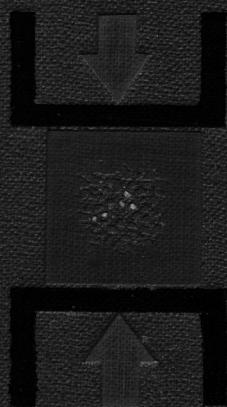


Н. М. ПРОСКУРЯКОВ
Р. С. ПЕРМЯКОВ
А. К. ЧЕРНИКОВ

**ФИЗИКО-
МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА
СОЛЯНЫХ
ПОРОД**



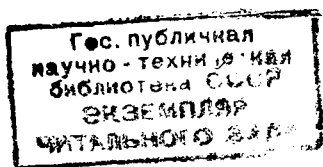
МИНИСТЕРСТВО ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ ГАЛУРГИИ

Н. М. ПРОСКУРЯКОВ
Р. С. ПЕРМЯКОВ
А. К. ЧЕРНИКОВ

ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛЯНЫХ ПОРОД



Издательство „Недра“
Ленинградское отделение
Ленинград • 1973



Проскуряков Н. М., Пермяков Р. С., Черников А. К. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛЯНЫХ ПОРОД. Л., «Недра», 1973. 272 с. (М-во химической промышленности СССР. Всесоюз. науч.-исслед. и проектн. ин-т галургии).

В книге даны характеристики физико-механических свойств соляных горных пород, оказывающих влияние на технологические производственные процессы при подземной разработке соляных месторождений. Описаны наиболее распространенные методы определения основных показателей этих свойств, таких, как прочность при сжатии, разрыв, изгиб, деформационные характеристики, а также показатели реологических и пластических свойств пород. Освещены результаты исследований физико-механических свойств в натуральных условиях, приведены экспериментальные данные о показателях этих свойств на примере основных месторождений ископаемых солей СССР. Показано практическое использование физико-механических свойств соляных пород для расчетов параметров систем подземной разработки соляных месторождений и способов управления кровлей.

Предлагаемая вниманию читателей монография является первым систематизированным обобщением по рассматриваемому вопросу. Предназначена для сотрудников научно-исследовательских и проектных институтов, инженеров-эксплуатационников калийной и соляной промышленности, а также может быть использована преподавателями, аспирантами и студентами высших учебных заведений горного профиля в качестве учебного пособия.

Таблиц 53, иллюстраций 101, список литературы — 196 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Быстрое развитие калийной промышленности СССР, занимающей в настоящее время по производству калийных солей первое место в мире, и в связи с этим развитие научно-исследовательских работ требует глубоких знаний о свойствах и поведении соляных пород под действием нагрузки. Решение сложных задач механики горных пород при подземной разработке калийных и каменносоляных месторождений невозможно без данных о прочностных и деформационных свойствах соляных пород. Если при исследовании свойств горных пород применительно к вопросам горной геомеханики достигнуты серьезные успехи, разработаны новые методы лабораторных и натуральных определений их свойств, появились работы по обобщению обширного материала [1, 45, 66, 113 и др.], то для соляных пород проведены ограниченные исследования, которые слабо освещены в отдельных публикациях или статьях. Вместе с тем особенность физико-механических свойств соляных пород, обладающих кристаллическим строением и большими деформациями ползучести, часто делает невозможным применение разработанных для других горных пород методов определения прочностных и деформационных характеристик. Все это затрудняет решение многих практических задач при отработке калийных и каменносоляных месторождений.

Предлагаемая вниманию читателя книга написана на основе выполненных в Ленинградском горном институте и ВНИИГалургии исследований физико-механических свойств соляных пород, а также освещает основные опубликованные результаты исследований ВНИМИ, Пермского политехнического института, ВНИИСТ и других организаций. Приводимые в монографии сравнительные описания методов исследования отдельных показателей свойств соляных пород, а

также многочисленные данные об их свойствах для конкретных месторождений могут служить справочным материалом.

Главы I и II написаны Р. С. Пермяковым; введение и главы III—VI, VIII—X; § 1 гл. XI, § 4 гл. XII, § 1, 3 гл. XIV — Н. М. Проскуряковым; гл. VII, § 1—3 и 6—7 гл. XII и гл. XIII — Н. М. Проскуряковым совместно с В. С. Ливенским; § 2 гл. XI и § 5 гл. XII — Н. М. Проскуряковым совместно с В. С. Романовым; § 2, 4 гл. XIV и гл. XVI — Н. М. Проскуряковым совместно с А. А. Антоновым; гл. XV — Д. В. Брусиловским; часть четвертая — А. К. Черниковым (под редакцией Р. С. Пермякова).

Авторы будут благодарны за все пожелания и замечания, которые просят присылать по адресу: 199164, Ленинград, В-164, Тифлисская, 1. ВНИИГалургии.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СОЛЕЙ И ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

ГЛАВА I

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

§ 1. Краткие сведения о калийных месторождениях и их геологических условиях

В настоящее время в мире известно около 37 бассейнов ископаемых калий-магнезиальных солей. Из них 20 находится в Европе, 5 — в Азии, 6 — в Северной Америке, 2 — в Южной Америке и 4 — в Африке; 16 бассейнов являются промышленными и эксплуатируются в данное время; 12 считаются потенциально промышленными; остальные 9 пока имеют минералогическое значение, но, возможно, в них будут обнаружены промышленные залежи калий-магнезиальных солей (например, в Московской синеклизе, в окраинных частях Сибирской платформы и т. д.). По комплексу калийных минералов и их пород 24 месторождения* (65% от общего числа всех бассейнов) относятся к хлоридному, 8 (21,6%) — к сульфатно-хлоридному, 4 (10,8%) — к хлоридно-сульфатному и лишь 1 (2,6%) — к сульфатному типам.

Среди хлоридов калия и магния доминируют сильвиниты. Они являются основными калийсодержащими породами в 25 месторождениях (67% от общего числа бассейнов), а в 5 — одними из основных (вслед за карналлитовой породой). Сильвиниты имеются как в наиболее древних (верхний протерозой, Пакистан [190]), так и в самых молодых (плейстоцен, Мосли, Эфиопия [168]) калийных месторождениях. Они отсутствуют полностью в Лотарингии (Франция), а в Зальцбурге (Австрия) представлены лишь в виде редких минералогических проявлений [24]. Среди калийсодержащих

* Все бассейны условно отнесены к месторождениям, так как в них вероятно обнаружение промышленных залежей.

сульфатных пород в ископаемых соленосных толщах наиболее распространены полигалитовые (в 10 месторождениях), затем идут лангбейнитовые (в семи) и каинитовые (в шести) породы.

Таким образом, на протяжении развития истории Земли от позднего протерозоя до плейстоцена включительно при формировании калийных пород в солеродных бассейнах прошлого доминировала хлоридная минерализация. В современных озерах морского происхождения и лагунах, в которых в настоящее время осаждаются соляные минералы и их породы (за исключением хлоридов калия и магния), преобладает сульфатная минерализация [24]. Это несоответствие в истории развития классической теории галогенеза давно привлекало внимание исследователей. В литературе оно известно как проблема «бессульфатности» в процессе формирования мощных хлоридных калийных пород.

В настоящее время хлоридный тип ископаемых калийных месторождений (Верхнекамское, Старобинское, Гаурдакское, Саскачеванское и др.) формируется из морских рассолов, потерявших сульфат-ионы SO_4 в процессе их метаморфизации (прямой по [24]). Реальность протекания такого процесса была доказана экспериментальными работами [24, 27, 71 и др.]. Дальнейшее развитие этого вопроса отражено в работах [25, 73, 28, 123 и др.], которые отводят ведущую роль этому процессу в формировании хлоридно-кальциево-натриевых вод, залегающих в глубоких частях земной коры. Помимо катионного обмена в процессе метаморфизации морских вод существенным является биогенный фактор [95].

Экспериментальными работами по метаморфизации морских вод и превращению их сульфатного состава в исключительно хлоридный установлено, что в результате взаимодействия карбонатов кальция с сульфатом магния (реакция Гейдингера) теряется не только SO_4 , но и эквивалентное ему количество Mg [24, с. 52], т. е. происходит обеднение морских вод магнием; этот процесс зависит от многочисленных экзогенных факторов, и поэтому в подготовительный период существования солеродных бассейнов он должен протекать очень медленно.

В древних соленосных толщах породы (включая сульфаты кальция) представлены либо одним минералом с небольшой примесью других (каменная соль, ангидрит и др.), либо комплексом минералов. Пределы растворимости этих минералов в зависимости от температуры и давления колеблются от трудно- (сульфата кальция) до легко-растворимого (калий-магнезиальные соли). С увеличением температуры растворимость у одних минералов возрастает (например, у сильвина), у других (ангидрит, галит и др.) она падает или остается практически постоянной. В связи с этим галогенные минералы разделяются на «криофильные» (первые) и «термофильные» [155].

Кроме температуры на растворимость влияет также состав рассола: если в растворе имеется одна какая-нибудь соль, то привнос в него другой соли может понизить растворимость обеих. Следовательно, при смешении двух рассолов, насыщенных разными солями,

могут возникнуть благоприятные условия для выпадения солей из них.

Хлориды натрия, калия и магния имеют разные пределы текучести, которые зависят от температуры и давления. Экспериментальные работы А. Геллера [165] показали, что давление, вызывающее текучесть галита и сильвина, падает с повышением температуры. При этом сильвин раньше переходит в текучее состояние, чем галит. Давление, необходимое для начала течения карналлита, возрастает от 75 (при 152° С) до 8000 кгс/см² (при ±1,5° С). Бишофит плавится при 117° С. Исходя из этих данных, А. Геллер рассчитал, что для перехода в текучее состояние под влиянием одного только давления необходимо погружение в земной коре карналлита на глубину 3 км, сильвина — 10 км и галита — 12 км. Касаясь геологической оценки результатов экспериментов А. Геллера, Фульд указывает, что опыты были проведены при двустороннем сжатии, а при всестороннем сжатии, осуществляемом в недрах земной коры в условиях регионального метаморфизма, эти глубины должны быть большими.

§ 2. Физико-химические условия

Галогенные минералы в ископаемых калийных месторождениях представляют собой в химическом отношении либо простые соли с кристаллизационной водой ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — гипс; $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ — кизерит; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — бишофит) и без нее (CaSO_4 — ангидрит; NaCl — галит; KCl — сильвин), либо двойные соли ($2\text{MgSO}_4 \times \text{K}_2\text{SO}_4$ — лангбейнит; $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — карналлит; $\text{KCl} \times \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — каинит и др.), либо ассоциации солей ($2\text{CaSO}_4 \times \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — полигалит и др.). Характерные для современного соленакопления сульфаты натрия, магния, кальция (астраханит, тенардит, глауберит и др.), а также калия (леонит, шенит, глазерит, эпсомит) в ископаемых месторождениях калийных солей встречаются редко и не образуют значительных скоплений, являясь в большинстве случаев вторичными образованиями зоны гипергенеза. Это отличительная черта современного соленакопления от древнего.

Как простые, так и сложные ископаемые соли представлены положительными и отрицательными элементами — ионами. Среди них главными являются катионы Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , анионы Cl^- и SO_4^{--} . Все указанные ионы — составные основных химических элементов современной океанической воды, формирующей ее солевой состав со средней минерализацией 35 г/кг, или 3,5‰.

Известно, что в определенном количестве морской воды может быть растворено только определенное количество соли, когда, как принято считать, вода достигает полного насыщения, т. е. между водой и солью возникает равновесие. Насыщение морской воды той или иной солью происходит либо при испарении воды, либо при привносе в бассейн новых порций солей (неоднократный приток

океанической воды или привнос с континента). При дальнейшем испарении (удалении молекул H_2O) увеличивается минерализация и нарушается равновесие вода — соль. Начинается выделение такого количества соли, которое нужно для восстановления условий насыщения.

Выделение соли — образование на поверхности морских вод кристаллов, которые, погружаясь на дно, образуют соляной осадок. Таким образом, для возникновения кристалла (или зародыша кристалла) необходимо определенное пересыщение растворов. Скорость кристаллизации зависит от степени пересыщения, диффузии, вязкости и температуры [158]. Относительные скорости кристаллизации особенно велики у галита и сильвина, несколько меньше у карналлита, эпсомита и гексагидрита. Кристаллизация протекает медленнее у каинита, кизерита и ангидрита (гипса). Однако, как отмечают Д'Анс и Р. Кюн, даже самой малой из этих скоростей кристаллизации достаточно для того, чтобы при наличии зародышей кристаллов обеспечить в естественных условиях осаждение солей.

Еще в первых опытах по непосредственному выпариванию морской воды (И. Узильо) и затем в многочисленных экспериментальных работах выдающихся химиков Я. Вант-Гоффа и Н. С. Курнакова был установлен порядок кристаллизации солей, который оказался обратно пропорциональным растворимости. Первыми осаждаются труднорастворимые соли, затем легкорастворимые. Этот порядок зависит также от степени минерализации растворов. К. Борхерт [156] считает, что осаждение гипса происходит в области 2—12-кратной концентрации морской воды, а каменной соли — при 12—63,6-кратной концентрации. Выделение сульфатов натрия, магния, калия и карналлита возможно только при 63,6—120-кратных концентрациях. Как видим, область выпадения сильвина отсутствует. По М. Г. Валяшко [24], сильвин выпадает перед карналлитом.

Кристаллизация солей в солеродных бассейнах прошлого могла происходить как путем метастабильных равновесий [24, 72 и др.], так и в стабильной равновесной системе, в политермических условиях* (Я. Вант-Гофф, Енеке, К. Борхерт, Д'Анс и др.).

В метастабильной равновесной системе в изотермических условиях постепенное насыщение морской воды начинается в ее поверхностном слое, так как солнечная энергия не может проникнуть глубже. Этот слой нагревается и, повышая свою концентрацию в результате испарения, делается тяжелым (плотным). Вследствие увеличения плотности он погружается вниз и, опускаясь, вытесняет вверх нижние слои воды, менее теплые и концентрированные (более легкие). В результате такого многократного вертикального обмена концентрация на всех глубинах водоема постепенно растет. Как только насыщение какого-либо соляного минерала (например, гипса, галита и т. д.) будет достигнуто во всей массе рассола, в поверхностном слое начинают образовываться его твердые кристаллы, которые при погружении на дно не растворяются, а накапливаются

* Определяющим является изменение растворимости с температурой.

в виде осадка. Такой путь насыщения исключает возможность образования одновременно в одном и том же водоеме солей различной концентрации и требует исключительно мелководных условий в пределах небольших водоемов с относительно ровным дном.

Влияние сезонных климатических факторов при описанных выше условиях насыщения велико. Оно фиксируется в виде сезонных прослоев. Физико-химические и геоморфологические процессы, действующие при таком пути солеобразования, достаточно детально изучены в современных морских и озерных водоемах и в лагунах (М. Г. Валяшко, О. Д. Кашкаров, А. Д. Пельш, А. И. Дзэнс-Литовский и др.). Особенности соленакопления в этих водоемах в большинстве случаев соответствуют тем эмпирическим законам физико-химии, которые выведены указанными исследователями в наблюдаемых сейчас природных условиях.

Во многих бассейнах древнего соленакопления установленное чередование соляных пород как в стратиграфической, так и в фациальной последовательности показывает, что правило соляных фаз часто нарушалось. Эти аномалии встречаются в бассейнах мощных соленакоплений прошлого и свидетельствуют о существовании иного пути кристаллизации соляных минералов. К. Борхерт [156] считает, что осаждение в солеродных бассейнах происходило не при стабильных равновесиях, которые возможны только при строгом поддержании температуры и концентрации и при интенсивном перемешивании в лабораторных сосудах, а при динамико-политермных условиях. Это означает, что в бассейнах соленакопления в результате испарения морская вода расслаивалась, т. е. образовывалась вертикальная зональность (поверхностный, промежуточный и донный рассолы), приведшая к возникновению течений в каждом слое. Осаждение солей в таких условиях, по К. Борхерту, осуществлялось как в слое поверхностных течений (где непосредственно происходили наиболее интенсивный прогрев и испарение), так и в слоях промежуточных (частично) и донных течений (главным образом). В последнем слое соли выпадают за счет снижения температуры. К. Борхерт утверждает, что наблюдаемые сейчас соляные парагенезисы, находящиеся рядом в несоответствии с правилом соляных фаз, не являются синседиментационными или десцендентными. Они являются результатом термометаморфизма, вторичной «внутрикристалльной дифференциации фаз».

М. П. Фивег [129], развивая идею Бренсона, считает, что наблюдаемые сейчас парагенезисы, находящиеся рядом или перекрывающие друг друга в несоответствии с правилом соляных фаз, можно объяснять питанием солеродных бассейнов прошлого концентрированной морской водой. Такое питание могло иметь место при наличии промежуточных бассейнов, в которых происходило сгущение. В ряде случаев бассейны могли питаться также десцендентными рассолами. Так считают в настоящее время многие исследователи [48, 177, 184].

В течение последних 10—15 лет многие исследователи пришли к выводу, что в большинстве случаев соленакопления в прошлом осуществлялись в глубоководных обширных морских бассейнах [78, 128, 150, 184, 188]. Толчком для принятия этого предположения послужило несоответствие между скоростью соленакопления, мощностями ископаемых солей и скоростями прогибания земной коры. Вопрос о глубине солеродных бассейнов подробно обсуждался А. А. Ивановым [52], но не был им окончательно решен. М. П. Фивег [129] полагает, что в начальной и средней стадии галогенеза бассейны в ряде случаев были глубоководными, а на стадии осаждения калийных солей — уже мелководными. Однако до последнего времени в печати отсутствовали работы, освещавшие физико-химическую сторону формирования соленосных отложений в условиях глубоководья.

Исключение представляет работа П. И. Лунина [78]. Обосновывая большую глубину накопления легкорастворимых солей, П. И. Лунин исходил из гидратной теории Д. И. Менделеева: в морском бассейне солевой состав воды не остается постоянным, а перераспределяется в зависимости от нарушения равновесия по удельному весу и от качественного распределения растворенного вещества. Это приводит к перемещению наиболее растворимых солей в глубоководные участки, а менее растворимых — в мелководные. В результате образуются три области распространения основных групп солей: 1) внешняя, богатая CaCO_3 , MgCO_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO и P_2O_5 ; 2) внутренняя, обогащенная хлоридами, и 3) промежуточная, или нейтральная, представленная всеми солями морских растворов (сульфаты). Именно такой процесс, как полагает П. И. Лунин, приводит к появлению хлоридного слоя в придонной части водоема, а из него в центральной и наиболее глубокой части бассейна выпадают в осадок галит и другие легкорастворимые соли. В то же время в мелководье осаждаются карбонаты, а в промежуточной зоне — сульфаты и сульфато-карбонаты. Из концепции П. И. Лунина следует, что наблюдаемые сейчас парагенезисы соляных пород, расположенные в несоответствии с правилами соляных фаз, являются синседиментационными и образовались в глубоководных условиях.

В работе Р. Ф. Шмальца [190] наиболее полно рассмотрена проблема о глубине древних солеродных бассейнов. Этот автор пришел к выводу, что существующая теория соленакопления, основой которой является модель мелководного бассейна, не может служить адекватным основанием для интерпретации многих древних отложений. По мнению Р. Ф. Шмальца, это объясняется следующими причинами.

1. В основании многих древних соленосных отложений имеются слои, обогащенные сапропелями и сульфидами основных металлов. Некоторые ангидритовые и терригенно-карбонатные пласты являются битуминозными. Эти отложения формировались в сильно восстановительных условиях, что трудно примирить с мелководными условиями соленакопления.

2. Расчеты показывают, что девонские соленосные отложения «прерий» формировались со скоростью 50, цехштейн II — 10, формация «Салина» (силур) — 20, кастильские эвапориты (пермь) — 15–20 мм/год. Средняя скорость современного соленакопления 20 мм/год. Скорости погружения земной коры в несколько десятков раз меньше этих скоростей. Например, наибольшая скорость в Галф Кост равна только 0,3 мм/год, в то время как Кордильеры в мезозое погружались со скоростью 0,06 мм/год.

3. Многие древние эвапориты содержат одновременно две петрографические разновидности галита («воронкообразную» и «кубическую»). Анализ этих разновидностей на бром указывает, что они возникли из рассолов совершенно различных концентраций. В гомогенной соли такая разница в солёности возникает тогда, когда оба типа являются диахронными.

Исходя из этих данных Р. Ф. Шмальц предлагает модель глубоководного бассейна соленакопления, допуская при этом, что первоначальная глубина бассейна будет соответствовать конечной мощности формирующихся солей и что бассейн изолирован от океана порогом. Основные стадии развития глубоководного бассейна определяются изменением плотностей рассолов вследствие испарения. Первоначальный раствор представляет собой морскую воду при 25° С. При этом гипс будет осаждаться при 5-кратном увеличении минерализации морской воды (плотность 1,1 г/см³), а при 8-кратном увеличении (1,13 г/см³) оседет ангидрит. Галит начнет выпадать при 10-кратном (1,215 г/см³) и более увеличении, а 80% хлористого калия оседет до того, пока произойдет 100-кратное сгущение (плотность 1,26 г/см³).

Р. Ф. Шмальц выделяет в модели развития глубоководного бассейна 5 стадий: образования, эвксинтовая, кратковременная, перманентная и конечная.

Стадия образования. На поверхности морской воды образуются плотные воды, которые, погружаясь в глубокие части бассейна, захватывают с собой кислород. В результате происходит перемешивание и накопление более минерализованных плотных вод на дне. Каждая последующая порция поверхностных вод является более концентрированной, чем предыдущая, и поэтому, погружаясь на дно, неоднократно вытесняет находящийся там рассол. В конце концов донная вода станет такой плотной, что предотвратится ее перемешивание с любыми водами. В результате произойдет застой донных вод и после истощения кислорода наступит следующая стадия.

Стадия эвксинтовая. Вследствие образования наиболее концентрированных рассолов на дне доступ кислорода с поверхности прекращается. Существовавший до сих пор бентос погибает и, разлагаясь, способствует образованию сероводорода. Последний, подымаясь со дна вверх, вступает в реакцию с катионами основных щелочных металлов (Fe, Cu, Zn и др.) и образует сульфиды. В наддонных частях бассейна и в поверхностном слое продолжают существовать нектонные и планктонные организмы в условиях притока в бассейн

свежей морской воды, но они погибают также в периоды более активного испарения при солености выше допустимой. Гибель организмов приводит к накоплению темноцветных пород с богатой органикой (сапропелиты) и сульфидами.

Кратковременная стадия. Начинает развиваться в периферийных мелководных частях глубоководного бассейна, где минерализация рассолов может дойти до садки гипса. Первые кристаллы гипса, осевшие на поверхности, должны опуститься на дно через слой воды, не насыщенной сульфатом кальция, и поэтому они будут растворены. Растворение вызовет увеличение плотности донных вод, которые окажутся слишком солеными для развития органики, и осадки, образовавшиеся на этой стадии, будут бедны органикой или совсем не содержать ее. Неоднократное повторение кристаллизации и растворения гипсов приведет к формированию на дне рассолов, насыщенных по гипсу вплоть до глубины порога, после чего гипсы будут выпадать и накапливаться на дне уже без растворения.

Перманентная (продолжительная) стадия. С прекращением сгущения поверхностных вод произойдет их разбавление пресными водами, что ведет к прекращению активного осаждения гипса, но процесс растворения не пойдет, так как формирующиеся осадки будут защищены донными рассолами, более плотными, чем поверхностные, и их вытеснения не произойдет. Разбавленный рассол будет оставаться на поверхности. Если испарение прогрессирует, то произойдет нарастание концентрации поверхностных рассолов и их погружение на дно, а оттуда — вытеснение рассолов, насыщенных гипсом. На мелководных участках образуются кристаллы галита, которые, погружаясь на дно, будут растворяться и тем самым насыщать донные рассолы. Вследствие того, что эти погружающиеся в глубь бассейна рассолы помимо галита насыщены также гипсом, гипсовые осадки на дне бассейна не растворятся, т. е. донные рассолы будут вытеснены без растворения донных гипсовых осадков.

После перманентной стадии осаждения гипса при прогрессирующем испарении наступает кратковременная стадия образования галита, которая со временем сменится перманентным его осаждением. Дальнейшее развитие глубокого бассейна при непрекращении испарительных процессов заключается в повторении кратковременных и перманентных циклов формирования осадков калийных солей. Для перманентной стадии формирования отложений необходимо наполнение бассейна рассолами, насыщенными той или иной солью до глубины порога.

Типичная последовательность осаждения солей в глубоководном бассейне такова: гипс — галит — эпсомит — кизерит — каинит — карналлит — бишофит, независимо от того, что точная последовательность кристаллизации солей зависит от температуры рассолов [184]. Эта модель снимает проблему «избытка» карбонатов и сульфатов.

Конечная стадия. Происходит постепенное уплотнение формирующихся на дне осадков.

Р. Ф. Шмальц считает, что в глубоководном бассейне «сезонно-годовые» прослойки возникают на дне в результате не только изменения скорости испарения, но и в значительной степени распространения смешивания и отлива в поверхностной зоне. Он в конце концов приходит к выводу, что если под соленосными толщами имеются красноцветы, то бассейн был неглубоким (например, Елк Пойнт, Саскачеван), а если осадки богаты органикой, то бассейн надо считать глубоководным.

Физико-химическое обоснование формирования соляных пород в глубоководном бассейне было выполнено экспериментальными работами американского ученого О. Б. Рауна [103]. Согласно выводам исследователя, выпадение соли может происходить по одной из следующих схем.

1. При смешении рассолов разных составов и плотности.
2. Без дальнейшего испарения.
3. Из рассолов, которые до смешения были недонасыщены.
4. Сильвин может осаждаться как первичный минерал.
5. Воронкообразные кристаллы могут образоваться в результате смешения рассолов на любой глубине.
6. Галит и сильвин могут выделяться при смешении рассолов разных стадий испарения.

Перечисленные выводы указывают на огромную значимость проведенных О. Б. Рауном экспериментальных работ. Они открывают еще один путь механизма солеобразования в древних солеродных бассейнах. Экспериментальные работы в этом направлении необходимо продолжить, так как познание сложных процессов галогенеза, несомненно, является ключом определения тех закономерностей формирования месторождений, которые необходимы для поисков и разведки калий-магнезиальных солей.

ГЛАВА II

КЛАССИФИКАЦИЯ, СТРОЕНИЕ И ТЕКСТУРА ПОРОД СОЛЕНОСНЫХ ТОЛЩ. ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

§ 1. Классификация галогенных пород

При изучении ископаемых солей исследователи чаще всего пользуются классификацией, предложенной в 1964 г. Я. Я. Яржемским, положившим в основу классификации галогенных пород «такие градационные критерии, которые отделяли бы промышленные породы (руды) от непромышленных».

Двухкомпонентные породы, состоящие, например, из сильвина и галита, образуют следующий ряд в зависимости от содержания в них сильвина, %:

1. 0—5 сильвина (остальное галит) — галитовая порода (каменная соль) с примесью сильвина
2. 5—15 сильвина — сильвин-галитовая порода (сильвинсодержащая каменная соль)
3. 15—50 сильвина — сильвинит нормальный (галит-сильвиновая порода)
4. Свыше 50 сильвина — сильвиновая порода (богатый сильвинит)

Аналогичный ряд образуют породы, состоящие соответственно из каинита в сочетании с галитом, лангбейнита, полигалита и карналлита с галитом, но если порода с содержанием КСl от 15 до 50% имеет специфическое название «сильвинит», то породы с соответствующими содержаниями каинита, лангбейнита, полигалита и карналлита носят название галит-каинитовой, галит-лангбейнитовой, галит-полигалитовой или галит-карналлитовой. При содержаниях каинита, лангбейнита, полигалита или карналлита свыше 50% породы, ими сложенные, называются каинитовой, лангбейнитовой, полигалитовой или карналлитовой.

Из характеристики двухкомпонентных пород видно, что примесями в них считаются те компоненты, которых содержится не более 5%, а в названии породы они упоминаются лишь тогда, когда эта примесь представляет практический или теоретический интерес.

В классификации и номенклатуре трехкомпонентных пород учитываются количественные соотношения минералов, которые располагаются в порядке возрастания их процентных содержаний. Для основных породообразующих минералов граничными значениями являются: от 0 до 5, от 5 до 15, от 15 до 50 и свыше 50%. При переходе от одной области содержаний к другой меняется название породы. Например, каинит и лангбейнит в сочетании с галитом дадут следующую гамму пород, %:

1. 0—5 каинита и лангбейнита — галитовая порода с примесью каинита и лангбейнита
2. 5—15 каинита и лангбейнита — каинит-лангбейнит-галитовая или лангбейнит-каинит-галитовая порода
3. 15—50 каинита и лангбейнита — каинит-галит-лангбейнитовая, или галит-каинит-лангбейнитовая, или лангбейнит-галит-каинитовая, или галит-лангбейнит-каинитовая порода
4. Более 50 каинита и лангбейнита — лангбейнитовая порода с галитом и каинитом или каинитовая порода с галитом и каинитом

Аналогичные ряды трехкомпонентных пород получаются при сочетании друг с другом галита, сильвина и ангидрита, галита, сильвина и полигалита, галита, сильвина и кизерита, галита, сильвина и карналлита.

При изучении соленосных толщ мы сталкиваемся с двумя типами месторождений: с месторождениями, сложенными исключительно хлоридными солями натрия, калия и магния при явно подчиненной роли сульфатного компонента, и с месторождениями, в которых сульфатные породы доминируют над хлоридными. Во-первых, основными породами являются гипсовые и ангидритовые, каменная соль, сильвиниты, карналлитовые (и их переходные разности); во-вторых, кроме гипсовых и ангидритовых основными породами служат полигалитовые, каинитовые, лангбейнитовые, кизеритовые и переходные между ними разности (смешанные породы). Естественно, что нередко в сульфатных месторождениях определенную роль играют хлоридные минералы и ими образованные породы (хотинские сильвиниты Калужского месторождения). Часть минералов, входящих в состав галогенных пород, образует так называемый нерастворимый в воде остаток. К таким частично разлагающимся в воде породам относятся гипсовые, ангидритовые и полигалитовые.

§ 2. Структурные и текстурные особенности толщ соленосных пород

Сложность соотношения структур галогенных пород со структурами нормальных осадочных минералов состоит в том, что зерна минералов первых по своим размерам попадают в разряд крупно- и гигантозернистых. Это обстоятельство привело к тому, что петрограф-солевик зачастую вынужден смешивать такие понятия, как структура и текстура. Я. Я. Яржемский [152] выделил следующие структуры: пелитоморфная (размер частиц менее 0,001 мм), микрозернистая (от 0,001 до 0,01 мм), мелкозернистая (от 0,01 до 0,1 мм), среднезернистая (от 0,1 до 0,25 мм) и крупнозернистая (более 0,25 мм). Крупнозернистая структура в свою очередь подразделяется на крупнозернистую (от 0,25 до 5 мм), весьма крупнозернистую (от 5 до 10 мм) и гигантозернистую (более 10 мм). Такая классификация структур галогенных пород позволяет охватить всю гамму пород соленосных толщ от пелитовых частиц до блочных образований пестрых сильвинитов, отдельные кристаллы которых достигают 10 см в поперечнике.

Пелитоморфная и микрозернистая структуры зачастую соседствуют друг с другом в одной и той же породе, что связано обычно с частичной или полной перекристаллизацией первой. В соленосных толщах эти структуры характерны для прослоев галопелитов, ангидритовых и полигалитовых пород, а также для карбонатных прослоев. Следует отметить хорошую выдержанность прослоев указанных пород в пространстве. Размеры частиц, слагающих породы пелитоморфной структуры, обычно не превышают 0,001 мм, а породы микрозернистого строения (или микрозернистые участки в породах пелитоморфного строения) сложены зернами или кристаллами с размерами до 0,1 мм.

Глинистые прослои, отражающие периоды разбавления материнской рапы (длительные или кратковременные, т. е. многолетние

или сезонные), представлены преимущественно пелитоморфной своей разновидностью. В них наряду с собственно глинистыми минералами (гидрослюды, монтмориллонит, каолинит, хлориды) присутствуют кластический материал (кварц, полевые шпаты, минералы тяжелых фракций и т. д.), хемогенные компоненты (ангидрит, гипс, кальцит, доломит, магнезит, полигалит) и такие легкорастворимые хлориты, как галит, сильвин, карналлит, каинит и т. д. Присутствие или отсутствие в галопелитах легкорастворимых хлоридов (а тем более хлоридов калия и магния) может указывать на стадию (раннюю или позднюю) пегнитогенного процесса. Соотношения терригенного и хемогенного компонентов в прослоях галопелитов варьируют, но чаще в них преобладают хемогенные.

Не затронутые перекристаллизацией галопелитовые прослои под микроскопом слабо просвечивают и отдельные минеральные частицы (обычно хемогенного происхождения или терригенный материал алевритовой фракции) едва различимы. Хорошо различимы компоненты песчаной фракции. Для таких галопелитов обычно свойственны микро- или тонкослоистая (порой тонколистоватые) текстуры. Толщина отдельных микропрослоек имеет сотые доли миллиметра и достигает для тонколистоватых прослоек 0,1 мм. Тонкая слоистость галопелитовых прослоев, выдержанность их в пространстве и большее или меньшее однообразие в минеральном составе одного прослоя дают возможность предположить их конседиментационное происхождение. Мощности галопелитовых прослоев варьируют в широких пределах: от долей миллиметров (сезонные и внутрисезонные прослои) до нескольких десятков сантиметров и даже метров (многолетние, вековые и т. п. прослои).

Наиболее легко галопелитовый материал подвергается перекристаллизации на контакте с хлоридными солями (галит, сильвин, каинит, карналлит и т. д.), где происходит заметное увеличение размерности их минеральных частиц с образованием тонкопризматических или игольчатых агрегатов ангидрита, розетковидных или ромбоэдрических образований карбонатов, развитие хорошо огранных кристаллов аутигенного кварца и т. д.

На ранних стадиях пегнитогенного процесса, когда основными хемогенными составляющими галопелитов являются ангидрит и карбонаты, последние при перекристаллизации образуют участки, выполненные мелкозернистым ангидритом или карбонатами округлой или неправильной формы, порой с расплывчатыми контурами. Эти прослои приобретают пятнистую текстуру или желвачную, когда, например, ангидрит внутри галопелитовых прослоев «стягивается» в округлые желвачки диаметром от долей миллиметров до нескольких сантиметров и более. На средних и поздних стадиях пегнитогенного процесса внутри галопелитов нередко оказываются заключенными кубики или зерна галита, сильвина и других легкорастворимых минералов. Эти включения придают структуре таких прослоев вид порфиривидной (порфиривидно-кристаллической или порфиривидно-зернистой). В эти галитовые, сильвинитовые и т. д.

«окна» из окружающего их галопелитового материала интенсивно растут ангидритовые щетки, карбонатные образования (каемки), розетки и кристаллы кварца. Отдельные зерна хлоридных минералов оказываются порой целиком заполненными новым минералом (ангидритом, карбонатом, боратами и т. д.).

Почти во всех калийных месторождениях СССР вскрытие их обнаружило чрезвычайно широко представленный тип трещинных и брекчиевидных текстур. Трещинные текстуры характеризуют прослой галопелитов, пересеченные вертикальными или близкими к вертикальным трещинами, которые обычно залечиваются хлоридами натрия, калия и магния параллельно-волокнистой, столбчатой, ориентированной структур. При более интенсивно проявленном тектоническом факторе образуются брекчиевидные текстуры, в которые вовлекаются наряду с галопелитами и прослой хемогенных (в частности, хлоридных) минералов. Многочисленные трещины разных направлений залечены столбчатыми, параллельно-волокнистыми, зернистыми галитом, сильвином, каинитом, карналлитом и т. д. (например, Прикарпатские месторождения).

При переходе ангидритовых пород в гипсовые образуются описанные Я. Я. Яржемским в 1967 г. монокомпонентные брекчии. Происхождение их связано либо с гидратизацией ангидритовых пород по трещинам, либо с гидратизацией гнезд и включений ангидрита, заключенных в карбонатных породах.

В сульфатных месторождениях широко представлен полигалит, ассоциирующий как с каменной солью, так и с сильвинитами, каинитовыми, лангбейнитовыми и кизеритовыми породами (порой совместно с сильвином и карналлитом). Находясь в породе в рассеянном состоянии, полигалит обычно играет роль примеси или второстепенного породообразующего минерала. Первичная форма выделения полигалита — пелитоморфная (менее 0,01 мм). Скопления полигалитовых частиц имеет агрегатное погасание. Однако, очевидно, в присутствии жидкой фазы чаще всего хорошо проявляются процессы перекристаллизации полигалита с образованием пучковидных, сноповидных, радиально-лучистых, игольчатых, призматических агрегатов, пронизывающих вмещающую их породу. Примеры полигалитизации самых различных минералов многочисленны. Особенно «охотно» подвергаются полигалитизации сильвиниты. В отдельных случаях (Индерское месторождение, Предкарпатье) наблюдается почти полное «съедание» сильвиновых зерен полигалитовыми образованиями с появлением реликтовых структур.

Изучение сульфатных месторождений Прикаспия и Предкарпатья показало, что полигалит может образовывать самостоятельные, выдержанные по простирацию стратиграфические единицы обычно тонкослоистого строения или пятнистой текстуры за счет участков перекристаллизации. Такими стратиграфическими единицами могут быть прослой среди каменной соли, сильвинитов и сульфатно-хлоридных солей, линзообразные горизонты полигалитовых пород, имеющие, как правило, микрослоистую текстуру. Различные

участки таких прослоев и линз часто имеют различные структурные особенности. Нередко сохраняются пелитоморфные и микрозернистые структуры со спорадически проявленными участками мелкозернистого строения (иногда с возникновением мозаичной структуры).

Начальная фаза собирательной кристаллизации пелитоморфного полигалита приводит к появлению своеобразной петельчатой структуры [152], где в массе микроагрегатного полигалита в ходе очистительной перекристаллизации образуются петли галоцелитового вещества. Полнее прошедшая перекристаллизация полигалита приводит к образованию спутанно-волоknистых, перекрестно-волоknистых, тонкопризматических агрегатов. Тонкие неотчетливые полигалитовые прослой среди каменной соли (или сильвинитов и т. д.) в подавляющем большинстве случаев интенсивно перекристаллизованы.

Структуры несколько иного плана дают собственно соляные породы — хлоридные и сульфатные калийно-магнезиальные. В соответствии с этапами формирования этих пород могут быть выделены первичные (седиментационные) структуры и вторичные (диа- и катагенетические). Естественно, что первичных структур в чистом виде в природе нет. Все они несут на себе, как правило, следы более поздних изменений.

По размерности зерен среди первичных структур выделяется мелкозернистая структура с размерами зерен от 0,01 до 0,1 мм. Структура эта довольно редка и в основном характеризует прослой так называемой каменной соли высаливания, приуроченные в годичном слое к его верху, а также к верхам более крупных стратиграфических единиц (слои, пачки слоев, пласты). Чаще всего, как это, например, имеет место на Верхнекамском месторождении, галит высаливания представлен идиоморфными или изометричными зернами, в которых хорошо сохраняются первичные зональные микровключения газовой-жидкой фазы. Отсюда своеобразие структур каменной соли высаливания: мелко-зонально-зернистые структуры и мелко-зонально-кристаллические.

Кроме того, отдельные участки прослоев каменной соли высаливания могут быть подвергнуты перекристаллизации с появлением разномзернистых или разнокристаллических структур, вплоть до участков гигантозернистой или шпатовой каменной соли, в которой следы первичного зонального строения зерен полностью утрачены. Для каменной соли высаливания очень характерна примесь микро- или мелкопризматического ангидрита или мелкокристаллических карбонатов, зерна и кристаллы которых обычно окружают зерна и кристаллы галита с появлением так называемых петельчатой, сетчатой или (в случае карбонатов) венцевидной структур.

Для обычных прослоев каменной соли (летней или летне-осенней садки) характерны более крупнозернистые структуры, а именно: среднезернистая (среднекристаллическая) зональная или без следов зональности и с размерами зерен от 0,1 до 0,25 мм; крупнозер-

нистая (крупнокристаллическая) с размерами зерен от 0,25 до 5,0 мм; весьма крупнозернистая (кристаллическая) с размерами зерен от 5,0 до 10,0 мм и, наконец, гигантозернистая (кристаллическая) с размерами частиц более 10 мм. Разновидностью гигантозернистой структуры является блочная структура, типичная для участков пестрых сильвинитов Верхнекамского, Петриковского месторождений, для гнездовидных зон замещения в калийных горизонтах Старобинского месторождения. Эта структура характеризуется развитием гигантских (от 10 мм до 5 и даже 10 см в поперечнике) кристаллов-блоков обычно прозрачного галита и прозрачного или молочно-белого (порой с красной каемкой) сильвина.

Зонально-зернистые структуры характерны для мелкоперистой и перистой каменной соли Верхнекамского месторождения, для многих зерен галита легкой садки Старобинского месторождения, а также весьма типичны для отдельных прослоев красных сильвинитов из калийных горизонтов Старобинского месторождения. Каменная соль кембрия Восточной Сибири содержит зональные зерна галита, но количество их в прослоях заметно уступает перекристаллизованному, лишенному зональных микровключений.

Из сочетаний галита и сильвина, галита и карналлита образуются породы, имеющие своеобразные структуры, обусловленные различием в форме хлоридов натрия, калия и магния. При относительном идиоморфизме (изометричности) или слабом ксеноморфизме галита сильвиновые и карналлитовые зерна обладают явно выраженным ксеноморфизмом и относительно большей по сравнению с галитом размерностью зерен. В связи с этим возникают ксеноморфнозернистые структуры (большей частью равнозернистые), особенно четкие в породах, в которых сильвин или карналлит играют подчиненную роль и оказываются как бы «зажатыми» между зернами галита.

При относительно равных содержаниях сильвина и галита в Старобинском месторождении Я. Я. Яржемским в 1967 г. описана своеобразная «каркасная» структура, сложенная более или менее идиоморфными зернами галита и редко ксеноморфными зернами сильвина, отчего зерна галита кажутся как бы сцементированными сильвином. Каркасная структура относится к группе равнозернистых структур, но в отдельных случаях может быть и разнозернистой.

Карналлитсодержащие и карналлитовые породы (в сочетании с сильвином и галитом) обычно разнозернисты. В них размерность галитовых зерен в среднем заключается в пределах от долей до 6—8 мм, а карналлитовых (и сильвиновых) зерен колеблется от 2,5—4,0 до 12—15 и даже 20—30 мм.

При резком преобладании сильвина и карналлита над галитом, как было ранее указано, возникают сильвиновые и карналлитовые породы. В составе годичных пачек богатые сильвиниты и сильвиновые породы занимают их верхи и относятся к породам зимней садки. Эти породы сложены обычно ксеноморфными зернами сильвина, на фоне которых хорошо видны прозрачные «окна» близкого к идиоморфному или изометрическому галита. Структура таких пород

разнозернистая. Самые верхи сильвинитовых прослоев в пределах годичных пачек Верхнекамского и Старобинского месторождений зачастую сложены своеобразными, почти мономинеральными сильвинитами, имеющими ориентированную структуру. По размерности она относится к группе средне-крупнозернистых. Форма зерен сильвина вытянутая, призматическая, а длинные оси зерен ориентированы в направлении, параллельном общему направлению слоистости в пределах пласта. Формирование этих сильвинитов связано с отложением их из тонкого слоя рапы в зимних условиях при резком охлаждении.

Для близких к мономинеральным карналлитовых пород характерны либо ксеноморфная разнозернистая, либо пойкилитовая структуры. Вторая отличается тем, что на фоне гигантских ксеноморфных (обычно окрашенных в бурые тона) зерен карналлита хорошо видны мелкие (доли сантиметра) кубические зерна галита, распределенные либо равномерно, либо кучно. Образование этой структуры связано с высаливанием галита в ходе садки карналлита.

Из сульфатных калийно-магниевых пород следует отметить такие широко распространенные в Предкарпатье породы, как каинитовая, лангбейнитовая и лангбейнит-каинитовая, слагающие промышленные залежи (линзы) мощностью до 20 м.

Для каинитовых пород характерна разнозернистая структура с преимущественным развитием мелкозернистой. Состав породы довольно прост: галит, каинит, полигалит, глинистый материал (в отдельных случаях сюда добавляются сильвин, карналлит, кизерит). В каинитовой породе содержится 30—60% каинита [152] и 6—10% глинистого вещества. Зерна галита и каинита образуют плотную кристаллически-зернистую смесь. Очень часто наблюдается ориентированная структура, обусловленная тем, что длинные оси вытянутых зерен каинита и галита ориентированы в направлении, параллельном слоистости породы. Зерна галита и каинита в этих случаях обычно ксеноморфны, с извилистыми контурами. Галитовые зерна в каинитовой породе часто окрашены в синий цвет. Зональные структуры в галите крайне редки.

Галопелитовый материал, присутствующий в породе в ощутимом количестве, зачастую облекает зерна галита и каинита, придавая структуре вид петельчатой.

Аналогичные же структурные особенности обнаруживает и широко представленная в Предкарпатье каинит-галитовая порода, в которой содержание каинита опускается до 20—35%, а роль глинистой составляющей возрастает до 10—25%.

Лангбейнитовые породы Предкарпатья по своему составу просты: галит, лангбейнит, полигалит (при небольшой роли сильвина, полигалита). С. В. Ходьковой в 1968 г. выделены несколько разновидностей лангбейнитовых пород, генетически связанных друг с другом — это стекловидный лангбейнит (неперекристаллизованный глинистый и перекристаллизованные глинистый и зернистый) и лангбейнит кристаллический (в виде тетраэдров или их сростков).

Для стекловидного лангбейнита характерны мелкопетельчатая (петли глинистого материала вокруг зерен галита и лангбейнита мелкозернистого строения) и ячеистая структуры (глинистый материал располагается в виде ячеистого каркаса при кубической форме ячей, лангбейнит занимает пространство внутри ячей и содержит включения галита и сильвина).

При перекристаллизации глинистой лангбейнитовой породы образуется стекловидный зернистый лангбейнит, зерна которого имеют неправильную форму. Структура такой лангбейнитовой породы разномзернистая, а в отдельных участках появляются крупные тетраэдры лангбейнита. Размеры зерен в породе колеблются от долей до 10—20 мм. Образование лангбейнита С. В. Ходькова связывает с ранним диагенезом хлоридного и сульфатно-хлоридного осадка в условиях повышенных температур (37° С и выше). Содержание галита в обычной лангбейнитовой породе достигает 30—50%, а глинистого материала — до 10%.

Лангбейнит-каинитовые породы Предкарпатья по составу довольно сложны. Основными их составляющими являются галит, лангбейнит и каинит при второстепенной роли сильвина, кизерита и глинистого материала. Для этих пород также свойственна разномзернистая структура. Характерны сложное сочетание составляющих эти породы минералов и весьма прихотливые, извилистые их контуры. Глинистый материал заполняет промежутки между минералами, здесь широко проявляются различные стадии собирательной кристаллизации полигалита. На фоне основной среднезернистой (0,1—0,25 мм) массы хорошо видны крупные зерна и тетраэдры лангбейнита (до 30—40 мм в поперечнике). Состав породы нередко крайне изменчив в пределах одного слоя на соседних участках. Вторичные структуры широко представлены в соленосных толщах и особенно в их продуктивных горизонтах.

Для пород, содержащих в различных количествах сильвин, весьма типичны структуры замещения, образование которых связано с диагенезом и катагенезом осадков и пород. Диагенетические изменения солей региональны по своему масштабу.

Структуры частичного замещения сильвина галитом имеют определенный генетический смысл, поскольку при движении снизу вверх по разрезам калиеносных толщ количественная роль этих структур растет. В основаниях калиеносных разрезов в составе сильвинитовых годичных пачек наблюдаются лишь редкие точечные замещения, а в верхних частях этих разрезов процессы замещения сильвина галитом настолько глубоки, что, например, в кровле II калийного горизонта Старобинского месторождения появляется прослой вторичной красной каменной соли, так называемого «псевдосильвинита».

Частичное замещение зерен сильвина и карналлита, связанное с деятельностью хлор-натриевых рассолов, приводит порой к появлению особого вида структур: идиоморфно-поровой и идиоморфно-петельчатой, довольно широко представленных в сильвинитах III калийного горизонта Старобинского месторождения, отчасти

в сильвинитовой зоне Верхнекамского месторождения. Образование этих структур связано с частичным растворением зерен сильвина и карналлита по их периферии и высаливанием галита в виде петель или в форме заполнения пространства между соприкасающимися зернами основного минерала — наподобие порового цемента осадочных пород.

Неполное растворение калийного осадка приводит также к появлению равнозернистых вторичных структур, образованных примерно равными количествами галита и сильвина. Для этих структур характерно идиоморфное или изометрическое развитие зерен галита и изометричное или ксеноморфное для зерен сильвина. В галитовых зернах встречаются обильные реликты сильвина и пленки гидрокислов железа.

Полное замещение сильвина галитом приводит к образованию вторичной, окрашенной в красный цвет каменной соли, как, например, это имеет место в кровле II калийного горизонта Старобинского месторождения, где прослой вторичной красной соли выделен под названием «псевдосильвина». В карналлитовых частях соленосных толщ порой встречаются вторичные структуры, образование которых связано с деятельностью остаточных маточников, насыщенных хлористым магнием. Это структуры «псевдоморфизации» карналлитом сильвина. В начальную стадию формирования этих структур происходило частичное замещение сильвина карналлитом на периферии зерен с образованием каемчатой структуры. При полном прошедшем процессе замещения зерна сильвина целиком переходят в карналлитовые, но в последних сохраняются реликты сильвина извилистых очертаний. Аналогичные каемчатые структуры возникают и в случае разложения карналлита с образованием вокруг остаточного карналлита каемок вторичного сильвина. Эти явления относительно полно могут быть наблюдаемы в карналлитовой зоне Верхнекамского, Верхнегорского и Старобинского месторождений.

Особняком стоят катагенетические структуры соляных пород, так называемые параллельно-волокнистые (солениитовидные), параллельно-листоватые структуры, возникающие при заполнении трещин хлоридными или сульфатными калийно-магнезиальными растворами. Мощности трещинных образований изменяются от долей миллиметра до нескольких сантиметров. При относительно небольшой величине длинных осей слагающих породу минеральных зерен возникает ориентированная структура; при величине длинных осей минерала, соизмеримой с мощностью трещины, образуются параллельно-волокнистая, параллельно-листоватая структуры, широко развитые в калийных горизонтах, в надсолевой и глинисто-мергелистой толщах Старобинского месторождения, где трещины залечиваются галитом, сильвинитом, карналлитом, гипсом; в Предкарпатских месторождениях, где к перечисленным минералам присоединяются каинит, лангбейнит, шенит; в Верхнекамском, Карлюкском, Верхнепечорском и Кембрийском месторождениях.

Характерной особенностью большинства соленосных толщ является периодическая повторяемость определенных наборов пород. Эти явления в природе реализуются в форме седиментационных или вторичных текстур. Ю. И. Лупинович рассматривает текстурные особенности прослоев в качестве «микротекстур», т. е. текстур, наблюдаемых в пределах шлифа. При изучении более крупных стратиграфических единиц мы сталкиваемся с понятием «слоистость», признаком пород «макротекстурного» порядка. Микротекстура отражает взаимное расположение (смену) минеральных агрегатов в пределах данной породы, а макротекстура характеризует наборы чередующихся друг с другом пород (годовой слой, пласт и т. д.).

В пределах сезонных прослоев могут быть выделены массивная, полосчатая (неяснополосчатая) и линзовидная текстуры. Массивная текстура обладает устойчивыми структурными особенностями в пределах прослоя (прослой крупно- и весьма крупнозернистых сильвинитов пластов Красный I, Красный II и Красный III Верхнекамского месторождения, сильвинитов и карналлитовых пород II и III калийных горизонтов Старобинского месторождения, каинитовых пород Предкарпатья, многих прослоев каменной соли и т. д.).

Полосчатая (слоистая) текстура (микрополосчатая) отражает чередование полос разного состава или разной структуры в пределах прослоя. Она свойственна гипсовым, ангидритовым прослоям, прослоям сильвинитов Старобинского месторождения, сильвинитовой зоны Верхнекамского и т. д.

Для галопелитов весьма типичны микролистоватая (мощностью менее 0,01 мм), тонколистоватая (от 0,01 до 0,1 мм) и листоватая (от 0,1 до 1,0 мм) текстуры, выделенные Я. Я. Яржемским [152].

Линзовидная текстура является разновидностью полосчатой при достаточно быстром выклинивании по простиранию отдельных полос. В качестве разновидностей полосчатой (слоистой) текстуры могут быть выделены: а) тонкослоистая — при мощности полос от 1 до 10 мм; б) среднеслоистая — от 10 до 100 мм; в) толстослоистая — от 0,1 до 0,5 м.

При явлениях перекристаллизации седиментационные текстуры могут относительно легко менять свой облик. В ангидритовых породах появляются пятнистые текстуры при неравномерной перекристаллизации породы. Собирательная кристаллизация ангидрита в каменной соли способствует образованию желвачной текстуры. Подобные же желвачные текстуры свойственны полигалитсодержащей каменной соли.

Типичными текстурами соленосных толщ являются трещинные, обычно пространственно связанные с глинистыми прослоями, что, очевидно, обусловлено одновременностью литификации собственно солевых осадков и иловых отложений. Трещины имеют обычно вертикальное или близкое к таковому падение и являются одиночными либо групповыми (порой веерорасположенными). Они залечиваются галитом, сильвинитом, карналлитом, гипсом и т. д.

При интенсивно прошедших тектонических подвижках образуются такие вторичные текстуры галогенных пород, как брекчиевидные, характерные, например, для сильвинитов Хотинской линзы Калужского месторождения, для галит-ангидритовых пород Индерского месторождения и т. д. Типичный брекчиевидный сильвинит Хотинской линзы сложен обломками глинистых и песчано-алевритовых пород, сцементированных кристаллически-зернистой смесью сильвина и галита. Размеры обломков достигают 5—7 см (и до 15 см), форма их угловатая, многие из них разбиты трещинами, залеченными волокнистыми сильвином и галитом.

§ 3. Особенности разработки соляных месторождений

Главной особенностью природных минеральных солей, определяющей способ их разработки, является хорошая растворимость в воде. Эта особенность, с одной стороны, благоприятствует применению бесшахтного метода добычи (подземное выщелачивание через буровые скважины с поверхности), с другой стороны, не допускает возможности попадания воды в выработанное пространство при шахтной разработке.

Мировой опыт разработки калийных солей свидетельствует о том, что проникновение подземных вод и рассолов в горные выработки обычно заканчивается гибелью рудника от затопления. На некоторых рудниках затопления носили катастрофический характер и происходили за несколько часов после начала водопритока, на других боролись с притоками воды десятки лет. С момента эксплуатации и примерно до 1940 г. на территории Германии, где калийная промышленность развилась значительно раньше, чем в других странах, погибло от затопления 37 шахт. Попытки спасти шахты с помощью водоотлива не имели успеха: в процессе откачки воды или рассола развивался неуправляемый процесс карстообразования, способствующий непрерывному увеличению притока. Объем карста увеличивался настолько, что происходило обрушение земной поверхности, иссякали колодцы, понижался уровень воды в озерах, расположенных вблизи выработанных пространств.

Таким образом, при разработке калийных и каменносоляных месторождений подземным способом главным требованием является недопустимость попадания воды и рассолов в горные выработки. Это требование обеспечивается двумя мерами предосторожности. Во-первых, горные работы должны быть отделены от водоносных или рассольных горизонтов достаточной мощности водоупорным целиком, который в горной практике принято называть водозащитной толщей. Мощность водозащитной толщи определяется главным образом физико-механическими свойствами пород, слагающими ее, а также гидрогеологическими условиями разработки. По этим признакам проф. А. Н. Андричев [3] делит калийные месторождения на два класса.

Класс А. Месторождения с необходимым контактом соляных и покровных пород. 1-я группа. Сюда относятся месторождения с простыми гидрогеологическими и инженерно-геологическими условиями, залегающие обычно полого или наклонно. Надсолевая толща представлена преимущественно глинистыми или глинисто-мергелистыми пластичными породами, допускающими значительный прогиб слоев без появления в них трещин разлома. Водоносные горизонты расположены в верхней части геологического разреза и отделены от соляных отложений породами надсолевой толщи.

К этой группе месторождений относятся Старобинское и Калушское (СССР), Эльзасское (Франция) и Карлсбадское (США).

2-я группа. Это месторождения также с пологозалегающими пластами калийных солей, но с нарушениями в виде пологих складок. В непосредственной кровле пласта залегают неустойчивые глинистые породы, выше которых находится покровная каменная соль.

К этой группе месторождений относятся месторождения центральной части Южного Гарца, области Верра (ГДР) и Гаурдакское месторождение (СССР).

Класс Б. Месторождения с обводненным контактом. 3-я группа. Включает месторождения со сложными гидрогеологическими и инженерно-геологическими условиями, залегающие горизонтально или наклонно, с небольшими тектоническими нарушениями в виде местной складчатости. Продуктивная зона защищена от проникновения вод и рассолов пластом покровной каменной соли.

Типичные месторождения этой группы — Верхнекамское (СССР) и Саскачеванское (Канада).

4-я группа. А. Н. Андреев относит сюда месторождения с самыми сложными условиями. Это месторождения купольного типа; калийные пласты в них характеризуются большими тектоническими нарушениями в виде складчатости, сбросов, выклиниваний. В результате купольных поднятий или образования крупных антиклинальных складок породы надсолевой толщи во многих случаях оказались разорванными и сдвинутыми на склоны купола, благодаря чему воды верхних горизонтов получили доступ к калийным солям; вершины куполов или антиклиналей вследствие выщелачивания превращены в гипсовую шляпу, обычно сильно обводненную.

Такие условия характерны для Ганноверского (ФРГ), Стассфуртского (ГДР) месторождений, а также для Стебниковского и Индерского (СССР).

По опыту разработки калийных месторождений мощность водо-защитной толщи должна быть не менее 50 м. Там, где водоносные горизонты расположены ближе к калийным пластам, последние считаются непромышленными.

Другая мера предосторожности против попадания воды или рассолов в горные выработки заключается в жестком поддержании водо-защитной толщи на срок, по крайней мере обеспечивающий время отработки шахтного поля.

Система разработки не должна допустить опасных деформаций в водо-защитной толще, которые могут привести к нарушению ее сплошности (разрыву, появлению водопроводящих трещин). Наиболее подходящей к таким условиям является камерная система разработки.

Под влиянием горных работ на дневной поверхности происходят оседания и сопровождающие их процессы растяжения, сжатия и горизонтального сдвига. В результате разработки калийных и каменно-соляных месторождений на больших площадях наблюдается постепенное мульдообразное оседание покрывающих пород. В зависимости

от применяемых параметров системы разработки величина оседаний колеблется от нескольких миллиметров до 1—2 м. Оседание поверхности происходит в течение длительных периодов в результате увеличения подработанной площади, с одной стороны, и зависящей от времени деформации соляных пород — с другой. Величины оседания повышаются в случае затопления рудников, когда поступающая вода растворяет или разлагает несущие целики. В этом случае, как уже говорилось, могут иметь место провалы на земной поверхности, т. е. происходит обрушение (в виде воронки) массива покрывающих пород над пустотами, которые образовались в результате выемки камер и растворения целиков. Примером могут служить ныне закрытые рудники Леопольдсхаль, Вестергелья и Фриденсхаль (ГДР).

Под влиянием разработок происходят деформации соляных пород, окружающих горные выработки. Деформациям подвергаются кровля, почва и стенки выработок, интенсивность деформаций зависит от вида соляных пород, формы выработок и применяемой крепи.

Под действием нагрузки со стороны покрывающих пород происходит сжатие соляных целиков, служащих для поддержания кровли, и одновременно их поперечная деформация. В зависимости от вида соляных пород, глубины залегания и параметров системы величина сжатия и поперечной деформации соляных целиков колеблется от нескольких миллиметров до нескольких десятков сантиметров. Зачастую такие деформации нельзя обнаружить визуально. В дальнейшем происходит отслаивание краевых зон соляных целиков, в то время как ядро целика (в связи с частичным трехосным сжатием) чаще всего выдерживает повышенную нагрузку. В отдельных случаях, главным образом при большой высоте целиков по отношению к их ширине, в процессе развития деформаций разрушается также ядро целиков.

В зависимости от физико-механических свойств соляных пород и параметров разработки этот процесс разрушения может протекать постепенно или внезапно. Практика показала, что внезапные разрушения несущих соляных целиков происходят главным образом тогда, когда эти целики состоят из карналлитовой породы и размеры их слишком малы. Обширные рудничные поля в таких условиях могут разрушиться внезапно с высокой сейсмической интенсивностью, причем порода целика молниеносно выбрасывается в горные выработки. Кровля и подошва при этом лишь в незначительной степени подвергаются деформации или разрушению. Процессу внезапного разрушения предшествуют, однако, определенные постепенные процессы деформации и микросейсмические явления (потрескивание, горные удары), так что в настоящее время при проведении соответствующих замеров можно прогнозировать возникновение таких опасных ситуаций.

Известен также ряд случаев, когда соляные целики на больших участках выемочного поля разрушались постепенно. Такие разрушения, как правило, возникают в поздней стадии, т. е. после оконча-

ния горных работ в этих участках, и происходят с относительно низкой сейсмической интенсивностью.

Разрушению соляных целиков в настоящее время противодействуют закладкой отработанных камер или выбором соответствующих размеров этих целиков. В случаях, когда для этого имеются благоприятные гидрогеологические условия в покрывающей толще, можно допускать постепенное разрушение соляных целиков.

Одновременно с деформацией соляных целиков происходит оседание пород кровли горных выработок в выработанное пространство. Это оседание сопровождается разрыхлением. Такое расслаивание в значительной степени зависит от стратиграфического строения соляных пород в кровле выработок. Так, например, тонкослойные пласты соляных пород, вмещающие глинистые прослойки, более склонны к расслаиванию. Отслаивающаяся порода вызывает вывалы из кровли, причем в открытое выработанное пространство внезапно могут обрушаться соляные плиты толщиной от нескольких сантиметров до 1,2 м на площади величиной от нескольких до сотен квадратных метров. Измерения деформации в кровле выработок показывают, что описанное расслаивание происходит при глубине кровли главным образом в пределах от 0 до 1,0 м, в то время как залегающие выше породы оседают без заметного расслаивания.

Аналогично кровле деформируется и почва выработок. И здесь зона расслаивания распространяется не более чем на 1—1,5 м в глубину подстилающей породы. Вопросы общей деформации пород, подстилающих горные выработки на калийных и каменносоляных рудниках, в настоящее время еще не изучены полностью. Общее сближение кровли и почвы откаточных штреков в результате опускания кровли и поднятия подошвы в крайних случаях доходит до нескольких дециметров в год (до 10—20% от высоты выработки). Значительные скорости и величины сближения кровли и подошвы, в частности, наблюдаются в выработках с длительным сроком службы, находящихся под влиянием горных работ (панельные и участковые откаточные и вентиляционные штреки). На больших глубинах (800—1000 м) при соответствующем стратиграфическом строении месторождения могут иногда значительно деформироваться также изолированные горные выработки, не подвергнутые влиянию горных работ (разведочные штреки и т. п.).

Деформации соляных пород вокруг горных выработок при обычных глубинах залегания нельзя предотвратить; однако путем соответствующего выбора параметров и размеров целиков эти деформации можно держать в пределах, допускающих возможность управления ими.

Размеры целиков для калийных и каменносоляных месторождений ввиду особо ответственной их роли должны выбираться с достаточным знанием физико-механических свойств соляных пород, а также с учетом трещиноватости горного массива, неоднородности строения и разнопрочности слоев, слагающих целики, длительности воздействия нагрузки (срока службы), возможного их ослабления и разрушения.

При разработке месторождений каменной соли широко применяется метод подземного выщелачивания через буровые скважины. Этот метод начинает использоваться и при разработке калийных месторождений. Преимущества бесшахтного метода добычи (через буровые скважины) заключается в том, что весь добывающий комплекс, включающий насосное оборудование, контрольно-распределительные устройства и др., располагается на поверхности земли. Таким образом, полностью исключается тяжелый подземный труд, повышается культура производства, процесс становится более управляемым и легко поддается автоматизации.

При разработке месторождений солей методом подземного выщелачивания так же, как и при шахтном способе, применяется в основном камерная система разработки, характеризующаяся оставлением междукамерных целиков для поддержания вышележащей толщи горных пород. Однако размеры камер при подземном выщелачивании достигают значительных размеров: объем камер 200—500 тыс. м³ считается обычным, имеются случаи, когда объем камеры выщелачивания превышает 1000 тыс. м³. Диаметры камер составляют 50—150 м (иногда больше), размеры междукамерных целиков — 50—100 м. Характер оседания земной поверхности при разработке месторождений подземным выщелачиванием мало чем отличается от сдвижения поверхности при подработке ее подземными работами. Так, например, результаты десятилетних наблюдений за оседанием дневной поверхности на Яр-Бишкадакском рассолопромысле подтвердили образование мульды оседания над камерами выщелачивания. Средняя скорость оседания реперов была постоянной и не превышала 5—9 мм/год.

Методы определения несущей способности целиков и устойчивости кровли камер при подземном выщелачивании пока не отражают всего многообразия влияющих на них факторов, поэтому размеры целиков принимаются с большим запасом прочности. Это обуславливает высокие потери в недрах полезного ископаемого. Создание надежных методов определения основных параметров системы разработки связано с изучением физико-механических свойств соляных пород.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОЛЯНЫХ ПОРОД

ГЛАВА III

ОТБОР ПРОБ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ СОЛЯНЫХ ПОРОД

Исследования соляных горных пород необходимы для установления их физико-механических свойств и главным образом прочностных характеристик с целью выбора наиболее целесообразной технологии отработки калийных и каменносоляных месторождений, обоснования рациональных параметров применяемых систем разработки, обеспечивающих безопасность ведения горных работ.

Наиболее достоверные данные о поведении соляных горных пород и их механических характеристиках можно получить на основании исследований, проводимых непосредственно в массиве. Однако это сопряжено со значительными трудностями: большой трудоемкостью, сложностью оконтуривания отдельных блоков ввиду значительной прочности и вязкости соляных пород и ряда других факторов. Поэтому до настоящего времени выполнен ограниченный объем испытаний свойств соляных пород в натуральных условиях и большая часть испытаний проводится в лабораторных условиях на образцах различных форм и размеров.

§ 1. Отбор проб для лабораторных исследований

При выборе мест отбора проб соляных пород для лабораторных испытаний, так же как и при выборе мест для проведения натуральных испытаний, необходимо исходить из максимально возможной типичности этих мест с точки зрения состава и строения пород, их текстуры, а также с точки зрения проявлений изучаемых процессов в горной выработке. Особое значение для соляных пород приобретает первое требование, так как их механические характеристики в значительной степени зависят от минералогического состава пород, размеров слагающих их зерен, текстуры и структуры испытываемых образцов. Вместе с тем для калийных и каменносоляных месторождений

характерно колебание мощности, состава и строения пластов на отдельных участках обрабатываемых площадей.

Методики отбора проб и изготовления образцов обычных горных пород для лабораторных испытаний изложены в ряде инструкций, руководств и отдельных публикаций [35, 53, 58, 66, 80, 81, 82, 86, 91, 113]. Основные положения этих методик могут быть использованы и для соляных пород с изменениями и добавлениями, определяемыми особенностью соляных пород.

Количество и размеры образцов соляных пород определяются видом лабораторных испытаний и задачей исследований. Форма и размеры отдельных образцов предусматриваются методикой испытаний и разновидностью применяемого оборудования. Естественная неоднородность соляных пород по минералогическому составу и структуре обуславливает для получения достоверных результатов испытания нескольких образцов, при этом степень надежности исследуемого показателя будет зависеть от испытанных образцов и оценивается коэффициентом вариации. Так, по данным [91], при испытании двух образцов надежность получаемых результатов составит 61%, четырех — 86% и десяти — 99,2%. Обычно применяется по 4—6 образцов, а для грубых испытаний — по 2—3 образца.

Необходимый для изготовления образцов материал может быть получен из кусков породы, взятой в очистном забое; из специальных блоков породы — монолитов, отделяемых от массива; из кернов разведочных скважин или из кернов необходимых размеров, полученных непосредственно из горных выработок. При использовании кернового материала одной и той же породы, взятого на одинаковой глубине от поверхности, из одной или нескольких скважин, необходимо точно документировать получаемые пробы: устанавливать минералогический и структурный состав, влажность, давать их петрографическое описание.

Для комплексного исследования физико-механических свойств, по данным [113], необходимо обработать не менее 1 м керна диаметром 70—120 м. Максимальный выход керна при разведочном бурении обеспечивается хорошей промывкой забоя перед бурением. По окончании выбуривания керна следует избегать вращения инструмента вхолостую, а также ударов и резких толчков при подъеме и развинчивании буровых труб.

Керновый материал для лабораторных исследований свойств соляных пород может быть получен и при эксплуатации месторождения. В этом случае для выбуривания кернов на калийных рудниках используются колонковые сверла с твердосплавными кольцевыми коронками. Сложность получения кернов таким путем заключается в том, что в силу незначительной мощности отдельных слоев соляных пород происходит разделение керна по разделяющим их глинистым прослойкам. В этом случае отбирают керны в направлении, параллельном слоистости, учитывая это при испытаниях.

Отбирать образцы из кусков породы, взятых в очистном забое или старых горных выработках, следует только в исключительных

случаях, так как получаемые при этом результаты нельзя считать представительными. Куски пород, отобранные таким образом, могут иметь скрытые трещины, подвергаться действию горного давления, иметь отличную от массива влажность и ряд других недостатков.

Образцы для лабораторных испытаний могут быть получены из блоков соляных пород, отделяемых от массива в специальных нишах свежепройдённых горных выработок выбуриванием. Применение взрывных работ для отделения блоков от массива недопустимо, так как взрыв оказывает существенное влияние на свойства пород, в них образуется трещиноватость разной интенсивности. Нами для проведения лабораторных испытаний соляных пород Старобинского месторождения отбирались блоки размером $60 \times 70 \times 100$ см. Для оконтуривания и отделения блоков от массива использовались нарезные комбайны и специальный буровой инструмент.

Для сохранения естественной влажности и ограничения воздействия на образцы атмосферных осадков отбираемые образцы соляных пород и отдельные блоки парафинировались и покрывались нитролаком или лаком типа «Кузбасс» с последующим их обертыванием марлей в несколько слоев и повторным парафинированием или покрытием лаком. Опыт отбора и консервации нами образцов и блоков соляных пород показал, что более надежным является покрытие их лаком типа «Кузбасс». Методика парафинирования образцов изложена в работе [53].

§ 2. Изготовление образцов

При определении физико-механических свойств соляных пород в лабораторных условиях используются различные методы, требующие изготовления образцов правильной геометрической формы: кубиков, призм, балочек, цилиндров, дисков и пластин. К изготовлению таких образцов предъявляется ряд требований и в первую очередь тщательность обработки торцевых граней, параллельность противоположных (торцевых) граней с точностью до 0,05 мм и др.

Обычно для получения образцов правильной формы применяются камнерезные машины с абразивными или алмазными режущими дисками, характеристика которых дана в работе [113]. При изготовлении образцов соляных пород не всегда можно использовать режущие органы камнерезных машин с промывкой из-за большой способности соляных пород к растворению. Кроме того, отдельные соляные породы, например карналлит, сильно гигроскопичны и не могут находиться даже на воздухе длительное время без консервации.

Образцы цилиндрической формы изготавливаются выбуриванием их из монолитов по методике ВНИМИ [82, 91] или вытачиванием на токарном станке из кернов разведочных скважин. Обработка кернов соляных пород на токарном станке не представляет особых

трудностей, за исключением крупнокристаллических пород и кернов, разбитых трещинами или имеющих прослойки глины. При обработке крупнокристаллических образцов последние крошатся, что ведет к неровности обработки. Образцы, ослабленные трещинами или другими включениями, трудно поддаются обработке и, как правило, разрушаются.

Керны, полученные из разведочных скважин бурением с промывкой, обрабатываются на токарном станке до определенного диаметра, чтобы исключить влияние увлажненной поверхности. Точность обработки образцов соляных пород на токарном станке при правильной их установке составляет 0,1 мм. С помощью специальных приспособлений можно повысить точность обработки кернов на токарном станке.

Разделка монолитов соляных пород для получения образцов правильной формы представляет большие трудности ввиду невозможности использования существующих камнерезных машин с промывкой. Она производится вручную обычными пилами.

Образцы призматической и кубической формы, а также образцы, имеющие форму балочек, для испытания на изгиб изготавливаются на камнерезных станках, оснащенных алмазными дисками, с промывкой керосином или 5%-ным раствором соды, или на станках, оснащенных корундовыми дисками. Последующая обработка образцов заключается в окончательной доводке торцевых и параллельных граней образца на шлифовальном станке. Для проверки параллельности торцевых и боковых граней образца используется специальное приспособление.

ГЛАВА IV

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ СОЛЯНЫХ ПОРОД

В последние годы исследованию механических свойств кристаллов посвящено много работ. Среди них следует отметить работы М. В. Класен-Неклюдовой [63, 64], Н. П. Юшкина [148] и др.

Соляные породы, слагающие каменносоляные и калийные пласты, представлены комплексом различных минералов. Прочностные и деформационные характеристики соляных пород определяются их минералогическим и структурным составом.

При характеристике структуры соляных пород важное значение имеют размеры составляющих их кристаллов (зерен), изменяющиеся от долей миллиметров до десятков сантиметров. Исследованию прочностных и деформационных характеристик кристаллов каменной соли посвящены работы [40, 54, 55, 62, 63, 142, 148, 154, 178, 185, 186, 187 и др.].

§ 1. Связь между структурой и механическими свойствами кристаллов

Механические и физические свойства кристаллов обусловлены их структурой. При характеристике структуры кристаллов соляных пород необходимо учитывать связь между отдельными структурными элементами и их свойствами, пространственное расположение структурных элементов и дефектов их строения.

Прочность кристаллов соляных пород, как и любых монокристаллов, определяется силами связи, действующими между отдельными структурными элементами. Для оценки сил связи можно использовать энергию кристаллической решетки. Для кристаллов с одновалентным катионом и анионом силу связи можно рассчитать по формуле для определения потенциала решетки, которая для галита составляет 182, для сильвина — 162 ккал/моль.

Зная энергию кристаллических решеток, можно теоретически подсчитать усилие, необходимое для преодоления сил сцепления. Так, для кристаллов галита расчетная прочность на разрыв составляет 20 000 кгс/см², а для сильвина она несколько меньше. Практически получить такое значение прочности кристаллов соляных пород на разрыв невозможно, так как это прочность идеального кристалла. Между идеальными и реально встречающимися в природе кристаллами существует значительное различие; в реальных кристаллах наблюдаются различные нарушения закономерностей строения. Различают две большие группы нарушений в кристаллах: дефекты в строении кристаллической решетки и дефекты структуры или строения самого кристалла. Дефекты в строении кристаллической решетки влияют на механические свойства кристаллов.

По данным исследований А. Смекаля [185], при введении одновалентных ионов (K^+ , Ag^+ , Cu^+) в кристаллы галита было установлено увеличение их прочности на растяжение на 30—100%, а при введении двухвалентных ионов (Ca^{2+} , Pb^{2+} , Sr^{2+}) прочность на растяжение увеличивалась в 4—5 раз. Нарушения в кристаллической решетке галита, вызванные введением других ионов, по-видимому, значительно затрудняют скольжение отдельных элементарных частиц в кристалле под нагрузкой и тем самым повышают прочность.

По данным [40], включение в кристаллическую решетку минерала изоморфных примесей изменяет прочность кристаллохимических связей, что ведет к изменению механических свойств минерала. Так, незначительное содержание в галите примесей кальция, бария и стронция вызывает повышение предела текучести в несколько раз. По данным исследований Бланка [154], включение в кристалл галита 0,0025% $SrCl_2$ повышает его прочность при растяжении на 50%, а включение 0,045% $SrCl_2$ вызывает увеличение σ_p на 400%.

Кроме дефектов кристаллической решетки для соляных пород характерно и нарушение структуры самих кристаллов. К таким

нарушениям в реальных кристаллах сильвина и галита относятся смещения кристаллических решеток, а также более крупные нарушения — разных размеров трещины, включения газовых и жидких скоплений и др. В работе [181] в зависимости от линейных размеров выделяются три типа дефектов в строении кристаллов соляных пород:

а) макроскопические дефекты в строении кристаллов с размерами более 10^{-3} см;

б) микроскопические дефекты с размерами от 10^{-5} до 10^{-3} см;

в) ультрамикроскопические дефекты с размерами менее 10^{-5} см.

Пример влияния микроскопических дефектов на строение кристаллов приведен в работе [187], где определялась прочность на растяжение кристаллов галита различного сечения. Было установлено, что с уменьшением сечения прочность возрастала: при сечении кристаллов галита 10^{-2} см² прочность составляла 200 кгс/см², при сечении 10^{-4} см² — 7000 кгс/см² и при сечении 10^{-5} см² прочность на растяжение возросла до 18 000 кгс/см². Увеличение прочности при растяжении кристаллов галита почти до теоретического значения (20 000 кгс/см²) можно объяснить уменьшением у испытываемых образцов числа дефектов в строении кристаллов, которых у образцов с поперечным сечением 10^{-5} см² было очень мало.

Характерным для кристаллов каменной соли и сильвинита являются включения в них газовых и жидких скоплений кубической и канальцевидной формы с размерами от сотых и десятых долей миллиметра до сантиметра. Такие включения значительно снижают прочность кристаллов, если учесть к тому же, что газовые скопления находятся под большим внутренним давлением.

Трещиноватость кристаллов галита понижает их сопротивление пластическим и хрупким деформациям. Природные пластические деформации упрочняют кристаллы галита.

§ 2. Структура основных породообразующих соляных минералов }

Основными породообразующими минералами являются галит, сильвин, карналлит и ангидрит. В качестве примесей часто присутствуют глинистые, гипсовые и другие породы.

Кристаллы галита и сильвина имеют кубическую форму, а при наличии примесей — октаэдрическую или ромбододекаэдрическую. В пространственной кристаллической решетке галита и сильвина координационное число ионов Na^+ , K^+ и Cl^- равно 6, плоскости кристаллов заполнены ионами равномерно, вследствие чего кристаллы имеют совершенную спайность по граням куба.

Разница в структурах кристаллов галита и сильвина заключается в более сильном поляризующем действии иона Na^+ ($0,98 \cdot 10^{-8}$ м) по сравнению с ионом K^+ ($1,33 \cdot 10^{-10}$ м). Этим и вызвано незначительное различие в прочности галита по сравнению с сильвином. Размер элементарной ячейки NaCl равен 5,628 Å, а кратчайшее межионное расстояние 2,814 Å. Удельная теплопроводность NaCl при темпера-

туре 0°C равна $16,7 \cdot 10^3$ кал/(см·сек·град). При комнатной температуре коэффициент теплопроводности каменной соли λ равен $16 \cdot 10^{-3}$ кал/(см·сек·град). Удельная теплоемкость кристаллического NaCl при 0°C равна $0,204$ кал/(г·град). Коэффициент линейного расширения NaCl $\alpha = (40,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Коэффициент объемного расширения β изменяется в пределах $(92,5 \div 121) \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Удельное сопротивление галита (ρ), по данным [99], при температуре 20°C равно $46 \cdot 10^{15}$ ом·см. Более подробные данные о физических свойствах галита можно найти в работе [99].

В отличие от галита и сильвина ангидрит относится к кристаллам со сложной ионной решеткой, для которой характерны комплексы, представляющие собой в зависимости от вида связи особые структурные группы SO_4 . У ангидрита эти группы столь стабильны сами по себе, что образуют самостоятельные единства. Группы SO_4 образуют тетраэдры, у которых каждый ион S^{6+} окружен четырьмя ионами O^{2-} , а каждый ион Ca^{2+} окружен 8 ионами O^{2-} .

Энергия кристаллической решетки ангидрита значительно выше, чем у галита, что обуславливает значительно большую по сравнению с галитом и сильвином его прочность.

Отличную от рассмотренных выше структуру имеют кристаллы карналлита ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Он относится к псевдогексагональной орторомбической системе. Карналлит не обладает определенной спайностью. Вместо плоскостей спайности на гранях разрушения наблюдается раковистый излом. Интересно отметить, что карналлит имеет более высокую (2,7) по сравнению с галитом и сильвином твердость, хотя его прочность при сжатии и растяжении значительно ниже.

§ 3. Механические свойства кристаллов соляных пород

Между прочностью соляных пород как поликристаллических структур и прочностью слагающих их монокристаллов большое различие. Между тем прочностью отдельных кристаллов соляных пород представляет интерес с точки зрения оценки прочности реальных соляных пород, встречающихся при отработке калийных и каменно-соляных месторождений. Разрушение поликристаллических соляных пород происходит в местах наименьшей прочности кристаллов и прочности на контактах деформаций.

Как указывалось, большое влияние на механические характеристики кристаллов соляных пород оказывают структура кристаллов, их состав и генезис. Кроме того, прочностные и деформационные характеристики кристаллов зависят от условий их испытания: действия внешней среды, скорости приложения, времени действия нагрузки и других факторов. Различие методик испытания кристаллов соляных пород обуславливает различные по величине значения их прочности при растяжении и сжатии. Поэтому нами приводятся результаты различных авторов в сопоставлении.

Значения прочности кристаллов каменной соли на растяжение, по данным разных авторов, сведены в табл. 1. Разнообразие значений σ_p можно объяснить тем, что разные авторы исследовали различные по составу и генезису кристаллы каменной соли. Это подтверждается опытами Бланка (табл. 2). Из данных табл. 2 видно, что прочность кристаллов каменной соли при растяжении для различных месторождений изменяется от 21,7 до 172,2 кгс/см². Аналогичные изменения прочности кристаллов каменной соли на растяжение для различных месторождений можно найти у А. Смекаля [185] и К. Шенфелда [188]. По мнению Г. Шпакелера и Ф. Зибена [187], такое разнообразие значений σ_p для кристаллов каменной соли следует отнести к несовершенству лабораторных испытаний, наличию неровностей на поверхности, образующихся при изготовлении образцов из кристаллов, и анизотропии кристаллов.

Таблица 1

Прочность кристаллов каменной соли при растяжении	
Прочность при растяжении σ_p , кгс/см ²	Исследователь
8,5	Зонке [187]
57,8	В. Фойгт [194]
45	А. Ф. Иоффе и др. [55]
45	Киндт [187]
44	А. Ф. Иоффе и др. [55]
15	Шобер [187]

Таблица 2

Предел упругости и прочность кристаллов каменной соли при растяжении [154]		
Месторождения	Предел упругости, кгс/см ²	Прочность при растяжении σ_p , кгс/см ²
Бохия (ПНР) *	7	21,7
Калифорния (США) *	18	25,1
Величка (ПНР) **	29	32,8
Стассфурт (ГДР)	42	48,1
Бахмут (СССР)	50	38,2
Виннебург (ФРГ)	—	172,2

* Природные целые кристаллы.

** Кристаллы с прожилками.

Прочность кристаллов сильвина при растяжении исследовал П. Шютц [189]. Он установил, что прочность искусственных кристаллов сильвина при растяжении (по направлению 100) колеблется от 19,3 до 21,4 кгс/см², а природных кристаллов сильвина — от 28 до 75,1 кгс/см². Как видно из приведенных данных, значения σ_p для кристаллов сильвина близки к значениям σ_p для кристаллов каменной соли.

Прочностные свойства кристаллов каменной соли определяются наличием в них примесей, дефектов кристаллической решетки, анизотропией и другими факторами. Из внешних факторов наибольшее влияние на механические свойства кристаллов каменной соли оказы-

вает среда, в которой проводятся испытания, скорость приложения нагрузки, масштабный фактор и др. Влияние увлажнения кристаллов на предел их текучести и прочность при растяжении, по данным Г. Шпакелера и Ф. Зибена [187], показано в табл. 3. Как видно из данных табл. 3, увлажнение кристаллов каменной соли незначительно влияет на предел текучести, но вызывает увеличение в несколько раз значения σ_p . Модуль упругости кристаллов каменной соли при увлажнении уменьшается несущественно. Повышение скорости нагружения при испытаниях кристаллов увеличивает их способность к хрупкому разрушению. Существенное влияние на механические свойства кристаллов оказывает масштабный фактор; тонкие кристаллы обладают резко повышенной прочностью при растяжении и сжатии по сравнению с крупными кристаллами. Так, по данным Г. Мюллера [178], значение прочности кристаллов каменной соли при растяжении возрастает с 50 до 700 кгс/см² при уменьшении сечения с 20 до 0,3 мм².

Таблица 3

Влияние увлажнения на предел текучести и прочность при растяжении для кристаллов каменной соли [187]

Местонахождение кристаллов	Сухая		Влажная	
	Предел текучести, кгс/см ²	σ_p , кгс/см ²	Предел текучести, кгс/см ²	σ_p , кгс/см ²
Калифорния	42,3	42,3	44,8	60—140
Гейльбронн	36,9	39,1	38,0	204—407,6
»	40,1	61,8	43,0	520
Фридрихсгалль	33,2	37,0	35,1	280—770

По данным Н. П. Юшкина [148], практически у всех минералов, в том числе и у галита, резко выражена анизотропия механических свойств, характеризующаяся зависимостью от выбранного кристаллографического направления испытания. Такая зависимость механических свойств кристаллов от их состава и направления испытания вызывает широкое колебание механических характеристик кристаллов каменной соли.

В. Фойгт [192] установил, что изменение прочности кристалла галита на растяжение в зависимости от направления приложения растягивающего усилия изменяется от 5,71 до 22,4 кгс/см². Прочность же кристаллов каменной соли на растяжение в зависимости от свойств, структуры и ориентировки в кристаллах изменяется в широких пределах — от 5 до 640 кгс/см².

В работе [40] показано, что предел текучести (кгс/см²) кристаллов галита изменяется от 7 (Бохня, ПНР) до 50 (Бахмут, СССР) и даже до 112 (Стассфурт, ГДР), а предел прочности при сжатии от 160 (Величка, ПНР) до 172,2 кгс/см² (Виннебург, ФРГ).

Интересные опыты по исследованию прочности кристаллов каменной соли были выполнены А. Ф. Иоффе [54]. Так, на основании теории кристаллических решеток величина сцепления в кристаллах каменной соли при всестороннем растяжении составляет $3 \cdot 10^4$, а одноосном растяжении — $2 \cdot 10^4$ кгс/см², в то время как по экспериментальным данным прочность кристаллов каменной соли при растяжении в среднем равна 44 кгс/см². Прочность одиночных кристаллов каменной соли на растяжение примерно в 500 раз меньше вычисленного максимума сил сцепления; при этом σ_p зависит от поперечного сечения и периметра испытываемых кристаллов, а также от внешней среды.

При испытании кристаллов каменной соли на растяжение в горячей воде А. Ф. Иоффе и М. А. Левицкая [54] установили увеличение σ_p с 44 до $3 \cdot 10^3$ и даже $16 \cdot 10^3$ кгс/см²; при этом испытание кристаллов каменной соли на разрыв в насыщенном растворе не приводило к увеличению σ_p . Интересные данные о влиянии увлажнения кристаллов каменной соли на их прочность при растяжении приводит Г. Шпакелер [187].

Таблица 4

Значение предела упругости для кристаллов каменной соли

Предел упругости, кгс/см ²	Исследователь
7—50	Бланк [154]
9,4—11,2	Г. Шпакелер [187]
19—51	А. Смекаль [185]
19,8—318	В. Д. Кузнецов [65]
Около 90	А. Ф. Иоффе [54]

Значения предела упругости при растяжении для кристаллов каменной соли, по данным разных исследователей, приведены в табл. 4.

Различие величин предела упругости для кристаллов каменной соли можно объяснить анизотропией кристаллов и степенью их чистоты. При рассмотрении данных табл. 4 становится очевидным, что предел упругости неориентированных кристаллов каменной соли (10—320 кгс/см²)

близок по своим значениям к пределу текучести и составляет примерно половину величины σ_p для кристаллов каменной соли.

Значения пределов упругости при растяжении для кристаллов силвина, по данным П. Шютца [189], даны в табл. 5.

Модуль упругости кристаллов каменной соли, по данным разных исследователей, приведен в табл. 6. При этом следует отметить, что испытывались кристаллы каменной соли различных месторождений, некоторые кристаллы имели примеси других минералов.

В кристаллах соляных пород под нагрузкой вслед за упругими деформациями проявляются пластические. Механизм пластических деформаций, характерных для кристаллов соляных пород, сложен и неодинаков для однородных кристаллов в разных условиях деформации. На основании экспериментальных исследований, выполненных М. В. Классен-Неклюдовой [62, 63], пластическая деформация кристаллов может развиваться следующими способами:

Таблица 5

Таблица 6

Значения пределов упругости
для кристаллов сильвина [189]

Характеристика кристаллов	Предел упругости, кгс/см ²
Искусственные кристаллы	9,3—11,2
Природные кристаллы	17,7
Осколки кристалла сильвина	60,5—67,8

Значение модуля упругости кристаллов каменной соли

Модули упругости E , 10^6 кгс/см ²	Исследователь
2,03—3,390	Кох [187]
4,2—3,00	В. Фойгт [194]
4,2	А. Ф. Иоффе [54]
2,95—6,39	В. Д. Кузнецов [65]

а) простым трансляционным скольжением одних частей кристалла относительно других по системе кристаллографически фиксированных плоскостей скольжения;

б) сложным скольжением, вовлекающим в действие несколько систем скольжения;

в) механическим двойникованием с изменением внешней формы кристалла и с симметричной переориентировкой областей кристаллической решетки;

г) механическим двойникованием без изменения внешней формы кристалла, но с двойниковой перестройкой кристаллической решетки;

д) самодиффузией атомов, образующих кристаллическую решетку, проявляющейся при очень малых скоростях деформации или при высоких температурах (близких к температуре плавления).

По данным [181], в кристаллах галита и сильвина плоскостью трансляционного скольжения является грань (110) в направлении (110); для кристаллов ангидрита гранью трансляционного скольжения, очевидно, является (001) в направлении (010). При скольжении у кристаллов ангидрита отмечается двойникование, а у кристаллов галита и сильвина, по мнению [185], двойникования при скольжении не происходит.

В кристаллах карналлита не было обнаружено пластических деформаций путем трансляционного скольжения одних частей кристалла относительно других и предполагается, что пластические деформации развиваются в карналлите только посредством двойникования при скольжении по плоскостям (110) и (130), расположенным под углом $88^\circ 37'$.

Представляет интерес установленное для кристаллов каменной соли явление «уплотнения», или упрочнения, под нагрузкой, которое заключается в следующем: воздействие нагрузки на кристалл (в рамках предела текучести) вызывает его упрочнение, не исчезающее во времени после снятия нагрузки. Повторное испытание кристалла в первоначальном направлении показывает значительное увеличение прочностных характеристик. Так, в работе [65] показано, что вследствие упрочнения предел текучести кристаллов каменной соли

повышался на 56—315% (45—205 кгс/см²), а прочность при растяжении увеличилась с 166 до 286 кгс/см². По данным А. Ф. Иоффе [54], вследствие упрочнения кристаллов каменной соли в процессе текучести происходило увеличение их прочности при растяжении в 20 раз.

ГЛАВА V

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

Величина предела прочности соляных пород при одноосном сжатии является наиболее распространенной характеристикой при оценке их механических свойств. Прочность соляных пород при одноосном сжатии определяется при испытании образцов правильной геометрической формы (цилиндрических, кубических или призматических) на прессе. Величина прочности при одноосном сжатии вычисляется по формуле

$$\sigma_{сж} = P_{\max}/S, \text{ кгс/см}^2, \quad (1)$$

где P_{\max} — максимальная разрушающая нагрузка, кгс; S — площадь поперечного сечения образца, см².

Величина $\sigma_{сж}$ — относительный показатель прочности, так как в действительности при испытании образцов на сжатие в них имеет место сложное, неоднородное распределение напряжений как по длине, так и по площади поперечного сечения. Характер напряженного состояния образцов при испытаниях на одноосное сжатие определяется их формой, размерами, структурой, условиями на контактах с плитами прессы, скоростью приложения нагрузки и др.

Абсолютное значение $\sigma_{сж}$ зависит от ряда естественных факторов, как, например: структуры и неоднородности петрографического состава (соляные породы представлены обычно смесью различных минералов); величины зерен породообразующих минералов (галита и сильвина); соотношения среднего размера зерен и образца; наличия и ориентировки трещин слоистости к направлению действия силы; включений других минералов. Поэтому при определении истинного значения $\sigma_{сж}$ для соляных пород предпринимались попытки установить рациональные формы и размеры образцов, стандартизировать условия их испытания [34, 66, 105, 110, 146, 160, 181]. Единого мнения по этому вопросу среди исследователей не достигнуто.

Для учета влияния отмеченных выше факторов на прочность при одноосном сжатии различными авторами [105, 146, 162, 164, 175, 181] предложено большое количество различных формул, однако они плохо согласуются с данными экспериментальных исследований.

§ 1. Геометрическая форма и абсолютные размеры образцов

Как уже отмечалось, прочность горных пород при одноосном сжатии обычно определяют на образцах правильной формы (цилиндрических, кубических, призматических) с различным соотношением их размеров. Выбор формы образца для лабораторных испытаний частично зависит от возможности их изготовления и обработки. К образцам, предназначенным для лабораторных исследований, предъявляются высокие требования по точности и качеству их обработки, так как в противном случае получаются большие отклонения $\sigma_{сж}$ от истинных значений.

Изготовление образцов соляных пород правильной формы очень трудоемко и требует специального оборудования. Кроме того, соляные породы имеют кристаллическое строение (с размерами зерен от 0,001 до 50 мм и более), различные минералогический состав и текстуру. В большинстве случаев калийные пласты представлены отдельными чередующимися слоями калийной и каменной соли, разделенными прослоями глины. Высокая гигроскопичность глинистого материала, а также кристаллическое строение соляных пород делают порой невозможным изготовление образцов требуемой формы и размеров. Вместе с тем для определения рациональных параметров систем отработки калийных пластов и управления горным давлением необходимо иметь данные о прочностных характеристиках соляных пород. Поэтому исследования прочности соляных пород при сжатии проводят на образцах разной формы и геометрических размеров. Влияние геометрической формы и размеров соляных образцов на прочность при одноосном сжатии отмечали многие исследователи [34, 66, 113, 147, 181].

В работе [195] при испытании образцов соляных пород было установлено, что для получения представительных результатов о величине предела прочности при сжатии в образце должно быть не менее 1000 зерен, при этом грани образцов должны иметь размер около 125 мм, средний диаметр зерен порядка 13 мм, т. е. отношение размера грани образца d к среднему размеру зерен δ должно составлять ~ 10 .

Л. Оберт [180] при испытаниях образцов каменной соли также установил зависимость прочности при сжатии от отношения размеров поперечного сечения образца к размеру составляющих его зерен.

В работе [187] отмечается, что напряжение и деформации будут представительны для образцов соляных пород с размерами их граней от 10 до 50 см. Испытания на одноосное сжатие кубических образцов каменной соли (калийный пласт Верра) с размерами $100 \times 100 \times 100$ и $10 \times 10 \times 10$ см, выполненные Ф. В. Уленбеком [195], показали одинаковый характер деформаций и разрушения образцов, а также величину их прочности на сжатие, равную 310 кгс/см^2 . Зависимость прочности образцов каменной соли и карналлита от их размеров, по данным исследований [195], показана на рис. 1. Исследования проводились с использованием на торцах

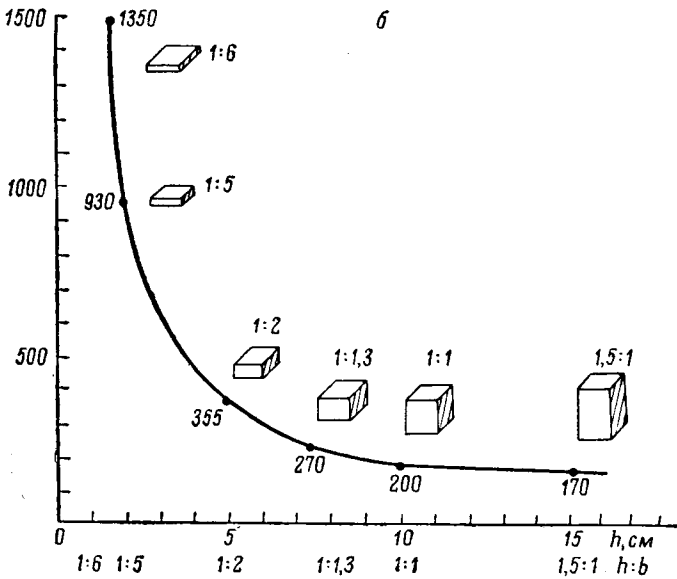
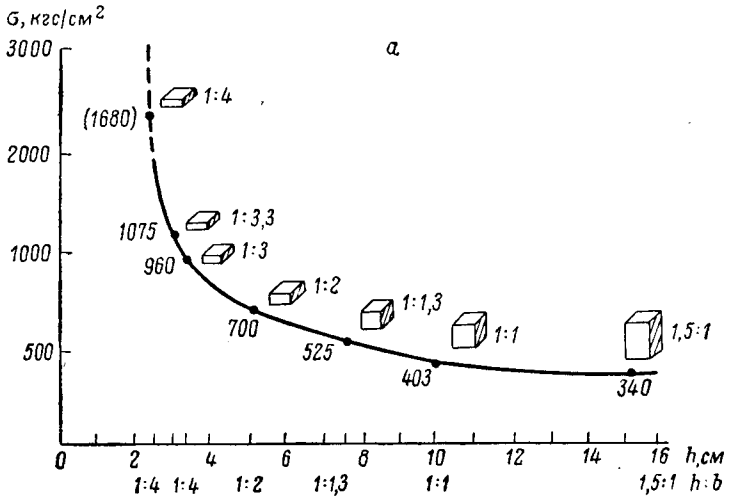


Рис. 1. Зависимость прочности образцов каменной соли (а) и карналлита (б) при одноосном сжатии от их размеров (h — высота; b — ширина).

образцов стальных прокладок с насечкой (глубина насечки 0,2 мм) при скорости нагружения 10 кгс/(см²·сек). Размеры зерен, мм: для образцов каменной соли 1—2, карналлита — 3. Карналлитовые образцы имели следующий минеральный состав, %: карналлит — 50, каменная соль — 40, сильвин — 7 и кизерит — 3.

Из приведенных рисунков видно, что при изменении отношения высоты образцов каменной соли к ширине (h/b) от 1,5/1 до 1/4 их прочность при сжатии увеличивается от 340 до 1680 кгс/см² и соответственно для карналлита от 1,5/1 до 1/6 $\sigma_{сж}$ увеличивается от 170 до 1350 кгс/см².

Для горных пород установлена зависимость прочности при одноосном сжатии от абсолютных размеров образцов [113]. Образцы, геометрически подобные между собой и изготовленные из одного и того же пласта каменной или калийной соли, при испытаниях на одноосное сжатие показывают различную прочность [67, 96, 100, 122, 166]; при этом прочность маленьких образцов ниже, чем больших.

На рис. 2 представлен график изменения прочности соляных пород при сжатии образцов кубической формы различных размеров. Из сопоставления приведенных на рис. 2 результатов исследований разных авторов видно, что прочность соляных пород закономерно возрастает с увеличением размеров образцов. Следует отметить, что для образцов каменной соли с размерами от 5 до 20 см наблюдается интенсивный рост прочности на одноосное сжатие, а для образцов с размерами от 20 до 30 см этот рост незначителен.

В. Дрейер [163] отмечал, что предел прочности при одноосном сжатии для карналлитовых пород равен 130 кгс/см² и достигается на образцах кубической формы с длиной грани 20 см; при дальнейшем увеличении размеров образцов значение $\sigma_{сж}$ не изменяется, остается постоянным. Образцы каменной соли кубической формы имели постоянные значения $\sigma_{сж}$ при размерах граней 10 см.

Для установления зависимости прочности каменной соли на одноосное сжатие от абсолютных размеров образцов нами были проведены специальные исследования. Образцы каменной соли были отобраны из III калийного пласта (слой III—IV) Старобинского месторождения, залегающего на глубине 580—600 м от поверхности. Они были изготовлены кубической формы с размерами граней 4, 5, 10, 15 и 20 см. Каменная соль светло-серого цвета, разнoзернистой структуры (размеры зерен от 0,5 до 9 мм) содержит примеси микрозернистого ангидрита, карбонатов и глинистого вещества. Всего было испытано 74 образца каменной соли. Результаты испытаний показаны на рис. 2, из которого видно, что постоянное значение прочности при сжатии наблюдалось на образцах с размерами граней 10 см и при дальнейшем увеличении размеров образцов практически не изменялось. При увеличении размеров кубических образцов от 4 до 8 см их прочность повышалась от 240 до 380 кгс/см². Такое изменение величины прочности следует отнести за счет различного соотношения размеров образцов и средних размеров зерен галита.

Наиболее достоверные значения прочности образцов каменной соли при одноосном сжатии, по данным [96], получаются для кубических образцов размерами не менее $20 \times 20 \times 20$ см, по данным наших исследований — для образцов с размерами не менее 10—12 см.

Г. Н. Кузнецов [66, 67] проводил испытания прочности на сжатие для каменной соли Артемовского месторождения на образцах ($h/b = 2$ и 3) кубической и призматической формы с шириной квадратного

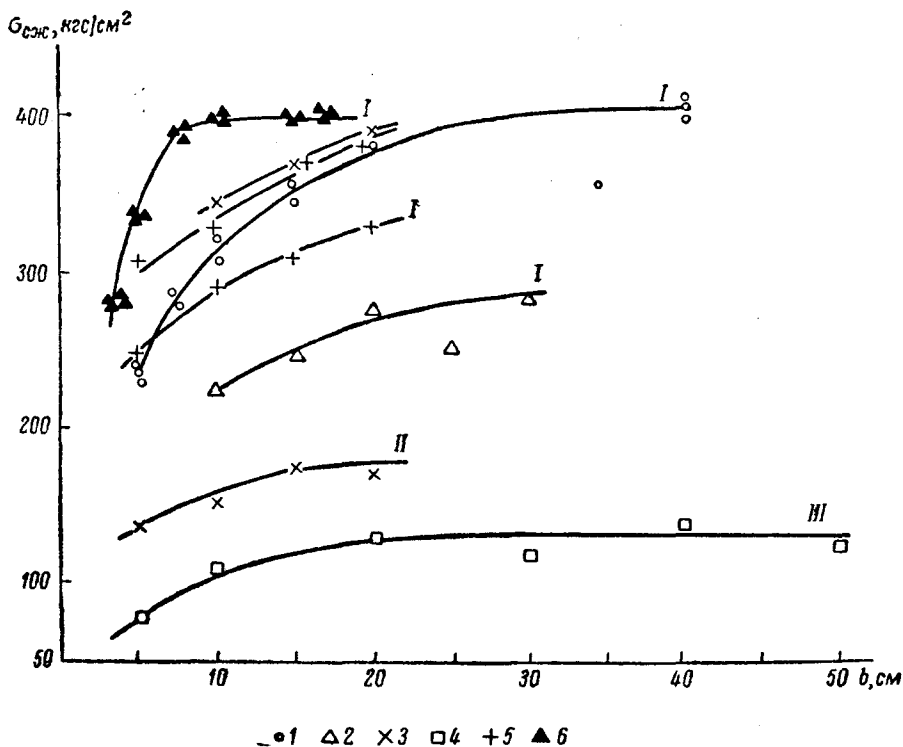


Рис. 2. График изменения прочности при одноосном сжатии кубических образцов соляных пород.

I — каменная соль, II — карналлит, III — карналлит с 40%-ным содержанием каменной соли. Данные: 1 — А. М. Пенькова, А. А. Вопилкина [96]; 2 — Г. Н. Кузнецова [67]; 3 — Г. И. Широко [146]; 4 — В. Дрейера [160]; 5 — М. Стаматиу [122]; 6 — Н. М. Проскурякова, В. С. Ливенского [100].

основания образца от 10 до 30 см. При этом для первых было установлено изменение $\sigma_{сж}$ от 228 до 281 кгс/см² (на 23%), а для вторых ($h/b = 2$) — от 167 до 204 кгс/см² (на 21%) при изменении ширины основания образца от 10 до 20 см. При дальнейшем увеличении размеров основания образца изменения $\sigma_{сж}$ не наблюдалось.

Значительно изменяется прочность карналлита при испытаниях на одноосное сжатие у образцов кубической формы с размерами от 5 до 15 см, а для образцов с размерами более 20 см она практически не изменяется (рис. 2).

В работе [181] приведены результаты испытания карналлитовых образцов ($l/d = 1$, $d = 45 \div 107$ мм) пластов Тюрингия и Стассфурт (ГДР) (рис. 3, а). Изменение величины прочности при сжатии имеет место при испытаниях образцов цилиндрической формы диаметром до 9 см; при дальнейшем увеличении диаметра заметного увеличения $\sigma_{сж}$ не наблюдается.

Иная зависимость прочности при сжатии от абсолютных размеров образцов ($l/d = 1$, $d = 42 \div 120$ мм) была получена для каменной соли пластов Хессен и Верра, а также для обломочного карналлита

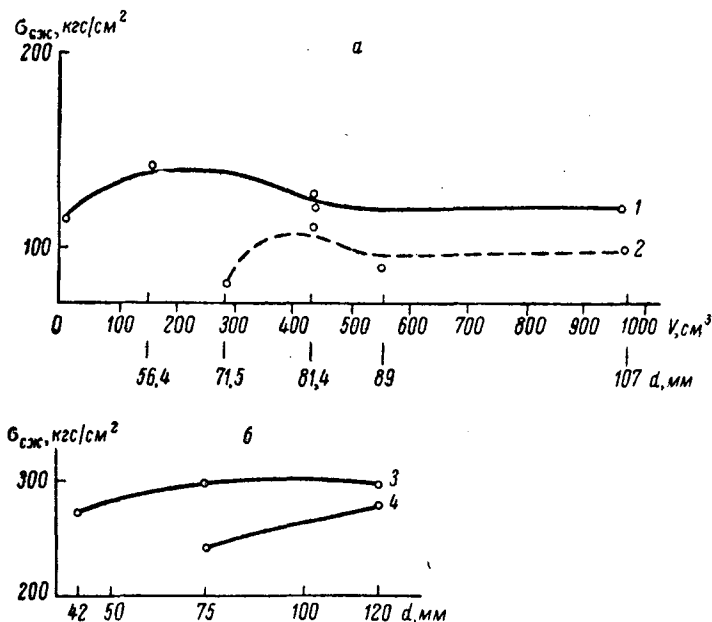


Рис. 3: Изменение прочности цилиндрических образцов ($l/d = 1$) карналлита (а) и каменной соли (б) в зависимости от их размеров [181].

Данные для пластов: 1 — Тюрингия, 2 — Стассфурт, 3 — Хессен, 4 — Верра.

пласта Тюрингия (рис. 3). На рис. 3, б видно существенное возрастание $\sigma_{сж}$ при увеличении их размеров. Если принять за 100% значение прочности при сжатии для образцов $d = 42$ мм, рекомендуемого при испытаниях горных пород, то уже для образцов с $d = 75$ мм отклонение составит: для каменной соли пласта Верра — 27%, пласта Хессен — 8% и для обломочного карналлита пласта Тюрингия — 26%.

При подземной разработке соляных и калийных месторождений встречаются целики различных геометрических форм и размеров. Для установления рациональных форм целиков и определения их несущей способности прибегают к моделированию или испытанию

в соответствующем масштабе геометрически подобных образцов соляных пород.

Для получения достоверных данных и возможности последующего их переноса на натурные условия при расчете целиков соляных пород, по мнению В. Гимма [166], при испытаниях образцов необходимо соблюдать следующие условия.

1. Распределение напряжений и деформаций в образце должно соответствовать характеру распределения напряжений и деформаций в целике.

2. Образец и целик должны иметь геометрически подобные формы.

3. Размеры образцов необходимо выбирать таким образом, чтобы они имели предельную прочность.

4. Длительность испытания образцов следует выбирать с соблюдением основных условий подобия.

5. Образец должен иметь идентичный по сравнению с натурой минерально-петрографический состав.

Для учета фактора формы при испытании образцов соляных пород предложен ряд эмпирических зависимостей. Так, В. Дрейером [162, 163] получена следующая зависимость:

$$\lambda = \frac{Uh}{4F}, \quad (2)$$

где λ — фактор формы образца; F — площадь поперечного сечения образца, см²; U — периметр поперечного сечения образца, см; h — высота образца, см.

Результаты испытания образцов каменной соли различной формы и размеров, выполненные В. Дрейером [161], приведены в табл. 7. Зависимость прочности образцов каменной соли от фактора формы, построенная по данным табл. 7, показана на рис. 4. Как видно из рис. 4 и табл. 7, прочность образцов каменной соли сильно зависит от фактора формы и для образцов плитообразной формы стремится к предельному значению, называемому пределом вторичного уплотнения (C). Предел уплотнения для различных соляных пород, по данным В. Дрейера [161, 163], имеет следующие значения:

Карналлит	0.02	Сильвинит	0.20
Каменная соль	0.14	Твердая каменная соль	0.23

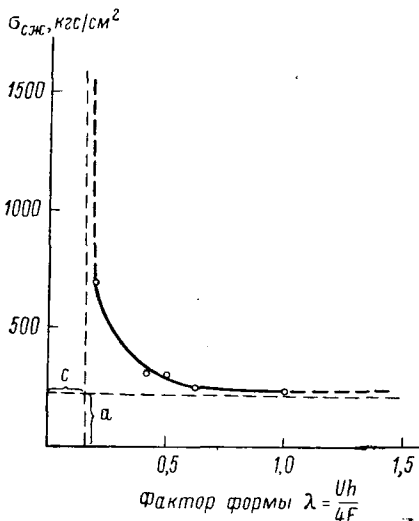


Рис. 4. Зависимость прочности каменной соли при одноосном сжатии от фактора формы образцов [161].

Влияние формы и размеров образцов на их прочность при одноосном сжатии (по В. Дрейеру) [161]

Размеры образцов, см			Прочность образцов $\sigma_{сж}$, кгс/см ²
Длина l	Ширина b	Высота h	
20	20	4	637 ± 17
25	25	10	340 ± 13
20	20	10	309 ± 11
30	10	10	283 ± 7
10	10	10	262 ± 12
10	10	20	235 ± 12

Предельное значение кривой, изображенной на рис. 4, по горизонтали (a) соответствует прочности образцов при одноосном сжатии.

Г. И. Широко [146] предлагает учитывать геометрическую форму и размеры образцов соляных пород при определении их прочности при одноосном сжатии следующей зависимостью:

$$\sigma_{сж} = Ke^n \frac{S}{Ph}, \quad (3)$$

где K — коэффициент «прочности», определяется графически; n — коэффициент закрепления образцов с плитами пресса.

Представляет интерес поведение образцов соляных пород под нагрузкой после их разрушения при сжатии, т. е. явление вторичного уплотнения. Это явление имеет место и в натурных условиях. Оно возникает за счет давления обрушенных вышележащих пород кровли на разрушенные целики в отработанном пространстве.

Для иллюстрации явления вторичного уплотнения образцов каменной соли с различным отношением $h/b = 0,25 \div 1$ (размеры основания образцов 10×10 см), по данным [195], на рис. 5 приведены графики изменения относительной разрушающей продольной деформации от давления на образец. После разрушения образца (на каждой кривой указаны максимальные разрушающие деформации в процентах) начинается резкое увеличение относительных продольных

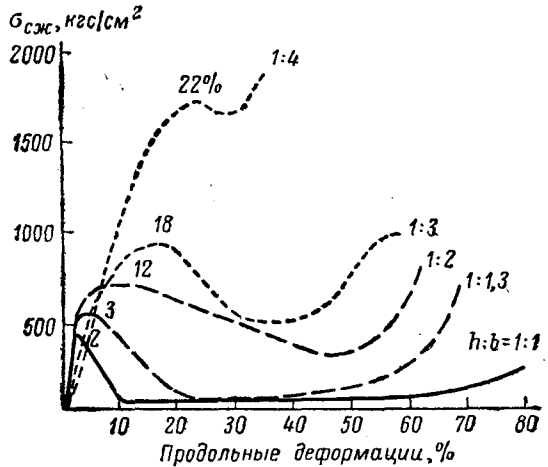


Рис. 5. Графики «нагрузка — продольная деформация» для образцов каменной соли ($h/b = 0,2 \div 1$; размеры основания 10×10 см) при испытаниях на одноосное сжатие [195].

деформаций, а после определенного уплотнения разрушенного образца (начиная с 40—50% от его первоначальной высоты и при $h/b = 0,3 \div 1$) имеет место вторичное увеличение нагрузки (несущей способности образца) и уменьшение его продольной деформации. Несколько иной характер деформации и вторичного уплотнения наблюдается у плоских образцов (при $h/b = 0,25$).

Приведенные в настоящем параграфе данные свидетельствуют о том, что предел прочности соляных пород при одноосном сжатии в значительной степени зависит от абсолютных размеров и формы испытываемых образцов. Эти факторы необходимо учитывать при определении истинных значений прочности при одноосном сжатии.

§ 2. Вертикальный размер образцов

Многочисленные исследования прочности горных пород при сжатии в зависимости от изменения вертикального размера образца показали закономерное снижение временного сопротивления сжатию при увеличении высоты образцов цилиндрической и призматической формы и увеличение $\sigma_{сж}$ при уменьшении их высоты [66, 82, 113]. Зависимость временного сопротивления сжатию от вертикального размера образцов в равной степени относится и к соляным горным породам, на что указывали многие исследователи [67, 96, 147, 164, 169, 181].

На рис. 6 приведены графики зависимости прочности образцов соляных пород от отношения высоты к диаметру (ширине) образца, построенные по опытным данным различных исследователей. Из рис. 6 видно, что для всех образцов соляных пород существует общая закономерность — снижение $\sigma_{сж}$ при увеличении $\eta = h/d$ и возрастание $\sigma_{сж}$ при снижении η .

Наиболее интенсивное снижение прочности образцов при сжатии происходит при изменении $\eta = h/d$ от 0,3 до 2. Дальнейшее увеличение отношения η (от 2 до 5) вызывает незначительное снижение прочности образцов при сжатии, которое можно принять практически постоянным.

В работе [96] отмечается повышенный разброс значений $\sigma_{сж}$ при испытаниях высоких образцов каменной соли по сравнению с образцами кубической формы, отличный характер их деформации и разрушения. В частности, при $\eta = 4$ и выше обычно происходило внезапное разрушение образцов, носившее взрывной характер и сопровождавшееся звуковым эффектом; при этом образец сразу же распадался на несколько крупных обломков без предварительного появления трещин разрушения (характерных для кубических образцов) и без образования разрыхленной соли в средней части образца. Аналогичный характер разрушения высоких ($\eta = h/d \geq 4$) образцов каменной соли при сжатии был отмечен Р. Квапиллом [175].

Иной характер деформаций и разрушений наблюдается у низких плитообразных образцов с отношением $\eta = 0,3 \div 0,25$. В этом случае после появления первых трещин разрушения нагрузка на образец вначале снижается, а затем после спрессования и вторичного

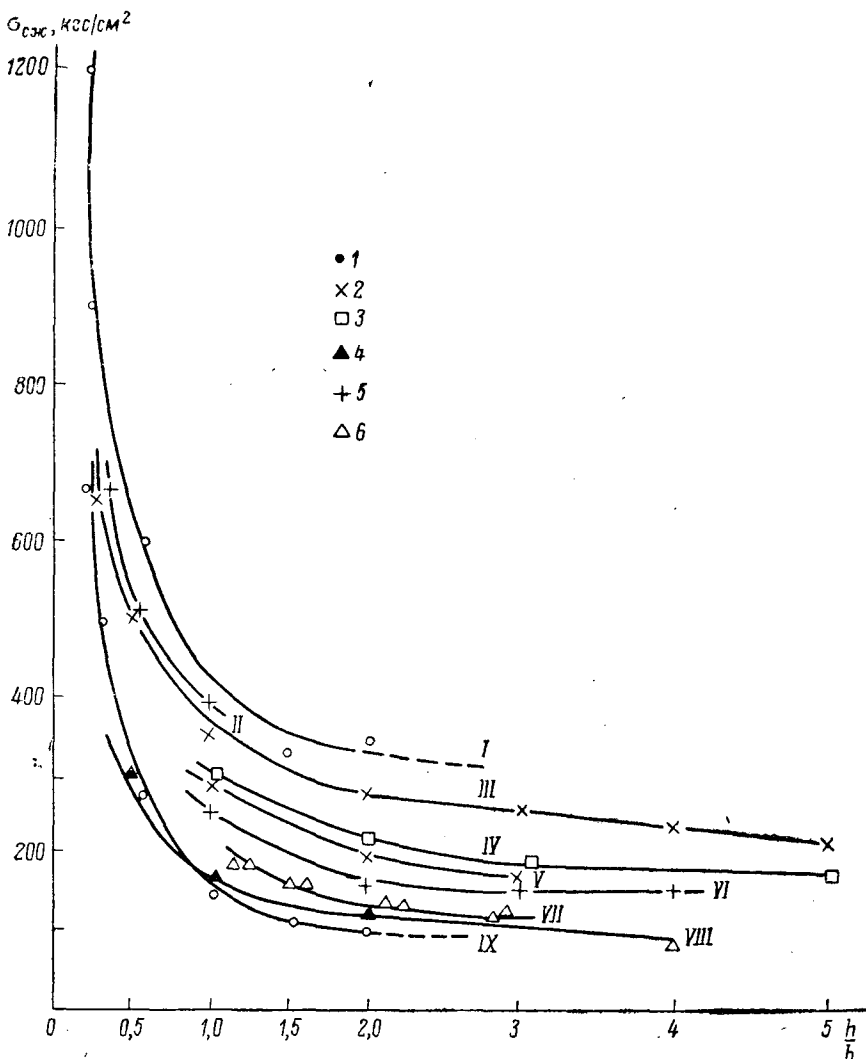


Рис. 6. Зависимость прочности соляных пород при одноосном сжатии от высоты образцов.

I — каменная соль пласта Хессен (образцы цилиндрической формы, $d = 70$ мм); II — белая каменная соль рудника Онка (призматические образцы с основанием 200×200 мм); III—VI — каменная соль (образцы призматической формы с основанием, мм: III — 70×70 , IV — 300×300 , V — 200×200 , VI — 50×50); VII — сильвинит второго пласта I Солигорского рудника (образцы призматической формы с основанием 140×140 мм); VIII — карналлит I Березниковского рудника (образцы призматической формы с основанием 50×50 мм); IX — карналлит пласта Хессен (образцы цилиндрической формы, $d = 70$ мм).
 Данные: 1 — Х. Пфобра и Г. Розетца [181]; 2 — Е. И. Ильницкой с соавторами [113]; 3 — А. М. Пенькова и А. А. Вопилкина [96]; 4 — Г. И. Широ [146]; 5 — М. Стаматиу [122]; 6 — Н. М. Проскурякова [100].

уплотнения вновь увеличивается до значений, превосходящих первоначальные. Такой характер поведения низких образцов при сжатии в работе [113] объясняется влиянием трения о плиты пресса опорных граней образца.

В. Дрейер и К. Борхерт [162], исследуя зависимость прочности разных горных пород при одноосном сжатии от соотношения h/d ,

установили, что постоянство значений $\sigma_{сж}$ для разных пород начинается при η , равном от 2 (для мелафира) до 8 (для каменной соли) (рис. 7). Из приведенных на рис. 7 графиков видно, что с увеличением способности горной породы к деформации или при снижении ее прочности постоянство $\sigma_{сж}$ наступает

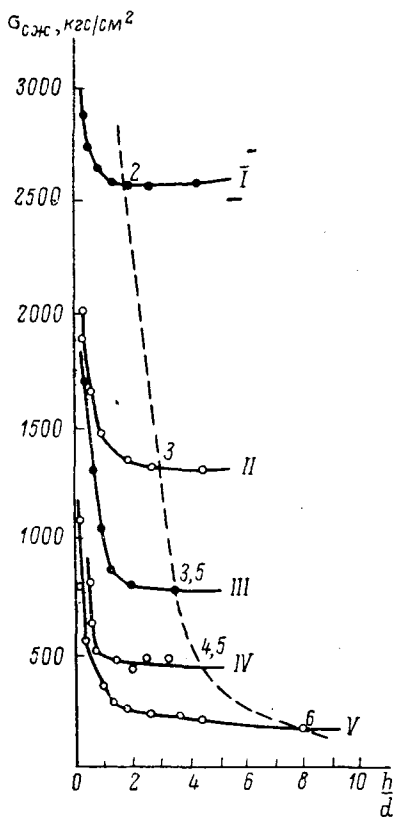


Рис. 7. Изменение прочности образцов горных пород при одноосном сжатии в зависимости от отношения их высоты к ширине [162].

I — мелафир; II — мрамор; III — ангидрит; IV — песчаник; V — каменная соль.

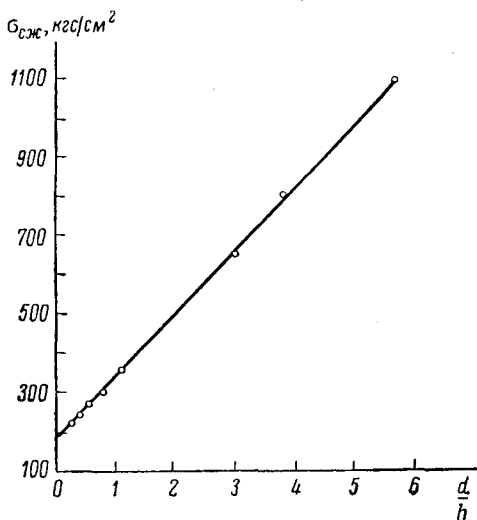


Рис. 8. Зависимость прочности каменной соли при одноосном сжатии от отношения линейных размеров образцов [162].

при большем значении η . Точки начала постоянных значений $\sigma_{сж}$ на графике соединены пунктирной кривой.

Для изучения влияния отношения $\eta = h/d$ на прочность при одноосном сжатии нами были проведены исследования на сильвинитовых образцах цилиндрической и призматической формы, отобранных из калийных пластов первого рудника комбината «Белорускалий». Результаты испытаний приведены на рис. 6. Для сильвинитовых образцов была подтверждена общая закономерность снижения проч-

ности при сжатии с увеличением высоты образцов. В частности, для образцов призматической формы при увеличении отношения $\eta = h/b$ с 1,4 до 2,7 значение $\sigma_{сж}$ изменяется от 320 до 112,3 кгс/см². При обработке данных испытания сильвинитовых образцов с различным отношением h/d была установлена линейная зависимость значений $\sigma_{сж}$ от обратного отношения $-d/h = 1/\eta$. Такая линейная зависимость, например, для сильвинитовых образцов II калийного горизонта первого рудника комбината «Белорускалий» может быть аппроксимирована формулой

$$\sigma_{сж} = 118 + 293,3 d/h, \text{ кгс/см}^2. \quad (4)$$

Линейная зависимость величины $\sigma_{сж}$ от отношения d/h была установлена В. Дрейером и К. Борхертом [162] для цилиндрических образцов каменной соли при значениях d/h от 0,2 до 6 (рис. 8) и аппроксимирована зависимостью

$$\sigma_{сж} = 180 + 164,43 d/h, \text{ кгс/см}^2. \quad (5)$$

Из сопоставления приведенных в настоящем параграфе данных можно установить, что прочность соляных пород при одноосном сжатии независимо от формы поперечного сечения образцов в значительной степени зависит от соотношения их линейных размеров и в первую очередь от отношения высоты к ширине (диаметру). Наибольшие колебания $\sigma_{сж}$ для образцов соляных пород имеют место при изменении h/b от 0,5 до 2. При дальнейшем увеличении этого отношения изменение величин $\sigma_{сж}$ незначительно.

§ 3. Минералогический состав и структура соляных пород

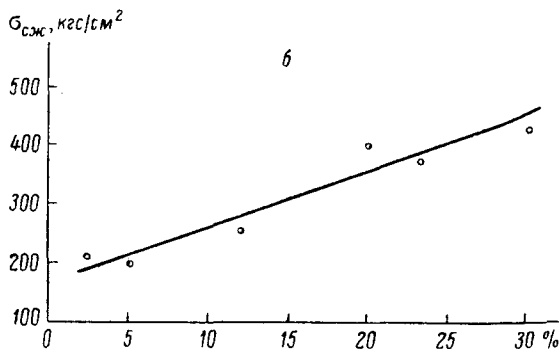
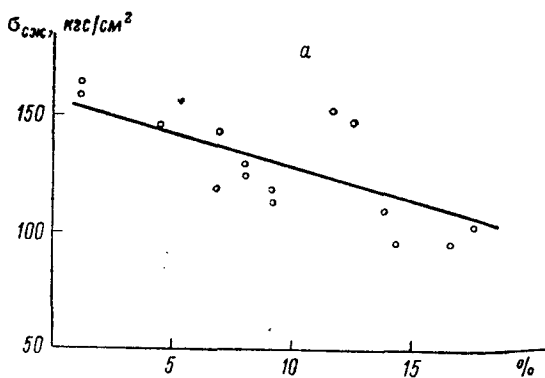
Соляные породы месторождений ископаемых солей представлены обычно смесью отдельных минералов с разным процентным отношением. В силу того, что составляющие соляные породы минералы (галит, сильвинит, карналлит, ангидрит и глинистые породы) обладают различной прочностью, прочность образцов соляных пород будет зависеть от содержания отдельных минералов в них. Поэтому между прочностью кристаллов и встречающихся в природных условиях соляных пород отмечается большая разница, так как в последних важную роль играет прочность составляющих их минералов.

Прочность соляных пород при одноосном сжатии является функцией сцепления между отдельными зернами. Зная структуру и состав соляных пород, можно найти качественные и количественные зависимости их прочности от содержания составляющих минералов.

Я. Я. Яржемский [151, 152] при характеристике минералогического состава соляных пород предлагает различать главные компоненты (50% и более состава), второстепенные минералы (от 5 до 30%),

минералы-примеси (менее 5%) и единичные зерна (менее 1%). Название пород дается по преобладающему компоненту.

Галит и сильвинит из-за сходства структуры и характера разрушения имеют небольшое различие величины прочности при одноосном сжатии. У карналлита самая низкая по сравнению с другими соляными породами прочность при сжатии, а у ангидрита, напротив, наиболее высокое значение $\sigma_{сж}$.



Х. Пфорр и Г. Розетц [181], исследуя соляные породы при одноосном сжатии, установили корреляционную зависимость прочности при сжатии от содержания составляющих породы минералов. Так, содержание тахидрита в карналлите от 0 до 20% вызывает снижение его прочности при сжатии от 160 до 70 кгс/см², а присутствие высокопрочного ангидрита в жесткой каменной соли (0—35%) приводит к возрастанию прочности каменной соли при сжатии от 200 до 500 кгс/см² (рис. 9).

Основные промышленные калийные пласты Старобинского месторождения представлены отдельными пропластками сильвинита и каменной соли, причем сильвинит и каменная соль находятся не в чистом виде,

Рис. 9. Зависимость прочности цилиндрических образцов ($l/d = 1$) карналлита (а) от содержания тахидрита и каменной соли (б) от содержания ангидрита [181].

а представлены смесью KCl и NaCl с различным содержанием. Хотя прочность сильвинита и галита при сжатии не имеет большого отличия, однако разное содержание этих минералов в соляной породе приводит к значительному изменению ее прочности при сжатии. На рис. 10 показана зависимость $\sigma_{сж}$ соляных пород III калийного пласта Старобинского месторождения от содержания в них NaCl и KCl [130]: увеличение содержания в соляных породах KCl от 10 до 55% вызывает снижение $\sigma_{сж}$ от 350 до 285 кгс/см², а увеличение содержания NaCl от 40 до 80% влечет за собой увеличение $\sigma_{сж}$ от 275 до 380 кгс/см².

При характеристике структуры соляных пород необходимо отме-

тить роль трещиноватости. При петрографическом описании образцов соляных пород калийных пластов Старобинского месторождения С. В. Ходькова [130] отмечает, что в них встречаются трещины открытого типа. Эти трещины очень тонкие, в основном не превышают 0,5—1,0 мм, приурочены к отдельным зернам, развиваются параллельно спайности. В каменной соли трещины встречаются чаще, чем в сильвините и карналлите, где они практически отсутствуют. Очевидно, в карналлите отсутствие трещин объясняется его способностью

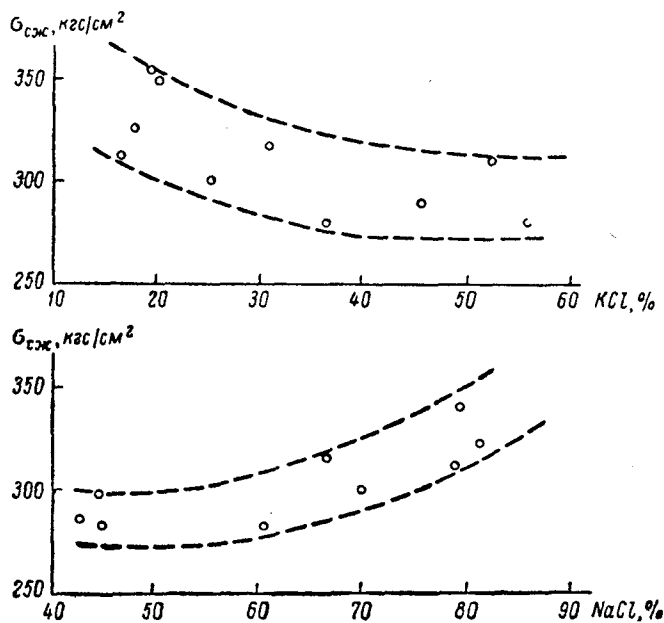


Рис. 10. Зависимость прочности сильвинитовых образцов при одноосном сжатии от содержания в них KCl и NaCl.

к быстрой перекристаллизации. Можно полагать, что такая незначительная трещиноватость соляных пород не будет оказывать сколько-нибудь существенного влияния на их прочность и характер разрушения.

В качестве примесей в каменной соли Старобинского месторождения присутствуют глинистое вещество, ангидрит, карбонатные минералы, располагающиеся обычно в промежутках между зернами галита, а также вдоль «зон роста» кристаллов, параллельно граням куба закономерно располагаются газово-жидкие скопления различных размеров [41]. Скопления глинистого материала и ангидрита, располагаясь в промежутках между зернами галита, сильвина или карналлита, обволакивают их, образуя так называемые петельчатые структуры.

Так как глинистое вещество, присутствующее в каменной соли и сильвините, обладает большой гигроскопичностью, это оказывает существенное влияние на прочность соляных пород и, следовательно, устойчивость горных выработок. Нами были выполнены испытания на сжатие 20 образцов кубической формы (размер граней 350 мм), отобранных с III калийного горизонта (слой III—IV) I Солигорского рудника. Средний размер зерен галита 7—10 мм, содержание глинистого вещества 0,5—3%. На рис. 11 показаны зависимость прочности образцов каменной соли при сжатии от содержания глинистого вещества и явно выраженная тенденция снижения прочности на сжатие

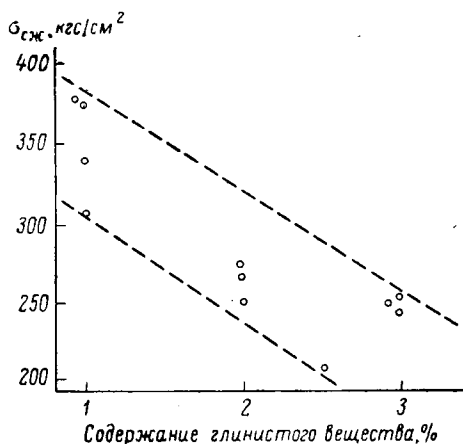


Рис. 11. Зависимость прочности каменной соли (кубические образцы $350 \times 350 \times 350$ мм) при одноосном сжатии от содержания в них глины.

при увеличении содержания в образцах глины. Значительное содержание глины в соляных породах Старобинского месторождения вызывает существенное изменение их прочностных и деформационных характеристик.

Следовательно, прочность соляных пород в значительной степени определяется их минералогическим составом, что необходимо учитывать при переносе данных лабораторных исследований прочностных характеристик на природу.

Кроме минералогического состава важным фактором, определяющим прочность пород при сжатии, является структурный

состав соляных пород, под которым понимается величина, форма, взаимосвязь и строение отдельных зерен, составляющих породу минералов. Определяющим из всех перечисленных факторов является величина зерен или отношение среднего поперечного размера образца к среднему диаметру зерен.

При характеристике структур соляных пород по размерам зерен В. Н. Щербина [41] выделяет микрозернистую структуру (с размером зерен менее 1 мм), мелкозернистую (размер зерен от 1 до 3 мм), среднезернистую (с размером зерен от 3 до 5 мм), крупнозернистую (размер зерен 5—10 мм) и гигантозернистую (с размером зерен свыше 10 мм).

Х. Пфорт и Г. Розетц [181] на образцах цилиндрической формы ($d = 70$ мм) разнoзернистой каменной соли пласта Стассфурт установили, что прочность при одноосном сжатии увеличивается от 250 у монокристаллического образца до 450 кгс/см^2 при изменении отношения диаметра образца (d) к среднему размеру составляющих его зерен (δ) до 30 (рис. 12). При дальнейшем увеличении этого отношения кривая асимптотически приближается к значению прочности

500 кгс/см². Х. Пфорр' и Г. Розетц [181] на основании выполненных исследований полагают, что при испытаниях образцов каменной соли отношение d/δ должно быть порядка 30. Для каждой соляной породы эта величина различна, так как влияние размеров зерен на прочность зависит не от их формы, а от связи между зернами.

Величина зерен влияет на прочность соляных пород по двум причинам: а) с увеличением размеров кристалла его прочность снижается; б) с ростом размеров кристаллов существенную роль начинает играть спайность.

Разрушение кристаллов происходит вдоль плоскости спайности; при этом торможение на границе большого кристалла будет меньше, чем у более мелких кристаллов.

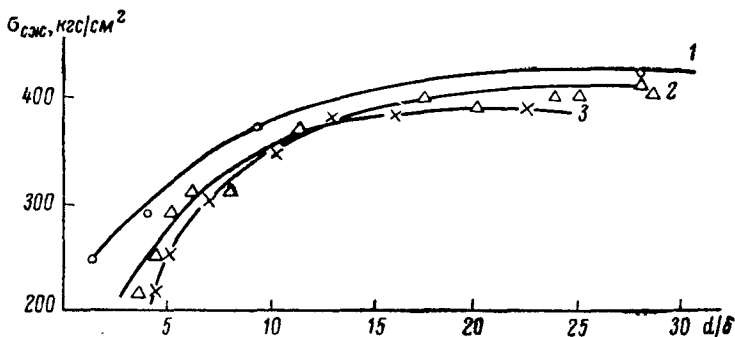


Рис. 12. Изменение прочности соляных пород при сжатии от отношения поперечного размера образца d к среднему размеру составляющих его зерен δ .

Образцы: 1 — цилиндрической формы ($d = 70$ мм) каменной соли пласта Стассфурт [181]; 2 — кубической формы каменной соли слоя III—IV I Солигорского рудника (по данным Н. М. Проскурякова); 3 — то же, для сильвинита II калийного горизонта.

На рис. 12 показана зависимость прочности при сжатии от отношения поперечного размера образца к среднему диаметру зерен для образцов кубической формы каменной соли и сильвинита. Прочность образцов каменной соли увеличивается с 213 до 410 кгс/см² и для образцов сильвинита от 215 до 380 кгс/см² при увеличении отношения d/δ от 3 до 28. Интересно отметить, что полученная нами зависимость прочности образцов каменной соли и сильвинита калийных пластов Старобинского месторождения при сжатии от размера составляющих их зерен хорошо согласуется с данными немецких исследователей [161], при этом увеличение отношения d/δ для образцов сильвинита больше 20 и для образцов каменной соли больше 25 практически не оказывает влияния на величину $\sigma_{сж}$. Наибольшее изменение прочности соляных пород при сжатии имеет место при отношениях d/δ от 3 до 15. Указанные отношения поперечного размера образца к среднему диаметру зерен могут иметь место при испытании образцов малых размеров или образцов крупнокристаллических соляных пород.

Следует отметить, что на прочность кристаллических соляных образцов значительно влияет направление приложения нагрузки по отношению к плоскостям спайности. Так, на образцах каменной соли пласта Стассфурт было установлено [161], что при нагрузке на образец, перпендикулярной к плоскостям спайности, его прочность была на 3—38% (в среднем на 10%) выше по сравнению с приложением нагрузки параллельно плоскости спайности.

В. Гимм [166] установил, что для получения представительных данных при испытаниях образцов соляных пород на сжатие необходимо выбирать образцы с соотношением их среднего поперечного размера и среднего размера составляющих зерен не менее 30. Эффект зависимости прочности при сжатии особенно проявляется на соляных породах (по сравнению с другими горными породами) и объясняется, по мнению В. Дрейера [160], тем, что прочность образцов соляных пород с увеличением кристаллов уменьшается, так как большие кристаллы имеют большее число дефектов и меньшую прочность.

Влияние среднего размера зерен на прочность при сжатии нами было установлено при испытании образцов кубической формы (с размерами граней от 30 до 150 см) каменной соли и сильвинита Старобинского месторождения.

Прочность при сжатии для карналлита, обладающего мелкокристаллической структурой и большей по сравнению с галитом и сильвинитом однородностью, мало зависит от величины составляющих зерен. Большое влияние на прочность карналлита при сжатии оказывают включения и процентное содержание других минералов.

Другими структурными показателями, определяющими прочность соляных пород при сжатии, является вид связи между отдельными зернами. Текстура характеризует не отдельное зерно, а комплекс одинаковых минералов. Соляным породам присущи два типа структур — массивная и слоистая. Я. Я. Яржемский [152] в зависимости от мощности слоев предлагает подразделять слоистую структуру на 7 подклассов. Анизотропия массива соляных пород будет зависеть от их структуры, что нужно учитывать при определении прочности пород при сжатии, особенно для слоистых структур.

Х. Пфорт и Г. Розетц [181] отмечают, что при определении прочности неоднородных соляных пород необходимо обращать особое внимание на наличие кизеритовых, глинистых и ангидритовых прослоек в каменной соли и сильвините. Наличие даже 5-миллиметровых глинисто-ангидритовых пропластков в каменной соли повышает ее прочность.

В работе [41] при изучении петрографии основных разновидностей каменной соли и сильвинита Старобинского месторождения указано, что наиболее характерной структурой является разномзернистая, при которой в пределах одного прослоя размер зерен галита колеблется от сотых долей миллиметра до 1 см и более (преобладают зерна средних размеров — 2—6 мм). Прослои каменной соли имеют мощность от 2 до 6 см и разделены прослоями глины мощностью от 1—2 мм до 3—7 см. Через определенные интервалы в пачках каменной

соли встречаются более мощные слои глины (от 5 до 30, чаще 6—15 см).

В работе [96] описано определение прочности каменной соли на образцах призматической формы с основанием 20×20 см, высотой от 20 до 100 см и ориентировкой плоскостей слоистости под углом $75\text{--}90^\circ$ к горизонтали. При этом было установлено снижение прочности образцов при одноосном сжатии до 35% по сравнению с образцами с горизонтальной ориентировкой слоистости.

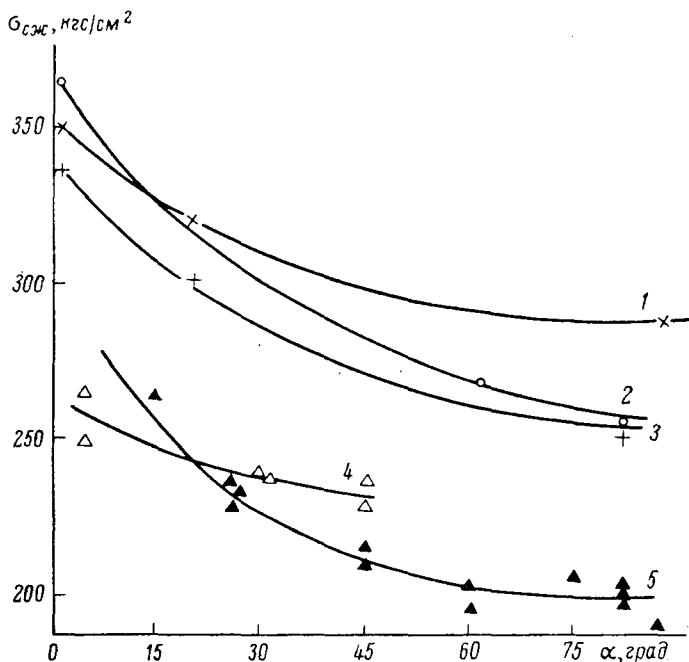


Рис. 13. Изменение прочности каменной соли при одноосном сжатии в зависимости от угла напластования α для образцов разных размеров.

1—3 — образцы размером $10 \times 10 \times 10$ см: 1 — серая каменная соль, 2 — пестрая каменная соль, 3 — белая каменная соль [122]; 4 — образец размером $120 \times 60 \times 80$ см; 5 — образец размером $20 \times 40 \times 60$ см [96].

На рис. 13 представлены графики зависимости прочности при одноосном сжатии призматических образцов каменной соли от угла напластования, построенные по данным [96]. На графиках выражена явная тенденция снижения прочности на сжатие при увеличении угла напластования (по отношению к горизонтам) от 0 до 20° : Наименьшей прочностью при сжатии обладали образцы, для которых плоскости слоистости были ориентированы вертикально ($\alpha = 90^\circ$) и совпадали с направлением действия приложенной силы. Так, для образцов с размерами $20 \times 60 \times 80$ см при $\alpha = 45^\circ$ прочность при сжатии снижается от 260 кгс/см², при $\alpha = 0^\circ$ — до 240 кгс/см², а для образцов

каменной соли с размерами $20 \times 40 \times 60$ см от 270 (при $\alpha = 0^\circ$) до 200 кгс/см² (при $\alpha = 90^\circ$). Характерно, что при испытании образцов с размерами $20 \times 60 \times 60$ см, т. е. при высоте, равной наибольшей стороне основания, уменьшения прочности при одноосном сжатии при изменении угла напластования не наблюдалось. По-видимому, для образцов с большими поперечными размерами и небольшой высотой влияние слоистости на прочность образцов при сжатии будет незначительно. Кроме того, в калийных пластах слоистость не выдержана, а имеет сложный волнообразный характер с различными амплитудами колебания.

Г. И. Широко [146], рассматривая влияние угла напластования на прочность при одноосном сжатии, отмечает, что расположение плоскостей напластования по отношению к действующей сжимающей силе должно учитываться при определении $\sigma_{сж}$ и расчетах прочных элементов систем разработки. В результате обработки данных экспериментальных испытаний глинистых, песчано-глинистых сланцев, песчаника и каменной соли Г. И. Широко получил следующую формулу:

$$\sigma_{сж}^\perp = 1,5\sigma_{сж}^\parallel, \text{ кгс/см}^2, \quad (6)$$

где $\sigma_{сж}^\perp$ — прочность на сжатие при испытании образцов перпендикулярно к напластованию ($\alpha = 0$), кгс/см²; $\sigma_{сж}^\parallel$ — прочность на сжатие при испытании образцов параллельно напластованию ($\alpha = 90^\circ$), кгс/см².

Для определения промежуточных значений прочности соляных пород при одноосном сжатии ($\sigma_{сж}$) в зависимости от угла напластования в рассматриваемой работе [146] предложена эмпирическая формула

$$\sigma_{сж} = \frac{\sigma_{сж}^\perp}{\left(\frac{\alpha}{\pi} + 1\right)}, \text{ кгс/см}^2, \quad (7)$$

где α — угол напластования, рад.

По данным исследований М. Стаматиу [122] для месторождения Ока Мурешулуй, значения прочности каменной соли при сжатии в зависимости от угла напластования различны для солей с различными петрографическими свойствами (рис. 13). Так, для белой каменной соли различие значений $\sigma_{сж}$ при испытаниях образцов параллельно напластованию и перпендикулярно к нему составляет 82 (32%), для пестрой — 109 (43%) и для серой каменной соли — 60 кгс/см² (21%). Испытания проводились на образцах кубической формы с размерами $10 \times 10 \times 10$ см. Для месторождения Тыргу Ока отклонения значений $\sigma_{сж}^\perp$ и $\sigma_{сж}^\parallel$ при испытаниях таких же образцов составили соответственно 10 (для белой каменной соли), 5 (для пестрой) и 1% (для серой).

В заключение необходимо отметить, что при определении прочности соляных пород при одноосном сжатии следует учитывать их петрографические особенности, к важнейшим из которых относятся

количественный минеральный состав, величина зерен главных компонентов и степень однородности (слоистости).

Для соляных пород, состоящих из одного минерала, оказывается обычно достаточным определение величины зерен, так как остальные петрографические свойства (параметры) оказывают несущественное влияние на прочность при одноосном сжатии. Особо следует отметить карналлитовые породы (состоящие из одного минерала), для которых кроме определения средних размеров, составляющих образец зерен, необходимо описывать тип структуры.

§ 4. Влияние условий на контактах на характер разрушения и величину прочности

Для различных горных пород установлена зависимость характера разрушения и величины прочности при сжатии от условий на контактах образца с плитами пресса [66, 113]. Такая зависимость наблюдается при испытании соляных пород.

М. Кулбауф [167] при определении прочности образцов каменной соли при одноосном сжатии и различных условиях на контактах образца установил, что образец кубической формы с длиной грани 5,08 см при обычных испытаниях имеет значение $\sigma_{сж} = 350$ кгс/см². Характер деформации и значение прочности при сжатии существенно изменяются при снижении сцепления на контактах образца с плитами пресса, в частности при использовании прокладок, смазанных графитом. При этом значение $\sigma_{сж}$ снижается до 175 кгс/см² (рис. 14).

Изменение отношения ширины образца к высоте (до 2/1 вместо 1/1) без применения смазки на торцах вызывает увеличение прочности при сжатии до 495 кгс/см².

Ф. В. Уленбекер [195] испытывал образцы каменной соли и карналлита с использованием на контактах образцов металлических зубчатых прокладок (глубина насечки металлических прокладок 0,2 мм). При использовании металлических зубчатых прокладок для образцов кубической формы каменной соли (размер граней 10 см) было установлено возрастание прочности при сжатии до 403 против 310 кгс/см² для образцов без прокладок, что подтверждается натурными исследованиями (рис. 14).

При нагрузках $\sigma_{сж} = 1400$ кгс/см² разрушение образца не было зафиксировано. Более близким к натурным условиям, по данным работы [195], считается испытание образцов соляных пород на сжатие, когда к торцевым частям образцов приклеиваются специальным клеем плоские плиты каменной соли (карналлита) с размерами 15 × 15 × 15 см, имитирующие боковые породы. Плиты карналлита, приклеенные к основаниям образцов, с помощью специальных рамок сжимались до 30 кгс/см². После этого образцы испытывались на прессе на одноосное сжатие. По такой схеме было испытано 120 образцов каменной соли и карналлита; результаты испытаний показаны на рис. 15.

Из рис. 15 видно, что прочность образцов при сжатии также зависит от отношения высоты образца к ширине и изменяется для образцов каменной соли от 350 (при $h/b = 1/1$) до 1000 кгс/см² (при $h/b = 1/3,3$), для образцов карналлита (содержание карналлита в образцах равно 65%) — от 275 (при $h/b = 1/2$) до 1100 кгс/см² (при $h/b = 1/6$).

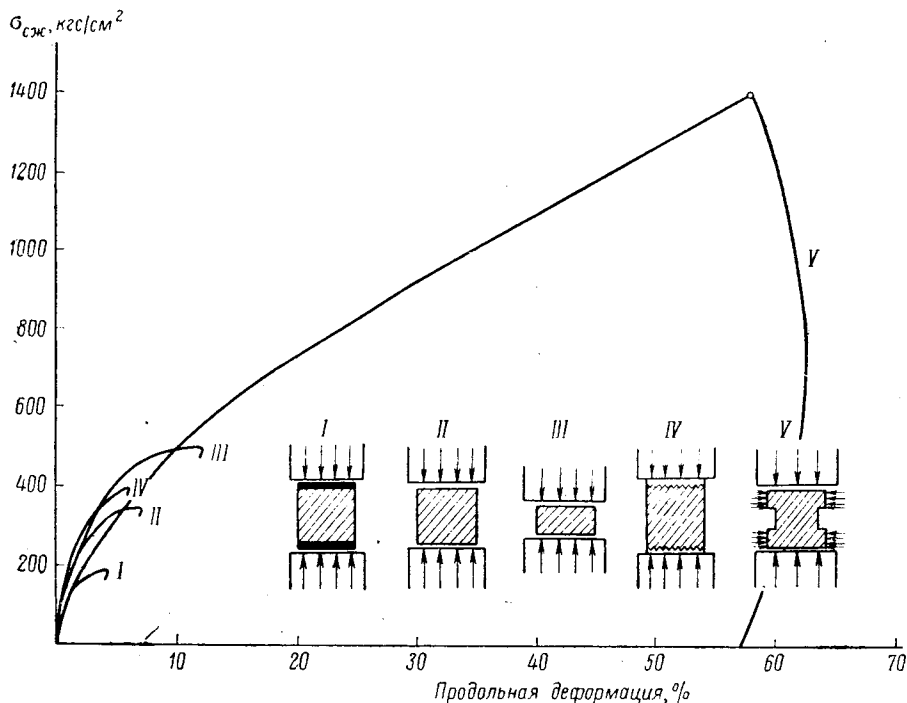


Рис. 14. Графики «напряжение — деформация» при испытании образцов каменной соли на одноосное сжатие при различных условиях на контактах.

I — с прокладками, смазанными графитом при $h/b = 1$; II — без смазки на торцах при $h/b = 1$; III — то же, при $h/b = 2$; IV — с металлическими зубчатыми прокладками на торцах при $h/b = 1$; V — со стальными обоймами на торцах образца при $h/b = 2$.

Нами были выполнены испытания образцов каменной соли на сжатие с применением парафиновой смазки на контактах образца с плитами пресса для различных отношений высоты образца к ширине ($b = 4$ см). Образцы отбирались с III калийного горизонта Старобинского месторождения (слой III—IV), изготовлялись с квадратным поперечным сечением и имели средний размер зерен от 5 до 10 мм. Результаты испытаний приведены на рис. 16, где показано, что использование парафиновой смазки на плоскостях давления вызывает снижение прочности с 30 кгс/см² для образцов с отношением $h/b = 3$ до 630 кгс/см² для образцов с отношением $h/b = 0,5$. Применение парафиновой смазки вызывает большее снижение прочности при сжатии у низких образцов, а с увеличением высоты образца влияние

смазки на плоскостях давления на прочность при сжатии уменьшается; при этом величина $\sigma_{сж}$ стремится к предельному значению, установленному на подобных образцах соляных пород без смазки.

Полученные нами данные хорошо согласуются с данными исследований Г. Н. Кузнецова [66] и Г. И. Ширко [146]. Так, по данным

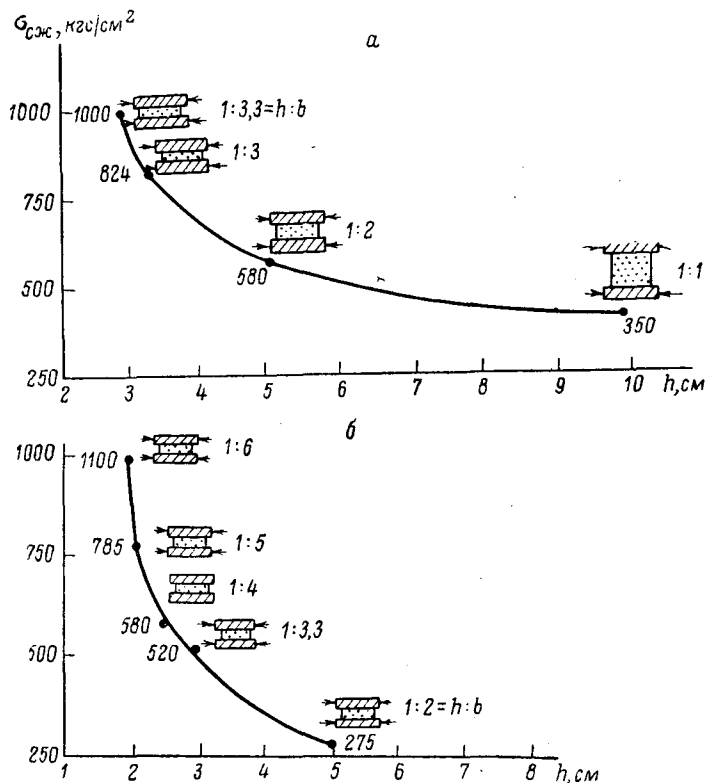


Рис. 15. Зависимость прочности образцов каменной соли (а) и карналлита (б) при одноосном сжатии от отношения их высоты к ширине с приклеенными на торцах напряженными плитами соляных пород.

Г. Н. Кузнецова [66], испытывавшего образцы каменной соли Артемовского месторождения с отношением h/b от 0,5 до 4, снижение $\sigma_{сж}$ за счет применения смазки на плоскостях давления для образцов кубической формы составило 50% (по сравнению с кубиковой прочностью без смазки) и для призматических образцов ($h/b = 3$) — 30%.

Р. Квапил [175], изучая характер разрушения горных пород (в том числе и соляных) и их прочность при одноосном сжатии, также установил, что смазка на плоскостях давления вызывает снижение $\sigma_{сж}$ примерно на 30—50%.

В работе [113] отмечено, что изменением контактных условий (использование различных типов прокладок) при испытаниях горных

пород на сжатие можно изменить прочность образцов в 5 раз и более. Значения прочности соляных пород при одноосном сжатии в зависимости от условий на контактах при их испытании по данным различных исследователей приведены в табл. 8.

Из данных табл. 8 следует, что применение различных видов смазки на контактах образца с плитами пресса при испытаниях на сжатие приводит к значительному снижению $\sigma_{сж}$, причем интенсивность уменьшения последней зависит от соотношения вертикального и поперечного размеров образцов. Для высоких образцов (при $h/b \geq 3$)

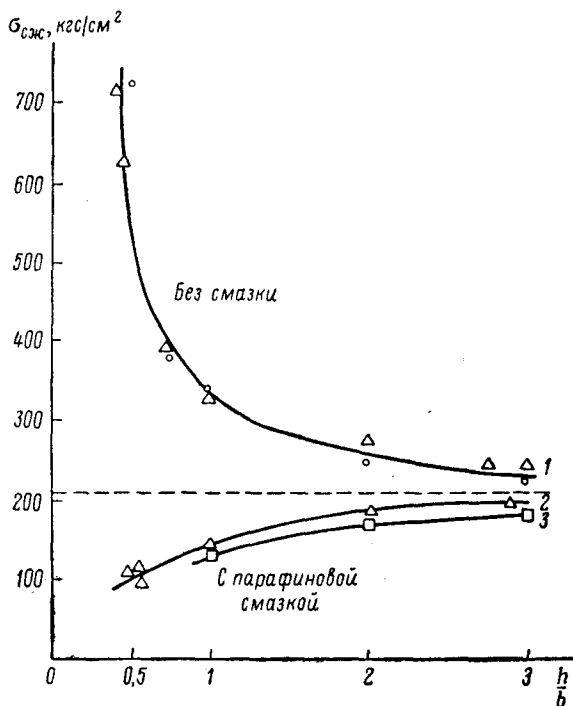


Рис. 16. Зависимость прочности образцов каменной соли при одноосном сжатии от условий на контактах по данным разных исследователей.

1 — Г. И. Широ [146] и Н. М. Проскуракова; 2 — Н. М. Проскуракова; 3 — Г. Н. Кузнецова [66].

влияние смазки на контактах снижается и $\sigma_{сж}$ стремится к предельному значению. Напротив, увеличение сцепления образцов на контактах с плитами пресса (применение стальных зубчатых прокладок, приклейка образцов к напряженным плитам соляных пород и использование на торцах образцов стальных обжимов) вызывает увеличение $\sigma_{сж}$ в несколько раз по сравнению с обычными условиями испытания.

При подземной разработке калийных и каменносоляных месторождений в толще соляных пород часто встречаются глинистые прослойки мощностью от нескольких миллиметров до десятков сантиметров или отличающиеся по прочности от соляных пород прослойки, которые под нагрузкой снижают сцепление между отдельными слоями и оказывают на устойчивость целиков воздействие, аналогичное испытанию образцов со смазкой на контактах. Устойчивость горных выра-

Зависимость прочности образцов соляных пород
при одноосном сжатии от их формы и условий на контактах

Порода	Условия на контактах	Форма поперечного сечения образца	Прочность при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, кгс/см ² , при отношении высоты образца к ширине						Исследователь
			0,25	0,5	1,0	2	3	4	
Каменная соль	Без смазки	Прямоугольная	—	725	342	249	223	—	} Г. И. Ширко [147]
Карналлит	»	»	712	403	230	114	—	80	
Каменная соль	»	Квадратная	—	—	350	—	—	—	} М. Кулбауф [167]
Сильвинит	»	»	—	—	132	162	181	—	
Каменная соль	Парафиновая смазка	»	—	—	175	—	—	—	Г. Н. Кузнецов [66]
То же	Графитовая »	»	—	—	147	187	198	—	М. Кулбауф [167]
»	Парафиновая »	»	203	101	403	330	—	—	Н. М. Проскуряков
»	Стальные зубчатые прокладки	»	1680	700	—	—	—	—	} Ф. В. Уленбекер [195]
Карналлит	То же	»	770	355	200	165	—	—	
Каменная соль	Напряженные приклеенные к основаниям образца плиты каменной соли	»	1160	580	—	—	—	—	
Карналлит	То же	»	580	275	—	—	—	—	
Каменная соль	Стальные обоймы на торцах образца	»	—	1400	—	—	—	—	М. Кулбауф [167]

боток и несущая способность целиков в таких условиях значительно ухудшаются.

Как отмечает В. Гимм [166], глинистые прослойки при обработке калийного пласта Стассфурт в районе Южного Гарца существенным образом снижают устойчивость горных выработок, вызывают расслоение и обрушение пород кровли. Аналогичное воздействие на процессы деформаций и расслоений пород кровли, а также на несущую способность целиков оказывают глинистые прослойки при обработке

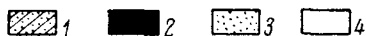
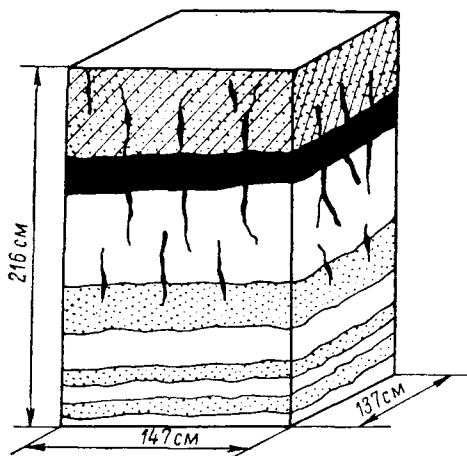


Рис. 17. Характер разрушения обр. 22 из верхней пачки II горизонта по глинистому прослойку при испытаниях на сжатие.

1 — сильвинит с каменной солью; 2 — глина; 3 — каменная соль; 4 — сильвинит.

калийных пластов Старобинского и Верхнекамского месторождений. Действие, подобное смазке образцов на контактах, может оказывать прослоек карналлита, расположенный в соляных породах более высокой прочности (каменной соли, сильвинита), особенно при его увлажнении (карналлит является сильно гигроскопичной породой) или длительном воздействии нагрузки.

Нами были выполнены исследования прочностных характеристик образцов соляных пород призматической формы неоднородной структуры для калийных пластов Старобинского месторождения. Образцы были представлены прослойками каменной соли, сильвинита и глины. При этом глинистые прослойки, расположенные в различных сечениях

по высоте призматических образцов, играли роль пластичного прослойка и являлись обычно местом начального разрушения образца и образования системы параллельных трещин (рис. 17). В местах контакта глинистых прослойков с соляными породами при испытании образцов на одноосное сжатие происходило образование местных выколов, вспучивание и выдавливание глинистого материала. На рис. 18 показан типичный характер разрушения соляного целика с глинистым прослойком в его основании.

Если смазка расположена не по всей площади давления, а по одной из граней или на углу образца, то это вызывает местный откол части образца, где сцепление с плитами пресса меньше. В результате образования местного откола прочность образца снижается и разрушение, как правило, происходит по ослабленному сечению. В связи с этим интересно отметить, что проведение горных выработок в массиве соляных пород сопровождается обнажением глинистых прослойков.

В силу гигроскопичности глины происходит увлажнение и разрушение глинистого прослойка на некотором расстоянии от обнажения. Развитие процессов деформаций целиков вызывает образование местных выколов по глинистому прослойку, причем характер и интенсивность таких местных выколов зависят от мощности глинистых прослоек, влажности атмосферного воздуха и интенсивности деформаций целика от нагрузки.

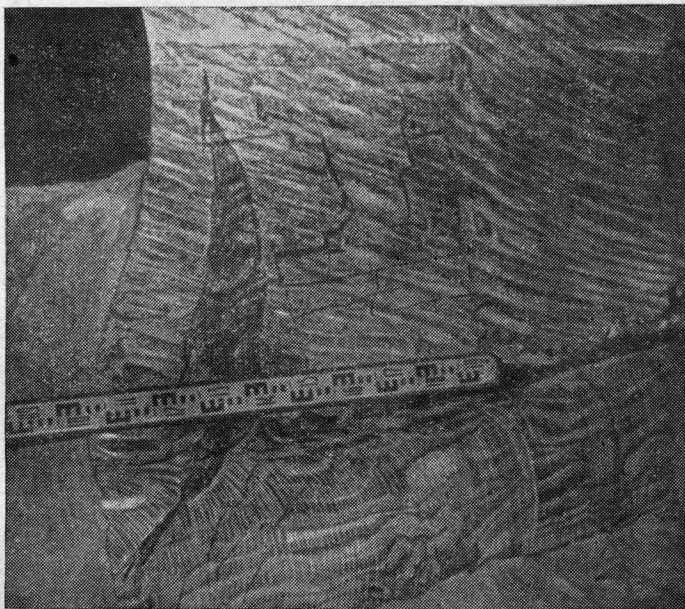


Рис. 18. Характерное разрушение целика по глинистому прослойку, расположенному в основании (пласт Кр. II, II Березниковский рудник).

ВНИМИ были проведены исследования по изучению влияния контактных условий на прочность образцов горных пород при одноосном сжатии. В работе [60] изложен метод испытаний образцов цилиндрической формы горных пород на сжатие при однородном напряженном состоянии, которое достигается применением на торцах низко модульных прокладок, заключенных в жесткие металлические обоймы. Перед испытанием прокладки уплотняются на прессе под нагрузкой, большей значения $\sigma_{сж}$ для испытываемой породы, и зажимаются под этой нагрузкой гайкой. Результаты испытания образцов с такими прокладками позволили получить равномерные деформации по всей высоте образца и значение $\sigma_{сж}$, не зависящее от отношения h/b . Значение прочности испытываемых образцов при сжатии с применением низко модульных напряженных прокладок несколько выше,

чем $\sigma_{сж}$ для образцов при обычных испытаниях при отношении $h/b \geq 2$. Аналогичные результаты были получены и при испытании образцов каменной соли.

§ 5. Скорость приложения нагрузки

Механические процессы, протекающие при разработке соляных и калийных месторождений, вызываются различной по скорости приложения нагрузкой. При разных технологических процессах имеют место разные режимы нагрузки соляных горных пород, отличающиеся друг от друга на 10—20 порядков. Так, процессы деформаций пород в зоне влияния одиночной выработки развиваются в течение весьма длительного промежутка времени; при этом имеют место пластические деформации. При использовании буро-взрывного способа выемки соляных пород возникают динамические нагрузки. При взрывании скорость приложения нагрузки достигает 10 000 м/сек, а скорость распространения упругих волн — 800—5000 м/сек. При статических испытаниях соляных горных пород скорость приложения нагрузки около 0,2—10 мм/мин [5—12 кгс/(см²·сек)].

Рассмотрение характера разрушения и прочности соляных пород в зависимости от скорости приложения нагрузки имеет важное значение при оценке динамических проявлений горного давления в калийных шахтах и, в частности, для горных ударов и выбросов соли и газа.

Подробный анализ исследований процесса нагрузки горных пород на прочность и деформируемость при сжатии с различными скоростями нагружения приведен в работе [149]. На основании выполненных экспериментов в работе показано, что прочность горных пород и вид зависимости «напряжение — деформация» являются функцией скорости нагружения, при этом в одних случаях с увеличением скорости приложения нагрузки значение $\sigma_{сж}$ возрастает, в других, наоборот, снижается.

В. Дрейер [161], исследуя зависимость прочности образцов каменной соли при сжатии от скорости приложения нагрузки на образцах одного размера, установил некоторое повышение прочности при увеличении скорости нагружения, на образцах другого размера такой зависимости не было получено. В другой работе В. Дрейера [162] приведены результаты исследований прочности каменной соли при сжатии со скоростью приложения нагрузки от 0,5 до 810 кгс/(см²·мин). При этом для образцов каменной соли было установлено увеличение прочности при сжатии с 306 до 351 кгс/см², т. е. на 15%, и получена следующая аналитическая зависимость $\sigma_{сж}$ от скорости приложения нагрузки v_n :

$$\sigma_{сж} = 358 - \frac{37,6}{v_n + 0,458} \quad (8)$$

В работе [181] описаны результаты испытаний цилиндрических образцов карналлита и каменной соли ($l = 140$ мм, $d = 70$ мм)

при различных скоростях приложения нагрузки. На торцах образцов устанавливались металлические обоймы.

На рис. 19, а показаны результаты испытаний образцов обломочного карналлита из рудника им. Маркса и Энгельса при пяти различных скоростях нагружения. Как видно из рис. 19, а, пластические деформации образцов значительно увеличиваются с уменьшением скорости приложения нагрузки, а при больших скоростях нагрузки карналлит ведет себя как «упругое тело», при этом упругие свойства увеличиваются с возрастанием скорости приложения нагрузки. Прочность при сжатии карналлитовых образцов понижается с уменьшением скорости приложения нагрузки. Существует, очевидно, предел изменения скорости приложения нагрузки [в интервале 1—20 кгс/(см²·сек)], ниже которого изменение прочности карналлита при сжатии будет незначительным.

Аналогичные исследования были проведены на образцах каменной соли (рис. 19, б) пласта Верра, которые показали, что даже при относительно высокой скорости нагружения каменная соль проявляет пластические деформации. Прочность при сжатии для образцов каменной соли понижается с увеличением скорости приложения нагрузки.

Таблица 9

Прочность и деформации соляных пород при различной скорости их нагружения [181]

Порода	Скорость нагружения v , кгс/(см ² × сек)	Кол-во испытанных образцов	d , мм	l/d	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	Относительная продольная деформация ϵ , %
Карналлит	110	9	70	2.0	177	0.14
»	25	10	70	2.0	163	0.17
»	4	6	70	2.0	143	0.26
»	0,02	4	70	2.0	149	1.15
»	0,007	6	70	2.0	142	1.60
Каменная соль (Верра)	80	9	70	2.0	190	0.87
То же	20	8	70	2.0	208	0.98
»	2	6	70	2.0	226	1.22
»	0,02	4	70	2.0	300	2.10
»	21	2	55	1.5	237	1.25
»	7	11	55	1.5	210	1.51
»	27	3	55	1.5	270	1.49
»	7	7	60	1.5	256	2.11
»	7	2	56	1.5	276	2.38
»	7	2	56	1.5	227	2.80
»	2	7	78	1	259	3.17
»	2	40	78	1	331	3.43
Карналлит	7	24	70	1	129	0.74
»	7	8	70	1	153	0.62
»	7	12	70	1	113	0.87
Песчаник	27	2	60	1	576	0.46

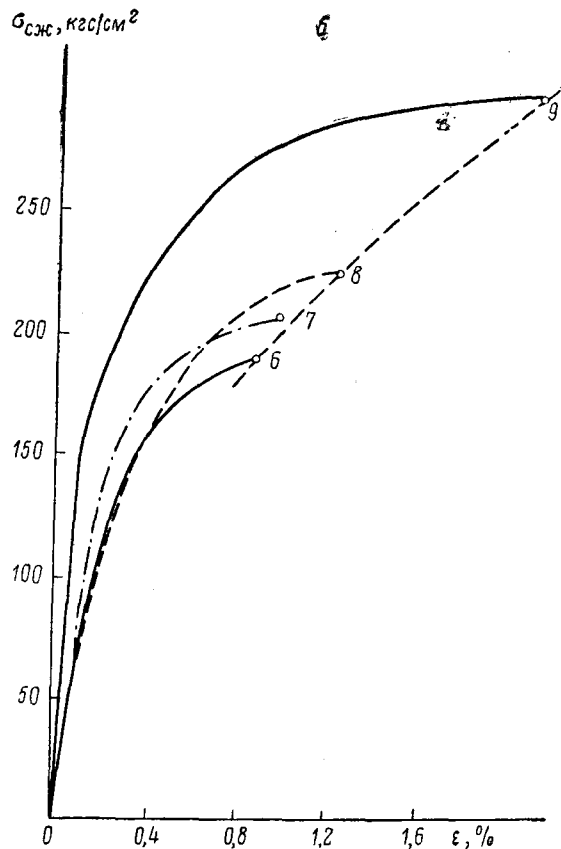
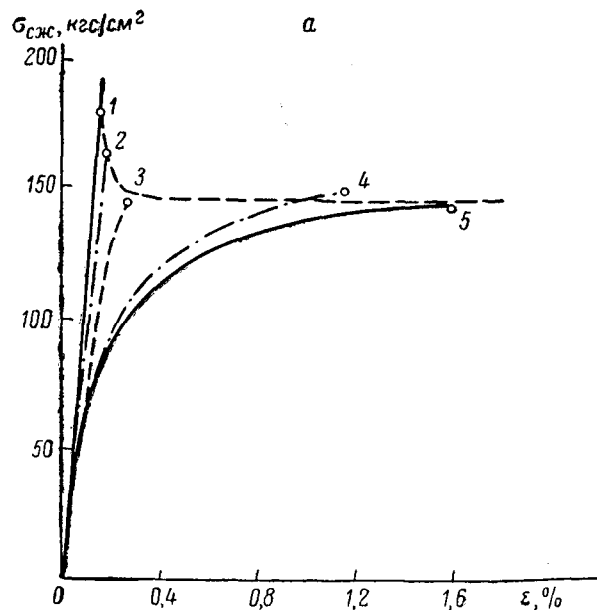


Рис. 19. Изменение прочности карналлита (а) и каменной соли (б) при одноосном сжатии в зависимости от скорости приложения нагрузки [181].

Скорость приложения нагрузки, кгс/(см² · сек): 1 — 110; 2 — 25; 3 — 4; 4 — 0,02; 5 — 0,0072; 6 — 80; 7 — 20; 8 — 2,5; 9 — 0,02.

Подобная тенденция была отмечена В. Дрейером [160] при испытании образцов каменной соли из пласта Стассфурт. Очевидно, для каменной соли большую роль играет ее упрочнение при небольших скоростях приложения нагрузки или пластическом течении.

В табл. 9 приведены значения прочности и предельных деформаций разрушения образцов соляных пород при различных скоростях их нагружения. Из сопоставления этих данных видно, что при одинаковых условиях испытания предельные деформации разрушения для образцов карналлита в 4 раза меньше по сравнению с таковыми

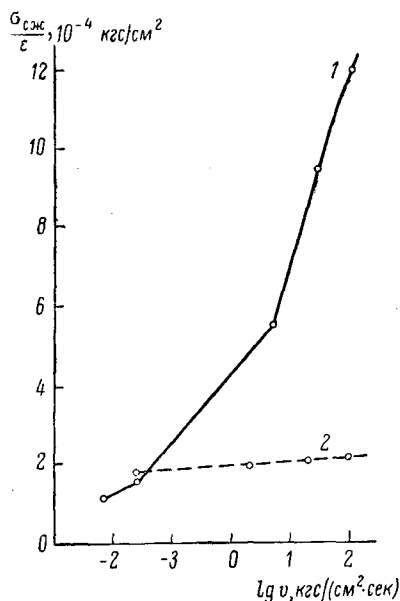


Рис. 20. Зависимость отношения прочности при сжатии и деформации разрушения соляных пород от скорости приложения нагрузки.

1 — карналлит; 2 — каменная соль.

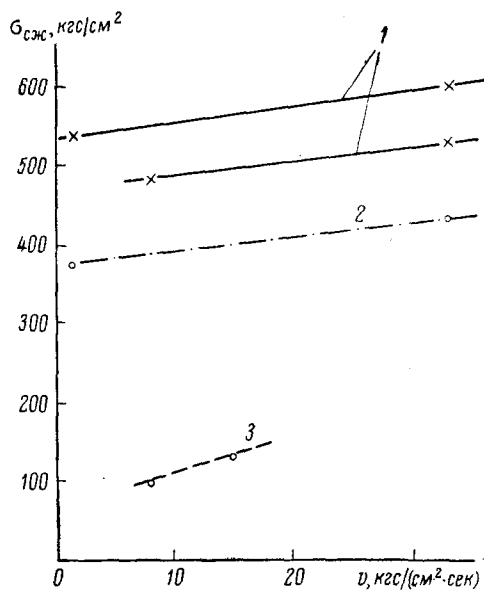


Рис. 21. Зависимость прочности при сжатии от скорости приложения нагрузки ($d = 60 \div 100$ мм; $l/d = 1$) [166].

1 — ангидрит; 2 — песчаник; 3 — карналлит.

для образцов каменной соли — $0,6/2,4\% = 1/4$. Следует отметить, что это отношение для различных размеров образцов и условий испытания может изменяться, однако каменная соль имеет значительно бóльшие предельные деформации разрушения по сравнению с карналлитом, что хорошо показано на рис. 20.

Р. Квалил [175] установил, что с увеличением скорости нагружения возрастает склонность соляных пород к хрупкому разрушению. Чем выше скорость нагрузки, тем быстрее накопленная в образце потенциальная энергия напряжения переходит в работу при превышении предела упругости, увеличивающегося также с возрастанием скорости нагрузки. Это означает, что соляные породы, обладающие определенными петрографическими и прочностными свойствами,

при достаточной скорости нагрузки могут мгновенно разрушаться, что имеет место при горных ударах.

В работе [166] описаны результаты испытания образцов цилиндрической формы при сжатии и различных скоростях нагружения (рис. 21). Для сопоставления приведены результаты испытания образцов песчаника. Как видно из рис. 21, при повышении скорости приложения нагрузки с 5 до 32 кгс/(см²·сек) прочность при сжатии для всех испытанных пород возрастает, при этом интенсивность роста прочности больше для карналлита и меньше для ангидрита и песчаника. Интересно, что чем выше скорость приложения нагрузки, тем интенсивнее происходит разрушение соляных пород. Так, по данным [181], при повышении скорости нагрузки образцов каменной соли при испытании их на сжатие с 2 до 150 кгс/(см²·сек) доля фракций с размером больше 10 мм при разрушении образца уменьшается с 35 до 13%.

Таким образом, при повышении скорости нагрузки соляные породы показывают закономерное изменение прочности при сжатии, при этом возрастает их склонность к хрупкому разрушению, особенно для карналлита и ангидрита.

§ 6. Увлажнение соляных пород

Оценка влияния увлажнения соляных пород на снижение их прочности при сжатии имеет большое значение при определении рациональных параметров камер выщелачивания и целиков при подземной разработке калийных и соляных месторождений с использованием гидрозакладки.

Исследования прочности при одноосном сжатии для увлажненных образцов каменной соли проводились В. С. Романовым [105]. Подготовленные к испытаниям образцы выдерживали в течение 20—45 суток в насыщенном соляном растворе, после этого насухо вытирали и испытывали. Насыщение образцов влагой происходит практически через 6—10 суток; при этом весовая влажность составляет в среднем 3,0—3,5%. Испытания проводились на 50-тонном прессе [скорость нагружения 5—10 кгс/(см²·сек)] на цилиндрических образцах диаметром 60 и высотой 90 мм. Сопоставление результатов исследований показало, что прочность образцов каменной соли на сжатие при их увлажнении снижается с 286 до 182 кгс/см² (в среднем на 40%).

Исследования влияния влажности на прочность соляных пород Калушского месторождения проводились также Е. П. Сивоконем [114]. Он испытывал образцы сильвинита, соленосной глины и каинитовой породы. Первая партия из 30 образцов сильвинита и каинитовой породы изготовлялась из кернов, выбуренных на участках гидрозакладки. По результатам натурных исследований было установлено, что глубина увлажнения пород в целиках Калушского рудника со стороны гидрозакладки составляет 2,1—3,3 м (в среднем 2,7 м); при этом влажность соляных пород в этой зоне изменяется от 0,5 до 10,5%. Результаты испытания первой серии образцов показали, что с увеличением влажности пород среднее значение их прочности снижается:

у сильвинита с 320 до 200 кгс/см² при повышении влажности от 0,5 до 3,2%, у каинитовой породы с 350 до 270 кгс/см² при изменении влажности от 1 до 2,5%.

Вторая партия из 150 образцов сильвинита, соленосной глины и каинитовой породы испытывалась в лабораторных условиях при искусственном их увлажнении; при этом влажность изменялась от 1 до 9%. Для испытаний использовали образцы цилиндрической формы диаметром 90 мм (при $l/d = 1$). Результаты испытаний образцов приведены в табл. 10, из которой видно, что среднее значение прочности соляных пород при сжатии изменяется, кгс/см²: для сильвинита с 310 до 140 при изменении влажности от 1 до 4%; для каинитовой породы с 400 до 74 при изменении влажности от 1 до 5%; для соленосной глины с 340 до 40 при изменении влажности от 1 до 9%.

Таблица 10

Испытания образцов соляных пород различной влажности [114]

Порода	Кол-во образцов	Влажность W, %	σ _{сж} , кгс/см ²			Δ, кгс/см ²	ν, %
			Миним.	Максим.	Средняя		
Сильвинит	12	До 1	258	360	310	40	15
	9	1—2	198	360	280	56	20
	5	2—3	120	200	160	34	21
	6	3—4	100	200	140	42	30
Каинитовая порода	9	До 1	312	460	400	62	15
	21	1—1,5	218	390	300	43	15
	15	1,5—2	156	395	270	54	20
	15	2—2,5	123	376	260	59	22
	12	2,5—3	105	342	210	67	32
	9	3—3,5	90	278	177	69	35
	4	3,5—4	93	145	124	23	18
4	4—5	45	90	74	20	28	
Соленосная глина	4	До 1	228	410	340	77	20
	5	1—2	177	255	240	16	7
	14	2—3	95	225	140	40	28
	4	3—4	45	57	50	8	16
	5	8—9	28	55	40	11	27

При подземной разработке калийных пластов для увеличения устойчивости целиков, снижения величины и скорости опускания кровли на ряде месторождений (Южный Гарц, ГДР; Калужское и Верхнекамское месторождения, СССР) применяют гидравлическую закладку. В этой связи представляют интерес испытания прочности образцов соляных пород при сжатии в условиях «подбучивания» или сжатия их закладкой и воздействия влаги. Как показали исследования, выполненные немецкими учеными [182] на образцах

в лабораторных условиях, прочность при сжатии зависит от степени подпора (отношение высоты подбучивания или закладки к высоте целика или образца), времени влияния и сжимаемости закладки. Результаты их исследований приведены в табл. 11, из которой видно, что прочность образцов при сжатии в условиях воздействия гидрозакладки увеличивается со 194 до 521 кгс/см², т. е. на 270%.

Таблица 11

Результаты испытания соляных образцов, погруженных в гидрозакладочный материал [182]

Условия испытания	Отношение высоты закладки к высоте образца (целика), %	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	
		Хвосты флотации	Отходы обогащения калийных солей
Без закладки	—	$194 \pm 6,7$	
С гидрозакладкой	33	$290 \pm 9,8$	$284,9 \pm 4,5$
»	66	$521 \pm 4,0$	$512,9 \pm 5,6$

§ 7. О характере и механизме разрушения образцов соляных пород при испытаниях на сжатие

Характер разрушения образцов соляных пород при испытаниях на сжатие зависит от многих факторов: их размера и формы, условий на контактах образца с плитами пресса, скорости приложения нагрузки и др.

При испытаниях образцов соляных пород кубической, цилиндрической и призматической формы (при $l/d \leq 2$) и при отсутствии смазки на контактах с плитами пресса образцы разрушались, образуя два противоположно расположенных конуса и две призмы скола по граням. При испытаниях образцов соляных пород со смазкой на контактах с плитами пресса разрушение образцов происходит с образованием системы вертикальных параллельных трещин. Аналогичный отмеченному выше характер разрушения целиков наблюдается и в натуральных условиях при отработке соляных и калийных пластов (рис. 18, 22).

Р. Квапил [175], рассматривая механизм разрушения образцов горных пород с точки зрения потенциальной энергии, отмечает, что при механической нагрузке образца деформируются не сами частицы, а связи между ними. При этом в образце накапливается потенциальная энергия, которая превращается в работу и вызывает деформацию образца. Если образец не имеет смазки на плоскостях давления, то потенциальная энергия аккумулируется приблизительно в форме двух конусов, имеющих общую ось и соприкасающиеся вершины (рис. 23, а). Максимальное количество потенциальной энергии акку-

мулируется посредине плоскостей давления образца, так как в этой части образец испытывает максимальные поперечные деформации.

При наличии смазки на плоскостях давления максимальное количество потенциальной энергии аккумулируется в цилиндрической зоне вдоль вертикальной оси образца и уменьшается по направлению боковых граней (рис. 23, б). В этом случае зоны одинакового количества потенциальной энергии

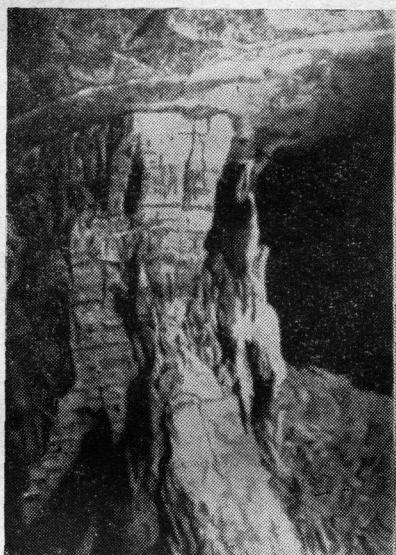


Рис. 22. Характер разрушения целика каменной соли (Южный Гарц [169]).

расположены параллельно оси образца. Образец разрушается вертикальными трещинами, которые представляют собой линии с одинаковым количеством потенциальной энергии. Как уже отмечалось, прочность образцов соляных пород на

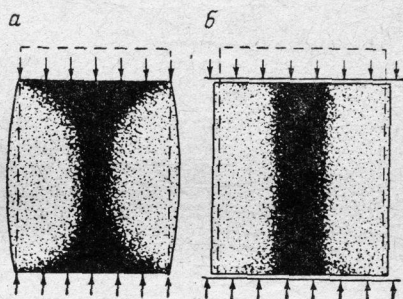


Рис. 23. Схема распределения потенциальной энергии в образце при его обычных испытаниях (а) и со смазкой на плоскостях давления (б), по Р. Квапилу [175].

сжатие со смазкой на плоскостях давления примерно на 30—50% меньше прочности образцов с трением на плоскостях давления.

В работе [130] проводилось сравнительное петрографическое описание образцов соляных пород Старобинского месторождения до и после их испытания на сжатие. Образцы имели цилиндрическую форму при отношении $l/d = 1$ и взяты с глубины 380—412 м. При испытаниях на одноосное сжатие образцы каменной соли и сильвинита приобретали характерную форму в виде двух конусов (рис. 24). После испытаний из образцов изготавливались шлифы и по ним велось петрографическое описание различных зон образца. По характеру деформирования в образце были выделены следующие характерные зоны:

А — зона упруго-пластической деформации, в которой при изучении шлифов под микроскопом не было обнаружено нарушений целостности отдельных зерен. Зона подразделяется на две подзоны: A_1 — область, расположенная у основания конуса; A_2 — область, расположенная у вершины конуса.

Б — зона разрушения кристаллов, слагающих образец. Она прилежит к конусовидным поверхностям, образующимся в процессе перераспределения напряжений и разрушения образца под нагрузкой во время испытаний.

В — зона разрушения и скола. Соляная порода здесь полностью разрушается во время испытаний.

При петрографическом описании ненарушенных образцов каменной соли по шлифам было установлено [130], что порода представлена мелко- и среднезернистым галитом; при этом преобладали зерна размером 3—7 мм, имеющие неправильную форму и тесно срастающиеся по слабоизвилистым контурам.

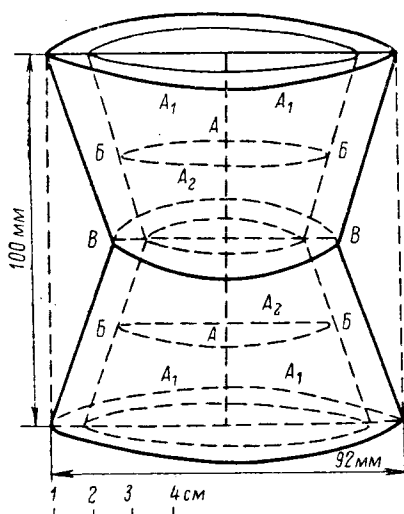


Рис. 24. Характер разрушения цилиндрического образца при испытаниях соляных пород на сжатие [130].

После испытания образца при $\sigma_{сж} = 230 \text{ кгс/см}^2$ в нем произошли существенные изменения: более интенсивно и густо развилась система трещин. В кристаллах галита образовалась система тончайших трещин, пересекающихся между собой и образующих густую сетку. Следует отметить, что чем крупнее кристалл, тем более густая сеть трещин в нем развивается (рис. 25, *a*). В мелких кристаллах галита (размером от долей миллиметра до 1—2 см), как правило, трещин практически не возникало, только контуры таких зерен становились более расплывчатыми. Во внутренней части образца, в зоне *A*, под влиянием сжатия контуры зерен теряют отчетливость, в них появляются трещины (более интенсивно в области *A*₂ и менее интенсивно в области *A*₁), однако нарушения целостности зерен не происходит. В зоне *Б* многие зерна галита разрушаются, дробятся и на их поверхности образуются ступеньки (рис. 25, *a*).

Образцы сильвинита имели мелко- и среднезернистую структуру (размеры зерен от долей до 10 мм) и были представлены прослоями сильвина (мощностью 8—10 мм) и примесью галита. Зерна сильвина имеют неправильную форму, сильно извилистые контуры, по которым они срастаются друг с другом и с зернами галита. В большинстве сильвинитовых зерен содержатся в виде микроворстков кубические кристаллики галита, размер которых не превышает 1 мм.

После испытания на сжатие ($\sigma_{сж} = 250 \text{ кгс/см}^2$) структура образца существенно изменилась. В сильвините деформации при нагружении образца проявляются в другом виде (по сравнению с каменной солью); зерна сильвина изменили свои очертания, некоторые

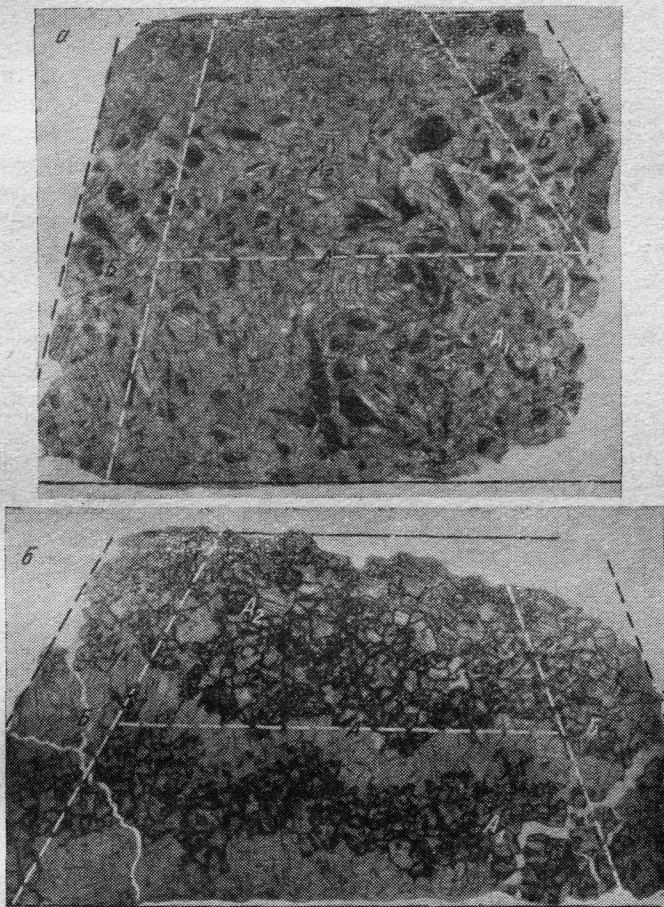


Рис. 25. Каменная соль (а) и сильвинит (б) после их испытания на сжатие [130].

потеряли отчетливость настолько, что часто трудно определить их границы. Имеющиеся в сильвиновых зернах кубические микровключения галита в свою очередь тоже деформируются и огрубляются (рис. 25, б).

В сильвинитовых зернах в отличие от галитовых трещин значительно меньше, они располагаются редкими параллельными линиями, обычно не пересекаются между собой и приурочены в основном к группам зерен.

Во внутренней части образца, в зоне A , наиболее деформировалась под давлением порода в области A_2 , где более, чем на других участках, зерна сильвинита деформировались и потеряли свои очертания. В области A_1 деформация зерен сильвинита проявлялась более слабо. В зоне B , где происходит скол, галитовые и сильвинитовые зерна приобретают трещиноватость и дробятся, при этом в зернах сильвина деформации и трещиноватость выражены слабее.

В заключение отметим, что характер разрушения соляных пород под нагрузкой зависит от структуры и текстуры пород и условий испытания. Характерны две формы разрушения. При значительном давлении на поверхностях давления максимальные поперечные деформации проявляются в середине образца (целика), в результате чего образуются два характерных противоположно расположенных конуса. При отсутствии сцепления на поверхностях давления или его уменьшении деформации практически одинаковы по всей длине образца (целика) и его разрушение происходит параллельно действию нагрузки. Под действием нагрузки имеет место разрушение и образование системы трещин как в самих кристаллах, составляющих образец, так и в их связях.

ГЛАВА VI

ПРОЧНОСТЬ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

Прочность соляных пород при растяжении σ_p является одним из важнейших показателей механических свойств, имеет большое значение для решения практических задач механики горных пород при разработке соляных и калийных месторождений. Кроме того, это один из определяющих показателей, характеризующих механизм разрушения твердых тел по различным теориям прочности. Значение прочности на растяжение используют при построении паспорта прочности соляных пород. Однако, несмотря на необходимость и большое значение этого показателя, количество экспериментальных исследований весьма незначительно, что объясняется техническими трудностями изготовления образцов сложной конфигурации и проведения испытаний.

Значение прочности соляных пород на растяжение может быть определено экспериментально методом прямого растяжения образцов или одним из косвенных методов, например методом изгиба на образцах в виде балочек или изгиба кольцевым штампом тонкой пластины, опирающейся по контуру; методом раздавливания и раскалывания образцов правильной или неправильной формы; методом разрыва давлением изнутри образца [113]. До настоящего времени при экспериментальном определении прочности соляных пород при растяжении применялись следующие косвенные методы: раздавливание цилиндри-

ческих образцов по образующим, разрыв породных колец гидростатическим давлением изнутри, расколом плоских образцов при помощи соосно расположенных клиньев (метод Людвика) [66, 166, 181].

При определении прочности соляных пород на растяжение необходимо учитывать их петрографические и минералогические характеристики, структурные и текстурные особенности испытываемых образцов. Так, по данным [181], значительное влияние на величину σ_p

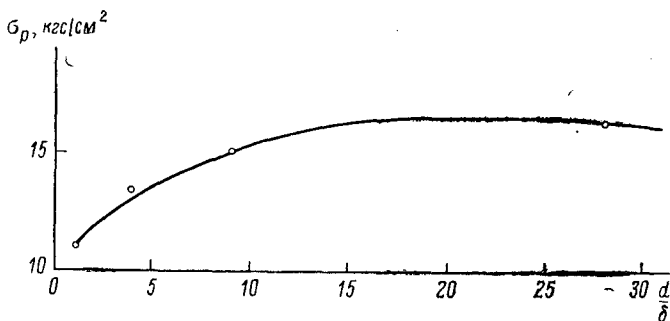


Рис. 26. Изменение прочности каменной соли на растяжение от отношения поперечного размера образца d к среднему размеру составляющих его зерен δ .

оказывает структурный состав образцов, характеризуемый отношением диаметра образца (d) к среднему размеру составляющих зерен (δ). При изменении этого отношения от 2 до 30 значение σ_p для образцов каменной соли увеличивается с 11 до 17 кгс/см² (рис. 26).

Существенные различия в значениях прочности образцов соляных пород получаются при их испытаниях параллельно слоистости и перпендикулярно к ней, особенно при наличии глинистых прослоев.

§ 1. Метод прямого растяжения

Для определения прочности соляных пород при одноосном растяжении необходимо изготавливать образцы сложной геометрической формы, которые позволили бы их закрепить в разрывных машинах и создать равномерное распределение напряжений в образце при растягивающих нагрузках.

Подобная характеристика образцов различной формы и размеров, применявшихся различными исследователями при испытаниях горных пород на растяжение, приведена в работе [113]. Все образцы имели фигурную форму с различной конфигурацией головок на концах для крепления в захватах разрывных машин. Среднее сечение образцов было прямоугольным или круглым.

Об испытании образцов соляных пород имеются весьма ограниченные сведения. В работе [142] описаны результаты исследования прочности каменной соли, выполненные на образцах в виде коротких восьмерок с резко выраженной шейкой, при этом разброс значений σ_p свыше 120%.

Г. Н. Кузнецов [66] для определения прочности соляных пород при одноосном растяжении рекомендует изготавливать образец в форме длинной вытянутой восьмерки с весьма плавным переходом от головок с средней части образца. При этом Г. Н. Кузнецов указывает, что «форма захватов и места их соприкосновения с образцом должны быть такими, чтобы напряжения в средней расчетной части образца достигали предельных разрушающих значений раньше, чем достигнут предельной величины напряжения в зоне местной их концентрации у захватов». Выполненные автором лабораторные испытания на разрыв образцов каменной соли указанной формы дали во всех случаях разрушение образцов в средней части, при этом разброс значений σ_p в отдельных сериях испытаний не превышал 6—7%. Чтобы исключить изготовление образцов сложной формы при испытаниях на одноосное растяжение, во ВНИМИ [80] проводились испытания цилиндрических образцов, концы которых заливались сплавом Вуда во втулки, перемещающиеся в направляющих. Для испытания образцов по этой методике образцы должны иметь диаметр 30—43 и длину 150—200 мм, кроме того, необходимо специальное испытательное устройство ПР-2.

В работе [130] описаны результаты испытаний образцов соляных пород на одноосное растяжение. Образцы цилиндрической формы приклеивали к основаниям специальной матрицы, состоящей из двух стаканов с углублениями и двух стержней. В качестве клея использовали алюмоаммониевые и алюмокалиевые квасцы. Нагрузка от верхней опорной плиты пресса передавалась на нижнюю (подвижную) часть стакана с помощью стержней, проходящих через отверстия в верхней матрице, создавая растягивающие усилия в образце. Обеспечение равномерного распределения напряжений по сечению образца при этом методе испытания затруднительно. Малейший перекос, вызванный неточностью обработки торцов, приклейки образца к матрицам или движением нижнего основания, создает неравномерность напряжений на боковых поверхностях образца. Возникающая при этом концентрация напряжений на одной из боковых поверхностей образца приводит к его разрушению, в то время как напряжения на противоположной части поверхности образца будут равны нулю. Об этом свидетельствуют большой разброс значений σ_p , определенных по описанной методике (до 70%), и низкие абсолютные значения прочности соляных пород на растяжение по сравнению с другими методами (для каменной соли $\sigma_p = 1,6 \div 3,5$, для сильвинита — $1,5 \div 3,4$ кгс/см²).

Х. Пфорт и Г. Розетц [181] при определении прочности соляных пород методом прямого растяжения использовали цилиндрические образцы диаметром 60—70 мм, закрепленные в специальных металлических обжимках. Переход от места закрепления к рабочей части образца осуществлялся путем постепенного уменьшения диаметра. Испытание образцов каменной соли по этой методике показало, что они разрушаются в основном в месте изменения диаметра образца, где происходила концентрация напряжений при растяжении.

При последующих опытах цилиндрические образцы соляных пород приклеивались эпоксидной смолой к захватам и испытывались на растяжение.

Результаты определения прочности соляных пород при растяжении по данным различных авторов приведены в табл. 12, где сопоставляются со значениями прочности соляных пород на сжатие и где дано соотношение $\sigma_{сж}/\sigma_p$.

По данным [181], наибольшей прочностью на растяжение обладает ангидрит ($\sigma_p = 42,2$ кгс/см²), имеющий высокую прочность на сжатие. Прочность при растяжении каменной соли для пластов Верра и Стасфурт составляет 13,4—13,7, а карналлита — 8,1 кгс/см², при этом величина прочности при растяжении составляет только 4—8% от прочности при сжатии. Для каменной соли отношение $\sigma_{сж}/\sigma_p = 4\%$, а для карналлита оно значительно выше — 7% и близко к отношению прочностей при сжатии и растяжении для ангидрита (8%).

Значительный разброс значений σ_p по данным различных исследователей обусловлен, с одной стороны, различным минералогическим и структурным составом соляных пород и, с другой — различием применяемых методик и условий испытания. Из приведенных в табл. 12 данных видно, что наименьшей прочностью при растяжении обладает карналлит ($\sigma_p = 1,9$ кгс/см²). Для каменной соли значение σ_p изменяется от 4,5 до 17, сильвинита — от 6,1 до 20,1 кгс/см². Значение σ_p составляет 1—9% от прочности при одноосном сжатии.

Для определения прочности образцов соляных пород на растяжение в ЛГИ были использованы призматические образцы с размерами 20 × 20 × 130 мм *. Для крепления образцов к боковым плоскостям около торцов специальным клеем приклеивались треугольные (с отношением катетов 1/6, 1/3 и 3/4) и фасонные (с разным радиусом закругления и размером грани, приклеиваемой к образцу) головки. Образец с наклеенными головками помещался в специальное устройство, обеспечивающее центровку образца во время испытания. Исследования, выполненные методом фотоупругости с использованием различных типов головок, приклеиваемых к образцам, позволили выбрать рациональный вид и форму, при которых концентрация напряжений в захватах весьма незначительна. Результаты испытания образцов соляных пород Старобинского месторождения приведены в табл. 13. Средние для серии испытанных образцов значения σ_p для каменной соли 9,1 и 15, а для сильвинита 8,9 кгс/см².

Разрушение образцов соляных пород при испытаниях методом прямого растяжения происходит, как правило, в местах изменения сечения или местах ослабления прочности за счет трещин или других прослоек. При определении σ_p прямым растяжением получается большой разброс значений, что требует для получения достоверных данных испытания значительного количества образцов.

* Испытания выполнены доц. А. Н. Курочкиным и Т. А. Пономаревой.

Результаты определения прочности соляных пород при одноосном растяжении и сжатии

Пласт	Порода	Прочность при растяжении		Прочность при сжатии		$\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}}$, %	Исследователь
		σ_p , кгс/см ²	Кол-во испытанных образцов	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	Кол-во испытанных образцов		
Хессен, Стассфурт	Карналлит	8,1	28	113	250	7	} Х. Пфорт, Г. Розетц [181]
	Древняя каменная соль	13,4	4	314	25	4	
	Каменная соль	13,7	153	326	437	4	
Тюрингия	Ангидрит	42,6	10	550	31	8	
Брянцевский	Серая каменная соль	13,3	—	366	18	4,0	Г. Н. Кузнецов [66]
Надбрянцевский	Белая » »	5,9	—	—	—	1,5	То же
Брянцевский	То же	4,5	—	340	8	1,5	А. Ф. Савченко [99, 110]
»	Серая каменная соль с годовыми кольцами	8,5	—	206	18	4,0	И. В. Остроухов [92]
Подбрянцевский	Белая каменная соль	8,8	—	239	20	4,0	То же
Месторождение Тыргу Ока	Белая каменная соль	11,0	—	287	16	4,0	} М. Стаматчу [122]
То же	Пестрая » »	15,7	—	324	20	5,0	
»	Серая » »	23,0	—	328	20	7,0	
Верхнекамское месторождение							} Г. И. Широ [146]
Пласт В	Карналлит	1,9	—	157	—	1,0	
Пласт Кр. II	Сильвинит	6,1	—	396	—	1,5	
Пласт А	»	2,7	—	287	—	1,0	
Пласт Б	»	4,3	—	251	—	2,0	
Каменная соль	Каменная соль	4,6	—	371	—	1,0	
Старобинское месторождение							} Н. М. Проскуряков, В. С. Ливенский, А. А. Антонов
II калийный горизонт	Покровная каменная соль	9,0	6	346	6	2,6	
То же	Верхняя сильвинитовая пачка	8,4	4	155	6	5,4	
III калийный горизонт	Каменная соль, слой III—IV	17	10	294	60	5,7	
То же	То же, IV—V	14,5	6	215,5	5	6,7	
»	» V—VI	10,0	4	—	—	—	
»	Глинисто-карналлитовая пачка	8,5	3	192,5	41	4,5	
»	Покровная каменная соль	15,8	5	215	14	7,0	
»	Сильвинит, слой IV	13,9	10	266	8	5,2	
»	То же, V	16,0	9	—	—	—	
»	» VI	20,1	8	222	6	9,0	
»	» III	—	—	263	8	—	

Результаты определения прочности соляных пород
Старобинского месторождения при растяжении

Горизонт, пласт	Порода	Прочность при растяжении σ_p , кгс/см ²		
		Метод прямого растяжения	Метод рас- кальвания кернов по образу- ющей клиньями	Метод соосных пуансонов
III горизонт, III—IV	Каменная соль	15,0	17,0	9,3
II горизонт, покровная каменная соль	То же	9,1	9,0	5,2
Верхняя сильвинитовая пачка	Сильвинит	8,9	8,4	—

Все вышеизложенное ограничивает применение рассматриваемого метода для испытания образцов соляных пород и вызывает необходимость использования косвенных методов.

§ 2. Метод раздавливания и раскальвания

Для определения прочности соляных горных пород при растяжении используют косвенные методы, основанные на раздавливании или раскальвании цилиндрических или плоских (плитообразных или цилиндрических) образцов. Здесь нами принята терминология, используемая в работе [113]. Под термином «раздавливание» понимается сжатие образца любой формы между давящими плитами пресса до разрушения; под «раскальванием» — разрушение образцов любой формы при помощи соосно расположенных клиньев или стержней.

Раздавливание цилиндрических образцов по образующей между плоскими плитами пресса широко используется в качестве косвенного метода определения прочности горных пород при растяжении, который известен также под названием «бразильского» метода. Прочность образцов при растяжении определяется по формуле [81]

$$\sigma_p = \frac{2P}{\pi dl}, \text{ кгс/см}^2, \text{ или } \sigma_p = 0,637 \frac{P}{dl}, \text{ кгс/см}^2, \quad (9)$$

где P — разрушающее усилие, кгс; d — диаметр образца, см; l — длина образца, см.

В работе [181] описаны результаты испытания большого числа образцов соляных пород на растяжение методом раздавливания по образующей (табл. 14). Исследования проводились на цилиндрических образцах соляных пород с отношением $l/d = 0,3$ ($d = 60 \div 70$ мм),

скорость приложения нагрузки составляла около 25 кгс/сек. Согласно данным табл. 14 разброс значений σ_p для большого количества испытанных образцов находится в пределах 5—9% (за исключением карналлита, для которого это значение равно 15%). В табл. 14 включены также результаты исследования по методу раскалывания плоских цилиндрических образцов ($l/d = 0,3$; $d = 60 \div 70$ мм) по основанию между двумя соосно расположенными клиньями. Из сопоставления значений σ_p , определенных двумя разными методами, видна их хорошая сходимость для соляных пород, а имеющиеся различия находятся в пределах разброса значений. Наибольшие отклонения значений σ_p получились для ангидрита, которые объясняют [181] влиянием его петрографических особенностей.

Таблица 14

Прочность соляных пород при растяжении [181]

Пласт	Порода	Раздавливание кернов по обра- зующей		Раскалывание клиньями плоских образцов	
		σ_p , кгс/см ²	Кол-во образ- цов	σ_p , кгс/см ²	Кол-во образ- цов
Тюрингия Хессен	Карналлит	7,5±5%	12	—	—
	Сильвинит	18,4±4%	5	19±9%	5
»	Каменная соль	12,8±9%	4	—	—
	То же	13,8±5%	7	—	—
Стассфурт	Карналлит	8,6±15%	16	7±10%	14
»	Каменная соль	12,7±5%	84	14,1±6%	35
Верра	То же	15±5%	53	—	—
Стассфурт	»	15±5%	16	13,1±6%	20
»	»	15±5%	16	13,1±6%	20
Осн. ангидрит	Ангидрит	42±4%	10	27,6±6%	11

Для определения прочности соляных пород Старобинского месторождения при растяжении нами был использован косвенный метод — раскалывания цилиндрических образцов по образующей между двумя соосно расположенными клиньями (рис. 27). Исследовались образцы диаметром 56 мм и длиной 80—120 мм. Скорость приложения нагрузки при испытании образцов составляла 20—30 кгс/сек. Результаты испытания образцов соляных пород этим методом приведены в табл. 13. Значения σ_p , полученные методом раскалывания образцов по образующей клиньями, весьма хорошо совпадают со значениями σ_p , определенными методом прямого растяжения.

При определении прочности соляных пород при растяжении в ГДР [181] вместо цилиндрических образцов использовали плоские круглые образцы ($l/d = 0,2 \div 0,3$), изготавливаемые из кернов. Такие плоские образцы раскалывались клиньями. Результаты испытания плоских круглых образцов соляных пород методом раскалывания клиньями приведены в табл. 14. Видна хорошая сходимость значений

σ_p для соляных пород, определенных разными методами, за исключением ангидрита.

Для выявления анизотропии соляных образцов и ее влияния на значение прочности при растяжении была подвергнута испытанию серия образцов каменной соли и сильвинита по описанной методике; при этом клинья располагались (что определяло направление приложения нагрузки) в одном случае перпендикулярно к слоистости, а во втором — параллельно ей. Было установлено, что средние значения σ_p^\perp составляли для каменной соли и сильвинита соответственно 24 и 21,3 кгс/см², а средние значения σ_p^\parallel — 12,5 и 11,7 кгс/см². Таким образом, значение прочности образцов соляных пород при растяжении в плоскости напластования примерно в 2 раза ниже по сравнению со значениями σ_p в направлении, перпендикулярном к слоистости.

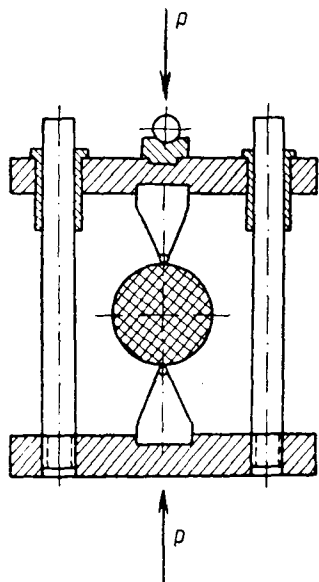


Рис. 27. Определение σ_p методом раскалывания цилиндрических образцов по образующей клиньями.

Аналогичные исследования были проведены Х. Пфорром и Г. Розетцом [181] на серии образцов каменной соли пласта Верра. Было испытано 50 образцов диаметром 60 мм при отношении $l/d = 1$. Значение σ_p определялось методом раскалывания образцов между соосно расположенными клиньями, при этом нагрузка прикладывалась параллельно слоистости и перпендикулярно к ней. Среднее значение прочности каменной соли при растяжении $\sigma_p^\parallel = 7,0$ кгс/см², а значение $\sigma_p^\perp = 12,6$ кгс/см², т. е. $\sigma_p^\perp = 1,8\sigma_p^\parallel$. При сопоставлении величин прочности на растяжение различными методами * (методом прямого растяжения по методике ВНИМИ [80], раскалыванием цилиндрических образцов клиньями по образующей и образцов той же формы шариковыми инденторами [85, 91] сильвинитовых образцов пласта Кр. II (слой III), выбуренных параллельно напластованию во II Березниковском руднике, обнаружена хорошая сходимость значений σ_p . Полученные при испытаниях значения прочности при растяжении составляли соответственно: при прямом растяжении $\sigma_p = 14,5$, раскалыванием по образующей — $\sigma_p^\perp = 15,6$ и раскалыванием шариковыми инденторами $\sigma_p^\parallel = 14,3$ кгс/см². Следует отметить, что получаемые в данном случае значения σ_p методом прямого растяжения справедливы для образцов, выбуренных параллельно напластованию. Как отмечалось, они примерно в 2 раза выше по сравнению со значениями σ_p для образцов, выбуренных перпендикулярно к напластованию.

* Данные Березниковского филиала ВНИИГалургии.

§ 3. Метод разрыва изнутри образца

Для определения прочности горных пород при растяжении используется метод разрыва образцов правильной и неправильной формы изнутри. Методика определения σ_p этим методом изложена в работах [108, 113]. Аналогичные исследования для определения величины σ_p нами были проведены на образцах соляных пород. Исследования проводились на малых образцах в форме дисков диаметром 56 и высотой 12 мм, нарезанных из кернов. В центре диска просверливали отверстие диаметром 11,27 мм и заполняли его резиной. Затем образец устанавливали в специальное приспособление, имеющее два соосно расположенных пуансона, диаметр которых равен диаметру просверленного отверстия. За счет сжатия резины соосными пуансонами внутри диска создавалось равномерное всестороннее давление, порождавшее в нем растягивающие напряжения. Под действием растягивающих напряжений образец разрушался.

По методике, рекомендованной ВНИМИ [108], величина σ_p определяется по формуле

$$\sigma_p = K_T \sigma_n \frac{d}{D-d} \quad (10)$$

где σ_n — напряжение под пуансоном, кгс/см²; K_T — коэффициент, учитывающий пластичность и текучесть резины; D и d — внешний и внутренний диаметры кольца, см.

Результаты испытания образцов каменной соли по этому методу приведены в табл. 13.

Из сопоставления значений σ_p , определенных по различным методам, видно, что наибольшие отклонения получены при испытаниях кольцеобразных образцов методом разрыва изнутри. Изготовление образцов в форме диска указанных размеров и высверливание внутреннего отверстия небольшого диаметра для кристаллических соляных пород весьма затруднительно. При высверливании внутреннего отверстия диска для крупнокристаллических образцов каменной соли происходило их разрушение. Кроме того, определение прочности при растяжении (точно так же и при сжатии) характеризовалось большим разбросом значений σ_p .

ПРОЧНОСТЬ СОЛЯНЫХ ПОРОД НА ИЗГИБ

§ 1. Методы определения прочности соляных пород на изгиб

Исследования соляных пород на изгиб весьма малочисленны, хотя данные испытаний на изгиб имеют большое значение для решения практических задач управления горным давлением при разработке калийных и каменносоляных месторождений.

Значение прочностных и деформационных характеристик соляных пород позволяет оценить процессы деформаций и разрушения пород кровли при подземной разработке калийных месторождений (наиболее распространены камерная и камерно-столбовая системы разработки) и установить безопасные и рациональные размеры камер и обнажений кровли. Испытания соляных пород на изгиб в лабораторных условиях не представляют сложности.

Образцы горных пород при испытаниях на изгиб разрушаются под действием растягивающих нормальных напряжений. Последнее обстоятельство служит основанием для принятия в практических расчетах значения $\sigma_{изг}$ по данным испытания горных пород при растяжении с использованием различных переходных коэффициентов. При этом переходные коэффициенты не позволяют получить истинных значений $\sigma_{изг}$, особенно для неоднородных и соляных пород. Кроме того, различие напряженного состояния образцов при их испытаниях на растяжение и изгиб не дает возможности установить точную корреляционную зависимость между значениями $\sigma_{сд}$ и $\sigma_{изг}$. Экспериментальных данных, подтверждающих соотношение прочности соляных пород при растяжении, сжатии и изгибе, очень мало; при этом они для одних и тех же пород имеют большой разброс ввиду влияния масштабного фактора, структурных и петрографических особенностей и различных методик испытания.

Испытания соляных пород на изгиб в лабораторных условиях осуществляются обычно по одной из следующих четырех схем:

а) балочка, свободно лежащая на двух опорах, нагрузка в виде сосредоточенной силы прикладывается посередине пролета между опорами (трехточечная схема) (рис. 28, а);

б) балочка, свободно лежащая на двух опорах с кольцеобразным приложением нагрузки; при этом нагрузка в виде двух сосредоточенных сил в двух точках, отстоящих на равных расстояниях от опор (четырёхточечная схема) (рис. 28, б);

в) балочка с защемлением на двух опорах и равномерно распределенной по длине нагрузкой (рис. 28, в);

г) консольная балочка; нагрузка в виде сосредоточенной силы прикладывается на конце балки (рис. 28, г).

Для соляных пород испытания на изгиб проводились по третьей схеме с сосредоточенной нагрузкой посередине пролета [146]. Более представительные и надежные результаты получаются при испытании по второй и третьей схемам, так как, по данным [113], в этих случаях на показатель $\sigma_{изг}$ срезающие силы и концентрация напряжений оказывают минимальное влияние.

При испытаниях соляных пород на изгиб используют образцы призматической формы — балочки прямоугольного или квадратного сечения. Размеры образцов выбираются с учетом структурного, минералогического и текстурного строения испытываемых соляных пород, а также с учетом влияния масштабного фактора. В работе

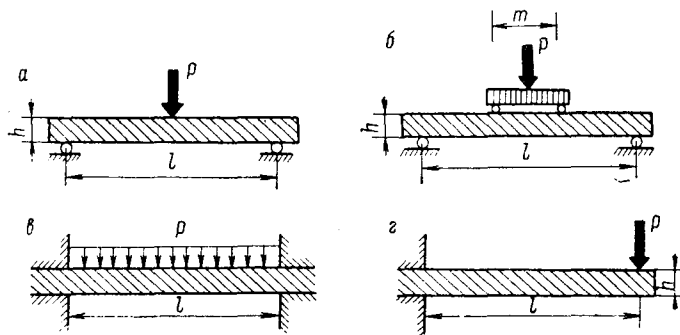


Рис. 28. Схемы нагружения образцов-балочек при испытании на изгиб по трехточечной схеме (а), по четырехточечной схеме (б), с защемлением на опорах (в) и консоль (г).

[113] при определении прочности на изгиб рекомендуется применять образцы с площадью поперечного сечения не менее $5-10 \text{ см}^2$; при этом соотношение между большей и меньшей сторонами сечения балочки должно быть больше 1,5. Учитывая влияние структурного состава (зернистости) соляных пород при их испытаниях на сжатие и растяжение, необходимо при испытаниях на изгиб использовать образцы с отношением его поперечных размеров (d) к диаметру среднего составляющего зерна (δ) не менее $d/\delta \geq 20 \div 25$. На величину прочности при изгибе оказывает также влияние отношение длины пролета (l) балочки к ее высоте (h). В работе [113] с учетом рекомендаций других исследователей [107] для горных пород рекомендуется это отношение принимать в пределах $l/h = 3,5 \div 10$.

В. Гимм [166] считает, что в соответствии с рекомендациями Международного бюро по механике горных пород испытывать соляные породы на изгиб по второй (четырёхточечной) схеме нагружения следует на образцах с размерами, мм: $h = 10$; $m = 10$; $l = 55$ (рис. 28, б).

На величину прочности при изгибе оказывает влияние и скорость приложения нагрузки. По рекомендациям [113], скорость нагружения образца должна быть не более $25 \text{ кгс}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$.

Прочность соляных пород при изгибе и испытаниях по одной из приведенных на рис. 28 схем определяется по известной формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M_{\text{изг}}}{W_{\text{изг}}}, \text{ кгс/см}^2, \quad (11)$$

где $M_{\text{изг}}$ — максимальный изгибающий момент, соответствующий разрушающей нагрузке, кгс·см; $W_{\text{изг}}$ — момент сопротивления изгибу, определяемый из выражения

$$W_{\text{изг}} = \frac{Jh}{2}, \text{ см}^3, \quad (12)$$

где J — момент инерции для конкретного поперечного сечения испытываемого образца, см⁴; h — высота образца, см.

Для образца с прямоугольным поперечным сечением момент инерции

$$J = \frac{bh^2}{6}. \quad (13)$$

В зависимости от конкретной задачи исследований прочности соляных пород на изгиб для каждой пробы испытывается от 3 до 10 образцов и по ним вычисляется среднее значение.

§ 2. Результаты исследований прочностных и деформационных характеристик соляных пород при изгибе

Исследования соляных пород на изгиб проводились Г. Н. Кузнецовым [66, 67], Г. И. Широко [146] и рядом других исследователей [113, 166], на образцах различных размеров по одной из приведенных на рис. 28 схем. При испытаниях соляных пород на изгиб фиксируются разрушающая нагрузка, по которой вычисляется значение $\sigma_{\text{изг}}$, и развиваемые образцом под нагрузкой деформации. Для замера деформаций образцов при изгибе наибольшее распространение получили следующие приборы:

- а) зеркальные типа Мартенса;
- б) индикаторы часового типа;
- в) проволочные (тензометрические) датчики сопротивления.

Зеркальный прибор типа Мартенса представляет собой два зеркала, устанавливаемых на концах тонких металлических стержней. Металлические стержни крепятся в торцы образца-балки. При изгибе образца плоскости зеркал поворачиваются, что фиксируется оптическим прибором [69]. Методика замера деформаций с помощью индикаторов часового типа и тензометрических датчиков изложена в работах [57, 91, 113]. Для автоматической регистрации деформаций при изгибе нами был использован фотоиндикатор, позволяющий измерить деформации с точностью 0,004 мм.

Г. И. Широко [146] исследовал образцы-балочки соляных пород на изгиб по разным схемам нагрузки. Из сопоставления полученных

при этом результатов видно (табл. 15), что прочность испытанных образцов соляных пород по трехточечной схеме (балка на опорах при сосредоточенной нагрузке) и консоли с защемлением на одном конце примерно одинакова и составляет в среднем для каменной соли 24,3 и для сильвинита 22,1 кгс/см². При испытаниях образцов, защемленных на двух опорах, и при сосредоточенной нагрузке прочность на изгиб для каменной соли примерно в 2, а для сильвинита в 3 раза выше по сравнению с испытанными по первым двум схемам.

По данным [110], прочность артемовской каменной соли при изгибе колеблется от 32 до 42 кгс/см². Испытания каменной соли на изгиб проводились на образцах размером (4—6) × (6—10) × (28—60) см на свободных опорах и при сосредоточенной нагрузке по середине пролета. Коэффициент вариации при испытаниях на изгиб составлял 7—14%.

Для получения прочности на изгиб для соляных пород Старобинского месторождения и изучения масштабного фактора при изгибе нами проведены испытания образцов каменной соли различных размеров. Образцы отбирали со II и III калийных горизонтов I Солигорского рудника. Изготавливали их квадратного поперечного сечения с соотношением l/h , равным 7 во всех случаях. Последнее позволяет оценить влияние масштабного фактора при испытаниях на изгиб. В соответствии с рекомендациями [45, 46], скорость нагружения при испытаниях образцов каменной соли на изгиб по четырехточечной схеме была принята равной 5,5—6 кгс/мин, что составляет 0,24—0,26 кгс/(см²·сек).

При испытаниях образцов каменной соли на изгиб замерялись деформации, при этом нагружение образца производилось отдельными циклами «нагрузка — разгрузка». По результатам испытаний образца строились графики «напряжение — прогиб» (рис. 29), по которым определялись модули деформации при изгибе по методике, изложенной в работах [113, 166, 181].

Модуль деформации ($E_{изг}$) при изгибе вычислялся по нагрузочной кривой по формуле

$$E_{изг} = \frac{\Delta P}{\Delta y} \cdot K, \text{ кгс/см}^2, \quad (14)$$

где ΔP — приращение нагрузки в середине пролета, кгс; Δy — приращение прогиба при нагрузке ΔP , см; K — коэффициент формы, определяемый по формуле

$$K = \frac{l^3}{4bh^3} \left(1 + 2,95 \frac{h^2}{l^2} - 0,02 \frac{h}{l} \right). \quad (15)$$

Результаты испытаний двух серий образцов каменной соли приведены в табл. 15, из которой видно, что прочность каменной соли при изгибе в зависимости от размера образца изменяется от 28 до 50 кгс/см² (среднее для II горизонта 32 и для III горизонта 43 кгс/см²). Анализ приведенных результатов испытаний каменной соли при

Испытания соляных пород на изгиб											
Рудник, пласт	Порода	Размеры образцов, см			Кол-во испытанных образцов	$\sigma_{изг}$, кгс/см ²	Кoeffициент вариации, %	Модуль деформации при изгибе E , 10 ⁵ кгс/см ²	Схема испытания	Исследователь	
		<i>b</i>	<i>h</i>	<i>l</i>							
I Березниковский	Каменная соль	8,0	10,0	60	—	24,0	—	—	} На свободных опорах и сосредоточ. нагрузке Консоль С заземлением на опорах и сосредоточ. нагрузке	Г. И. Ширко [146]	
		8,6	10,0	40	—	25,3					
		8,0	10,1	20	—	23,6					
		6,9	7,9	40	—	44,5					
Пласт Кр. II	Сильвинит	8,1	10,0	60	—	22,0	—	—	} На свободных опорах и сосредоточ. нагрузке Консоль С заземлением на опорах и сосредоточ. нагрузке		
		8,3	10,0	40	—	21,0					
		8,1	10,0	20	—	22,8					
		6,7	5,6	30	—	64,6					
Пласт А » Б » В	Сильвинит То же Карналлит	8,2	9,2	30	—	24,8	—	—	} На свободных опорах и сосредоточ. нагрузке		
		8,2	9,5	30	—	19,9					
		8,4	9,6	30	—	15,9					
I Солигорский, II горизонт	Покровная каменная соль	2,0	2,0	16	11	38	32	0,65	} На свободных опорах с приложением нагрузки по четырехточечной схеме	Н. М. Проскуряков, В. С. Ливенский	
		3,0	3,0	24	5	33					
		4,0	4,0	32	5	29					
		8,0	8,0	64	3	28					
То же, III горизонт	Каменная соль III—IV	2,0	2,0	16	17	50	17	0,76	}		
		3,0	3,0	24	16	45					
		4,0	4,0	32	10	39					
		8,0	8,0	64	3	39					
Им. Володарского, пласт Брянцевский	Каменная соль	10	6,0	60	5	37	9,2	—	} На свободных опорах с приложением нагрузки по трехточечной схеме		А. Ф. Савченко, А. Р. Серая [110]
		8	4,5	40	4	33					
		6	3,0	28	4	32					
Пласт Подбрюнцевский, рудник № 3	То же	8	4,0	40	4	41	11,5	—	}		
		10	6,0	60	6	43					
	Артемовская каменная соль (светлая)	6	4,3	40	3	—	—	—	} С заземленными концами и сосредоточенной нагрузке в середине пролета	Г. Н. Кузнецов [67]	
		6	6,0	40	4	—					
		6	4,5	20	2	—					
		6	4,5	30	1	—					
		6	3,0	40	2	—			} То же, при равномерно распределенной нагрузке		
		6	3	40	3	—					
		6	4,5	40	5	—					
		6	4,5	40	5	—					

изгибе показывает, что с увеличением размеров образцов значение $\sigma_{изг}$ снижается, а на образцах с размерами $4 \times 4 \times 32$ и $8 \times 8 \times 64$ см влияния масштабного фактора не наблюдается. Кроме того, при испытании образцов каменной соли малых размеров ($2 \times 2 \times 16$ и $3 \times 3 \times 24$ см) имеет место наибольший разброс значений $\sigma_{изг}$ (коэффициент вариации изменяется от 11 до 32%), а на образцах больших размеров он незначителен (коэффициент вариации изменяется от 2 до 10%). Большой разброс экспериментальных

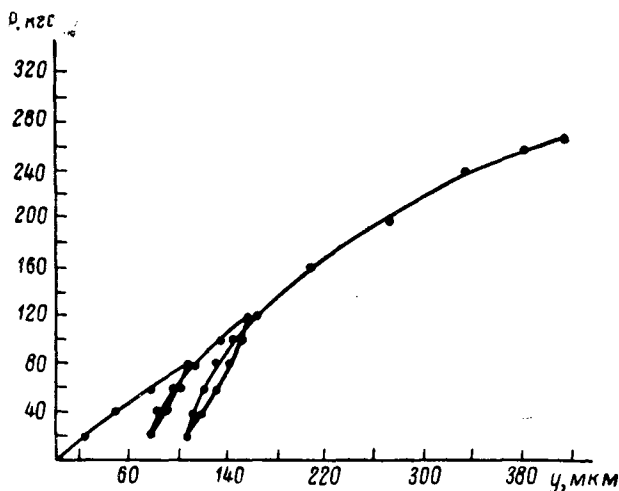


Рис. 29. Характерный график «нагрузка — прогиб» для образца каменной соли III—IV (с размерами $8 \times 8 \times 64$ см) при испытаниях на изгиб ($\sigma_{изг} = 39,1$ кгс/см²; $E_{изг} = 0,68 \cdot 10^5$ кгс/см²).

данных при испытаниях малых образцов каменной соли на изгиб следует отнести за счет структурного строения образцов.

Значение модуля деформации при изгибе для испытанных образцов каменной соли находится в пределах $(0,62 \div 0,84) \cdot 10^5$ кгс/см². Значения модуля упругости при изгибе, вычисляемые по разгрузочным кривым, примерно в 2 раза превышают значения модуля деформации и составляют $(1,57 \div 2,0) \cdot 10^5$ кгс/см².

Из сопоставления средних значений прочностей соляных пород, приведенных в табл. 12 и 15, видно, что их соотношение составляет для:

каменной соли $\sigma_{сж} : \sigma_{изг} : \sigma_p$. . .	1 : (1/6—1/10) : (1/15—1/40);
сильвинита $\sigma_{сж} : \sigma_{изг} : \sigma_p$	1 : (1/12—1/20) : (1/60—1/100);
карналлита $\sigma_{сж} : \sigma_{изг} : \sigma_p$	1 : 1/10 : 1/80.

Таким образом, прочность соляных пород при изгибе составляет от 5 до 20% их прочности при одноосном сжатии.

**МОДУЛЬ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ
НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ
(МОДУЛЬ УПРУГОСТИ)
И КОЭФФИЦИЕНТ ПОПЕРЕЧНЫХ
ДЕФОРМАЦИЙ (КОЭФФИЦИЕНТ
ПУАССОНА) СОЛЯНЫХ ПОРОД**

Показатели деформационных свойств соляных пород — модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ — имеют важное значение при оценке процессов деформации и разрушений соляных пород, происходящих при подземной разработке месторождений. Показатели деформационных свойств соляных пород чаще всего определяются при испытаниях их на сжатие, реже на изгиб. При других видах испытания пород трудно практически осуществить измерение деформаций образца под нагрузкой. Модуль упругости определяется по соотношению величин напряжений и относительных упругих деформаций, а коэффициент Пуассона — по соотношению относительных поперечных и продольных деформаций.

Измеряемые при испытаниях соляных пород продольные и поперечные деформации образцов являются исходными данными для определения показателей деформационных свойств — E и μ . Следует отметить, что измеряемые величины продольных и поперечных деформаций не являются постоянными; они зависят от условий испытания образцов — величины и скорости нагрузки, влияния внешней среды и др.

Для определения показателей деформационных свойств горных пород наиболее распространены три способа [113] продольных и поперечных деформаций при сжатии и изгибе: 1) с помощью индикаторов (чаще всего часового типа); 2) с помощью электроизмерительных схем с применением проволочных датчиков сопротивления, наклеиваемых на испытываемый образец; 3) по скорости распространения упругих волн (продольных или поперечных) в образце под нагрузкой с помощью ультразвуковых датчиков и соответствующих электронных схем. Методика определения модуля пропорциональности напряжений и деформаций и коэффициента Пуассона горных пород указанными способами, а также применяемая при этом аппаратура подробно описаны в работе [113]. Методы определения деформаций и модуля упругости соляных пород при изгибе изложены в гл. VII.

**§ 1. Модуль пропорциональности напряжений
и деформаций (модуль упругости)**

Для соляных пород, обладающих большими деформациями ползучести, даже при незначительных нагрузках понятие модуля упругости, используемого для оценки упругого поведения горных пород под нагрузкой, является в определенной степени условным.

В гл. V было показано, что карналлит при достаточно высокой скорости приложения нагрузки ведет себя как «упругое тело». Другие соляные породы, как каменная соль и сильвинит, при действии нагрузки проявляют упругие и пластические деформации, при этом их соотношение зависит от скорости приложения нагрузки. Поэтому оценка упругого деформирования соляных пород при определенном уровне нагрузки представляет значительный интерес.

Как уже отмечалось, отличительным свойством соляных пород от других горных пород является развитие даже при небольшой нагрузке значительных деформаций ползучести. Поэтому определенную трудность представляет вычисление по результатам испытаний соляных пород модуля пропорциональности между напряжениями

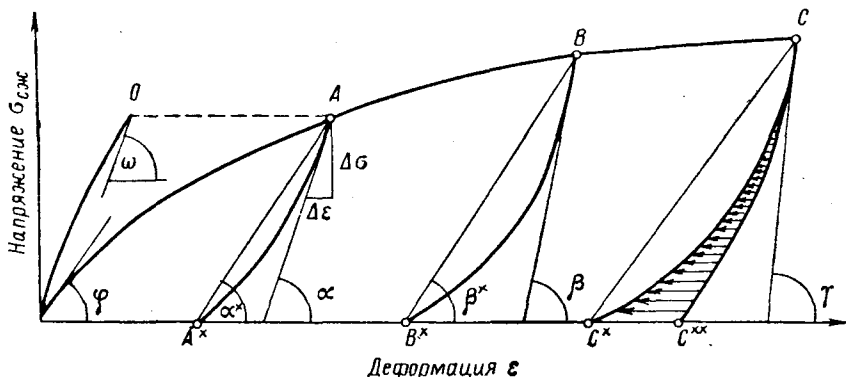


Рис. 30. Схема к определению статического модуля упругости соляных пород (по В. Дрейеру [163]).

и деформациями, или модуля упругости. До настоящего времени об определении модуля упругости соляных пород нет единого мнения и конкретных рекомендаций.

Статический модуль упругости определяется на основании испытаний соляных пород при сжатии по графику «напряжение — деформация» из выражения

$$E_{ст} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \approx \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (16)$$

где $\Delta\sigma$ — приращение нагрузки, кгс/см²; $\Delta\varepsilon$ — приращение относительной деформации, соответствующее приращению нагрузки $\Delta\sigma$.

На рис. 30 показана схема определения модуля упругости соляных пород по В. Дрейеру [163]. Значения модуля упругости можно вычислять по одному из следующих методов:

а) по первой разгрузочной кривой, по касательной, расположенной под углом α к оси деформаций;

б) по касательной, проведенной в начале первой нагрузочной кривой и расположенной под углом φ к оси деформаций. В общем случае деформации соляных пород под нагрузкой $\alpha > \varphi$, следова-

тельно, и определяемые в этом случае значения $E_{ст}$ будут меньше по сравнению с первым случаем;

в) по второй разгрузочной кривой, по касательной, расположенной под углом β к оси деформаций. В этом случае $\beta > \alpha > \varphi$, поэтому и значение $E_{ст}$, определенное по второй разгрузочной кривой, будет больше по сравнению с первыми двумя случаями.

Как отмечалось в гл. V, с увеличением скорости приложения нагрузки изменяется характер деформирования соляных пород, при этом увеличивается значение $E_{ст}$. Последнее хорошо иллюстрируется рис. 30. В описываемом случае значение $E_{ст}$, определяемое по первой разгрузочной кривой, будет выше, так как $\omega > \alpha$. У карналита значение угла ω (следовательно, и $E_{ст}$) растет с увеличением скорости приложения нагрузки.

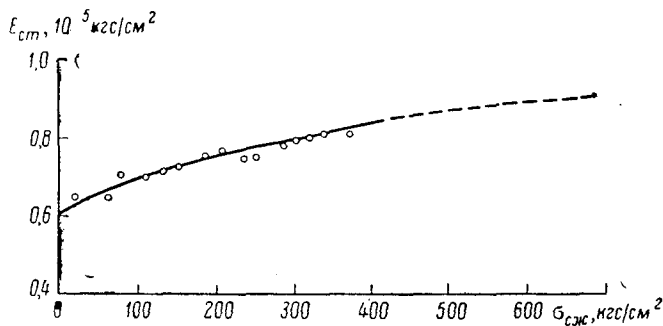


Рис. 31. Зависимость статического модуля упругости каменной соли от напряжения [163].

Модуль деформации при разгрузке может определяться по первой разгрузочной кривой (прямой AA^* , расположенной под углом α^* к оси деформаций, рис. 30). Получаемое при этом значение модуля деформации будет ниже по сравнению со значением $E_{ст}$, определенным по этой же разгрузочной кривой. Следует отметить, что на величину модуля деформации при разгрузке соляных пород большое влияние оказывает скорость разгрузки. При этом можно получить завышенное значение модуля деформации (при большой скорости разгрузки, например, кривая CC^{**} , рис. 30) и заниженное (при малой скорости разгрузки кривая CC^* , рис. 30).

Влияние скорости нагрузки и разгрузки соляных пород было установлено В. Дрейером [163] и при определении динамического модуля упругости по скорости прохождения упругих волн. В. Гимм и В. Дрейер [166] предложили для определения статического модуля упругости соляных пород использовать первый метод, т. е. по касательной к первой разгрузочной кривой, расположенной под углом α к оси деформаций. При этом напряжение разгрузки необходимо принимать около 40% от предела прочности на сжатие.

Характер изменения статического модуля упругости каменной соли в зависимости от величины нагрузки, по данным [163], показан

на рис. 31. При увеличении нагрузки на образец каменной соли с 50 до 400 кгс/см² значение статического модуля упругости $E_{ст}$ изменяется от $0,6 \cdot 10^5$ до $0,85 \cdot 10^5$ кгс/см².

Для определения прочностных и деформационных характеристик соляных пород в лабораторных условиях было испытано несколько серий образцов. По результатам испытаний строились графики «напряжение — деформация» (рис. 32), по которым находилось значение статического модуля упругости (по первой разгрузочной кривой).

При испытаниях на сжатие нагрузка на образец задавалась отдельными циклами «нагрузка — разгрузка» в пределах значений

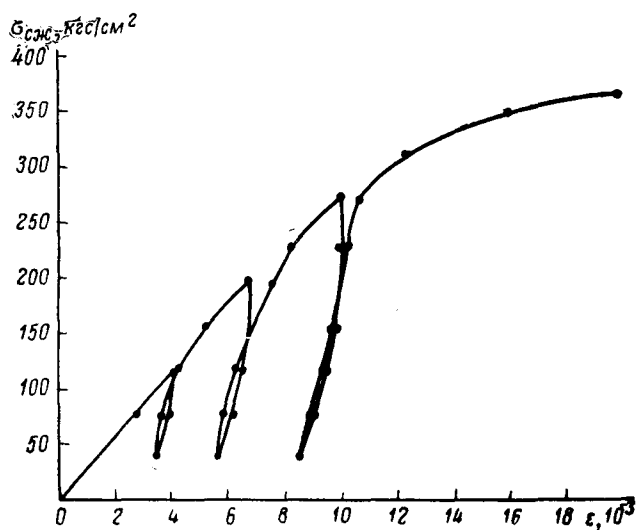


Рис. 32. График «напряжение — деформация» при испытании образцов (размеры $8 \times 8 \times 8$ см) каменной соли III—IV (III горизонт, I Солигорский рудник) на сжатие ($\sigma_{сж} = 368$ кгс/см², $E_{ст} = 1,22 \cdot 10^5$ кгс/см²).

40—60% от разрушающей, после чего образец разрушался и определялось значение $\sigma_{сж}$. Напряжение разгрузки принималось в пределах 35—45% от $\sigma_{сж}$. Средние значения модуля упругости по результатам лабораторных испытаний составили, кгс/см²: для каменной соли III—IV (III горизонт, I Солигорский калийный рудник) $(0,94 \div 1,15) \cdot 10^5$ (для кубических образцов с размерами граней 3—4 см) и $(1,4 \div 1,93) \cdot 10^5$ (для кубических образцов с размерами 5—15 см); для сильвинита (II горизонт, верхняя пачка, I Солигорский калийный рудник) $1,18 \cdot 10^5$ (для кубических образцов размером $5 \times 5 \times 5$ см).

§ 2. Коэффициент Пуассона

Коэффициент поперечных деформаций, или коэффициент Пуассона, определяется по результатам испытаний соляных пород при сжатии как отношение относительной поперечной деформации образца к относительной продольной деформации:

$$\mu = \epsilon'' / \epsilon', \quad (17)$$

где ϵ'' — относительная поперечная деформация образца, определяется из выражения

$$\epsilon'' = \Delta d/d, \quad (18)$$

где Δd — абсолютная поперечная деформация образца, мм; d — диаметр испытываемого образца, мм; ϵ' — относительная продольная деформация образца:

$$\epsilon' = \Delta h/h; \quad (19)$$

h — высота образца, мм.

Величина коэффициента Пуассона для соляных пород зависит от нагрузки и, по данным [163], для каменной соли увеличивается от 0,25 до 0,45 при изменении напряжения от 50 до 400 кгс/см².

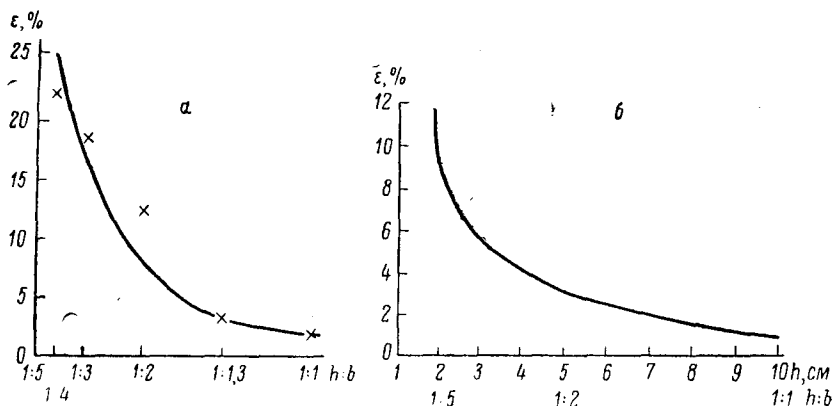


Рис. 33. Зависимость максимальных относительных продольных деформаций каменной соли (а) и карналлита (б) от отношения высоты образца h к ширине b .

В работе [195] описано испытание образцов каменной соли и карналлита при сжатии по обычной методике и при использовании на контактах плоских напряженных прокладок из того материала, что и испытываемый образец (см. § 4, гл. V).

На рис. 33 приведены значения максимальных (разрушающих) относительных продольных деформаций образцов соляных пород с различным отношением h/b . Образцы испытывались на сжатие по обычной методике с применением на торцах металлических прокладок с насечкой. Как видно из рис. 33, а, разрушение образцов кубической формы каменной соли имело место при ϵ , равных 2%, а образцов с отношением $h/b = 1/3$ — при $\epsilon = 18\%$. С увеличением отношения при сжатии образцы каменной соли проявляют большие относительные деформации. При испытаниях образцов (кубической формы) карналлита на сжатие они разрушались при $\epsilon = 1\%$ (рис. 33, б), а образцов с отношением $h/b = 1/5$ — при $\epsilon = 11\%$.

Из сопоставления максимальных относительных продольных деформаций каменной соли и карналлита видно, что для карналлитовых

образцов они примерно в 2 раза меньше по сравнению с аналогичными образцами каменной соли. При этом доля упругих деформаций для карналлитовых образцов была около 50%, а для образцов каменной соли — около 10%.

На величину продольных и поперечных деформаций соляных пород при сжатии и их отношение влияют, как уже отмечалось, форма образца и величина нагрузки.

Изменение продольных и поперечных деформаций образцов соляных пород с различным отношением высоты к ширине и при нагрузках 200 и 400 кгс/см² приведено в табл. 16. С уменьшением отношения высоты образца h к ширине b продольные деформации для каменной соли и карналлита увеличиваются, а поперечные, наоборот, уменьшаются. В результате отношение продольных деформаций к поперечным увеличивается: для образцов каменной соли с 0,7 до 13,9, а для образцов карналлита — с 1 до 600. При испытаниях образцов с плоскими напряженными прокладками на торцах суммарные вертикальные деформации примерно в 2 раза были больше по сравнению с обычными испытаниями образцов при сжатии, суммарные поперечные деформации были примерно одинаковыми.

Таблица 16

Изменение продольных и поперечных деформаций образцов соляных пород различной формы при нагрузке 400 кгс/см² [195]

Отношение высоты образца к ширине h/b	Относительные деформации, %						
	Продольные	Поперечные	Отношение продольных к поперечным	Продольные	Поперечные	Отношение продольных к поперечным	Содержание карналлита, %
	Каменная соль			Карналлит			
1/1	2,4	3,1	0,7	—	—	—	—
1/2	2,4	0,6	7,3	(4,0) *	(3,97)	(1,0)	—
1/3	5,0	0,5	10,0	—	—	—	—
1/3,3	7,8	0,6	13,9	5,8 (4,6)	3,8 (0,16)	1,5 (28,4)	62
1/4	—	—	—	7,7 (4,5)	0,3 (0,05)	2,6 (90,0)	77
1/5	—	—	—	8,3 (6,1)	0,12 (0,03)	69,0 (203)	74
1/6	—	—	—	6,0 (5,4)	0,01 (0,01)	600,0 (540)	76

* В скобках приведены значения деформаций при нагрузке 200 кгс/см².

Значения продольных и поперечных деформаций соляных пород при их испытаниях на сжатие с напряженными прокладками на торцах и при различной нагрузке, по данным [195], приведены в табл. 17. Судя по данным табл. 17, для образцов каменной соли и карналлита с увеличением нагрузки на образец от 200 до 800 кгс/см²

Изменение предельных поперечных деформаций образцов соляных пород в зависимости от нагрузки [195] при $h/b = 1/3$

Нагрузка, кгс/см ²	Относительные деформации, %					
	Продольные	Поперечные	Отношение продольных к поперечным	Продольные	Поперечные	Отношение продольных к поперечным
200	3.6	0.1	36	5.9	0.44	13.4
300	—	—	—	6.5	0.82	7.9
400	5.3	0.5	10.6	7.5	3.1	2.7
500	—	—	—	10.3	4.9	2.1
600	8.3	2.3	3.6	13.6	8.9	1.7
800	12.6	13.7	0.9	—	—	—

величина продольных и поперечных деформаций растет, при этом отношение продольных деформаций к поперечным снижается: для каменной соли с 36 до 0,9, для карналлита — с 13,4 до 1,7.

Для сопоставления интересно привести данные о продольных и поперечных деформациях соляных целиков в природных условиях. По данным [195], в целиках калийных пластов района Верра у границ шахтного поля на глубине 600—650 м от поверхности отношение продольных деформаций к поперечным составляет 10/1. Это отношение уменьшается с увеличением глубины разработки в центре шахтного поля до 2,5/1. В центре шахтного поля на глубине 930 м вертикальная деформация целиков составляла 70 мм (2,5% от высоты целика), а поперечная деформация на глубине 0,5 м от обнажения — 102 мм (1% от ширины 11-метрового целика). Указанные значения деформаций получены при отработке камерами шириной 18—20 м с целиками размером 60 × 13,5 × 2,5 м и при потерях 40—43%. Средние скорости оседания кровли на этих участках составили, мм/100 суток: на глубине 650—700 м — 0,5—0,8; на глубине 930 м — 9. На участках отработки калийных пластов камерами шириной 12—14 м с квадратными целиками (размеры целиков 16 × 16 × 3,5 м) и потерями 30—33% продольная деформация целиков составляла 60 мм (2% от высоты целика), поперечная — 55 мм (0,35% от ширины целика), а их отношение 5/1. Для целиков, расположенных на границе шахтного поля, это отношение составляло 10/1. Средняя скорость оседания кровли (деформаций целиков) на этих участках 11,3 мм/100 суток.

А. Ф. Савченко [109], изучая предельные деформации сжатия артемовской каменной соли, получил отмеченную выше закономерность снижения максимальной относительной деформации при сжатии.

Так, при изменении отношения высоты испытываемых образцов к диаметру (среднему поперечному размеру) с 0,4 до 5 значения относительных продольных деформаций снижались с 16,4 до 2,1%. В этой же работе отмечается хорошее совпадение полученных в лабораторных условиях данных о предельных продольных деформациях с натурными деформациями целиков. Для целика каменной соли на шахте им. Свердлова ($h/a = 0,55$) при средней за 19 лет скорости деформации 2 мм/100 суток максимальное значение относительной продольной деформации составило 8,5%, а по данным лабораторных испытаний для образца с отношением $h/d = 0,5$ оно было 8%.

По данным наших испытаний соляных пород в лабораторных условиях, при кратковременной нагрузке максимальные относительные продольные деформации в зависимости от формы и размеров испытываемых образцов Старобинского месторождения изменялись, %: для каменной соли от 0,8 до 2,5, для сильвинита — от 2,3 до 3, а значения коэффициента Пуассона для каменной соли были 0,26—0,41, для сильвинита — 0,28—0,43.

ГЛАВА IX

ПАСПОРТА ПРОЧНОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД И МЕТОДЫ ИХ ПОСТРОЕНИЯ

Рассмотренные в предыдущих главах методы определения прочности при одноосном сжатии, растяжении и изгибе позволяют получить значения прочности при простых видах нагружения образцов — $\sigma_{сж}$, σ_r и $\sigma_{изг}$. Соляные породы, вмещающие горные выработки, в зоне их влияния испытывают сложное неравномерное напряженное состояние, при этом величина вертикальной и горизонтальной составляющей напряжений будет определяться многими горно-техническими факторами. Можно предположить, что соляные горные породы в нетронутом массиве на определенной глубине от поверхности в силу значительной их пластичности находятся в объемном равномерном напряженном состоянии, т. е. нормальные составляющие напряжений равны. Прочность горных пород в условиях плоского и объемного напряженного состояния в несколько раз выше по сравнению с прочностью при одноосном сжатии [1, 37, 113, 121]. Сказанное справедливо и для соляных пород. Испытание образцов сильвинита при объемном напряженном состоянии ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$) показывает, что прочность при сжатии увеличивается с 300 (при боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) до 420 кгс/см² при боковом давлении 500 кгс/см² и до 750—760 кгс/см² при боковом давлении 750 кгс/см².

По данным [37], испытание образцов соляных пород при боковом давлении от 25 до 200 кгс/см² вызывает увеличение прочности, кгс/см²: для каменной соли от 260 до 800, для карналлита от 225 до 670.

Соляные породы при разработке месторождений каменной и калийных солей в зоне влияния горных выработок испытывают сложное напряженное состояние, которое определяет характер их деформации и разрушения. Поэтому изучение характера деформации пород в условиях сложных напряженных состояний представляет интерес для объяснения разнообразных проявлений горного давления и управления ими.

В связи с тем, что соляные породы в зоне влияния горных выработок могут принимать большое количество сочетаний компонентов главных напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3 , изучение прочности при всех сочетаниях главных напряжений в лабораторных условиях практически невозможно. Поэтому для сопоставления прочностных свойств соляных пород при разных напряженных состояниях используют теории прочности. В качестве критерия механического разрушения соляных пород, как и других горных пород, используются напряжения, деформации или другие механические характеристики. Соляные породы под нагрузкой разрушаются в результате деформации составляющих их кристаллов или связей между ними. Отмеченный характер деформации соляных пород и составляющих их кристаллов должен учитываться теорией прочности, при этом наиболее удовлетворительной будет та теория, которая дает лучшую сходимость с экспериментальными данными.

В настоящее время известно большое количество гипотез прочности материалов и, в том числе, горных пород, анализ которых приведен в работах [66, 113, 118, 120]. А. Н. Ставрогин [118, 120], исследуя предельные состояния горных пород, отмечает, что ни одна из классических теорий прочности или их комбинаций не объясняет поведения горных пород во всем диапазоне напряженных состояний. Отдавая предпочтение статистической теории прочности, в работе [120] он отмечает, что при деформации горных пород развиваются микротрещины во всем деформируемом теле. Внешне это проявляется в усиленном изменении формы и объема тела. Еще больший эффект увеличения объема за счет микроразрывов имеет место при длительной нагрузке на образец. Так, на образцах каменной соли, испытывавшихся в течение 107 суток при нагрузке 70% от разрушающей, было замечено [118], что эффект изменения объема по сравнению с подсчетным по теории упругости увеличился в 28 раз. Для горных пород наибольшее распространение и экспериментальное подтверждение получила теория Мора. По мнению В. Гимма [166], эта теория удовлетворительно описывает и поведение соляных пород.

По теории Мора, разрушение элемента горной породы под действием на него сжимающих усилий происходит по площадкам, где действуют предельные касательные напряжения, тем более высокие, чем больше величина нормального к площадке усилия.

Для характеристики напряженного состояния в точке строится круговая диаграмма. Графическая интерпретация данных исследований образцов пород заключается в следующем: для нескольких видов

напряженного состояния (одно-, двух- или трехосного) определяются значения разрушающих напряжений, которые изображаются в виде кругов напряжений на совмещенной диаграмме. Центры кругов находятся на расстоянии $\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$ от начала координат, а их радиусы равны $\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ [113]. Все семейство кругов будет иметь одну общую огибающую, которая достаточно полно характеризует прочностные свойства испытываемых пород и называется п а с п о р т о м п р о ч н о с т и .

Огибающая предельных кругов напряжений дает возможность наглядно оценить опасность конкретного напряженного состояния и охватывает весь комплекс предельных механических состояний конкретной горной породы.

Для соляных горных пород до настоящего времени имеются ограниченные данные о паспортах прочности и методах их построения. Для горных пород, по данным [113], наибольшее распространение получили следующие методы построения паспорта прочности: а) объемного сжатия; б) среза со сжатием; в) соосных пуансонов; г) по результатам определения прочности горных пород при растяжении и сжатии; д) расчетный.

Для определения паспортов прочности соляных пород могут быть использованы все перечисленные выше методы, однако, исходя из теоретического обоснования и области их применения, необходимо при выборе того или иного метода учитывать достоверность получаемых при его использовании параметров прочности.

Методы построения паспортов прочности соляных пород. Построение огибающей предельных кругов Мора (паспорта прочности) по результатам испытаний горных пород при объемном неравномерном сжатии было выполнено впервые Карманом, поэтому такой метод построения паспорта прочности называют методом Кармана [113]. Карманом на разработанной им установке для испытания горных пород при всестороннем неравномерном сжатии экспериментально была доказана приемлемость критериев разрушения Мора для горных пород при сложных напряженных состояниях и установлен вид огибающей к предельным кругам напряжений. Справедливость полученных Карманом выводов в одинаковой степени относится и к соляным горным породам.

В настоящее время для испытания горных пород при объемном напряженном состоянии с целью получения прочности и исходных данных для построения паспорта прочности разработано много разновидностей экспериментальных установок, описание конструкций и методик проведения испытаний на которых с достаточной полнотой освещено в литературе [1, 23, 37, 76, 121]. Построение паспорта прочности по результатам испытаний при объемном напряженном состоянии сводится к следующему: на конкретной установке определяют прочность образца горной породы при различных сочетаниях осевого (σ_1) и бокового (σ_2 и σ_3) давлений. Затем в координатной системе $\tau - \sigma$ строят соответствующие каждому напряжен-

ному состоянию предельные круги напряжений. Огибающая, проведенная к предельным кругам напряжений, будет охватывать весь комплекс предельных механических состояний испытываемой горной породы. Паспорт прочности для каменной соли по результатам испытания образцов при объемном напряженном состоянии в стабилometре КП-4 конструкции ВНИМИ приведен в гл. XI (рис. 36).

Построение паспорта прочности в форме огибающих предельных кругов напряжений Мора обладает тем недостатком, что для них трудно получить аналитическое выражение кривой. А. Н. Ставрогиным на основании большого числа выполненных им экспериментальных исследований [118, 120, 121] были предложены новые условия предельных состояний, построенные в координатах $(\lg \tau_{\max}, C)$, где

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad C = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}. \quad (20)$$

Паспорт прочности сильвинита, построенный по результатам испытаний при объемном напряженном состоянии по методике А. Н. Ставрогина [118], приведен в гл. XI (рис. 39). При значениях $C = 0$ имеет место одноосное сжатие, положительные значения C относятся к сжатию при боковом давлении, отрицательные — к растяжению при боковом давлении.

Вторым методом получения паспорта прочности соляных пород является построение огибающей по результатам испытаний горных пород на срез со сжатием при различных углах наклона плоскости среза к направлению действия внешней силы. Обычно испытания соляных пород на срез со сжатием производят в наклонных матрицах под углами 30, 45 и 60° к вертикали [107, 113]. Основные методические положения испытания горных пород на срез со сжатием подробно изложены в работе [113]. В зависимости от конструкции матриц при испытаниях горных пород используются образцы цилиндрической, призматической и неправильной формы, при испытаниях соляных пород — цилиндрической и призматической формы. Испытанию подвергают 5—6 образцов-близнецов, по результатам испытаний вычисляют средние арифметические значения нормальных и касательных напряжений в момент среза и по ним в координатной системе $\tau - \sigma$ строят зависимость $\tau = f(\sigma)$, представляющую собой огибающую предельных кругов напряжений Мора, или паспорт прочности (рис. 34).

Нормальные σ , касательные τ напряжения в плоскости среза рассчитывают по формулам

$$\sigma = \frac{P}{F} \sin \alpha = q \sin \alpha; \quad (21)$$

$$\tau = \frac{P}{F} \cos \alpha = q \cos \alpha, \quad (22)$$

где P — разрушающая нагрузка, кгс; F — площадь среза, см²; q — отношение сжимающей силы P к площади среза F , кгс/см²;

α — угол наклона плоскости среза к направлению действия силы, град.

Испытания соляных пород на срез со сжатием немногочисленны, их результаты приведены в работах [105, 130], а параметры паспортов прочности соляных пород по данным испытаний на срез со сжатием даны в табл. 18.

Анализ экспериментальных данных испытаний соляных пород на срез со сжатием показывает значительный разброс значений. Так, отношения максимальных значений q к минимальным при одном и том же угле среза достигает, по данным [130], от 200 до 500%;

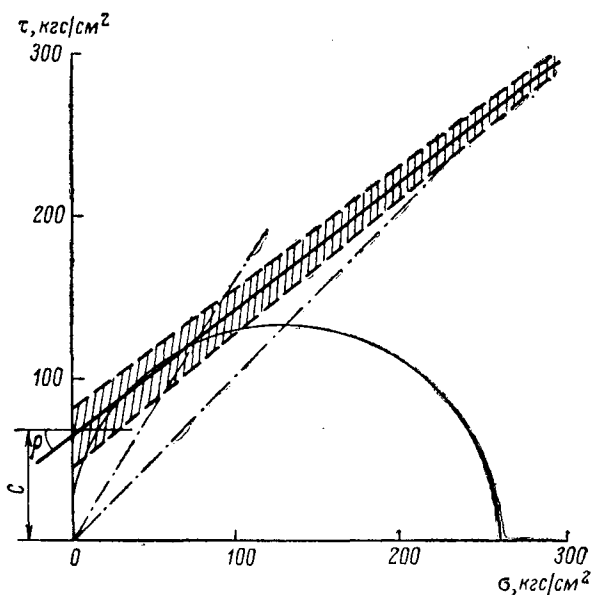


Рис. 34. Паспорт прочности каменной соли по результатам испытаний на срез со сжатием ($\rho = 37^\circ$, $K = 62$ кгс/см², $\sigma_{сж} = 270$ кгс/см²).

по данным В. С. Романова, испытывавшего цилиндрические образцы каменной соли, разброс значений не превышал 20%. Большой разброс значений q при испытании соляных пород в работе [130], очевидно, следует отнести за счет большой неоднородности испытываемых образцов, их недостаточной обработки и методики проведения испытаний. В работе [113] при испытаниях горных пород на срез со сжатием разброс получаемых значений составлял 400—500%, что объясняется неравномерностью распределения напряжений в плоскости среза из-за неточности изготовления образцов и недостатками срезных приборов.

Выполненные в Ленинградском горном институте испытания соляных пород на срез со сжатием показали достаточную представительность этого метода для соляных пород. Было установлено, что наибольшие погрешности при испытаниях имеют место из-за несовершенства срезных приборов, неточности изготовления образцов, дающих неравномерное распределение напряжений в плоскости

Параметры паспортной прочности соляных пород

Месторождение, пласт	Порода	Вид испытаний	Параметры паспортной прочности		Исследователь
			K , кгс/см ²	ρ	
Яр-Бишкадакское, глуб., м: 520 800 1130	Каменная соль	Срез со сжатием	57 62 108	39 36 32	В. С. Романов
То же	То же Увлажненная каменная соль	Объемное напряженное состояние	53 94	29 25	
Старобинское, III горизонт	Сильвинит Каменная соль Карналлит с глиной	Срез со сжатием	91 64—80 55	31 27—33 34	Н. М. Проскуряков, А. А. Антонов
Старобинское, глуб. 400— 500 м	Каменная соль разнозернистая	То же	35—50	27—39	А. А. Атрашкевич, Ю. П. Шокин и др. [130]

среза, а также из-за необходимости проведения испытаний на образцах с отношением их диаметра d (среднего поперечного размера) к среднему размеру составляющих зерен $d/\delta \geq 25 \div 30$. Проведение испытаний на образцах малых размеров даже при соблюдении всех других условий дает большой разброс данных.

Методика построения паспорта прочности горных пород по результатам испытаний образцов соосными пуансонами разработана во ВНИМИ и изложена в работах [108, 113]. Испытания проводят на плоских дисках, нагружая их в центральной части соосными пуансонами. Для построения огибающей проводят параллельные испытания сплошного и полого дисков с замером деформаций по концентрическим окружностям. Как уже отмечалось в гл. V и VI, испытания плоских дисков соляных пород методом соосных пуансонов затруднительны из-за сложности изготовления необходимых образцов, а получаемые при этом результаты имеют большой разброс.

Кроме того, проведение испытаний методом соосных пуансонов для построения паспорта прочности требует специального тензометрического оборудования. По отмеченным выше причинам этот метод не может быть рекомендован для определения паспорта прочности соляных пород.

Паспорт прочности соляных пород в области растяжения — сжатия может быть построен по данным испытаний на одноосное сжатие и растяжение. По полученным экспериментальным путем значениям $\sigma_{сж}$ и σ_p в координатной системе $\sigma - \tau$ строят предельные круги напряжений и к ним проводят касательную, которая рассматривается как огибающая. Методы определения $\sigma_{сж}$ и σ_p для соляных пород рассмотрены в гл. V и VI. Огибающая предельных кругов Мора в этом случае строится по двум точкам и представляет собой прямую линию. Полученный таким образом паспорт прочности отражает только одноосное напряженное состояние и носит ориентировочный характер. Значения угла внутреннего трения ρ и сопротивления сдвигу K рассчитываются по формулам

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\sigma_{сж} - \sigma_p}{2 \sqrt{\sigma_{сж}\sigma_p}}; \quad (23)$$

$$K = \frac{\sqrt{\sigma_{сж}\sigma_p}}{2}. \quad (24)$$

Построение паспорта прочности горных пород расчетным методом основано на существовании единой формы огибающей для всех горных пород. Этот вывод был сделан М. М. Протодяконовым на основе анализа существующих представлений о виде огибающей предельных кругов Мора.

Рассмотрение приведенных выше методов построения паспортов прочности соляных пород по результатам их испытания различными методами показывает, что для одной и той же породы получаются

различные, часто даже трудносопоставимые значения паспортной прочности. Наиболее близкие к натурным условиям данные о паспорте прочности соляных пород можно получить при их испытаниях в условиях объемного напряженного состояния.

В. С. Романов, проводивший сопоставительные испытания цилиндрических образцов каменной соли в условиях объемного напряженного состояния (в стабилometре КП-4) и на срез со сжатием в наклонных матрицах, отмечает, что при этом получаются близкие, сопоставимые данные (см. табл. 18). Построение паспорта прочности соляных пород по результатам испытаний на срез со сжатием может быть рекомендовано при условии хорошей обработки образцов в соответствии с размерами и формой применяемых матриц, а также при выполнении необходимых условий методики ведения испытаний.

В качестве основных критериев оценки методов определения паспортов прочности горных пород в работе [113] предлагаются следующие:

- а) возможно более широкий диапазон напряженных состояний, доступных для экспериментального исследования данным методом;
- б) достоверность экспериментальных исходных данных для построения огибающей.

ГЛАВА X

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ И ХРУПКОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД

Соляные породы характеризуются большой пластичностью, т. е. свойством претерпевать необратимые деформации. Под пластичностью горных пород понимают их способность под действием внешних сил изменять свою форму без разрыва сплошности и сохранять полученную форму после снятия нагрузки. Среди горных пород соляные породы (каменная соль и сильвинит) обладают наибольшей пластичностью, которая в значительной степени зависит от температуры и скорости приложения нагрузки.

Пластические свойства пород играют значительную роль в процессах деформаций и разрушений соляных пород при длительном действии нагрузок в зоне влияния горных работ. Глинистые прослойки в разрезах продуктивных калийных пластов при увлажнении приобретают свойства пластичности и под влиянием горного давления выдавливаются, ухудшают устойчивость целиков и потолочин. Поэтому показатели пластичности соляных пород должны учитываться вместе с показателями их прочности при определении рациональных параметров систем разработки.

Хрупкостью горных пород называют их свойство разрушаться без значительной пластической деформации. Наибольшей хрупкостью

среди соляных пород обладает карналлит. Свойство хрупкого разрушения соляных пород проявляется при больших скоростях приложения нагрузки, а также при динамических проявлениях горного давления — горных ударах и выбросах соли и газа. Поэтому количественная оценка хрупкости отдельных соляных пород при различных условиях их нагружения представляет практический интерес.

Различают пластичность и хрупкость соляных пород при статических и динамических нагрузках. Оценка хрупкости горных пород при динамических нагрузках весьма затруднительна и в настоящее время ее определяют косвенными методами.

Соляные породы под нагрузкой проявляют упруго-пластические деформации, при этом соотношение между упругими и пластическими деформациями будет определяться видом испытываемой породы и скоростью приложения нагрузки. Для определения и количественной оценки пластичности и хрупкости горных пород при статических нагрузках имеются различные методы и аппаратура. Так, для количественной оценки пластических свойств горных пород Л. А. Шрейнером [113] разработан метод и прибор УМГП-3, основанный на вдавливании цилиндрического штампа с плоским основанием в породу. Прибор УМГП-3 состоит из нагрузочного приспособления, устройства для записи деформаций и столика для установки образца. Прибор рассчитан на нагрузку от 100 до 1000 кгс с предельным измерением деформаций до 0,75 мм. На этом приборе определяются следующие характеристики: твердость, условный предел текучести, коэффициент пластичности, модуль упругости и энергоемкость разрушения. Методика определения этих показателей с помощью прибора УМГП-3 приведена в работе [113].

В качестве характеристики пластичности горных пород по результатам испытаний на приборе УМГП-3 принимают коэффициент пластичности, равный отношению общей работы до разрушения к работе упругой деформации из выражения

$$K = \frac{A_{\text{общ}} - A_{\text{ш}}}{A_{\text{упр}} - A_{\text{ш}}}, \quad (25)$$

где K — коэффициент пластичности; $A_{\text{общ}}$ — общая работа до разрушения; $A_{\text{упр}}$ — упругая работа; $A_{\text{ш}}$ — работа, затраченная на деформацию штампа.

При вдавливании штампа в весьма пластичные породы, к которым относятся и соляные, разрушение под штампом не происходит, поэтому для таких пород коэффициент пластичности условно принимается равным бесконечности. По результатам испытания на приборе УМГП-3 соляных пород Старобинского месторождения были получены следующие характеристики: условный предел текучести, равный отношению нагрузки, соответствующей пределу текучести, к площади штампа, для каменной соли — 3,4, для сильвинита — 3,2 кгс/мм²; коэффициент пластичности, как отмечалось, условно принят за бесконечность.

ВНИМИ разработан метод приближенной оценки пластических свойств горных пород [85], который предусматривает нагружение цилиндрических породных образцов (кернов) давлением двух встречных сферических инденторов (пуансонов) радиусом 5 мм на диаметрально противоположные точки боковой поверхности образца. В качестве определяемой деформации измеряется сближение этих инденторов. Показатели пластичности оцениваются в баллах, при этом значения остаточных деформаций и деформаций текучести, ограничивающие диапазоны 5 шкал (от 0 до 4) категорий пластичности, получены в ходе экспериментальных испытаний ряда типичных разновидностей горных пород. При оценке пластических свойств горных пород используются следующие показатели [85]:

а) категория пластичности, определяемая по величине остаточных деформаций пород при кратковременном (10-минутном) действии сжимающей нагрузки, равной 80% от разрушающей;

б) категория текучести, определяемая по величине деформаций породы, развивающейся в течение 10—60-минутного интервала действия указанной нагрузки.

Указанные интервалы времени при определении пластических свойств пород установлены экспериментально.

Исследованиями каменной соли по рекомендуемой методике ($\sigma_{сж} = 260 \text{ кгс/см}^2$) [85] установлены такие значения деформаций, мм: в первом интервале нагружения $\Delta l = 1,032$, во втором — 0,087, что послужило основанием для отнесения каменной соли к 4-й категории пластичности. Хрупкость горных пород часто оценивается по отношению временного сопротивления сжатию к временному сопротивлению растяжению. По этому критерию соляные породы имеют следующие значения хрупкости: каменная соль — 15—30, сильвинит — 20—30 и карналлит — 15—20. Большой разброс значений σ_p и $\sigma_{сж}$ для разных месторождений затрудняет оценку хрупкости соляных пород по предложенному критерию.

Для количественной оценки способности соляных пород к хрупкому разрушению в работе [166] предложен критерий (E°), представляющий собой отношение продольной упругой деформации по второй разгрузочной кривой ($\Delta l_{упр}$) к общей деформации породы под нагрузкой ($\Delta l_{общ}$) при втором цикле нагружения:

$$E^\circ = \frac{\Delta l_{упр}}{\Delta l_{общ}} \cdot 100, \% \quad (26)$$

Существенным условием при определении значения E° является напряжение, при котором происходит разгрузка образца при испытаниях его на сжатие. В работе [166] при определении значения E° разгружать образец рекомендуется при напряжении, наиболее близком к разрушающему, а именно: около 60—80% от предела прочности на сжатие. По этому критерию способность соляных пород к хрупкому разрушению оценивается в процентах и составляет: для карналлита — 80—90, ангидрита — 70—80, хартзальца — около 20—30 и каменной соли — около 12—20.

По Л. И. Барону [8], коэффициент хрупкости $k_{хр}$ горных пород определяется по отношению работы упругой деформации $A_{упр}$ к общей работе разрушения A_p :

$$k_{хр} = \frac{A_{упр}}{A_p}. \quad (27)$$

Для прочных горных пород значение коэффициента хрупкости, по Л. И. Барону, изменяется от 0,007 до 0,5 [113].

В заключение отметим, что пластичность и хрупкость для соляных пород зависят от многих факторов и в первую очередь от скорости приложения нагрузки. При медленном нагружении карналлит (наиболее хрупкий по сравнению с другими соляными породами) проявляет значительную пластичность, а при быстром или мгновенном приложении нагрузки каменная соль может проявлять значительные упругие деформации и разрушаться как хрупкое тело.

ГЛАВА XI

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ СЛОЖНЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ

§ 1. Методы исследования соляных пород

Соляные породы, находящиеся в зоне влияния горных выработок, испытывают сложное неравномерное напряженное состояние, отличное от одноосного. Поэтому исследование деформационных и прочностных характеристик в лабораторных условиях при одноосной нагрузке позволяет получить лишь ориентировочные значения прочности и деформаций испытываемых образцов.

В практике лабораторных испытаний известны и используются три варианта объемного или трехосного сжатия: $\sigma_1 = \sigma_2 - \sigma_3$; $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$; $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$. Чаще всего при лабораторных испытаниях используется второй вариант нагружения, называемый способом Кармана.

Экспериментальные работы по исследованию горных пород при сложных напряженных состояниях в лабораторных условиях многочисленны [1, 37, 91, 113, 118, 120, 121]. Применяемая аппаратура и методики лабораторных исследований горных пород при сложных напряженных состояниях подробно описаны в работе [1], а анализ состояния исследований свойств горных пород при всестороннем сжатии дан в работе [113]. Анализ выполненных исследований горных пород при всестороннем сжатии показывает, что прочность горных пород с увеличением всестороннего давления возрастает. При всестороннем давлении изменяется характер деформации и разрушения горных пород: хрупкие породы при больших всесторонних

давлениях проявляют пластические деформации и наоборот. При всестороннем давлении на образец порядка $1000-2000$ кгс/см² значительно возрастают упругие параметры горных пород, изменяется скорость распространения упругих волн, в несколько раз увеличивается прочность при сжатии.

Первые опыты по исследованию соляных пород при сложных напряженных состояниях были выполнены Ф. Киком [174], который испытывал шарообразные образцы каменной соли в цилиндрической металлической обойме, при этом свободное пространство последней заполнялось квасцами. Затем обойма сжималась на прессе и принимала бочкообразную форму. Эти опыты носили только качественный характер, никаких инструментальных замеров при этом не проводилось.

М. Кульбауф [167] исследовал образцы калийной соли в специальной металлической матрице. За счет осевого усилия, прикладываемого к образцу по торцам, в матрице создавалось трехосное напряженное состояние. Для снижения трения образца о стенки матрицы его тщательно смазывали. При испытаниях измеряли напряжения и деформации образца, по которым определялись прочность калийной соли на сдвиг по плоскости октаэдра, модуль пропорциональности между напряжениями и деформациями, коэффициент Пуассона. В начальной стадии формирования в матрице имеет место упругая деформация, для которой может быть определен модуль упругости. При дальнейшем увеличении осевой нагрузки развиваются деформации пластического течения. Величина давления, при котором калийная соль теряет свою упругость и проявляет пластические деформации, определяется сопротивлением сдвигу по плоскости октаэдра, представляющим собой молекулярную силу сцепления плоскостей спайности восьмигранников составляющих кристаллов.

§ 2. Результаты экспериментальных исследований свойств соляных пород

Исследования образцов соляных пород при объемном напряженном состоянии проводились в ГДР [37] на специальной установке для трехосного сжатия, при этом нагрузка образцов осуществлялась по схеме $\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$. Результаты испытания образцов каменной соли и карналлита при боковом давлении до 200 кгс/см² показаны на рис. 35. В пределах достигаемых давлений образцы каменной соли и карналлита проявляют различные деформационные и прочностные свойства. Явно выраженное хрупкое разрушение образцов каменной соли происходило только при одноосной нагрузке, при всестороннем давлении образцы каменной соли проявляют большие пластические деформации. Образцы карналлита при достаточно высоком боковом давлении обладали свойствами хрупкого разрушения и только при боковом давлении $\sigma_2 = \sigma_3 = 200$ кгс/см² в образцах развивались большие деформации, при этом разрушение происходило по взаимно пересекающимся плоскостям сдвига.

В работе [113] описана установка для трехосного неравномерного сжатия кубических образцов размером от 5 до 20 см, которая в зависимости от размеров образцов может развивать усилия в вертикальном направлении от 1500 до 24 000 кгс/см², а в горизонтальном — от 750 до 1200 кгс/см². При достижении определенного усилия и

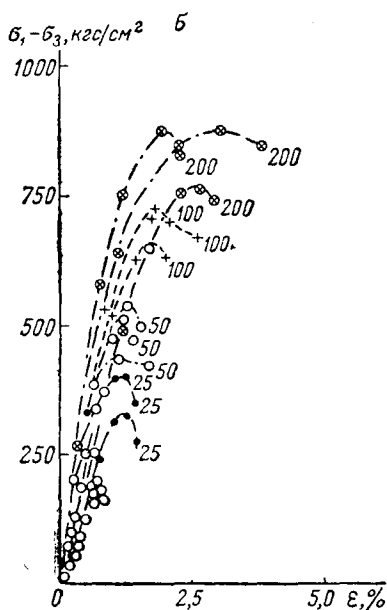
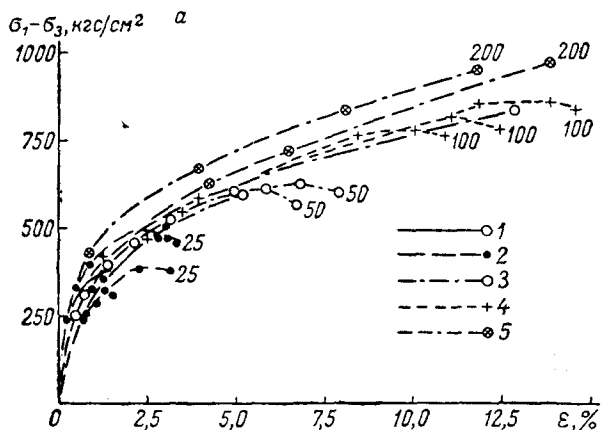


Рис. 35. Графики деформаций образцов каменной соли (а) и карналлита (б) при объемном напряженном состоянии [37].

Осяевое давление, кгс/см²:
1 — 0; 2 — 25; 3 — 50; 4 — 100; 5 — 200.

установки скорости нагружения, равной нулю, достигнутое усилие может поддерживаться постоянно в течение заданного промежутка времени независимо от деформации образца. На этой установке были испытаны образцы каменной соли.

Образцы каменной соли при объемном напряженном состоянии испытывались в стабилометре КП-4 конструкции ВНИМИ по мето-

дике, изложенной в работе [91]. Образец, помещенный в камеру стабилометра, нагружался по схеме $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, при этом образец разрушался при плавном постепенном увеличении осевого давления σ_1 , при поддержании бокового давления $\sigma_2 = \sigma_3$ постоянным. При испытаниях боковое давление изменялось от 0 до 190, осевое — от 160 до 900 кгс/см².

На первом этапе исследований в соответствии с конструктивными особенностями стабилометра испытывались цилиндрические образцы диаметром 43 и высотой 85—90 мм. Результаты предварительных испытаний показали, что для такого крупнокристаллического материала, как каменная соль, использование образцов с указанными размерами невозможно из-за большого разброса значений прочности

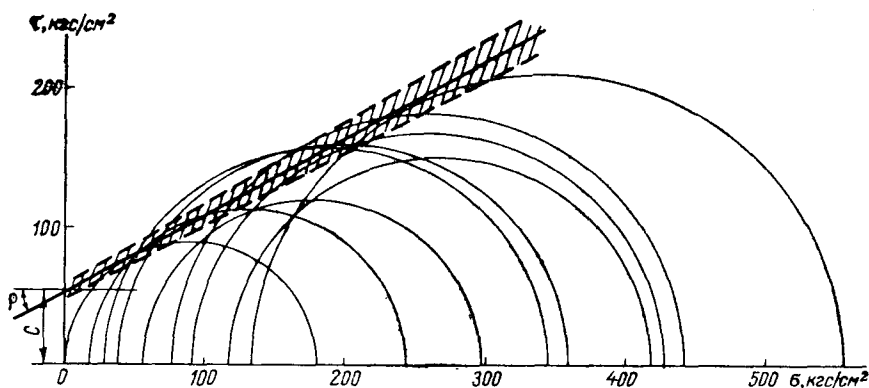


Рис. 36. Паспорт прочности каменной соли при объемном напряженном состоянии.

при сжатии и трудности изготовления образцов. В последующих опытах после внесения конструктивных изменений в стабилометре испытывались цилиндрические образцы диаметром 52 и высотой 90—96 мм. Результаты испытаний 23 образцов каменной соли (Яр-Бишкадакское месторождение) представлены на рис. 36 в виде паспорта прочности, из которого видно, что угол внутреннего трения $\rho = 29^\circ$, а коэффициент сцепления $C = 53$ кгс/см². По результатам испытаний одноименных образцов каменной соли в наклонных матрицах на срез со сжатием значения угла внутреннего трения и коэффициента сцепления составляли соответственно $\rho = 37^\circ$, $C = 62$ кгс/см², т. е. отличались незначительно от результатов испытаний при объемном напряженном состоянии.

При расчете параметров систем подземной разработки калийных и каменносоляных месторождений в условиях применения гидравлической закладки, а также при подземном растворении представляет интерес испытание объемной прочности увлажненных образцов каменной соли. Такие исследования были выполнены на образцах каменной соли указанных выше размеров в стабилометре КП-4. Подготовленные к испытаниям образцы помещали в насыщенный раствор

и выдерживали в течение 20—45 суток до полного насыщения влагой (насыщение образцов влагой практически заканчивается через 6—10 суток). Вынутые из рассола образцы насухо вытирали и испытывали по методике, аналогичной для сухих образцов. Весовая влажность образцов перед испытаниями составляла 3—3,5%. Результаты испытаний увлажненных образцов каменной соли при объемном напряженном состоянии представлены в виде паспорта прочности на рис. 37, из которого видно, что $\rho = 25^\circ$, $C = 94$ кгс/см², т. е. имеет место незначительное снижение угла внутреннего трения и увеличение коэффициента сцепления по сравнению с сухими образцами.

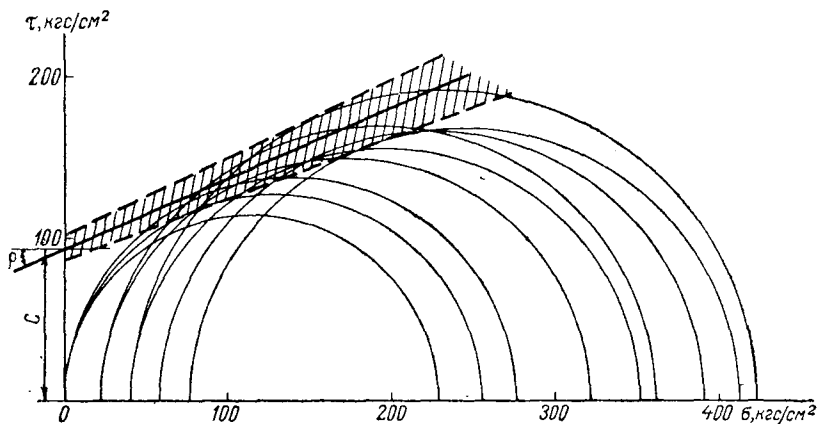
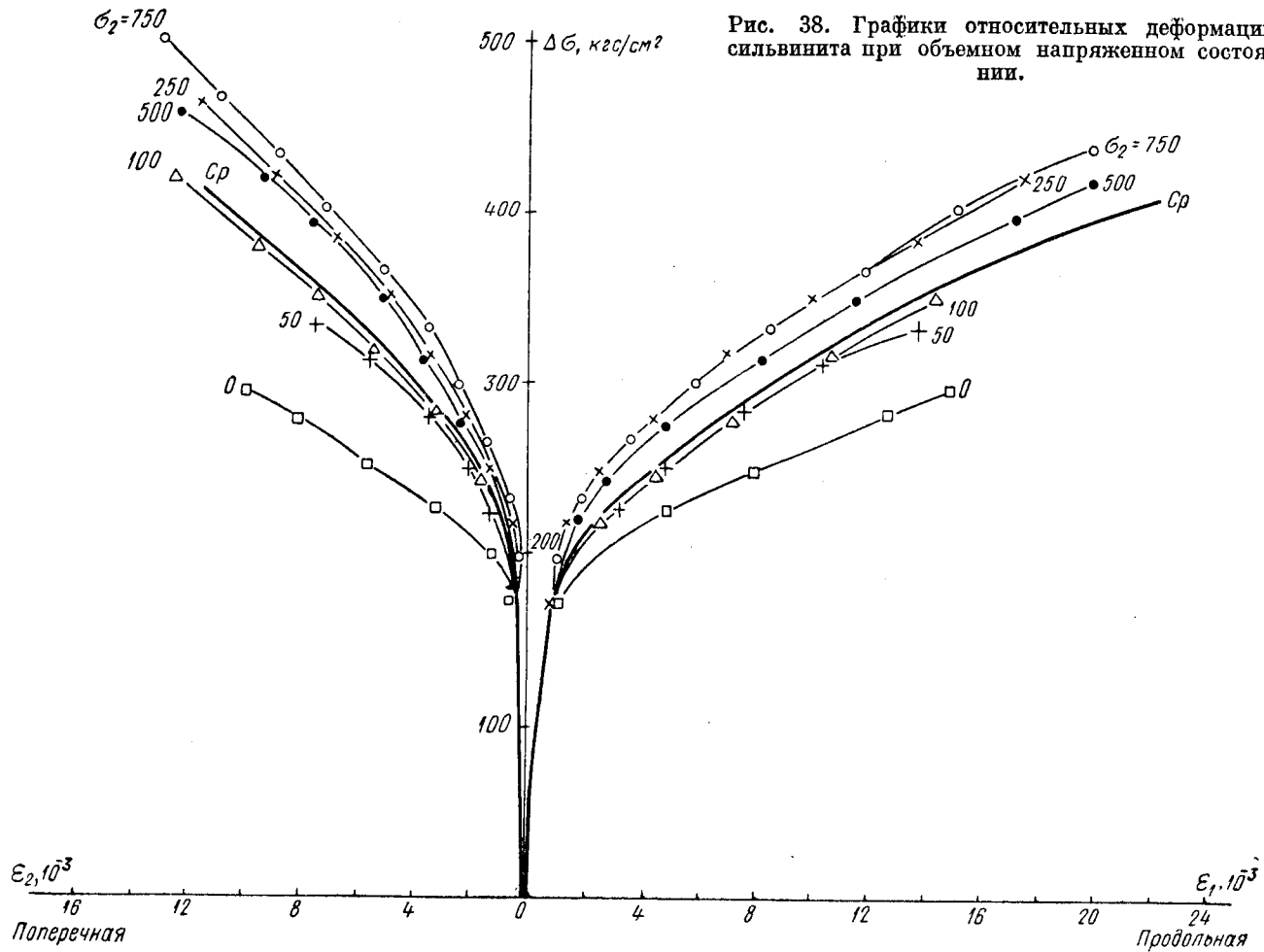


Рис. 37. Паспорт прочности увлажненных образцов каменной соли ($W = 3 \div 3,5\%$) при объемном напряженном состоянии.

Испытания * сильвинитовых образцов при объемном напряженном состоянии проводились на установке ГУСН, которая позволяет создавать в образце напряженное состояние неравномерного трехосного сжатия ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$). В соответствии с конструктивными особенностями установки для исследований использовались образцы мелкокристаллического сильвинита диаметром 30 и длиной 80 мм. Методики подготовки образцов к испытаниям и измерения деформаций описаны в работах [118, 120, 121]. При исследованиях осевое давление изменялось от 0 до 500, а боковое — от 0 до 750 кгс/см².

Графики относительных продольных и поперечных деформаций при различном осевом и боковом давлениях при объемном испытании образцов сильвинита показаны на рис. 38. Несмотря на большой диапазон изменения осевой и боковой нагрузок, испытываемые образцы сильвинита имели относительно небольшие относительные деформации — от 0,4 до 2,4%. Относительные продольные и по-

* Испытания проводились под руководством д-ра техн. наук А. Н. Ставрогина.



перечные деформации от осевой нагрузки при различных значениях σ_2 в начальной стадии деформирования практически совпадают, что позволяет сделать вывод о независимости упругих характеристик силвинита от величины всестороннего сжатия.

На рис. 39, а представлена зависимость изменения объема испытываемого образца θ от величины среднего давления $P = \left(\sigma_2 + \frac{\Delta\sigma_1}{3} \right)$.

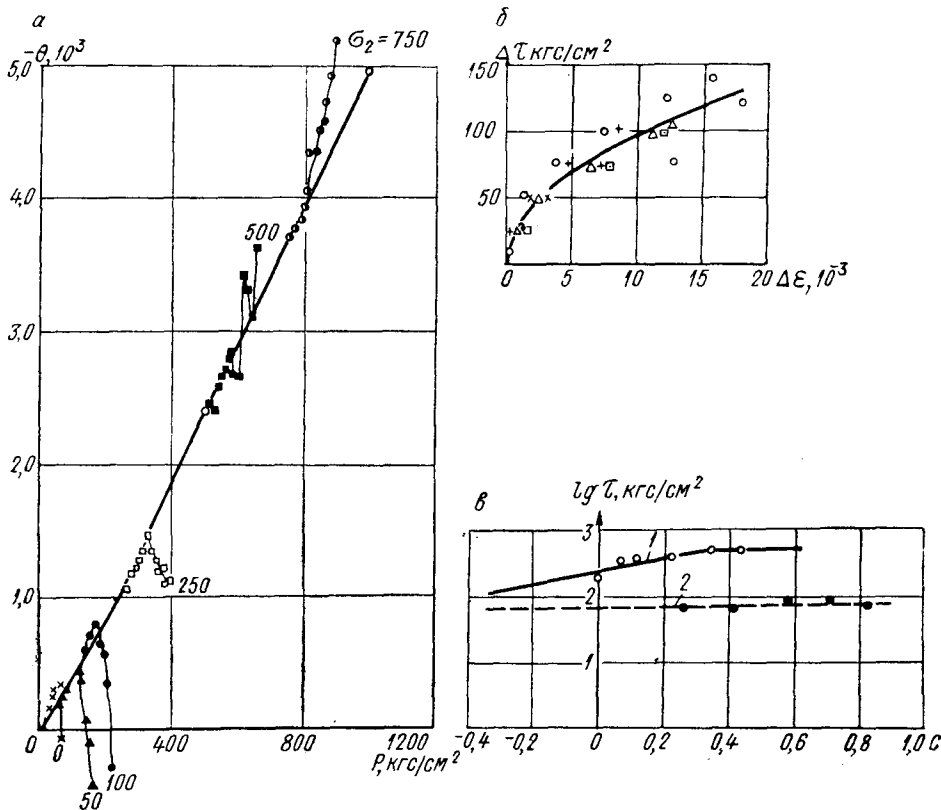


Рис. 39. Испытания силвинита при сложных напряженных состояниях.

а — относительное изменение объема образца θ при различных боковых давлениях σ_2 ; б — график обобщенной остаточной деформации; в — паспорт прочности (1) и предел упругости (2) силвинита при объемном напряженном состоянии.

Прямой линией изображена (рис. 39, а) зависимость, полученная при равномерном всестороннем сжатии. Остальные зависимости, изображенные на рис. 39, а, получены при осевом сжатии и различной величине бокового давления, которая указана на соответствующих кривых. Кривые, полученные при боковых давлениях $\sigma_2 = 0 \div 250$ кгс/см², после некоторого уровня осевой нагрузки начинают отклоняться вниз от основной зависимости, полученной при гидростатическом давлении. Момент отклонения указанных кривых вниз

ответствует началу раскрытия в образцах микротрещин, что приводит к увеличению объема образца. Эффект увеличения объема образцов при объемном напряженном состоянии является общей закономерностью деформации плотных (малопрочных) неоднородных пород [118, 120, 121], справедливой и для сильвинита.

Характерной особенностью деформации сильвинита, отличающей его от других пород, исследованных при сложных напряженных состояниях, является его деформация при $\sigma_2 = 500$ кгс/см² без увеличения объема. Для других горных пород указанное явление проявляется при значительно больших величинах всестороннего давления. При величине бокового давления $\sigma_2 = 750$ кгс/см² кривая начинает отклоняться вверх от прямой гидростатического давления, что означает, что материал образца начинает уплотняться, а его объем уменьшается.

Деформация испытанных образцов сильвинита при сложных напряженных состояниях за пределами упругости достаточно хорошо описывается обобщенной кривой текучести, методика построения которой описана в работах [118, 120, 121]. На рис. 39, б приведена обобщенная кривая текучести для испытанных образцов сильвинита.

По результатам выполненных лабораторных исследований образцов сильвинита при сложных напряженных состояниях по методике А. Н. Ставрогина [118] построены паспорт прочности и предел упругости для различных осевого и бокового давлений (рис. 39, в) в координатах

$$C = \sigma_2/\sigma_1 \text{ и } \lg \tau_{\max}, \quad (28)$$

где

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}. \quad (29)$$

Значение σ_1 определяется выражением

$$\sigma_1 = \Delta\sigma_1 + \sigma_2. \quad (30)$$

Для соляных горных пород наблюдается значительно меньшее (по сравнению, например, с песчаниками) влияние бокового давления ($\sigma_{2\max}$) на прочность образцов. Так, для испытанных образцов сильвинита при боковом давлении $\sigma_2 = 500$ кгс/см² предел прочности (максимальное касательное напряжение) достигает постоянной величины и при дальнейшем росте σ_2 не увеличивается.

На основании выполненных исследований соляных пород при сложных напряженных состояниях можно отметить, что наличие бокового давления увеличивает несущую способность образцов. В условиях объемного напряженного состояния соляные породы проявляют пластические деформации, увеличивают свой объем при сравнительно низком значении бокового давления. Испытания увлажненных образцов каменной соли при объемном напряженном состоянии по сравнению с неувлажненными образцами показали незначительное уменьшение угла внутреннего трения и увеличение коэффициента сцепления.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛЯНЫХ ПОРОД

Для обеспечения безопасной и рациональной отработки калийных и каменносоляных месторождений подземным способом, а также для прогнозирования устойчивости горных выработок при проектировании и эксплуатации калийных шахт необходимо решить ряд проблем горной геомеханики. Одной из таких проблем является учет фактора времени на напряженно-деформированное состояние пород в зоне влияния горных выработок. Как было показано в предыдущих главах, соляные породы являются телами упруго-пластическими и характеризуются большими деформациями ползучести при постоянной нагрузке во времени. Величина деформаций и напряжений соляных пород определяется, с одной стороны, величиной нагрузки, а с другой — временем ее действия. Поэтому исследование прочностных и деформационных характеристик соляных пород без учета фактора времени не может быть полным.

Изменение напряжений и деформаций соляных пород во времени при постоянной нагрузке носит название ползучести. Одна сторона явления ползучести — изменение деформаций во времени при постоянной нагрузке — называется собственно ползучестью, или последствием. Вторая сторона явления ползучести — изменение напряжений во времени при неизменной деформации — носит название релаксации напряжений.

Различают последствие в горных породах упругое и пластическое. При упругом последствии деформации, возникающие в породах под нагрузкой во времени, после разгрузки уменьшаются и с течением времени совсем исчезают. При пластическом последствии деформации в основном необратимы или после снятия нагрузки уменьшаются медленно и в незначительной степени.

При практических расчетах изменения несущей способности соляных пород от действия нагрузки в течение длительного промежутка времени вводят понятие длительной прочности. Предел длительной прочности для соляных пород, испытывающих деформации ползучести, ниже их прочности при кратковременной нагрузке. Это обстоятельство имеет большое значение при расчете устойчивости горных выработок, рассчитанных на большой срок службы.

Исследования реологических свойств соляных пород были начаты только в последние годы, поэтому в настоящее время имеется ограниченное количество экспериментальных данных.

§ 1. Реологические (механические) модели соляных пород

Для установления зависимости между деформациями, напряжениями и скоростью их изменения при описании поведения соляных пород во времени используют различные механические модели.

Модель должна воспроизводить все возможные в соляных породах деформации и характер их развития во времени при всех возможных уровнях напряжений. Использование механических моделей для соляных пород позволяет наглядно иллюстрировать характер деформации соляных пород во времени под действием нагрузки.

Для воспроизведения деформаций горных пород под нагрузкой используют механические модели, состоящие из сочетания простейших, описывающих один вид или несколько видов деформаций. Эти простейшие механические модели охарактеризованы в работах [45, 57, 107, 113].

Для горных пород используют механические модели, состоящие из двух, трех и четырех элементарных реологических моделей тел Гука, Ньютона и Сен-Венана. В настоящее время известны предложенные в разное время реологические модели тел Максвелла, Кельвина — Фойгта, Бингама, Шведова — Бингама, Джеффриса, Лессерсича, Пойнтинга — Томсона, Бюргерса, Трoutона — Ренкина и др.

Как отмечалось ранее, соляные породы весьма чувствительны к скорости изменения нагрузки. Реологическая модель соляных пород должна быть подобна поведению породы под нагрузкой и воспроизводить все многообразие деформаций при различных видах нагрузок.

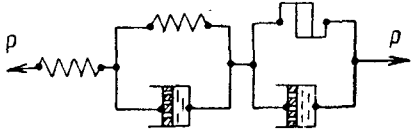
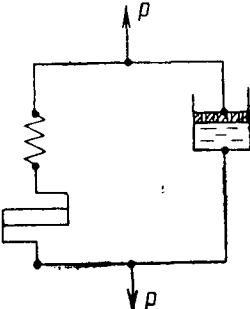
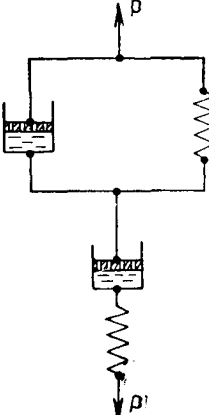
Рядом исследователей для соляных пород предложено несколько различных реологических моделей [37, 166, 167, 172]. В работе [167] описана реологическая модель каменной соли (табл. 19), предложенная С. Серата. Она представляет собой последовательное соединение двух элементарных моделей, составленных из двух или трех элементов упругих, пластичных и упруго-вязких деформаций. Для проверки предлагаемой реологической модели были проведены лабораторные и шахтные исследования деформационных характеристик каменной соли под нагрузкой во времени, в результате которых установлено [167] удовлетворительное соответствие предлагаемой реологической модели истинным значениям деформаций каменной соли.

По мнению А. Салустовича [167], исследовавшего реологические свойства соляных пород, наиболее близко поведение каменной соли при длительной нагрузке воспроизводит вязко-упруго-пластическая реологическая модель (табл. 19), состоящая из двух последовательно соединенных упругого и пластического элементов и параллельно им вязкого элемента модели Ньютона.

Для карналлита предлагается [167] реологическая модель Бюргерса. Заметим, что все предлагаемые реологические модели соляных пород не являются истинными структурными моделями, и поэтому они не могут объяснить структуру и механизм деформаций соляных пород. С помощью реологических моделей можно исследовать только качественную картину деформаций в соляных породах, развивающихся под нагрузкой во времени.

При пластических деформациях кристаллических тел, какими являются соляные породы, происходит скольжение как внутри

Реологические (механические) модели соляных пород

Порода	Исследователь	Модель
	С. Серата [167]	
Каменная соль	А. Салустович [167]	
Карналлит	В. Гимм, К. Г. Хёфер, Г. Духров [37]	

отдельных кристаллов, так и по их граням. Истинный характер деформаций и разрушений соляных пород можно определить экспериментальным путем в лабораторных условиях, на основании чего можно подобрать наиболее близкую механическую модель и составить уравнение ее состояния.

Характер кривых ползучести каменной соли при различной нагрузке, по данным [166], показан на рис. 40. При малых нагрузках в образцах каменной соли проявляются больше деформации установившейся ползучести. С ростом начальной нагрузки кривые ползучести становятся все круче и установившаяся ползучесть при нагрузке 145 кгс/см² (55% от $\sigma_{сж}$) через 160 дней переходит в прогрессирующую.

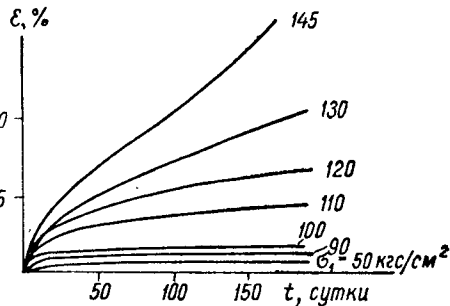


Рис. 40. Кривые ползучести каменной соли ($\sigma_{сж} = 262$ кгс/см²) [166].

§ 2. Основные теории ползучести

Ползучесть горных пород исследуется главным образом при испытаниях образцов при одноосном сжатии, реже при изгибе и сложных напряженных состояниях. По результатам экспериментальных исследований строят графики, на которых по оси ординат откладывают относительные деформации ϵ , а по оси абсцисс — время испытания t .

Типичные кривые ползучести соляных пород при различной нагрузке показаны на рис. 41. Для горных пород процесс деформации во времени, как показывают экспериментальные исследования [45, 47, 70, 79, 172], может быть подразделен на несколько стадий (рис. 41).

- I стадия — упругих деформаций, протекающих практически мгновенно сразу после приложения нагрузки;
- II стадия — неустановившейся ползучести, рост деформаций ползучести во времени происходит с постоянно убывающей скоростью;
- III стадия — установившейся ползучести, скорость деформаций ползучести остается продолжительное время постоянной;
- IV стадия — характер деформирования зависит от величины приложенной нагрузки. При нагрузке более 50% от разрушающей развиваются деформации прогрессирующей ползучести, которые вызывают разрушение (стадия IVа, рис. 41). При незначительных нагрузках, на стадии IVб, имеет место затухающая ползучесть, в конце которой наступает равновесное состояние системы «образец — нагрузка» и процесс ползучести стабилизируется.

Все рассмотренные выше стадии деформации характерны для соляных пород (рис. 41). Тангенс угла наклона касательной к линии

$ABCD$ ($A_1B_1C_1D_1$) с осью абсцисс выражает в масштабе скорость пластической деформации

$$v_{\pi} = de/dt. \quad (31)$$

При описании деформации горных пород во времени, как и других твердых тел, используются различные теории ползучести. Большинство теорий объясняет только качественную сторону явления, в них отсутствует достаточно полное физическое толкование процесса ползучести, релаксации и изменения физико-механических свойств. В последнее время для качественной, а иногда и для количественной оценки ползучести широкое распространение получила теория дислокаций [62, 63, 79, 148].

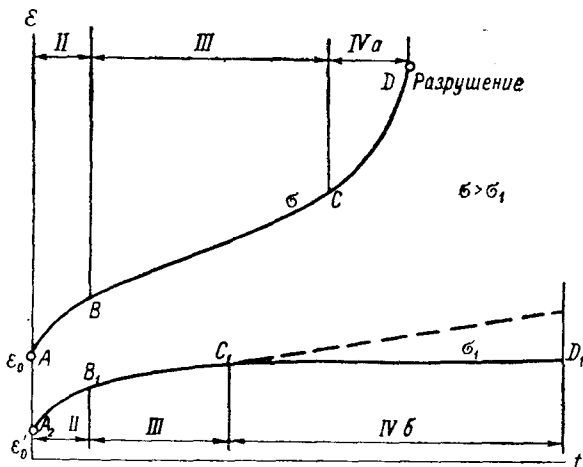


Рис. 41. Развитие деформаций ползучести соляных пород во времени.

Реологические свойства горных пород описываются уравнениями состояния типа

$$F(\sigma, \sigma', \epsilon, \epsilon', t, W, T) = 0, \quad (32)$$

где σ и σ' — напряжение и его первая производная; ϵ и ϵ' — деформация и ее первая производная; t — время; W — влажность; T — температура.

В зависимости от числа факторов, оказывающих существенное влияние на процесс ползучести, имеет место определенный вид деформации. Это обстоятельство и учитывают теории ползучести.

В механике при оценке прочности материалов и конструкций широко используются теории старения, течения и упрочнения [79]. Согласно первой предполагается, что при определенной температуре между деформацией, напряжением и временем существует постоянная зависимость

$$F(\epsilon, \sigma, t) = 0. \quad (33)$$

Если уравнение состояния отражает зависимость между пластической деформацией, ее скоростью и напряжением, то в этом случае мы получаем уравнение теории упрочнения

$$F(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, \sigma) = 0. \quad (34)$$

При этом в основном уравнении фактор времени в явном виде не содержится.

Связь между скоростью пластической деформации, напряжением и временем устанавливает теория течения, общее уравнение состояния для которой имеет вид

$$F(\dot{\varepsilon}, \sigma, t) = 0. \quad (35)$$

Теории течения и старения при плавно изменяющихся нагрузках хорошо согласуются с опытными данными. Реологические уравнения этих теорий, содержащие время в явной форме, обладают существенным недостатком — неинвариантностью относительного изменения отсчета времени. По этим теориям предполагается, что деформация в определенный момент времени определяется только значением напряжения в этот же момент времени. Однако из-за несложности математической интерпретации результатов и их хорошего совпадения с экспериментальными данными эти теории широко применяются при расчетах металлоконструкций на ползучесть.

В настоящее время для описания деформации горных пород во времени наиболее распространена теория наследственной ползучести [45, 46], для аналитического выражения которой используются основные интегральные уравнения Больцмана и Вольтера. Достоинством этой теории является ее гибкость, позволяющая путем подбора соответствующих ядер ползучести наиболее полно и точно отразить процесс ползучести горных пород.

Теория наследственной ползучести основана на предположении, что ползучесть различных материалов в определенный момент времени t_1 зависит не только от напряжений в этот же период времени, а также и от напряжений, действовавших в предшествующий момент времени τ .

В механике горных пород наиболее распространена теория линейной наследственной ползучести [29, 37, 45, 69]. Эта теория, основанная на интегральных уравнениях Больцмана и Вольтера, развита в трудах Ю. Н. Работнова [102], Ж. С. Ержанова [45], М. И. Розовского [47] и других исследователей.

Основные уравнения теории линейной наследственной ползучести имеют вид

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{E} \left[\sigma(t) + \int_0^t L(t, \tau) \sigma(\tau) d\tau \right]; \quad (36)$$

$$\sigma(t) = E \left[\varepsilon(t) - \int_0^t \varphi(t, \tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right], \quad (37)$$

где $\varepsilon(t)$ и $\sigma(t)$ — деформация и напряжение, соответствующие рассматриваемому моменту времени t , начиная с момента начального погружения; E — модуль упругости; $L(t, \tau)$ и $\varphi(t, \tau)$ — ядра наследственности.

Подынтегральные функции $L(t, \tau)$ и $\varphi(t, \tau)$ являются характеристиками данного материала, отражают всю историю его деформации во времени. Математическое выражение этих функций, называемых ядрами наследственности, зависит от свойств рассматриваемой среды (горной породы), определяется экспериментально.

Кроме горных пород теория линейной наследственной ползучести хорошо описывает процессы деформации высокополимерных материалов и бетона [50, 79]. Дальнейшее развитие эта теория получила в разработке варианта теории нелинейной наследственной ползучести.

Основные уравнения теории нелинейной наследственной ползучести имеют вид

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau) d\tau; \quad (38)$$

$$\sigma(t) = \varphi(\varepsilon) - \int_0^t R(t-\tau)\varphi[\varepsilon(\tau)] d\tau, \quad (39)$$

где $\varphi(\varepsilon)$ — нелинейная функция, характеризующая закономерность развития мгновенных деформаций; $K(t-\tau)$ — ядро ползучести; $R(t-\tau)$ — ядро релаксации.

Теория нелинейной наследственной ползучести была использована И. Х. Габдрахимовым [36] для описания деформаций ползучести соляных пород Верхнекамского месторождения. Для аппроксимации всех трех стадий ползучести им принимается спектральное ядро наследственности. И. Х. Габдрахимов считает, что для соляных пород функция $\varphi(\varepsilon)$ удовлетворительно аппроксимируется уравнением следующего вида:

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma_{сж}(1 + e^{-\lambda\varepsilon}), \quad (40)$$

где λ — показатель нелинейности, определяемый экспериментально.

Все вышеприведенные теории ползучести изучают реологические процессы на феноменологическом уровне, т. е. каждая из них исходит из ряда предположений, допущений и схематизации реального процесса.

§ 3. Ползучесть соляных пород при одноосном сжатии

Фактор времени оказывает большое влияние на устойчивость горных выработок и несущую способность целиков. Учет фактора времени ведется на основании длительных лабораторных и натуральных исследований деформаций ползучести при сжатии.

В работе [195] приведены результаты лабораторных исследований деформаций ползучести плоских (с отношением $h/b = 0,25 \div 0,5$) образцов каменной соли и карналлита. Длительные испытания образцов соляных пород проводились на образцах с поперечным сечением 10×10 см стальными зубчатыми прокладками на торцах. Кривые ползучести образцов каменной соли ($h/b = 0,5$) приведены на рис. 42; результаты испытаний образцов соляных пород при разной нагрузке — в табл. 20.

При длительных испытаниях образцов каменной соли и нагрузке, равной 88% от разрушающей (рис. 42), уже через 30 дней кривая ползучести входит в 4-ю стадию (прогрессирующую ползучесть) и разрушается через 86 дней.

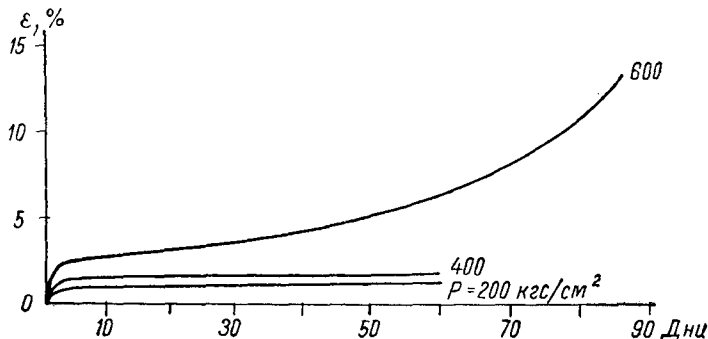


Рис. 42. Кривые ползучести каменной соли ($\sigma_{сж} = 690$ кгс/см²; $h/b = 0,5$) [195].

Сопоставление деформаций при кратковременной и длительной нагрузке показывает, что при одинаковой нагрузке на образец и длительных испытаниях значения как продольных, так и поперечных деформаций выше. Сравнение же деформаций и их отношения при длительных испытаниях, а также по замерам деформаций целиков в натуральных условиях (глубина разработки 900 м, потери 33%) показывает, что скорость пластических деформаций целиков на порядок ниже таковой образцов.

При нагрузке 40—50% от разрушающей скорость продольных деформаций на образцах — 0,3—0,5 мм/100 дней ($1 \div 2\%$ /100 дней), а скорость деформаций ползучести целиков $0,1 \div 0,2\%$ /100 дней. В этом случае наблюдается качественное совпадение деформаций ползучести в натуре и на образцах. При уменьшении отношения h/b образцов с 0,5 до 0,25 отношение продольных деформаций к поперечным увеличивается от 0,68 до 3,4. Ступенчатое нагружение плоских образцов каменной соли ($h/b = 0,25$) при их длительных испытаниях показали, что с увеличением нагрузки отношение продольных деформаций к поперечным снижается, при этом абсолютные скорости деформаций, несмотря на увеличение нагрузки во времени, уменьшаются.

Результаты длительных испытаний соляных пород [195]

Порода	h/b	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	σ_t , кгс/см ²	Относительные деформации, %		Отношение продольной деформации к поперечной	Продолжительность испытаний, сутки	
				Продольная	Поперечная			
Каменная соль (пласт Хессен)	1/2	680	200	1,3 (1,1) *	0,4 (0,08)	3,2	60	
	1/2	680	400	2,6 (1,9)	1,6 (0,9)	1,7	60	
	1/2	600	600	6,8 (5,9)	10,1 (3,7)	0,68	64	
	1/2	680	600	6,8	10,1	0,68	64	
	1/2	680	600	13,0	—	—	86	
	1/3	940	600	6,5	1,8	3,6	30	
	1/4	1680	600	5,4	1,6	3,4	30	
	Каменная соль с кизеритом	1/4	1680	200	1,6	0,2	8	1
		1/4	1680	400	2,9	0,6	4,8	16
1/4		1680	600	5,4	1,9	2,8	15	
1/4		1680	800	8,1	3,8	2,1	14	
1/4		1680	980	12,1	6,5	1,86	19	
Карналлит **		1/4	625	500	16,3	8,5	—	5
	1/4	625	500	29,3	15,5	—	10	
	1/4	625	500	74	—	—	30	

* В скобках дано значение деформаций при кратковременной нагрузке.

** Содержание карналлита — 80%.

Из результатов длительных испытаний плоских образцов карналлита ($h/b = 0,25$) видно, что он может развивать значительные пластические деформации, хотя при кратковременном нагружении ведет себя как упругое тело (табл. 20). Характер деформации карналлитовой породы под нагрузкой в значительной степени зависит от содержания в нем карналлита. При длительных испытаниях было установлено, что увеличение в образцах содержания карналлита вызывает уменьшение скорости пластических деформаций, изменение их абсолютных значений.

Относительно скорости нагружения при длительных испытаниях соляных пород в работе [195] отмечается, что воспроизвести в лабораторных условиях режим нагрузки, подобный нагружению целиков в калийных шахтах, затруднительно. Так, при скорости подвигания фронта очистных работ 30 м/мес. (глуб. 900 м, камерная система разработки), по данным [195], скорость нагружения целиков составляет 7 кгс/см² в сутки или 4,8 г/см² в минуту. Воспроизвести такой режим нагрузки практически невозможно.

Длительные исследования карналлитовых образцов Соликамского рудника в лабораторных условиях проводил В. Л. Водопьянов [30, 31, 32]. Испытывались образцы с отношением $h/b = 0,5$; 1 и 2 при нагрузках $\sigma_t = 30 \div 60\%$ от разрушающей. При нагрузках $\sigma_t = 30\%$ от разрушающей в образцах уже появлялись пластические деформации. Продолжительность установившейся ползучести определяется величиной нагрузки. Так, при $\sigma_t = 50\%$ от разрушающей установившаяся ползучесть наблюдалась в течение 6—12 суток, при большем напряжении она быстро сменялась прогрессирующей. Образцы с отношением $h/b = 2$ на стадии установившейся ползучести деформировались в 2—3 раза быстрее по сравнению с образцами кубической формы. Характер разрушения карналлитовых образцов при длительных испытаниях определялся величинами σ_t и накопленных деформаций.

Если принять за критическое состояние появление первых трещин в образце, то допустимая деформация ползучести составляла для карналлита 2,5—3% при скорости деформации $(15 \div 25) \times 10^2$ мкм/сутки. При меньшей скорости величина допустимой деформации была больше и достигала 10%. По данным К. Г. Хёфера [169, 171], допустимая деформация ползучести для карналлита при длительной нагрузке составляет 4—5%.

Нами была исследована ползучесть соляных пород Старобинского месторождения при сжатии* на образцах призматической формы с размерами 150 × 150 × 300 мм. Образцы изготовлялись из монолитов, специально отобранных для этой цели в горных выработках II (глуб. 450 м) и III (глуб. 620 м) калийных горизонтов I Солигорского калийного рудника. Монолиты отбирались в свежeproйденных горных выработках, расположенных в массиве и не

* Исследования проводились под руководством д-ра техн. наук А. Н. Ставрогина.

испытывающих влияния проходки или отработки соседних камер. Испытывались силвинит II и III силвинитовых слоев III горизонта и силвинит (верхняя пачка) II горизонта.

Испытания проводились при нагрузках, составляющих 40, 50, 75 и 90% от предела прочности при сжатии, определенного при кратковременной нагрузке. Каждый опыт повторялся на трех образцах-близнецах. Продолжительность испытания образцов до разрушения определялась величиной начальной нагрузки. Максимальная продолжительность испытаний — около 10 месяцев. Результаты испытания отдельных серий образцов при кратковременной нагрузке приведены в табл. 21.

Таблица 21

Результаты испытаний силвинита при одноосном сжатии

Слой	Размеры образцов, см			Кол-во испытанных образцов	Средняя весовая влажность W, %	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	$\sigma_{дл}$, кгс/см ²
	a	b	h				
III горизонт, II силвинитовый	15.5	15	22	6	0.1	285	200
II горизонт, нижняя силвинитовая пачка	15	15	30	5	2.32	230	150
III горизонт, верхняя силвинитовая пачка	15	14	30	5	1.73	155	115

Образцы, предназначенные для длительных испытаний, изолировались несколькими (до 10 слоев) покрытиями парафина и резинового клея, что позволило сохранить естественную влажность образцов в течение длительного времени. Значения средней весовой влажности образцов также даны в табл. 21.

Длительные испытания проводились на пружинных прессах типа УДИ конструкции А. Н. Ставрогина [119]. Схема пресса показана на рис. 43. Каждый пресс позволяет получать нагрузку до 100 тс. При испытаниях образцов измерялись величина напряжений, а также продольные и поперечные деформации с помощью индикаторов часового типа. Все образцы, предназначенные для длительных испытаний, оснащались комплектом индикаторов для замера деформаций (рис. 44). Общая продольная деформация измерялась с помощью индикаторов 1 и 4; продольная деформация в средней части образца на базе 100 мм — с помощью индикаторов 3 и 5, укрепленных на специальных устройствах в виде планок, составляющих требуемую базу измерений. Для замера поперечных деформаций в средней части образца использовались индикаторы 2 и 6.

В местах замера деформаций под штоками индикаторов изолирующее покрытие удаляется и к образцу приклеиваются металлические пластинки. Рассмотренная выше схема оснастки применялась

при длительных исследованиях однородных образцов. При решении частных вопросов, например при исследовании деформаций отдельных слоев, схема установки индикаторов усложняется. Последнее характерно при испытаниях соляных пород с глинистыми прослойками. На рис. 45 изображена схема установки индикаторов, применявшихся для исследования удельной деформации глинистого прослойка и ее отношения к общей деформации образца. С помощью

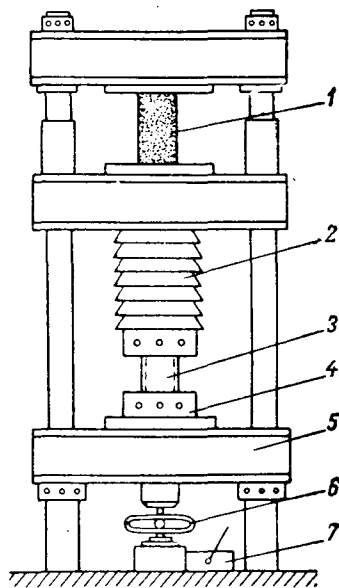


Рис. 43. Схема установки образца на прессе УДИ для длительных испытаний.

1 — образец; 2 — тарельчатые пружины; 3 — шток пресса; 4 — упорная гайка; 5 — нижняя траверса; 6 — динамометр; 7 — гидродомкрат.

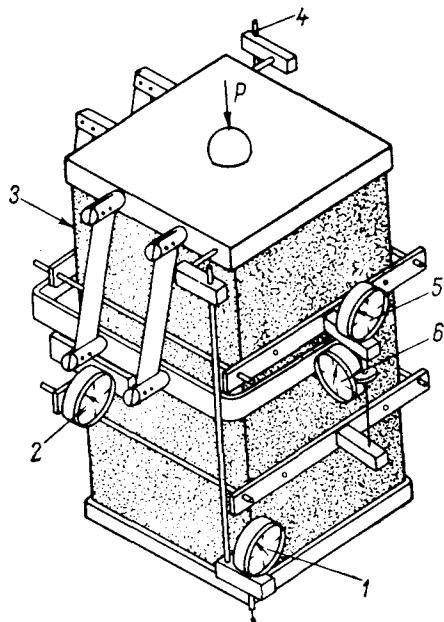


Рис. 44. Схема установки индикаторов для замера деформаций образца при длительных испытаниях.

индикаторов 1 и 2 измеряется общая продольная деформация образца, индикаторами 3 и 4 — продольная деформация средней части образца на базе 100 мм, индикаторами 5 и 6 — поперечные деформации. Продольные деформации глинистого прослойка и контактирующего с ним галита (сильвинита) замеряются на базе 40 мм индикаторами 7 и 8.

По данным длительных испытаний образцов были построены графики ползучести, аналогичные приведенным на рис. 46. Как видно из рис. 46, значение относительных продольных деформаций образца сильвинита при нагрузке 75% от прочности при сжатии составляет 2,1%, а поперечных — порядка 1%, т. е. отношение продольных деформаций к поперечным 2,1. Средние продольные деформации на базе 100 мм значительно ниже по сравнению с общей продольной

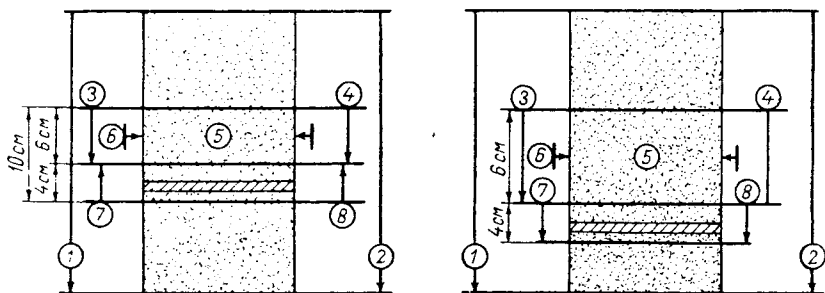


Рис. 45. Схемы установки индикаторов на образце для замера поперечных и продольных деформаций при различном расположении по высоте глинистого прослойка.

деформацией. Кривая продольных деформаций имеет характерный для соляных пород S-образный вид, при этом стадия неустановившейся ползучести развивается в первые 10 дней после нагружения образца. Она имеет место в течение последующих 8,5 месяцев, а стадия прогрессирующей (или разрушающей) ползучести наступает после 9 месяцев испытания под нагрузкой.

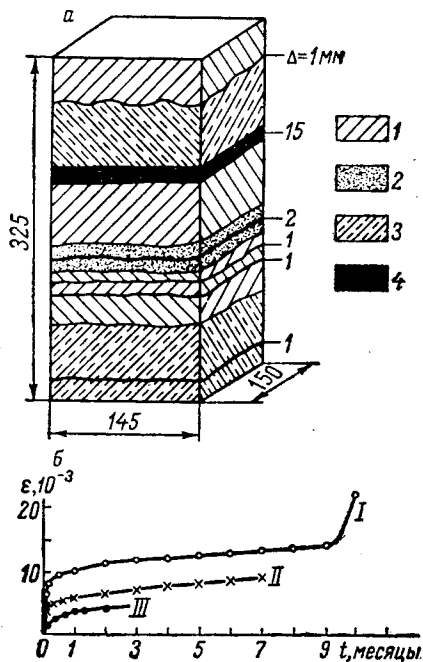


Рис. 46. Структура сильвинитового образца (II горизонт, верхняя пачка) для длительных испытаний (а) и графики ползучести (б) при нагрузке $\sigma_t = 80\%$ от разрушающей ($\sigma_{сж} = 155 \text{ кгс/см}^2$).

Деформации: I — продольные; II — поперечные; III — средние продольные на базе 100 мм; I — сильвинит; 2 — галит; 3 — сильвинит с галитом; 4 — глина.

Аналогичные графики ползучести были получены при испытаниях других серий образцов и разных длительных нагрузках. Сводные усредненные графики ползучести испытанных образцов приведены на рис. 47. Значения продольных деформаций сильвинита в зависимости от величины приложенной нагрузки к образцу изменяются от 0,8 до 5%.

При длительных испытаниях наблюдалось различие кривых ползучести для образцов из одних и тех же пачек пласта. Такие отличия объяснялись, с одной стороны, наличием в отдельных образцах глинистых прослоек значительной мощности (до 20 мм), а с другой — структурой испытываемых образцов. Наличие в отдельных образцах прослоек крупнозернистой каменной соли

существенно снижает их прочность по сравнению с мелкозернистым сильвинитом и изменяет их характер деформации под нагрузкой во времени. Характер разрушения образцов сильвинита при длительных испытаниях показан на рис. 48.

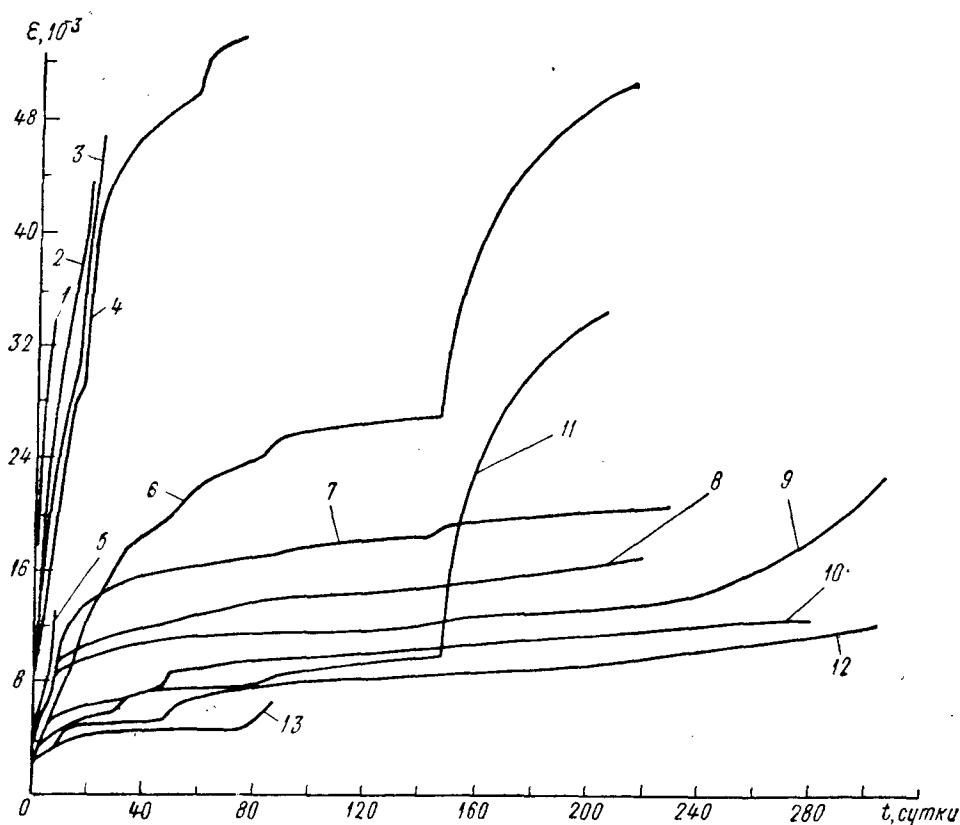


Рис. 47. Сводные кривые ползучести образцов сильвинита второго горизонта по результатам длительных испытаний.

1 — нижняя пачка; $\sigma_{уст} = 150 \text{ кгс/см}^2 = 65\% \sigma_{сж}$; 2—3 — верхняя пачка; $\sigma_{уст} = 138 \text{ кгс/см}^2 = 90\% \sigma_{сж}$; 4 — нижняя пачка; $\sigma_{уст} = 180 \text{ кгс/см}^2 = 75\% \sigma_{сж}$; 5 — верхняя пачка; $\sigma_{уст} = 130 \text{ кгс/см}^2 = 90\% \sigma_{сж}$; 6 — нижняя пачка; $\sigma_{уст} = 90 \text{ кгс/см}^2 = 40\% \sigma_{сж}$; 7—9 — верхняя пачка; $\sigma_{уст} = 115 \text{ кгс/см}^2 = 75\% \sigma_{сж}$; 10 — верхняя пачка; $\sigma_{уст} = 80 \text{ кгс/см}^2 = 50\% \sigma_{сж}$; 11—12 — нижняя и верхняя пачки соответственно; $\sigma_{уст} = 120 \text{ кгс/см}^2 = 50\%$ (для кривой 11) и $75\% \sigma_{сж}$ (для кривой 12); 13 — нижняя пачка; $\sigma_{уст} = 50 \text{ кгс/см}^2 = 30\% \sigma_{сж}$.

Длительные испытания образцов сильвинита Верхнекамского месторождения были выполнены А. Н. Ставрогиным [119]. Испытывались образцы с размерами $150 \times 150 \times 300$ мм при нагрузках 50, 60, 70 и 85% от величины разрушающего напряжения, определенного при обычной нагрузке. Прочность сильвинита при сжатии и кратковременной нагрузке составляла 290 кгс/см^2 .

Кривые ползучести испытанных образцов сильвинита в координатах относительная деформация — время приведены на рис. 49.

При нагрузках 85, 70 и 60% разрушение образцов происходило соответственно на 1,4; 4,4 и 34 сутки.

А. Н. Ставрогин [119] на основании полученных им и анализа других экспериментальных данных предлагает интерпретировать исследования ползучести горных пород с использованием уравнения вида

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{\alpha t}, \quad (41)$$

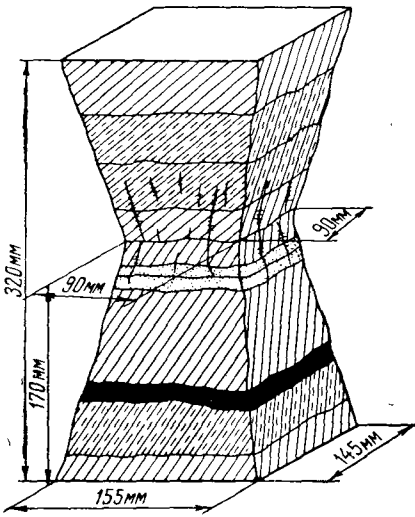
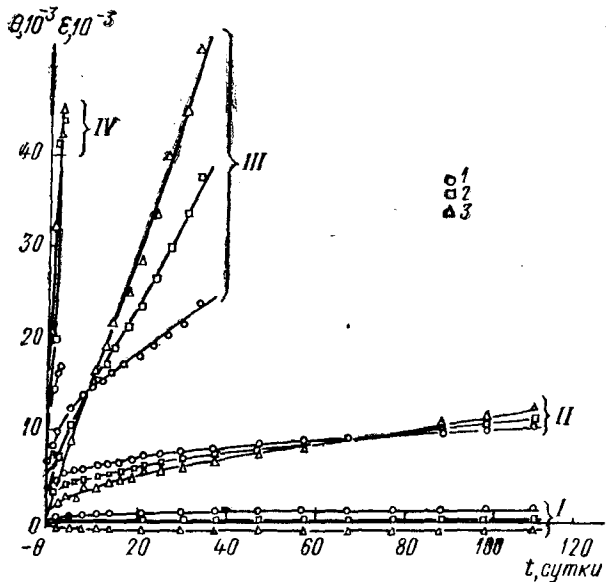


Рис. 48. Характер разрушения обр. 16 сильвинита из верхней пачки II горизонта при длительных испытаниях.

Рис. 49. Кривые ползучести сильвинита, по данным А. Н. Ставрогина [119].

1 — $\varepsilon_{\text{ср. прод}}$ — относительная средняя продольная деформация; 2 — $\varepsilon_{\text{ср. поп}}$ — относительная средняя поперечная деформация; 3 — относительное изменение объема θ .



Группа кривых	$\varepsilon_{\text{ср. прод}}$, %	$\varepsilon_{\text{ср. поп}}$, %	θ , %
I	30	30	30
II	50	50	50
III	60	60	60
IV	70	70	70

где $\dot{\epsilon}$ — скорость деформаций ползучести; σ — действующие напряжения, кгс/см²; ϵ_0 и α — константы материала.

Результаты исследования ползучести и долговечности соляных пород Верхнекамского и Артемовского месторождений в условиях одноосного сжатия подтверждают приведенную зависимость.

Графики ползучести сильвинита Старобинского месторождения по данным длительных испытаний при сжатии в координатах $\lg \dot{\epsilon}$ — σ приведены на рис. 50. Из этих графиков видно, что для испытываемых образцов сильвинита обе прямые проходят почти параллельно

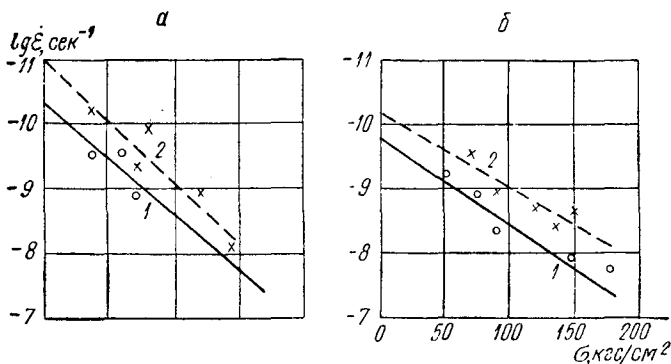


Рис. 50. Ползучесть образцов сильвинита III (а) и II (б) горизонтов Старобинского месторождения при длительных испытаниях.

Период испытаний, сутки: 1 — от 1 до 30; 2 — свыше 30.

друг другу, причем линия 2 расположена несколько выше линии 1. Это означает, что с течением времени скорость ползучести имеет тенденцию к затуханию. Параллельность линий свидетельствует об идентичности физической природы процесса ползучести для начальной и последующих стадий, имеющих большой разрыв во времени.

По данным А. Н. Ставрогина, значения констант для сильвинита III (III горизонт) для линии 1 (период испытания от 1 до 30 суток) $\epsilon_{01} = 5,13 \cdot 10^{-11}$ и $\alpha_1 = 0,0393$, для линии 2 (период испытания более 30 суток) — $\epsilon_{02} = 0,93 \cdot 10^{-11}$ и $\alpha_2 = 0,0495$. Для сильвинита II горизонта значения констант соответственно равны: $\epsilon_{01} = 2,09 \times 10^{-11}$; $\alpha_1 = 0,0391$; $\epsilon_{02} = 1,661 \cdot 10^{-11}$; $\alpha_2 = 0,0207$.

§ 4. Влияние влажности и скорости нагружения на деформации ползучести соляных пород при длительных испытаниях

На величину и характер изменения деформаций ползучести при длительных испытаниях значительное влияние оказывают влажность и скорость нагружения соляных пород. В работе [119] приведены

сопоставительные исследования ползучести образцов сильвинита, изолированных от внешней среды парафино-клеевым покрытием и неизолированных. Неизолированные образцы сильвинита, находящиеся длительное время (несколько месяцев) под нагрузкой при комнатной температуре ($16-20^{\circ}\text{C}$), изменяли свою влажность в силу гигроскопических свойств сильвинита. Различная влажность испытываемых образцов (при прочих равных условиях) привела к тому, что образцы имели явно различный характер деформации: при одинаковых уровнях нагрузки у неизолированных образцов была значительно большая скорость деформаций ползучести. По мнению А. Н. Ставрогина [119], атмосферная влага, проникая в тело образца сильвинита, ослабляет межзатомные связи, в результате чего процесс ползучести протекает более интенсивно.

Исследование влияния влажности и скорости нагружения на деформации ползучести при длительных испытаниях проводилось нами на образцах (цилиндрической формы) каменной соли ($d = 60$ мм, $l = 90 \div 150$ мм) на рычажных прессах конструкции И. А. Карманова. Продольные и поперечные деформации образцов при испытаниях замерялись индикаторами часового типа.

Для исследования влияния режима и скорости нагружения на деформации ползучести испытания проводились в 2 этапа: испытание образцов при плавном [с постоянной скоростью, равной 7 кгс/(см² · сутки)] нагружении и при разной скорости нагружения. Испытания образцов каменной соли при постоянной скорости нагрузки позволили установить, что при нагрузке более 60% от разрушающей ($\sigma_{сж} = 280$ кгс/см²) развиваются деформации прогрессирующей ползучести, вызывающие разрушение образца. Максимальная (разрушающая) продольная деформация при нагрузках более $0,6 \sigma_{сж}$ составляла 6—8%.

Вторая серия образцов каменной соли была испытана при разной скорости нагружения — от 3,5 до 28 кгс/(см² · сутки). Результаты испытаний, приведенные на рис. 51, показывают, что значения продольных деформаций ползучести и времени до разрушения образца в значительной степени зависят от скорости нагружения. Так, при скорости нагружения 28 кгс/(см² · сутки) образцы разрушались через 9 суток, а при скорости 3,5 кгс/(см² · сутки) — на 73 суток. При малых скоростях нагружения образцы каменной соли проявляют большие деформации ползучести без разрушения в течение длительного промежутка времени. Предел длительной прочности при испытаниях образцов равнялся $0,6 \sigma_{сж}$.

Исследование влияния увлажнения каменной соли на деформации ползучести проводилось следующим образом. Образцы помещали в ванну из оргстекла с насыщенным раствором соли, где они находились в течение всего периода испытаний. Образцы плавно нагружали [со скоростью 7 кгс/(см² · сутки)] до установленной нагрузки, после чего испытания продолжались при постоянном давлении на образец. Продольные деформации замеряли с помощью индикаторов часового типа. Характер деформирования увлажненных

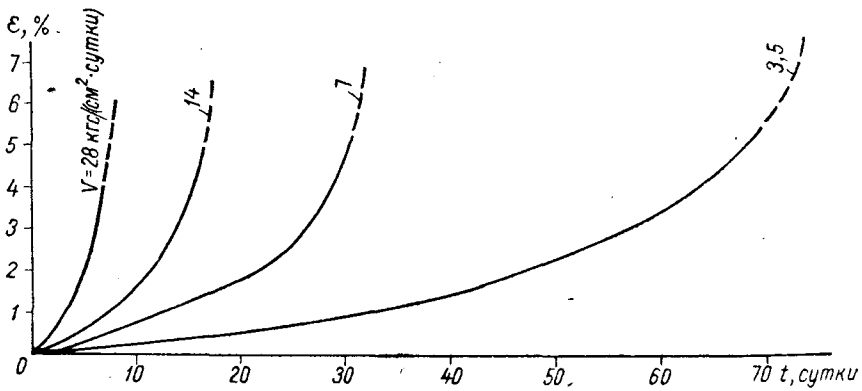


Рис. 51. Результаты длительных испытаний каменной соли при различных скоростях нагружения.

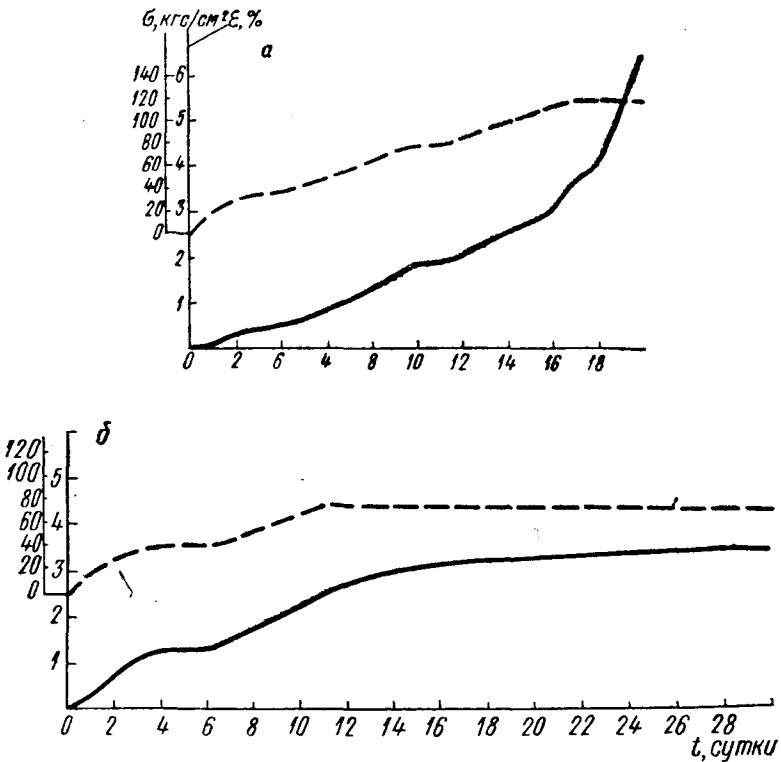


Рис. 52. Ползучесть влажных образцов каменной соли при длительной нагрузке и плавном нагружении со скоростью 7 кгс/(см²·сутки).

Нагрузка, кгс/см²: а — больше 80; б — меньше 80.

образцов во времени под нагрузкой показан на рис. 52. Из сравнения приведенного на рис. 52 характера деформирования увлажненных образцов с аналогичными испытаниями сухих образцов можно установить следующее:

- а) длительная прочность увлажненных образцов каменной соли снижается примерно в 2 раза и составляет около $80 \text{ кгс/см}^2 (\approx 0,35 \sigma_{сж})$;
- б) скорость деформаций ползучести возрастает в 3—4 раза;
- в) величина относительной продольной деформации по сравнению с сухими образцами возрастает в 1,5—2 раза.

§ 5. Ползучесть соляных пород при изгибе

Исследование деформаций ползучести при изгибе представляет интерес при расчетах устойчивости кровли горных выработок с длительным сроком службы. Сущность этих исследований заключается в получении кривых ползучести образцов-балок при постоянной нагрузке и последующем определении по ним параметров ползучести.

При исследовании деформаций ползучести соляных пород необходимо соблюдать следующие условия:

- а) сохранять постоянство напряжений в образце в течение всего периода испытаний;
- б) исключить случайные динамические воздействия на образец во время испытаний;
- в) предотвратить воздействие на образец внешней среды, в первую очередь влажности и температуры.

Нами исследовались образцы каменной соли Старобинского месторождения разных размеров ($20 \times 20 \times 160$, $30 \times 30 \times 240$, $40 \times 40 \times 320$ и $80 \times 80 \times 640$ мм) с постоянным отношением высоты образца к пролету (h/l), равным $1/7$.

Согласно исследованиям, описанным в работах [35, 46], напряженно-деформированное состояние образцов-балок при отношении $h/l = 1/7$ и их испытаниях на изгиб сосредоточенной силой, приложенной посередине пролета, можно считать однородным. При этом касательные напряжения в сечении образца с размерами 20×20 см не превышают 7% от соответствующих нормальных напряжений. Образцы-балочки каменной соли с указанными выше размерами испытывались по методике, изложенной в работах [69, 70], с замером деформаций образца зеркальными приборами. Образцы больших размеров ($80 \times 80 \times 640$ мм) испытывались на установке конструкции Г. Н. Кузнецова [67] с замером деформаций с помощью специально изготовленного фотоиндикатора, обеспечивающего автоматическую запись деформаций ползучести.

В каждой серии испытывалось 6 образцов-близнецов, три из которых использовали для определения прочностных и деформационных характеристик при кратковременной нагрузке (см. гл. VII), а другие три образца — для испытания на ползучесть при определенной нагрузке. Во всех испытаниях нагрузка на образец прикладывалась перпендикулярно к слоистости. В соответствии с рекомен-

дациями [46, 69] скорость нагружения образцов при длительных испытаниях составляла $0,24-0,26 \text{ кгс}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$.

При длительных испытаниях образцов каменной соли преследовалась цель — определить характер их деформации во времени, а именно: является ли ползучесть линейной или нелинейной. Для

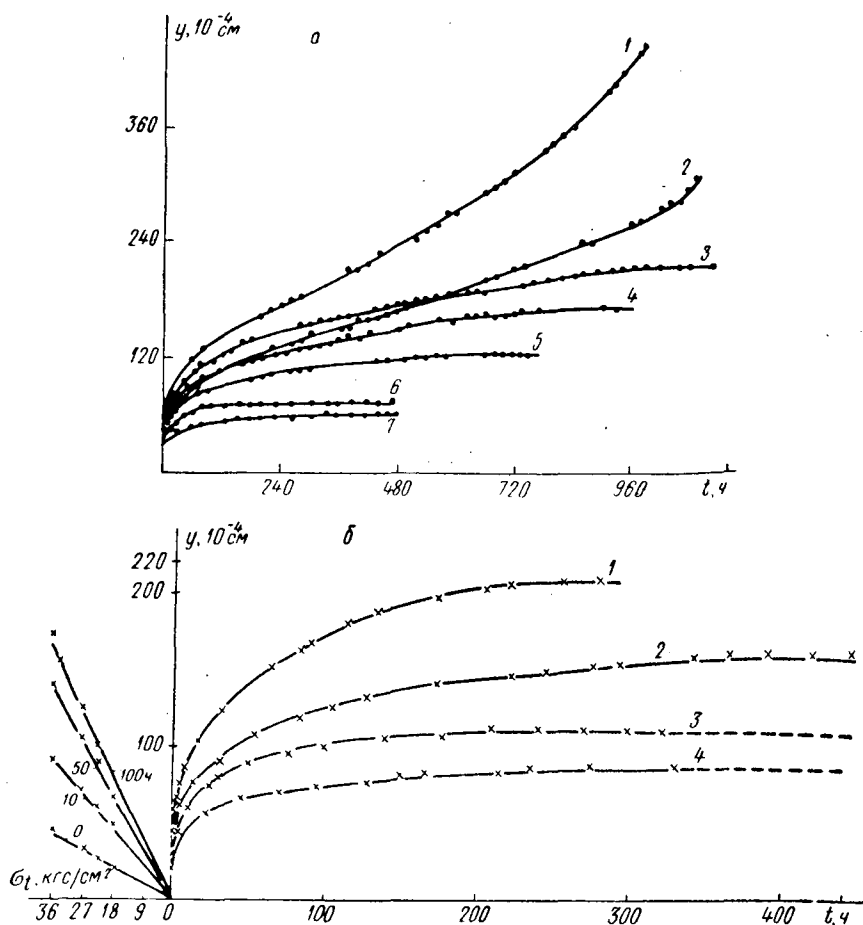


Рис. 53. Семейство кривых ползучести и изохронные кривые образцов каменной соли при изгибе.

a — образцы размером $30 \times 30 \times 240 \text{ мм}$; $\sigma_t/\sigma_{\text{изг}}$: 1 — 0,7; 2 — 0,65; 3 — 0,6; 4 — 0,5; 5 — 0,5; 6 — 7 — 0,4; *b* — образцы размером $20 \times 20 \times 160 \text{ мм}$; $\sigma_t, \text{ кгс}/\text{см}^2$: 1 — 36; 2 — 27; 3 — 22,5; 4 — 18.

этого была испытана серия образцов при разных нагрузках $\sigma_t = (0,3 \div 0,9) \sigma_{\text{изг}}$, а по результатам строились семейства кривых ползучести и изохронные кривые в координатах деформация — напряжение, по характеру которых определяли вид деформаций ползучести образцов. Образцы находились под нагрузкой до полной

Результаты испытаний ползучести каменной соли
Старобинского месторождения при изгибе

Размеры образцов, см			$\sigma_{изг.}$ кгс/см ²	$E_{дин.}$ 10 ⁵ кгс/см ²	$\sigma_t/\sigma_{изг}$	Параметры ползуче- сти	
<i>h</i>	<i>b</i>	<i>l</i>				α	δ
III горизонт, слой III—IV							
2	2	16	50 (17/23) *	4,2	0,5	0,793	0,01100
				4,06	0,65	0,592	0,00252
				4,06	0,70	0,525	0,00135
3	3	24	45 (16/24)	3,41	0,5	0,766	0,00409
				3,41	0,6	0,547	0,00078
				3,7	0,6	0,414	0,00018
				3,58	0,7	0,409	0,00020
4	4	32	39 (10/6)	3,9	0,3	0,882	0,00502
				4,0	0,3	0,775	0,00384
				4,6	0,4	0,612	0,00050
				4,08	0,6	0,550	0,00212
				4,0	0,7	0,623	0,00505
8	8	64	39 (3/2)	4,03	0,5	0,787	0,01090
				3,77	0,65	0,656	0,0043
				3,6	0,7	0,641	0,00038
II горизонт, покровный слой							
2	2	16	38 (11/32)	—	0,4	0,736	0,00100
				—	0,4	0,746	0,0143
				—	0,5	0,682	0,0098
				—	0,6	0,620	0,0044
				3,36	0,6	0,590	0,0030
3	3	24	33 (5/11)	3,0	0,4	0,740	0,0203
				3,7	0,5	0,714	0,0198
				3,7	0,6	0,674	0,0138
4	4	32	29 (5/9)	3,415	0,4	0,500	0,00120
				3,5	0,5	0,716	0,0150
				3,54	0,6	0,645	0,0071

* В скобках приведены: в числителе — количество испытанных образцов, в знаменателе — коэффициент вариации.

стабилизации процесса ползучести либо при появлении деформаций прогрессирующей ползучести до разрушения. Кроме того, для построения изохронных кривых несколько образцов после стабилизации ползучести разгружалось и после «отдыха», равного примерно периоду прямой ползучести, вновь подвергалось воздействию более высокой нагрузки.

На рис. 53 представлены семейства кривых ползучести и изохронные кривые, полученные по результатам длительных испытаний при изгибе для двух типоразмеров образцов каменной соли. Кривые ползучести для образцов других типоразмеров имеют аналогичный вид.

Анализ изохронных кривых по всем испытаниям образцов каменной соли Старобинского месторождения (III горизонт) при изгибе показал, что они имеют прямолинейный вид до напряжений, равных 70% от прочности на изгиб при кратковременных нагрузках, а для образцов каменной соли II горизонта — до напряжений $\sigma_t = 0,6 \sigma_{изг}$.

Таким образом, для данных разновидностей соляных пород с достаточной для практических расчетов точностью при нагрузках до 60—70% от разрушающих данные длительных испытаний можно аппроксимировать линейной теорией ползучести. Это подтверждается также натурными замерами деформаций пород кровли во время длительных испытаний при сжатии.

На основании проведенных длительных испытаний образцов каменной соли при изгибе кривые ползучести могут быть аппроксимированы по теории линейной наследственной ползучести с использованием двухпараметрического Абелева ядра [45] в виде

$$L(t, \tau) = \delta (t - \tau)^{-\alpha}, \quad (42)$$

где α и δ — постоянные, причем $0 < \alpha < 1$.

На основании полученных экспериментальных данных были вычислены параметры ползучести для испытанных при изгибе образцов каменной соли (табл. 22). Сравнение расчетных значений прогибов с использованием приведенных в табл. 22 параметров ползучести с экспериментальными показало хорошее их совпадение (расхождение не превышало 5%).

Таким образом, на основании экспериментальных исследований ползучести каменной соли Старобинского месторождения при изгибе установлено, что деформации ползучести можно аппроксимировать по линейной наследственной теории ползучести до напряжений $\sigma_t = (0,6 \div 0,7) \sigma_{изг}$, а полученные параметры могут быть использованы для расчетов устойчивости кровли и горных выработок с учетом фактора времени.

§ 6. Определение релаксационных характеристик соляных пород

Данные экспериментальных исследований релаксационных характеристик соляных пород в литературе отсутствуют, хотя они имеют большое значение при оценке характера распределения

напряжений в соляных породах во времени в зоне влияния горных выработок.

Релаксационные характеристики соляных пород определяли при одноосном сжатии по методике, изложенной в работе [69]. Испытания проводились на прессе производства ГДР, предназначенном

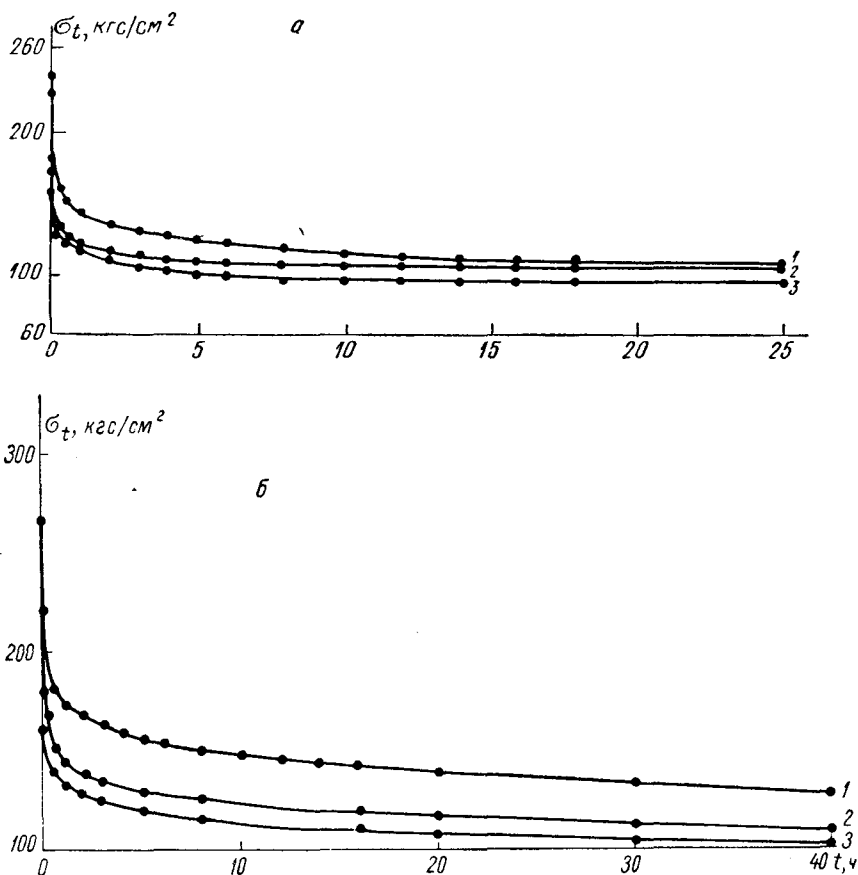


Рис. 54. Кривые релаксации напряжений: а — каменная соль (III горизонт, слой III—IV); б — сильвинит (II горизонт).

$\sigma_0/\sigma_{сж}$: 1 — 0,9; 2 — 0,75; 3 — 0,70.

для испытания металлических образцов на релаксацию при высокой температуре. Пресс снабжен автоматическим самопишущим диаграммным прибором, позволяющим в процессе испытаний получать график релаксации напряжений в образце.

Определение релаксационных характеристик при сжатии проводилось на призматических образцах каменной соли и сильвинита размером $4 \times 4 \times 8$ см при нагрузках $\sigma_{уст} = (0,6 \div 0,9) \sigma_{сж}$. Продолжительность испытаний 50 ч.

Экспериментальные кривые релаксации напряжений сильвинита и каменной соли Старобинского месторождения показаны на рис. 54. Весьма высокие скорости падения напряжений в образцах соляных пород имеют место в первые минуты после нагружения образца. Через 40—50 ч кривые релаксации сильвинита начинают выполаживаться; для каменной соли это наблюдается несколько раньше. После указанного периода действия нагрузки в образцах соляных пород еще заметно продолжается снижение напряжений, поскольку процесс ползучести к этому времени еще не стабилизировался.

Процесс релаксации напряжений в соляных породах практически прекращается тогда, когда остаточные (нерелаксируемые) напряжения в образце не будут вызывать его ползучести. Поскольку процесс ползучести в соляных породах имеет место при незначительных нагрузках, релаксация напряжений будет проявляться в них в течение длительного времени.

Н. М. Проскураковым и В. С. Ливенским были обработаны экспериментальные кривые релаксации напряжений по теории линейной наследственной ползучести с использованием двухпараметрического Абельева ядра, при этом параметры релаксации α^* и δ^* определялись из выражения

$$\sigma_t = \sigma_0 \frac{1}{1 + at^{1-\alpha^*}}, \quad (43)$$

Таблица 23

Результаты определения релаксационных характеристик соляных пород

Горизонт, слой	Размеры образцов, см	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	Объемный вес γ , кг/см ³	$E_{длин}$, 10 ⁵ кгс/см ²	$\sigma_0/\sigma_{сж}$	Параметры релаксации	
						α^*	δ^* , сек ^{$\alpha-1$}
II горизонт, покровная каменная соль	4×4×8	200	6.08	2.53	0.82	0.764	0.0354
					0.715	0.779	0.0312
					0.68	0.783	0.0336
II горизонт, верхняя сильвинитовая пачка	4×4×8	295	2.05	3.0	0.9	0.815	0.0218
					0.75	0.809	0.0210
					0.67	0.817	0.0201
III горизонт, каменная соль III—IV	4×4×8	250	2.11	3.25	0.9	0.789	0.0218
					0.73	0.827	0.0237
					0.7	0.836	0.0170

где σ_t — релаксируемое напряжение, кгс/см²; σ_0 — начальное напряжение, соответствующее моменту времени $t = 0$;

$$a = \frac{\delta^*}{1 - \alpha^*}. \quad (44)$$

В результате обработки экспериментальных кривых релаксации напряжений в соляных породах на ЭВМ «Проминь» были получены параметры релаксации (табл. 23). Погрешность при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных не превышала 5%.

§ 7. Длительная прочность соляных пород

Испытания соляных пород на ползучесть должны дать исходные данные для прогноза устойчивости горных выработок и целиков с длительным сроком службы. Шахтные стволы, главные откаточные и вентиляционные выработки служат в течение всего срока службы шахты, т. е. 40—50 лет. Поэтому по результатам длительных испытаний соляных пород в течение определенного промежутка времени делают путем экстраполяции прогноз устойчивости выработок с разным сроком службы.

При горно-технических расчетах с учетом фактора времени в качестве критерия принимают величину допустимых деформаций, не вызывающих разрушения, или вводят в расчет предел длительной прочности. $\sigma_{\text{длит}}$ — напряжение, вызывающее разрушение образца при заданном промежутке времени.

Предел длительной прочности горных пород определяется при испытаниях образцов на сжатие или изгиб. При испытаниях определяют время от начала загрузки образца до его разрушения при определенном уровне напряжения. Затем по результатам серии испытаний при различных нагрузках строят кривую длительной прочности в координатах напряжение — время, по которой и определяют значение $\sigma_{\text{длит}}$. По данным [113], за предел длительной прочности принимают напряжение, не вызывающее разрушение образца в течение 1000 ч.

В настоящее время мы располагаем ограниченными данными по исследованию длительной прочности соляных пород. Этот вопрос освещен в работах В. Л. Водопьянова [30, 32], И. Х. Габдрахимова [36] и А. Н. Ставрогина [119].

И. Х. Габдрахимов [36], принимая нелинейный характер деформации соляных пород Верхнекамского месторождения при длительных нагрузках, отмечает, что при напряжении $\sigma_t = (0,7 \div 0,9) \sigma_{\text{сж}}$ испытание образцов заканчивается разрушением в течение небольшого промежутка времени. Для пород, имеющих фиксированное значение $\sigma_{\text{длит}}$, им предложено выражение

$$\lim \sigma_{\text{длит}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{1 + B}, \quad (45)$$

где B — реологический параметр материала.

В работе [113] приведены значения длительной прочности при сжатии для каменной соли: 140—220 кгс/см² ($\sigma_{\text{длит}} = 0,6 \div 0,75 \sigma_{\text{сж}}$).

А. Н. Ставрогин [119] на основании экспериментальных исследований длительной прочности сильвинита установил справедливую для широкого круга материалов [50] зависимость времени до разрушения τ от величины приложенного напряжения σ в виде

$$\tau = \tau_0 e^{-\alpha \sigma}, \quad (46)$$

где τ_0 и α — константы материала.

Заметим, что коэффициент α в уравнениях (41), (46) имеет по абсолютной величине одинаковое значение. В полулогарифмических координатах $\lg \epsilon - \sigma$ и $\lg \tau - \sigma$ уравнения (41), (46) дают прямые линии.

Приведенные выше зависимости позволяют определить величины действующих напряжений и время до разрушения по известной скорости ползучести. Такой подход представляет практический интерес, так как измерение скорости ползучести в натурных условиях не представляет особых трудностей, и, кроме того, он исключает влияние масштабного фактора.

На основании обработки экспериментальных данных исследований ползучести соляных пород при одноосном сжатии на рис. 55 представлены графики ползучести и длительной прочности соляных пород Старобинского месторождения в координатах $\lg \epsilon - \sigma$ и $\lg \tau - \sigma$, а в табл. 24 приведены значения констант, входящих в уравнения (41) и (46).

При оценке устойчивости соляных пород кровли с учетом фактора времени представляет интерес исследование длительной прочности при изгибе. Н. М. Проскураковым и В. С. Ливенским были выполнены испытания длительной прочности образцов каменной соли Старобинского месторождения (III горизонт, слой III—IV) при изгибе. Для определения влияния масштабного фактора на прочность испытывались образцы 4 типоразмеров. Испытания проводились по методике, изложенной в работе [20], с сосредоточенной нагрузкой посередине пролета образца-балочки. При нагрузках ниже предела длительной прочности деформации замерялись зеркальными приборами, а при нагрузках выше предела длительной

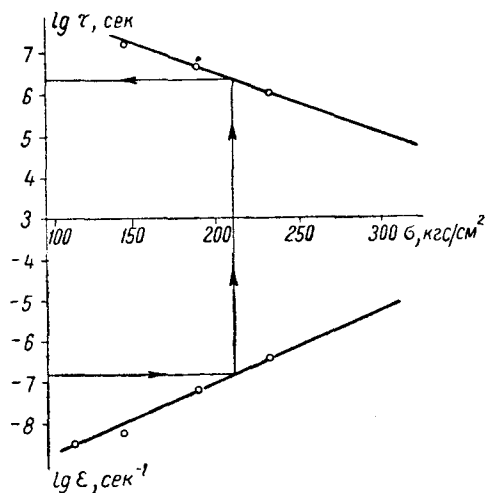


Рис. 55. Графики ползучести и длительной прочности сильвинита Старобинского месторождения (II горизонт) при одноосном сжатии.

Результаты испытания ползучести и длительной прочности соляных пород

Порода (месторождение)	Размеры образцов, см	Вид испытания	Параметры ползучести и длительной прочности				Исследователь
			ϵ_0 , см · сек ⁻¹	τ_0 , 10 ¹¹ сек	α^*	α^{**}	
Сильвинит (Верхнекамское)	15×15×30	Одноосное сжатие	—	—	0,046	0,047	А. Н. Ставрогин [119]
Монокристаллы каменной соли	—	Сжатие при температуре 550° С	—	—	—	1,88 · 10 ³	Д. Манке [119]
Искусственные образцы каменной соли	—	То же, при 400° С	—	—	—	2,24 · 10 ³	
Сильвинит (Старобинское, II горизонт)	15×15×30	Сжатие	0,68 · 10 ⁻¹¹	—	-0,0152	0,0144	Н. М. Проскуряков, В. С. Ливенский
Сильвинит (Старобинское, III горизонт)	15×15×30		2,10 · 10 ⁻¹¹	—	-0,0208	0,0222	
Каменная соль (Старобинское, III горизонт, слой III—IV)	2×2×16	Изгиб	0,071 · 10 ⁻¹⁴	70,8	-0,187	0,180	
	3×3×24		1,12 · 10 ⁻¹⁴	14,1	-0,187	0,181	
	4×4×32		8,9 · 10 ⁻¹⁴	3,16	-0,186	0,182	
	8×8×64		8,9 · 10 ⁻¹⁴	3,16	-0,186	0,182	

* Значения определены по кривой скорости ползучести.

** Значения определены по кривой длительной прочности.

прочности — с помощью фотоиндикатора с автоматической фиксацией деформаций и времени разрушения. Образцы для изоляции от внешней среды покрывались клеем.

На рис. 56 приведены кривые ползучести образцов каменной соли (размерами $3 \times 3 \times 24$ см) при различных нагрузках. Кривые ползучести при нагрузке $\sigma_t = 0,95\sigma_{изг}$ из-за разницы масштабов на рисунке не показаны.

Анализ кривых ползучести, полученных при различных уровнях нагрузки, показал, что при значении $\sigma_t \leq (0,65 \div 0,7) \sigma_{изг}$ процесс ползучести стабилизируется. При нагрузках выше этих значений

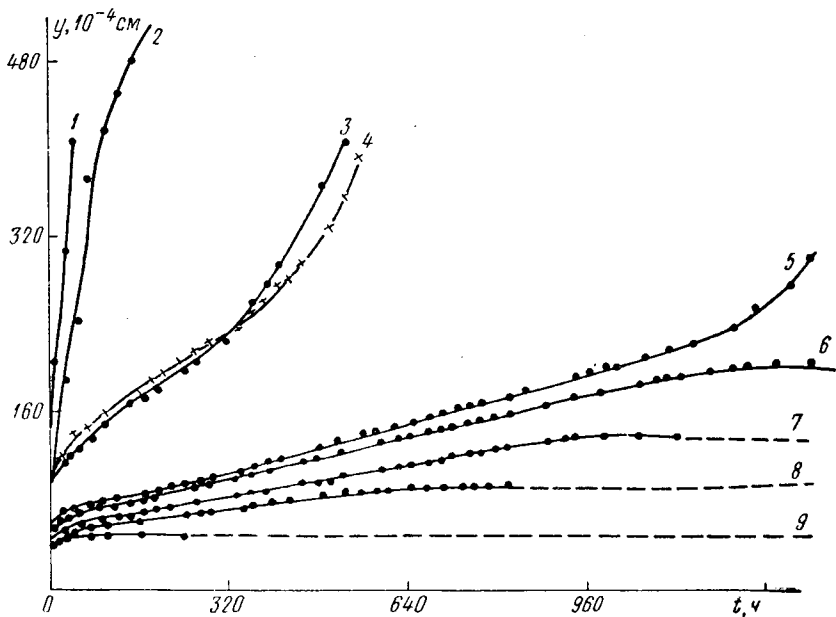


Рис. 56. Семейство кривых ползучести каменной соли при изгибе.

$\sigma_t/\sigma_{изг}$: 1 — 0,9; 2 — 0,85; 3—4 — 0,8; 5—6 — 0,7; 7—8 — 0,6; 9 — 0,5.

процесс не стабилизируется и стадия установившейся ползучести переходит в стадию прогрессирующей ползучести, образцы при этом разрушаются.

Таким образом, для испытанных образцов каменной соли предел длительной прочности при изгибе равен $(0,65 \div 0,7) \sigma_{изг}$. Обработка результатов испытаний по методике А. Н. Ставрогина [119] показала, что зависимости между временем действия нагрузки, величиной напряжения и скоростью ползучести в полулогарифмических координатах представляют прямую линию, аналогичную зависимости, полученной при длительных испытаниях на одноосное сжатие (рис. 57). Это подтверждает выводы, сделанные в работах [49, 119] о том, что длительная прочность и ползучесть как при сжатии, так и при изгибе являются процессами, имеющими одну

и ту же физическую сущность. Значения постоянных параметров, входящих в уравнения ползучести (41) и длительной прочности (46); по результатам длительных испытаний на изгиб приведены в табл. 24. Абсолютные значения коэффициентов α , входящих в уравнения (41) и (46), для каждого типоразмера образцов практически равны. Из равенства абсолютных значений коэффициентов α следует, что

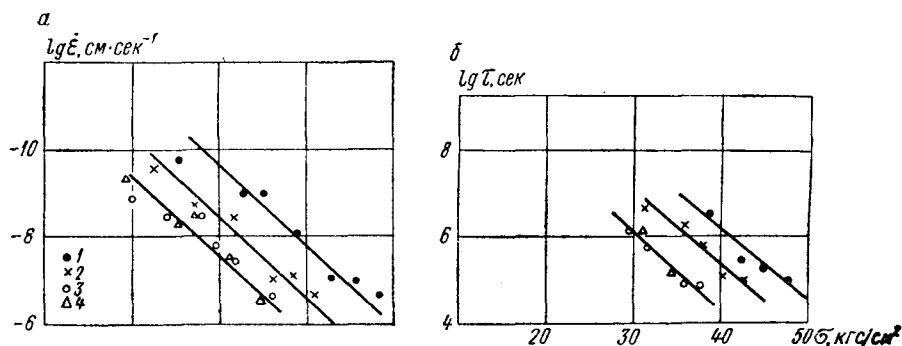


Рис. 57. Ползучесть (а) и длительная прочность (б) каменной соли (III горизонт, слой III—IV) при изгибе.

Размеры образцов, мм: 1 — $20 \times 20 \times 160$; 2 — $30 \times 30 \times 240$; 3 — $40 \times 40 \times 320$; 4 — $80 \times 80 \times 640$.

по известной скорости ползучести можно определять величины действующих напряжений и время до разрушения соляных пород, испытывающих деформации изгиба.

Анализ длительных испытаний образцов разных размеров на изгиб показал, что на образцах размером $4 \times 4 \times 32$ см и больших масштабный фактор не влияет на характер деформаций ползучести и на длительную прочность.

ГЛАВА XIII

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СОЛЯНЫХ ПОРОД

Свойства горных пород обусловлены целым рядом факторов, к числу которых в первую очередь относятся условия их образования, петрографический состав и плотность.

Реакция соляных пород на различные механические воздействия неодинакова и зависит от характера приложения нагрузки. Как правило, породы, имеющие одинаковые механические свойства, при статических и динамических нагрузках обнаруживают значительную разницу прочностных и деформационных свойств. Это объясняется тем, что при статических нагрузках образец горной породы подвержен напряжению в полном объеме и силы инерции

на деформации образца влияния не оказывают. При динамических нагрузках в образце возникают силы инерции, ускорения отдельных частиц и волновые процессы, качественно и количественно изменяющие процесс деформирования образца.

При обработке месторождений полезных ископаемых имеют место как статические, так и динамические нагрузки горных пород. Поэтому для более обоснованного прогноза проявлений горного давления, в том числе и динамического в форме горных ударов и внезапных выбросов, необходима оценка динамических свойств пород.

К числу динамических свойств соляных пород, как и других горных пород, относят следующие [113]: 1) скорость прохождения продольной и поперечной волн; 2) модуль упругости; 3) коэффициент Пуассона; 4) модуль сдвига; 5) акустическую жесткость; 6) модуль объемной упругости; 7) удельную энергоемкость разрушения; 8) пластичность и др.

Наиболее часто встречающиеся при оценке проявлений горного давления свойства — модуль упругости и коэффициент Пуассона. Поэтому нами в первую очередь экспериментально определялась скорость прохождения продольных волн и на основании полученных данных вычислялось значение динамического модуля упругости. Методика определения других показателей динамических свойств горных пород изложена в работе [113]. Скорость распространения упругих волн в образцах определяли импульсным (ультразвуковым) методом прибором УКБ-1 с резонансной частотой излучения 25, 60 и 150 кгц. Для установления анизотропии соляных пород образцы прозвучивались в трех направлениях. При этом скоростная анизотропия не была обнаружена.

Скорость прохождения продольной волны определяется по формуле

$$v_{\text{пр}} = L/t, \quad (47)$$

где $v_{\text{пр}}$ — скорость продольной волны, м/сек; L — длина образца, м; t — время прохождения импульса по образцу, сек.

Результаты определения скорости прохождения продольных волн в соляных породах приведены в табл. 25. Исследования скорости прохождения упругих волн в напряженных образцах соляных пород показали, что при возрастании напряжений в образце скорость продольной волны снижается на 40—45%. На основании экспериментальных исследований была установлена следующая корреляционная зависимость:

$$v_{\text{пр}} = 4874e^{-0,0018\sigma_t} t, \quad (48)$$

где σ_t — напряжение в образце при одноосном сжатии в момент прозвучивания, кгс/см².

Модуль упругости можно определить, зная скорость прохождения упругих волн, по формуле

$$E_{\text{дин}} = \frac{v_{\text{пр}}^2 \gamma}{g}, \quad (49)$$

где γ — объемный вес, г/см³; g — ускорение свободного падения, см/сек².

Условием образования продольной волны в образце, распространяющейся со скоростью $v_{пр}$, является отношение

$$\frac{a}{\lambda} \leq 0,5, \quad (50)$$

где a — средний поперечный размер образца, см; λ — длина волны, см.

Таблица 25

Результаты определения динамических свойств соляных пород

Размеры образца, см	Скорость продольной волны $v_{пр}$, м/сек	Модуль упругости $E_{дин}$, 10 ⁵ кгс/см ²	$E_{дин} : E_{ст}$
Каменная соль, III горизонт, слой III—IV			
8×8×64 *	4280 (3/1.6) **	3.96 (3/3) **	2.31 (3/7) **
4×4×32	4258 (10/3)	3.90 (10/6)	2.28 (10/9)
3×3×24	3997 (10/6)	3.44 (10/17)	2.12 (10/13)
2×2×16	4350 (12/10)	3.35 (12/17)	2.08 (12/16)
15×15×15	4350 (10/3)	4.05 (10/4)	2.15 (10/13)
10×10×10	4315 (14/2)	3.98 (14/5)	2.31 (14/9)
8×8×8	4250 (15/4)	3.76 (15/9)	2.43 (15/14)
5×5×5	4017 (11/4)	3.44 (11/9)	2.45 (11/12)
4×4×4	3718 (10/12)	2.96 (10/20)	2.65 (10/30)
3.5×3.5×3.5	3523 (19/9)	2.66 (19/20)	2.25 (5/8)
3×3×3	3178 (16/12)	2.22 (16/20)	2.17 (6/6)
Каменная соль, II горизонт, покровная пачка			
8×8×64	4246 (3/3)	3.82 (3/4)	2.27 (3/6)
4×4×32	4010 (5/3)	3.46 (5/7)	2.46 (5/6)
3×3×24	4160 (5/6)	3.75 (5/13)	2.35 (5/11)
2×2×16	3950 (6/7)	3.45 (6/16)	2.21 (6/16)
5×5×5	3682 (5/6)	2.92 (5/13)	2.77 (3/20)
Сильвинит, II горизонт, верхняя пачка			
5×5×5	3478 (5/9)	2.72 (5/12)	2.26 (5/20)

* Образцы-балочки прозвучивались по длинной стороне.

** В скобках приведены: в числителе — количество испытанных образцов; в знаменателе — коэффициент вариации.

Результаты определения динамического модуля упругости соляных пород приведены в табл. 25. Согласно этим экспериментальным данным динамический модуль упругости примерно в 2 раза больше статического.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ СОЛЯНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ

§ 1. Методы определения прочности

Рассмотренные в предыдущих главах методы и результаты определения прочностных и деформационных свойств соляных пород в лабораторных условиях имеют целью установить с большей точностью прочность испытываемых образцов, представляющих собой определенный комплекс минералов с конкретными структурными и текстурными особенностями. Однако полученные при лабораторных испытаниях значения прочности соляных пород даже при соблюдении максимально возможных условий отбора образцов с точки зрения их представительности и типичности для конкретных условий не будут соответствовать значениям прочности этих соляных пород в условиях их естественного залегания. В действительности значения прочности соляных образцов по данным лабораторных испытаний могут отличаться от естественных в той или иной степени в силу ряда факторов, к основным из которых следует отнести различие минералогического состава, структурные и текстурные особенности, факторы масштаба и напряженного состояния, условия нагрузки и испытания образцов, наличие поверхностей ослабления и др.

Испытание механических свойств соляных пород в натуральных условиях позволяет увеличить представительность и надежность получаемых прочностных характеристик по сравнению с лабораторными методами за счет уменьшения влияния масштабного фактора, большей представительности структурных и текстурных особенностей соляных пород, обеспечения их большей сохранности. В отдельных случаях испытания проводят, чтобы исключить работы по отбору, доставке и изготовлению образцов для лабораторных испытаний.

Если исключить условия, дающие отклонения при испытаниях образцов в лабораторных и натуральных условиях, то можно получить близкое совпадение получаемых результатов. Испытание соляных пород в натуральных условиях позволяет учесть следующие основные, характерные для соляных пород, факторы: а) различие атмосферных и температурных условий при лабораторных и натуральных исследованиях; б) различие в видах напряженного состояния; в) влияние масштабного фактора; г) различие структурных и текстурных особенностей.

Влияние первого фактора значительно сказывается при оценке ползучести соляных пород, особенно при их неоднородном строении и наличии глинистых прослоек. Влажность в значительной степени изменяет прочностные и деформационные характеристики соляных пород. По данным [37], при испытаниях образцов карналлита

и каменной соли отмечается существенное влияние температуры. Так, при повышении температуры до 100° С увеличиваются значения критических (разрушающих) деформаций; при этом прочность образцов каменной соли при сжатии снижается с 300 до 220 кгс/см² при повышении температуры с 20 до 80° С.

В зоне влияния горных выработок соляные породы испытывают сложное неравномерное напряженное состояние, которое трудно смоделировать при проведении лабораторных испытаний и которое в свою очередь будет оказывать существенное влияние на механические свойства.

При отработке калийных и каменносоляных месторождений встречаются соляные породы с крупностью составляющих их зерен от долей до 40 мм. Ранее отмечалось, что на прочностные свойства соляных пород оказывает влияние отношение диаметра образца к среднему диаметру составляющих их кристаллов, которое должно составлять $d/\delta \geq 30$. Для выполнения этого условия при испытании крупнокристаллических соляных пород необходимо иметь образцы с поперечным размером до 120 см, что можно выполнить только в натуральных условиях. Кроме того, испытания свойств соляных пород в таких условиях позволяют соблюсти идентичность структурного и минералогического состава испытываемых образцов и массива.

Подробный обзор и анализ методов натуральных испытаний свойств горных пород приведены в работах [83, 84, 86, 113]. Все методы натуральных испытаний механических свойств горных пород можно разделить на три большие группы [84]: 1) проведение опытных горных работ по специальной программе с инструментальным контролем механизма нагружения массива; 2) испытания искусственным нагружением крупных частей массива, частично отделенных от последнего; 3) испытания нагружением частично отделенных от массива малых областей («образцов»).

Первая группа методов в настоящее время недостаточно разработана и заключается в оценке прочностных и деформационных свойств массива горных пород по отдельным проявлениям горного давления: обрушению кровли, напряженному состоянию целиков в стадии их разрушения и др.

Вторая группа методов является основной. Методы определения прочности и деформируемости горных пород описаны в работах [83, 84] и заключаются в раздавливании оконтуренных призм массива нагрузочными устройствами. Оконтуриваются призмы соляных пород для испытания специальными угольными пилами или нарезными комбайнами. Наиболее удобны для этой цели комбайны 6РМ-2В и 2ВТ-6 фирмы «Джой». Менее совершенным следует считать оконтуривание призм пород шпурами, а неприемлемым — применение взрывных работ. При взрывных работах нарушается целостность предназначенного для испытаний образца и возникают системы трещин, снижающие его прочность. Оконтуривание призм производится с пяти и четырех боковых сторон и сверху, при этом связь

призмы с массивом осуществляется в первом случае через нижнее основание, а во втором — по двум поверхностям. Как показано в работе [84], при длине оконтуренных с четырех сторон призм, превышающей в 1,5—2 раза поперечный размер, их прочность несущественно отличается от прочности призм, оконтуренных с пяти сторон.

В качестве нагрузки на образец при испытаниях в массиве обычно используется гидравлическая давяльная установка конструкции

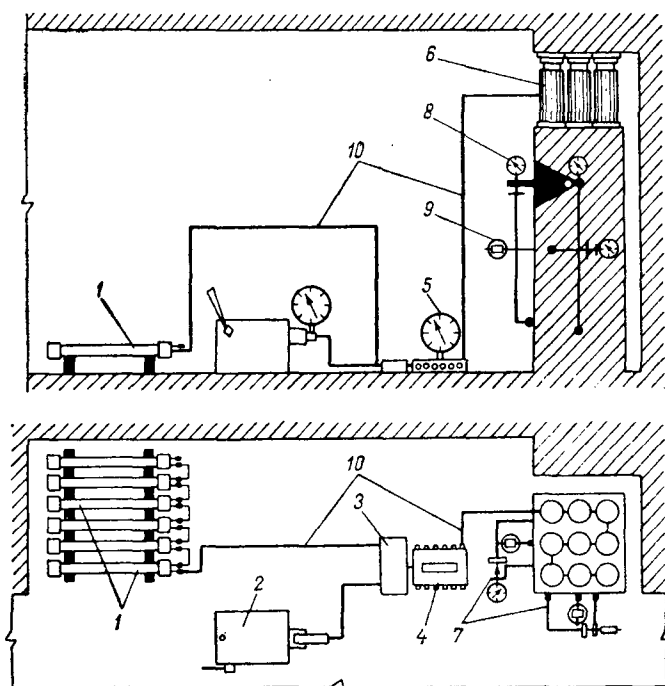


Рис. 58. Схема гидравлической установки для испытания пород в натуральных условиях [86].

1 — аккумуляторы давления; 2 — насос; 3 — предохранительный клапан; 4 — коллектор; 5 — манометр; 6 — домкраты; 7 — реперы; 8 — индикаторы; 9 — упоры; 10 — соединительные трубки.

ВНИМИ (рис. 58). Она позволяет испытывать образцы призматической формы размером до $100 \times 100 \times 150$ см, при этом максимальное удельное давление на торец призмы до 1200 кгс/см^2 .

Испытания отделенных от массива призм горных пород могут проводиться как при одноосном сжатии, так и в условиях трехосного неравномерного сжатия, когда компоненты главных напряжений различны. При испытаниях на одноосное сжатие гидравлические цилиндры устанавливаются в верхней торцевой грани призмы, а при испытаниях на трехосное неравномерное сжатие эти цилиндры

размещаются по бокам призмы, создавая компоненты бокового напряжения [83].

В практике проведения натуральных исследований свойств горных пород используется также метод раздавливания массива около врубовой щели [84], который значительно снижает трудоемкость исследований, но получаемая при этом прочность, по данным [84], будет примерно в два с лишним раза больше по сравнению с прочностью одноосно сжимаемых призм со свободными гранями.

Кроме рассмотренных выше методов определения прочности горных пород в натуральных условиях применяется ряд методов испытания частично отделенных от массива малых «образцов» (облом выбуренного керна в скважине, испытание кернов с помощью стабилметров и др.), а также методов косвенного определения прочности в массиве (статическое и динамическое вдавливание инденторов в обнажение массива, по усилиям подачи при бурении и др.). Более подробно методы описаны в работе [84].

Важным условием при проведении натуральных испытаний соляных пород является выбор места исследований (экспериментальных участков). При этом необходимо соблюдать следующие условия:

а) участок не должен находиться в зоне влияния очистных работ; б) участок не должен подвергаться влиянию взрывных работ и должен быть выбран в свежепроходной выработке; в) соляные породы в месте проведения испытаний должны иметь достаточную представительность, характерную для рассматриваемого участка месторождения в смысле минералогического состава, структурного и тектурного строения.

В настоящее время имеется ограниченное количество данных экспериментальных исследований свойств соляных пород в натуральных условиях, которые позволяют сделать некоторые предварительные обобщения.

§ 2. Прочность при сжатии

Прочность соляных пород при сжатии является одной из основных прочностных характеристик, используемых в практических расчетах механики горных пород. Поэтому сопоставление значений $\sigma_{сж}$, получаемых в лабораторных условиях, со значениями $\sigma_{сж}$, получаемыми в натуральных условиях, более близко отвечающих условиям естественного нагружения пород в массиве, представляет большой интерес.

К. Г. Хёфер [169], проводивший сопоставительные исследования соляных пород на сжатие и сдвиг в натуральных и лабораторных условиях, отмечает, что существенных различий между получаемыми значениями прочности нет.

При проведении натуральных исследований прочности соляных пород при сжатии большое значение имеет соблюдение условий на контактах образца (окоптуренной призмы) с давальными плитами. Точная обработка торцов призм соляных пород в шахтных условиях прак-

тически невозможна, а всякие неровности будут создавать концентрацию напряжений и снижение прочности. Некоторого улучшения контактных условий можно достичь подсыпкой между плитой и опорной гранью призмы смягчающего слоя штыба соляных пород. Под действием нагрузки штыб соляных пород спрессовывается, уплотняется и создает равномерную передачу давления от плиты на образец.

При испытаниях прочности соляных пород на сжатие в натуральных условиях одновременно замеряются продольные и поперечные деформации по известной методике [83, 84]. На боковой грани испытываемой призмы и на реперах, заделываемых в тело призмы, монтируются тензотрансформаторы часового типа. Деформации фиксируются в процессе проведения испытаний. При выборе места и глубины заделки реперов на боковой грани призмы необходимо учитывать характер ее разрушения под нагрузкой. При образовании боковых сколов образца под нагрузкой в зоне установки реперов нарушается режим замера деформаций.

На Старобинском месторождении исследование прочности соляных пород при сжатии было выполнено ЛГИ на II и III пластах I рудника. Исследования проводились в выработках, находящихся в стадии проходки, и на расстоянии 20—30 м от забоя. Блоки для натуральных испытаний оконтуривались в стенке выработок, представляющих массив и не испытывающих влияния соседних выработок.

Схемы оконтуривания и нагружения блоков соляных пород при испытаниях на сжатие показаны на рис. 59, из которого видно, что оконтуривание призм проводилось с четырех и пяти сторон. Нагрузка на соляные блоки, отделенные от массива по одной из указанных схем, создавалась давильной установкой конструкции ВНИМИ. Для испытания на одноосное сжатие изготавливались образцы следующих размеров, см: $30 \times 30 \times 60$; $40 \times 40 \times 80$; $50 \times 50 \times 100$.

Блоки оконтуривались комбайном 2ВТ-6, а также бурением по контуру намечаемого образца на расстоянии 5—10 мм друг от друга шпуров диаметром 42 мм с последующей разделкой перемычек между шпурами и выравниванием граней угольной пилой МС-10 конструкции ВНИМИ. В верхней части разделялась ниша для

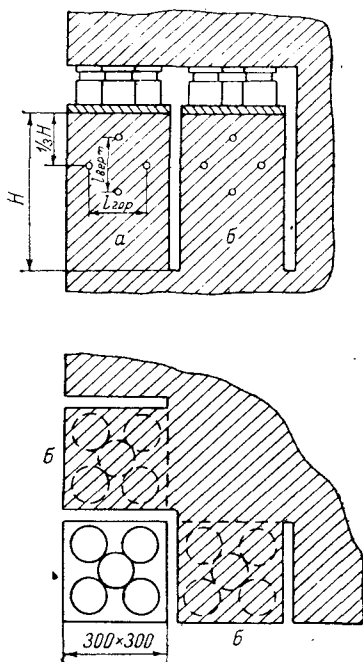


Рис. 59. Схема подготовки образцов соляных пород к натурным испытаниям.

а — оконтурен с 5 сторон; б — оконтурен с 4 сторон.

расположения в ней гидравлических домкратов и опорных плит (см. рис. 59). Давление в цилиндрах создавалось с помощью ручных насосов БН-2 и НР-1, при этом каждый цилиндр развивал усилие до 85 тс.

Испытание образцов проводилось по циклу «нагрузка — разгрузка». Образец считался разрушенным после того, как давление в гидросистеме падало и поднять его больше не удавалось. Контроль давления в гидросистеме осуществлялся с помощью манометров. В процессе нагружения образца измерялись продольные и поперечные деформации с помощью индикаторов часового типа (точность измерений 0,01 мм). Индикаторы крепились на реперах, закладываемых на глубину 150—250 мм на базе 150—300 мм.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 26. Прочность сильвинита при одноосном сжатии для II калийного горизонта 240—252 кгс/см², для II сильвинитового слоя III горизонта 270 ± 20 кгс/см², т. е. их различия незначительны; прочность каменной соли при одноосном сжатии соответственно для II и III калийных горизонтов 155—160 и 205 кгс/см². Необходимо отметить, что породы III калийного горизонта обладают несколько большими значениями $\sigma_{сж}$ (для сильвинита — на 12,5%, каменной соли — 32%) по сравнению с соляными породами II калийного горизонта. К тому же значения $\sigma_{сж}$, определенные для сильвинита и каменной соли II калийного горизонта по различным схемам испытания (с оконтуриванием призм с четырех и пяти сторон), отличаются несущественно, их различие находится в пределах разброса значений при испытаниях.

По данным В. Дрейера [163], значение модуля деформации E , определенное по первой нагрузочной или разгрузочной кривой, будет несколько занижено по сравнению со значением, установленным по последующим нагрузочным или разгрузочным кривым. При проведении натуральных исследований измерялись продольные и поперечные деформации, по которым строились графики «нагрузка — относительная деформация». На рис. 60 представлены такие графики для двух образцов сильвинита, испытанных на II и III калийных горизонтах. Модуль деформации E и коэффициент Пуассона μ определялись по нагрузочным и разгрузочным кривым в интервале нагрузок от 15 до 50% от разрушающих, при этом было установлено, что значения модуля деформации по нагрузочной кривой примерно на 30—50% ниже по сравнению с модулем деформации по разгрузочным кривым. Средние значения его при одноосном сжатии составляют, кгс/см²: для сильвинита II горизонта $(1,6 \div 1,65) \cdot 10^5$, III горизонта $2,8 \cdot 10^5$; для каменной соли $(1,2 \div 1,5) \cdot 10^5$ (табл. 26). Значения коэффициента Пуассона для соляных пород по данным натуральных испытаний находятся в пределах 0,3—0,38.

Сопоставление прочностных и деформационных характеристик соляных пород Старобинского месторождения по результатам лабораторных и натуральных исследований приведено в табл. 27. Судя

Результаты натуральных испытаний свойств соляных пород Старобинского месторождения

Слой	Порода	Размеры образцов, мм			Кол-во испытанных образцов	Схема испытаний	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	E , 10 ⁵ кгс/см ²	μ
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>					
II калийный горизонт									
Нижний сильвинитовый	Сильвинит	330	340	700	2	Призма оконтурена с пяти сторон	252 ± 20	1,65 *	—
		310	310	570	2	То же, с четырех сторон	240 ± 10	1,62	0,3 *
Средняя каменная соль	Каменная соль с прослойками глинисто-карбонатных пород	330	340	600	3	То же, с пяти сторон	160 ± 12	1,45	0,38
		320	350	600	2	То же, с четырех сторон	155 ± 15	1,50	0,30
III калийный горизонт									
Второй сильвинитовый Каменной соли II—III	Сильвинит с глинистыми прослойками	530	500	900	6	Призма оконтурена с четырех сторон	270 ± 20	2,8	0,29
	Каменная соль с прослойками глинисто-карбонатных пород	500	500	930	3	То же, с пяти сторон	205 ± 5	1,23	0,35

* Значения E и μ определены по нагрузочной кривой.

по данным таблицы, значения $\sigma_{сж}$ по результатам лабораторных и натуральных испытаний совпадают, их различия находятся в пределах разброса значений. Несколько больше различаются значения модуля деформации E , что объясняется, по-видимому, текстурными и структурными особенностями испытываемых образцов.

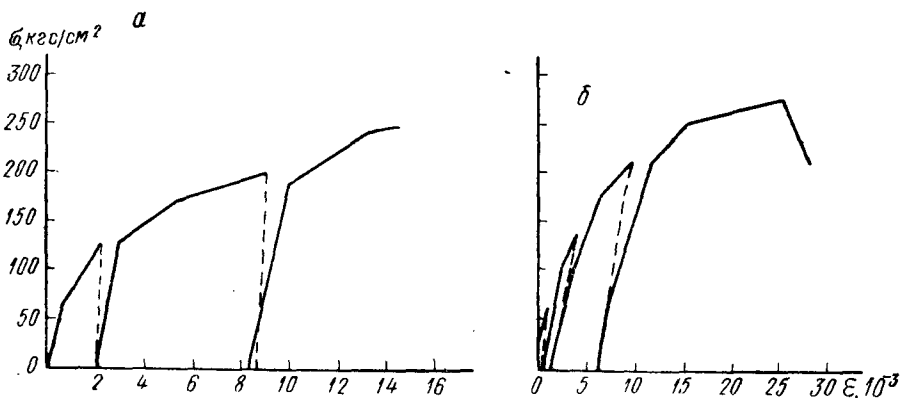


Рис. 60. Графики «нагрузка — относительная деформация» по результатам натуральных испытаний: *a* — сальвинит, II горизонт ($\sigma_{сж} = 247$ кг/см²); *б* — сальвинит II, III горизонт ($\sigma_{сж} = 280$ кг/см²).

Таблица 27

Сопоставительные результаты натуральных и лабораторных испытаний свойств соляных пород Старобинского месторождения

Порода	Лабораторные испытания			Натурные испытания		
	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	E , 10 ⁵ кгс/см ²	μ	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	E , 10 ⁵ кгс/см ²	μ
Сильвинит (II горизонт, нижняя пачка)	240	1.20	—	252	1.65	—
Каменная соль (средний слой)	159	1.23	0.32	160	1.45	0.38
Сильвинит (III горизонт, слой II)	260	2.70	0.26	270	2.8	0.29
Каменная соль (слой II—III)	212	2.70	0.27	205	1.23	0.35

По результатам натуральных исследований свойств соляных пород при одноосном сжатии можно выделить три характерные формы разрушения оконтуренных призм под нагрузкой:

а) разрушение вертикальными трещинами по всей высоте образца (рис. 61, *a*), характерное при испытании однородных образцов без глинистых прослоек;

б) разрушение части образца в месте расположения глинистых прослоек с образованием системы местных параллельных трещин;

в) отжим боковых граней образца с образованием двух противоположно расположенных конусов. Это наиболее характерный для горных пород вид разрушения. При натуральных испытаниях соляных пород такой вид разрушения имел место при однородных высоких образцах или при наличии в средней части образца глинистого прослойка (рис. 61, б).

При испытаниях образцов различных форм и размеров можно наблюдать большее разнообразие видов разрушения, представляющих собой комбинации отмеченных выше наиболее характерных форм. Заметим, что разрушения образцов при лабораторных испытаниях и целиков в натуральных условиях, определяемые их формой, размерами и структурой, имеют аналогичный характер.

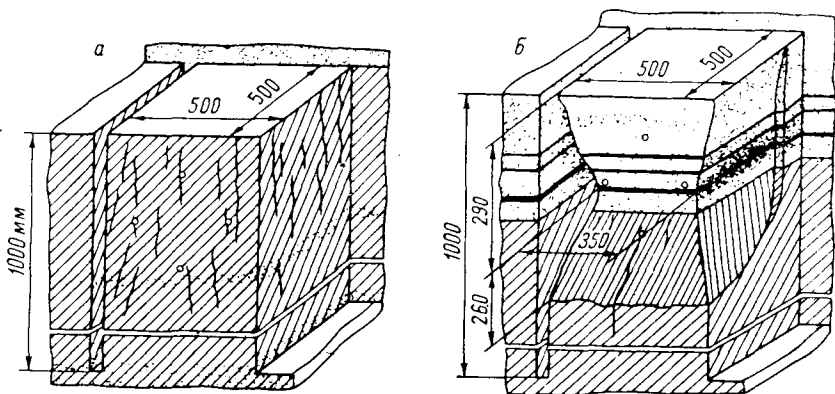


Рис. 61. Характер разрушения образцов при натуральных испытаниях.
Образцы: а — однородные; б — с глинистыми прослойками.

Натурные исследования свойств соляных пород проводились Н. М. Проскураковым для сильвинитовых пластов АБ и Кр. II в условиях II Березниковского рудоуправления и В. Л. Водопьяновым для карналлитового пласта Соликамского рудника [30, 31, 34]. Исследование сильвинитовых пластов АБ и Кр. II было выполнено по описанной выше методике, при этом породные призмы оконтуривались с четырех и пяти сторон. При испытаниях определялась прочность при одноосном сжатии, модуль деформации и коэффициент Пуассона. Результаты исследований приведены в табл. 28. Прочность испытанных образцов для пласта АБ составляет 205, а для пласта Кр. II — 218 кгс/см².

Испытания карналлита проводились в 45-м блоке (пласт В, слой VI, в антиклинальной складке) Соликамского рудника. Образцы оконтуривались ручной пневматической пилой ПУР-2. Испытание велось в две стадии: вначале образец загружался отдельными циклами «нагрузка — разгрузка» до значений, составляющих 50% от разрушающих, для определения упругих и деформационных характеристик. После 5—8 циклов «нагрузка — разгрузка» образец

Результаты натуральных испытаний свойств соляных пород Верхнекамского месторождения *

Пласт	Порода	Размеры образцов, см			Кол-во испытанных образцов	Схема испытаний	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	E , 10 ⁶ кгс/см ²	μ
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>h</i>					
АБ, слои А, А' и А—А'	Сильвинит с прослойками каменной соли и глины	40	40	80	4	Призмы, ооконтуренные с пяти сторон	205	2.20	0.30
Кр. II (5—7 сильвинитовые)	То же	40	40	80	5	Призма, ооконтуренная с четырех сторон	218	1.88	0.28
В, шестой слой (Соликамский рудник)	Карналлит	40	38	82	1	Призма, ооконтуренная с пяти сторон	153	1.4	0.33
	»	33	33	67	1	То же	159	1.9	0.25
	»	38	35	37	1	»	164	1.9	0.32
	»	34	36	48	1	»	167	1.75	0.30
	»	36	37	36	1	»	193	1.92	0.30

* Данные В. Л. Водоньянова [30, 31, 34].

разрушался и устанавливалось значение прочности при сжатии. Как отмечается в работе [30], характер разрушения образцов в натуральных условиях был аналогичен разрушению образцов при испытаниях в лабораторных условиях: разрушение начиналось с образования отдельных трещин, возникающих при напряжениях 70—80% от разрушающих. С ростом нагрузок появлялись новые трещины, интенсивное развитие которых заканчивалось образованием двух противоположно расположенных конусов разрушения. Размеры испытанных образцов и полученные при испытаниях значения $\sigma_{сж}$, E и μ приведены в табл. 28, из которой видно, что среднее значение прочности при сжатии для карналлита равно 165 кгс/см^2 , модуля упругости $1,77 \cdot 10^5 \text{ кгс/см}^2$ и коэффициента Пуассона 0,3.

Сопоставляя значения прочности карналлита при сжатии по данным лабораторных и натуральных испытаний, можно отметить их хорошую сходимость, а значения модуля упругости по результатам натуральных испытаний примерно в 2 раза выше значений, полученных по результатам испытаний в лабораторных условиях. Более подробно с материалами испытаний можно ознакомиться в работах [30, 31, 34].

§ 3. Прочность на изгиб

При определении прочности горных пород на изгиб в натуральных условиях применяют две схемы испытаний [84].

1. Испытание на изгиб оконтуренной в пролете породной балки с защемлением по двум концам. Балка оконтуривается в почве или кровле выработки двумя вертикальными щелями, длина которых определяет пролет породной балки (до 2 м). Защемление обоих концов балки в почве обеспечивается кроме ненарушенной непосредственной их связи с массивом нажимом двух распорных стоек. Нагружается балка ступенями с помощью сосредоточенной силы, развиваемой тяговым устройством или гидродомкратом.

2. Испытание на изгиб оконтуренной породной консоли. Суть испытаний заключается в оконтуривании на вертикальном обнажении соляных пород или на стыке выработки глубокими врубами угольной пилой МС-10 консольного бруса. Пригрузка свободного конца консоли осуществляется грузовым рычагом, опоры которого располагаются в подготовленной для этого нише с упором в кровлю (рис. 62). Прочность испытываемых по этой схеме образцов на изгиб определяется по разрушающей нагрузке рычага (с учетом собственного веса консоли) по известным формулам сопротивления материалов.

Соляные породы на изгиб испытывались в кровле выработки, проходимой комбайном 2ВГ-6 фирмы «Джой», в условиях I Солигорского рудника.

Испытания на изгиб оконтуренной породной консоли проводились с помощью рычажного прибора конструкции ВНИМИ [84] в такой последовательности: в кровле выработки с помощью ручной

угольной пилы МС-10 оконтуривался образец намечаемых размеров прямоугольной формы с разделкой небольшой ниши для установки прибора. В процессе нагружения измерялся прогиб «образца» (балки) с помощью индикатора часового типа, укрепленного на специальном репере. Второй замерный репер устанавливался в торце образца.

Расчет прочности соляных пород на изгиб, испытываемых по указанной схеме, проводился по методике расчета консольной балки,

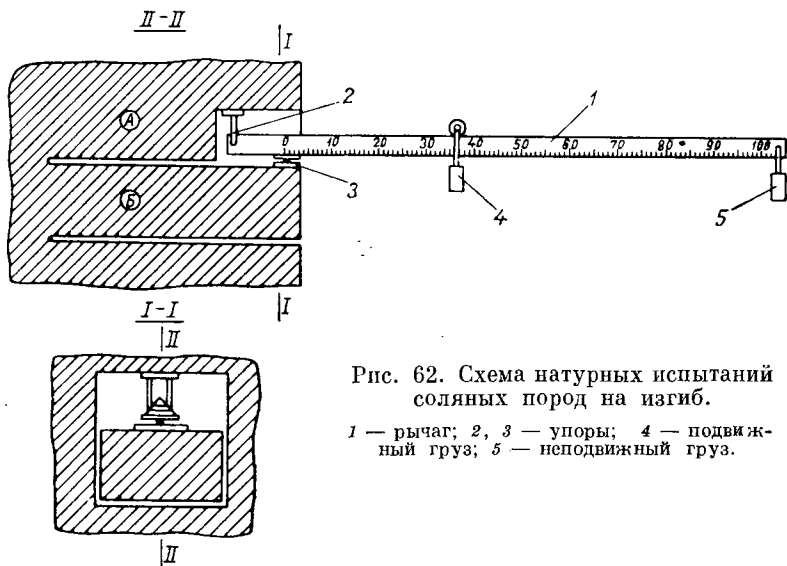


Рис. 62. Схема натуральных испытаний соляных пород на изгиб.

1 — рычаг; 2, 3 — упоры; 4 — подвижный груз; 5 — неподвижный груз.

нагруженной собственным весом и сосредоточенной силой на ее конце, по формуле

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{3l(ql + 2P)}{bh^2}, \text{ кгс/см}^2, \quad (51)$$

где l — длина балки от защемления до места приложения нагрузки, см; P — усилие, создаваемое рычагом, кгс; q — собственный вес единицы длины балки, кг/см; b и h — ширина и высота балки, см.

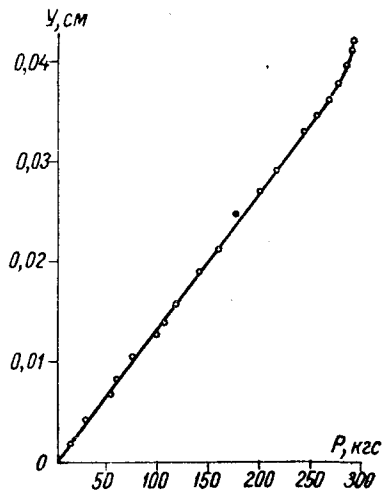
Результаты натуральных испытаний каменной соли на изгиб сведены в табл. 29, в которой указаны размеры испытанных балок. Среднее значение прочности верхней каменной соли (II горизонт) на изгиб равно $60,9 \pm 6,1$, а каменной соли II—III (III горизонт) — 41 ± 12 кгс/см². Несколько больший разброс значений $\sigma_{\text{изг}}$ при испытании образцов каменной соли III калийного горизонта обусловлен, очевидно, большей ее неоднородностью и наличием глинистых прослоек. Сравнивая значения прочности соляных пород на изгиб по результатам лабораторных (см. гл. VII) и натуральных исследований, следует отметить близкую сходимость их величин. Соотношение значений прочности каменной соли при одноосном сжатии и изгибе по результатам натуральных исследований находится в пределах $\sigma_{\text{изг}}/\sigma_{\text{сж}} = 1/(3,5 \div 4)$.

Результаты натуральных испытаний каменной соли Старобинского месторождения на изгиб по схеме консольной балки

Горизонт	Размеры образца, см			Расстояние от конца балки до места разлома, см	Изг., кгс/см ²	Модуль деформации E , 10^5 кгс/см ²	Напряжение, при котором определено значение E , % от $\sigma_{изг}$
	b	h	l				
Второй калийный, каменная соль верхнего слоя	24.0	15.5	46.5	39.2	54.8	—	—
	12.0	10.0	46.2	37	66.2	2.1	48
	13.0	10.0	46.0	45	56.9	2.3	50
	13.0	10.0	46.0	45.5	65.7	2.5	50
Среднее				55.6	60.9 ± 6.1	2.3	—
Третий калийный, каменная соль, III (II—III)	23	46	78	—	53	—	—
	19.2	26.5	82	—	38	—	—
	18	20.5	80	—	35	—	—
	20	22	85	—	46	—	—
	19	22	81	—	37	—	—
	17	20	39	—	39	—	—
Среднее					41 ± 12		

По результатам натуральных испытаний строили графики в координатах «нагрузка — прогиб» (рис. 63), по которым при нагрузках до 50% от $\sigma_{изг}$ определяли модуль деформации (табл. 29). Среднее значение модуля деформации при изгибе для верхней каменной соли (II горизонт) составляет $2,3 \cdot 10^5$, а для каменной соли II—III (III горизонт) — $2,17 \cdot 10^5$ кгс/см². Значения модуля деформации по результатам испытаний в натуральных условиях примерно в 3 раза выше по сравнению со значениями модуля деформации, определенными на образцах в лабораторных условиях, и примерно на 40% выше значений модуля деформаций каменной соли, определенных в натуральных условиях при одноосном сжатии.

Рис. 63. График зависимости деформаций от нагрузки при натуральных испытаниях каменной соли на изгиб.



§ 4. Длительные испытания соляных пород в натуральных условиях

Для соляных пород, обладающих значительными деформациями ползучести, проводятся испытания их длительной прочности в натуральных условиях. Изображенная на рис. 58 установка позволяет проводить длительные испытания соляных пород в натуральных условиях при постоянной заданной нагрузке. Основными узлами установки являются комплект гидравлических аккумуляторов давления и комплект давящих гидравлических цилиндров. На рабочую жидкость в гидроаккумуляторах действуют усилия сжатых пружин, которые обеспечивают постоянное давление в гидросистеме в случае утечек [86].

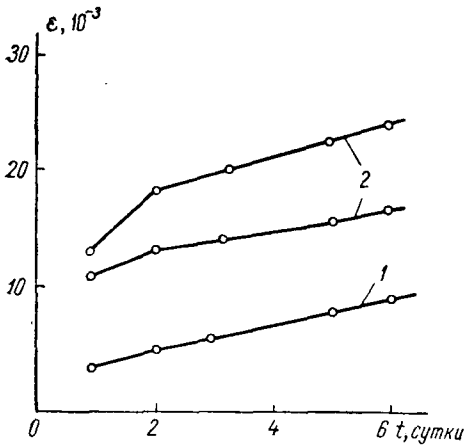


Рис. 64. Кривые ползучести силивинита по данным натуральных испытаний [86]. 1 — продольные; 2 — поперечные деформации.

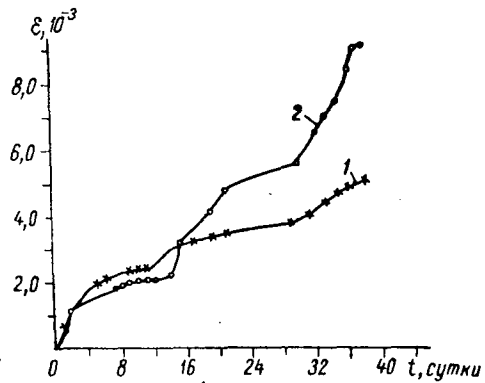


Рис. 65. Кривые ползучести силивинита по данным длительных натуральных испытаний. 1 — продольные; 2 — поперечные деформации.

Методика подготовки блоков, установки реперов для замера деформаций и схемы нагружения аналогичны испытаниям при кратковременном нагружении. Отличие заключается в том, что в систему включаются аккумуляторы давления, обеспечивающие постоянную нагрузку на образец в течение всего периода испытаний.

Первые испытания длительной прочности силивинита в натуральных условиях (I Березниковский калийный рудник) были выполнены ВНИМИ [86]. Призмы силивинита, ооконтуренные с пяти сторон и имеющие размеры $50 \times 50 \times 100$ см, испытывались под нагрузкой 107 кгс/см^2 (67% от разрушающей $\sigma_{сж} = 160 \text{ кгс/см}^2$) в течение 6 суток. Кривые ползучести силивинита приведены на рис. 64, из которых видно, что поперечные деформации по абсолютной величине превосходят продольные, что, по данным [86], свидетельствует

о сильном увеличении объема образца за счет развития в нем трещин разрушения.

Ленинградским горным институтом были проведены натурные длительные испытания образцов сильвинита (II сильвинитовый слой III калийного горизонта) I Солигорского рудника. По результатам кратковременных испытаний $\sigma_{сж} = 270$ кгс/см². Призмы с размерами $520 \times 500 \times 900$ мм нагружались постоянной нагрузкой $\sigma_t = 220$ кгс/см², составляющей 80% от разрушающей, и испытывались в течение 39 суток. График ползучести образцов сильвинита по данным натуральных длительных исследований представлен на рис. 65, из которого видно, что наиболее интенсивное нарастание деформаций происходит в первые 5 суток, затем скорость деформаций снижается в 4—5 раз; в последующие 11 суток скорость деформаций вновь увеличивается.

Сопоставление графиков ползучести образцов сильвинита, по данным лабораторных и натуральных испытаний, при одинаковых нагрузках [100] показывает аналогичный их характер.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ РЕЗАНИИ И ВДАВЛИВАНИИ

ГЛАВА XV

СВОЙСТВА СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ РЕЗАНИИ

§ 1. Методы определения сопротивляемости резанию

Для определения силовых нагрузок, действующих на породоразрушающий инструмент исполнительных органов горных комбайнов, прогнозирования производительности последних в различных условиях их применения используется ряд показателей свойств пород. Применительно к солям важнейшим из них является показатель сопротивляемости породы резанию, поскольку повсеместно на калийных рудниках наибольшее распространение получил метод разрушения солей резанием.

Наиболее известными показателями сопротивляемости резанию являются:

- а) показатель $A_{\text{ДКС}}$, получаемый прибором ДКС;
- б) показатель $A_{\text{СДМ}}$, определяемый прибором СДМ;
- в) показатель сопротивления породы резанию P'_z ;
- г) сопротивляемость приповерхностному сдвигу $P_{\text{сд}}$.

Метод определения первого показателя разработан в 1950 г. б. ВУГИ для оценки сопротивляемости резанию углей [74]. В дальнейшем он получил широкое распространение и послужил основой для построения ИГД им. А. А. Скочинского шкалы сопротивляемости резанию ископаемых углей различных шахтопластов угольных месторождений СССР [10]. Для оценки сопротивляемости резанию соляных пород этот метод впервые был применен при проведении исследований на руднике I рудоуправления комбината «Белорускалий» в 1961 г. Основанием для разработки данного метода послужила установленная большинством исследователей прямо пропорциональная зависимость усилия резания углей с выровненной поверхности забоя (образца) от толщины стружки. В связи с этим авторами метода [74] было предложено оценивать сопротивляемость резанию углей показателем A , равным отношению усилия резания

$P_{z\text{ ср}}$ с гладкой поверхности забоя эталонным резцом к толщине стружки h :

$$A = P_{z\text{ ср}}/h. \quad (52)$$

В качестве эталонного был принят резец с шириной режущей кромки 20 мм, передним углом 40° и задним углом 10°. Резание производится непосредственно в забое с помощью прибора ДКС (рис. 66), состоящего из распорного винтового домкрата, распределяемого между кровлей и почвой пласта, рукояти с резцом, свободно вращающейся вокруг оси распорного домкрата, и червячной лебедки с тянущим винтом, осуществляющими с помощью троса

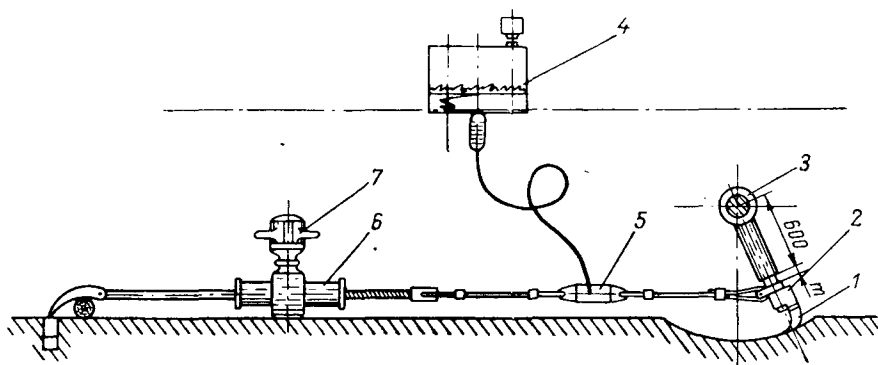


Рис. 66. Прибор ДКС.

1 — резец; 2 — рукоять; 3 — распорный домкрат; 4 — записывающее устройство; 5 — гидравлический датчик; 6 — лебедка; 7 — электросверло.

поворот вокруг оси распорного домкрата рукояти с резцом. Резец может выдвигаться из рукояти на длину до 300 мм, что обеспечивает различную толщину срезаемой стружки. Приводом для лебедки служит ручное электросверло, а сама лебедка канатом крепится к распорной стойке.

Для измерения и записи усилия, действующего при резании, используется динамограф, гидравлический датчик которого включается в разрез троса и связан с измерительным и записывающим аппаратом гибким маслопроводом. После установки прибора ДКС в выработке он осуществляет зачистку груди забоя по цилиндрической поверхности по всей высоте забоя до получения гладкой выровненной поверхности. Далее резец выдвигается из рукояти на требуемую величину (задаваемую толщину стружки) и производит зачетный рез, после чего рукоять возвращается в исходное положение, поднимается или опускается по распорному домкрату на некоторое расстояние. Расстояние между соседними резами должно быть равным приблизительно $(4 \div 5) h$, чтобы предыдущий рез не оказывал влияния на последующий. При проведении опыта следует задавать 4—6 значений толщины стружки, а каждый опыт должен повторяться 3—5 раз. Полученные в опытах диаграммы записи

усилия в функции времени планиметрируются, определяются значения усилия в каждом опыте P_{zd} и по формуле

$$P_{zi} = B_p P_{zd} \quad (53)$$

определяется среднее усилие резания, действующее на резец в данном опыте. Здесь B_p — коэффициент, выбираемый по таблице в зависимости от величины выдвижения рукоятки с резцом. Среднее усилие резания в i одинаковых опытах определяется как среднее арифметическое:

$$P_{zcp} = P_{zi}/i. \quad (54)$$

По вычисленным значениям усилий резания строится график прямолинейной зависимости $P_{zcp} = Ah$, откуда определяется показатель сопротивляемости резанию A .

Таблица 30

Значения сопротивляемости соляных пород и углей резанию

Порода	Бассейн	Средняя сопротивляемость резанию A , кгс/см ²
Сильвинит среднего пласта	I Солигорское рудоуправление	286
Каменная соль среднего пласта	То же	265
Каинит-лангбейнитовая (пласт 19)	Стебниковский рудник	480
Соленосная глина	То же	275
Угли марок:		
Г, Д	Донецкий	166
Ж, КЖ, К, ОС, Т	»	81
ПА, А	»	166
Уголь	Кизеловский	230
»	Карагандинский	158
»	Печорский	81

В табл. 30 приведены определенные нами значения показателя A для соляных пород Старобинского и Стебниковского месторождений [20]. Здесь же для сравнения представлены аналогичные данные для углей различных угольных бассейнов СССР [10].

В табл. 31 приведены значения показателя A для различных соляных пород по данным лабораторных опытов, а рис. 67 иллюстрирует вполне удовлетворительную корреляцию усилия резания соляной породы с показателем ее сопротивляемости резанию.

Значения показателей соляных пород резанию

Порода	Рудник	Пласт	Показатель сопротивляемости резанию A , кгс/см ²	Показатель сопротивления породы резцу-эталону P_{23} , кгс/см ²
Сильвинит	I Березниковское рудоуправление	Кр. II	309	197
Каменная соль (подстилающая)	То же	—	193	126
Сильвинит	I Солигорское рудоуправление	Средний	259	205
Каменная соль	То же	»	233	197
Сильвинит	Калушский	Хотинский уч-к	212	184
Каинит	»	Каинитовый уч-к	274	190
Каинитовая	Стебниковский	2	298	200
»	»	13	—	182
»	»	13-бис	237	204
Каинит-лангбейнитовая	»	7	250	208

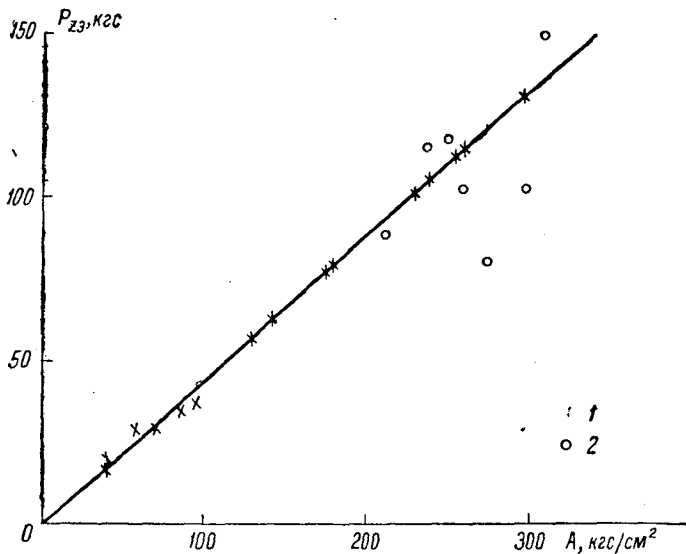


Рис. 67. Корреляция усилия резания с показателем сопротивляемости резанию.

1 — угли; 2 — соляные породы.

Показатели свойств соляных пород

Порода	Рудник (пласт)	Место отбора образцов
Сильвинит	II Березниковское рудоуправление (АБ)	3-я запад. панель
»	То же (Кр. II)	Там же, камера 25
Каменная соль между пластами АБ и Кр. II	I Березниковское рудоуправление	3-я вост. панель, камера 108
Каменная соль (подстилаящая)	II Березниковское рудоуправление	Сбойка между стволами 2 и 3
Сильвинит	I Березниковское рудоуправление (Кр. II)	3-я вост. панель, камера 108
»	То же (АБ)	Там же, камера 20
»	II Солигорское рудоуправление (средний)	1-й уч-к, панель 8—4—13, гориз. 264, камера 20
»	То же	То же
Каменная соль	»	»
Сильвинит	»	»
Лангбейнит	»	»
Каннито-лангбейнитовая	Домбровский карьер им. 50-летия Октября	

при механических видах разрушения

Объемный вес, г/см ³	Коэффициент крепости			Осредненный коэффициент крепости	Удельные сдвигающие усилия, кгс/мм ²
	по М. М. Протодьяконову	по Л. И. Барону	по методу раздвигания образцов неправильной формы		
2,27	1,47	2,70	1,76	2,24	1,07
2,02	2,44	3,66	1,47	2,57	1,00
2,00	2,36	3,57	1,41	2,50	0,81
2,16	1,96	3,19	1,08	2,13	1,00
2,15	2,30	3,53	1,66	2,60	1,02
2,05	1,51	2,74	0,96	1,85	0,70
2,15	3,07	3,31	1,21	2,26	1,00
2,21	2,74	3,91	1,50	2,74	1,29
2,15	1,22	2,42	0,62	1,51	0,66
2,14	1,38	2,60	1,44	2,02	0,90
2,26	3,81	4,81	2,54	3,07	—
2,22	2,32	3,54	1,47	2,52	—

Продолжение табл. 32

Порода	Показатель дробимости		Показатель динамической твердости	Показатель динамической контактной пластичности	Скорость распространения ультразвуковых волн, м/сек
	V_{max} , см ³	$tg \alpha$			
Сильвинит	23,3	0,77	7,6	262	3620
»	24,6	0,78	5,7	245	3180
Каменная соль между пластами АБ и Кр. II	24,9	0,78	7,2	234	2100
Каменная соль (подстилаящая)	23,0	0,80	11,4	245	1880
Сильвинит	22,1	0,80	8,0	223	3250
»	25,1	0,96	7,6	282	2200
»	26,9	0,85	6,4	265	3130
»	16,9	0,77	9,4	161	3620
Каменная соль	25,2	0,88	5,5	259	1760
Сильвинит	15,7	0,71	11,2	168	3160
Лангбейнит	13,7	0,56	12,5	131	4100
Каннито-лангбейнитовая	10,9	0,58	14,9	101	4200

Акустическая жесткость, кг/сек см ³	Динамический модуль упругости E , 10^5 кгс/см ²	Коэффициент трения		Примечание
		покоя	движения	
0,835	3,20	0,167	0,120	Образец содержит сильвинитовый слой А, нижняя кромка образца выбуривалась от соляного слоя АА на расстоянии 15 см Образец содержит 50 см пятого и 20 см шестого сильвинитовых слоев Образец выбуривался на расстоянии 20 см от нижнего слоя пласта «Красный II» Образец содержит третий сильвинитовый слой пласта Образец содержит часть сильвинитового слоя пласта
0,655	2,80	0,168	0,121	
0,430	0,90	0,168	0,120	
0,445	0,74	0,161	0,120	
0,714	2,32	0,160	0,123	
0,450	0,99	0,161	0,111	
0,687	2,16	0,167	0,121	
0,819	2,90	0,167	0,123	
0,391	0,69	0,160	0,120	
0,691	2,18	0,167	0,129	
0,945	3,88	0,460	0,324	
0,950	4,00	0,440	0,346	

Проведенный нами анализ позволил установить, что с точностью, вполне достаточной для инженерных расчетов, производительность комбайнов можно определять по формуле

$$Q = k/A, \quad (55)$$

где k — эмпирический коэффициент.

В 1959 г. в ЦНИИС Минтрансстроя Н. Е. Черкасовым был предложен метод определения показателя сопротивления породы резанию с помощью прибора ПЭР-3 [133]. Показатель сопротивления породы резанию $P_э$ вычисляется по формуле

$$P_э = \frac{P_э h_э}{h}, \quad \text{кгс/см}^2, \quad (56)$$

где $P_э$ — показатель сопротивления породы резцу-этalonу, определенный в процессе опыта, кгс/см²; h — толщина стружки, принятая в опыте, см; $h_э$ — сторона квадрата эталонной стружки, см (принимается по номограмме в зависимости от типа породы).

Исследованиями [9, 133] доказана возможность использования показателя $P_э$ для расчета усилий на резцах. Значения указанного показателя для различных типов соляных пород приведены в табл. 31 [12].

В 1970 г. в ИГД им. А. А. Скочинского Л. И. Бароном и В. М. Курбатовым для пластичных горных пород, не дающих хрупкого разрушения при вдавливании в них штампа, каковыми являются большинство соляных пород, был разработан метод определения сопротивляемости пород приповерхностному сдвигу [11]. Согласно разработанной методике показателем сопротивляемости пород приповерхностному сдвигу является средняя величина удельных сдвигающих и вдавливающих усилий, определяемая по формуле

$$P_{сд} = P/S_k, \quad \text{кгс/см}^2, \quad (57)$$

где S_k — площадь контактирующей поверхности эталонного стержня, мм².

На рис. 68 показано устройство, применяемое в опытах для определения сопротивляемости приповерхностному сдвигу. Результаты определений $P_{сд}$ для десяти образцов пород Верхнекамского и Старобинского месторождений калийных солей приведены в табл. 32.

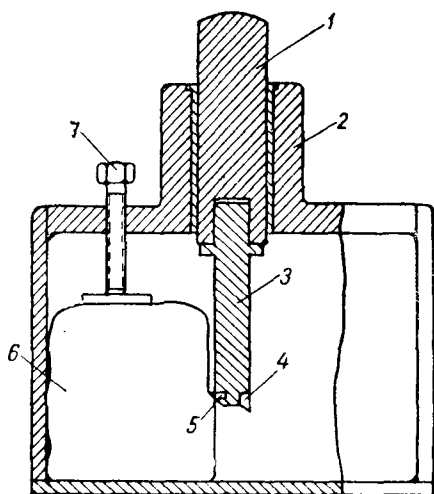


Рис. 68. Устройство для определения сопротивляемости пород приповерхностному сдвигу.

1 — поршень; 2 — обойма; 3 — державка; 4 — зачистной резец; 5 — рабочий стержень; 6 — образец породы; 7 — болт.

§ 2. Свойства соляных пород как объекта разрушения механическими способами

К показателям, при определении которых не используется технологическая проба «резание» и которые косвенно характеризуют сопротивляемость породы механическому разрушению, следует отнести: а) коэффициенты крепости, определенные на образцах правильной и неправильной формы; осредненные коэффициенты крепости; б) контактную прочность; в) дробимость; г) динамическую твердость и динамическую контактную пластичность; д) скорость распространения ультразвуковых волн и акустическую жесткость.

В табл. 32 приведены результаты определений указанных показателей в лаборатории механических способов разрушения горных пород ИГД им. А. А. Скочинского.

Методы испытаний горных пород для определения вышеперечисленных показателей и аппаратура, применяемая при этом, достаточно полно изложены в работах [5, 6, 8, 10, 11, 14].

Для оценки абразивных свойств пород в настоящее время широко используется методика и аппаратура, разработанные в ИГД им. А. А. Скочинского [13] Л. И. Бароном. Сущность предложенного метода определения абразивности горных пород заключается в установлении потери веса металлического стержня после истирания его в течение определенного времени об образец породы.

Л. И. Бароном и К. Д. Бондаревым разработан метод оценки абразивных свойств соляных пород, основанный на определении величины укорачивания эталонного резца (щупа) при стачивании им керн испытываемой породы на токарном станке [7].

Породный керн диаметром 32—34 мм и длиной 40—50 мм зажимается в патроне токарного станка. По оси керна на глубину до 30 мм высверливается отверстие диаметром 5—6 мм для обеспечения выхода резца в процессе испытания. В резцедержателе станка зажимается оправка с эталонным резцом. Последний вытачивается из стальной пластинки стандартного щупа (ГОСТ 882—64) толщиной 0,3 мм на наждачном станке.

Испытание породы на абразивность по предложенному способу заключается в стачивании торца породного керна путем снятия с него последовательно стружек толщиной 0,3 мм при подаче резца 0,05 мм/об, осуществляемой посредством поперечного самохода станка. Керн стачивается от его периферии к центру.

Перед началом испытания и периодически в процессе его микрометром замеряется длина резца с точностью до 0,002 мм. Резание ведется до износа резца по длине на 0,15—0,25 мм, при этом число стружек должно быть не менее 1 и не более 100. Величина показателя абразивности a_k определяется по формуле

$$a_k = \frac{1000\Delta}{n}, \text{ мкм}, \quad (58)$$

где Δ — линейный износ по длине резца, мм (разность длин резца до и после опыта); n — число стружек, снятых в процессе опыта.

Значения показателя абразивности соляных пород

Порода, месторождение, горизонт, пласт	Средняя величина показателя абразивности, мкм
Сильвинит красный, Верхнекамское, пласт Кр. II	0,71
Сильвинит розовый, Верхнекамское	0,14
Сильвинит пестрый, Верхнекамское	7,4
Сильвинит, Старобинское, пласт II горизонта	3,3
Галит, Старобинское, пласт II горизонта	6,5
Каинитовая порода без заметных включений аргиллита, Стебниковское, пласт 13-бис	30,5
Каинитовая порода с небольшим количеством включений аргиллита, Стебниковское, пласт 13-бис	63
Каинито-сильвинитовая порода без заметных включений аргиллита, Стебниковское, пласт Зигмунт	59
Та же порода, но с включениями аргиллита до 50—60%	282
Каинито-сильвинитовая порода с включениями аргиллита до 40%, Стебниковское, пласт 19	314
Соленосная глина с включениями значительных количеств калийных солей и аргиллита, Стебниковское, пласт 2	215
Соленосная глина без сколько-нибудь заметных включений каинитовых солей и аргиллита, Стебниковское, пласт 2	45,6

В табл. 33 приведены результаты определений по вышеописанной методике показателей абразивности соляных пород различных отечественных месторождений калийных солей [7].

Одним из важнейших показателей, используемых в практике инженерных расчетов силовых нагрузок, действующих на породоразрушающий инструмент исполнительных органов комбайнов, является коэффициент трения пар «монокристаллическая горная порода — твердый сплав». Л. И. Бароном и Л. Б. Глатманом в ИГД им. А. А. Скопинского были разработаны метод и аппаратура определения коэффициентов трения [9].

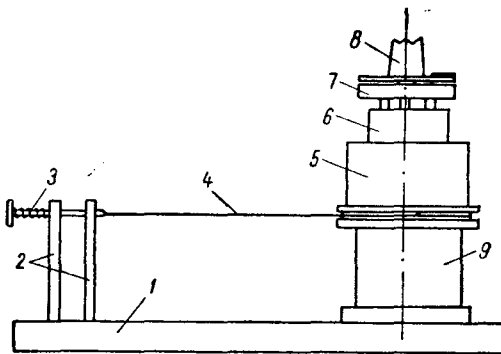


Рис. 69. Схема установки для определения коэффициентов трения горных пород.

1 — плита; 2 — направляющие стойки; 3 — пружина; 4 — трос; 5 — нижний патрон; 6 — образец породы; 7 — диск с твердосплавными стержнями; 8 — самоцентрирующее устройство; 9 — корпус.

На рис. 69 приведена схема предложенной ими установки. Определение коэффициента трения покоя осуществляется при

включенном электродвигателе станка путем плавного поворота шкива вручную. При этом фиксируется максимальное значение угла поворота стрелки на дуговой шкале, соответствующее началу проскальзывания одной поверхности относительно другой.

Коэффициент трения вычисляется по формуле

$$\mu = \frac{P}{N} = \frac{Aq \frac{R_1}{R_2 r}}{N}, \quad (59)$$

где P — сила трения, кгс; N — нормальная сила, кгс; A — величина отсчета по шкале, мм; q — жесткость пружины, кгс/мм; R_1 — радиус начальной окружности желоба шкива, мм; R_2 — радиус дуги шкалы, мм; r — радиус окружности расположения центров стержней твердого сплава, мм.

По результатам исследований можно сделать вывод о практической равнозначности для пород Верхнекамского и Старобинского месторождений коэффициентов трения, составляющих в среднем в покое 0,165, в движении 0,12. По сравнению с последними коэффициенты трения для Калушских рудников почти в 3 раза выше.

В заключение отметим, что изучение свойств соляных пород как объектов разрушения механическими способами является одной из важнейших задач горной технологии. Знание их позволяет грамотно и успешно решать задачи, связанные с конструированием горных комбайнов.

ГЛАВА XVI

СВОЙСТВА СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ ВДАВЛИВАНИИ

Изложенные в предыдущих главах методы определения прочностных и деформационных свойств горных пород под действием нагрузки основаны на непосредственном испытании пород в лабораторных или натуральных условиях. Вместе с тем имеются и косвенные методы определения свойств соляных пород, основанные на корреляционной зависимости между отдельными показателями (усилием вдавливания штампа, пуансона, глубиной внедрения различных инденторов, усилением резания и др.) и прочностными характеристиками соляных пород. Одним из них является метод вдавливания пуансона. Этот метод широко используется для оценки прочностных и упругих свойств горных пород, оценки их напряженного состояния как в лабораторных, так и в натуральных условиях [8, 23, 84, 85, 94, 98].

Известно [100, 113], что прочностные свойства соляных пород зависят от вида напряженного состояния и обладают по сравнению с другими горными породами относительной однородностью в пределах отдельных пачек калийных и соляных пластов. Оценка

напряженного состояния соляных пород в натуральных условиях методом вдавливания пуансона является относительной. Для установления количественных зависимостей необходимо для конкретно рассматриваемой породы получить зависимость усилия вдавливания от вида и величины напряженного состояния.

Исследование свойств соляных пород методом вдавливания пуансона. Основными показателями, по которым оцениваются свойства соляных пород при их исследовании методом вдавливания, являются: а) усилие вдавливания пуансона; б) скорость вдавливания пуансона; в) диаметр пуансона; г) глубина внедрения пуансона.

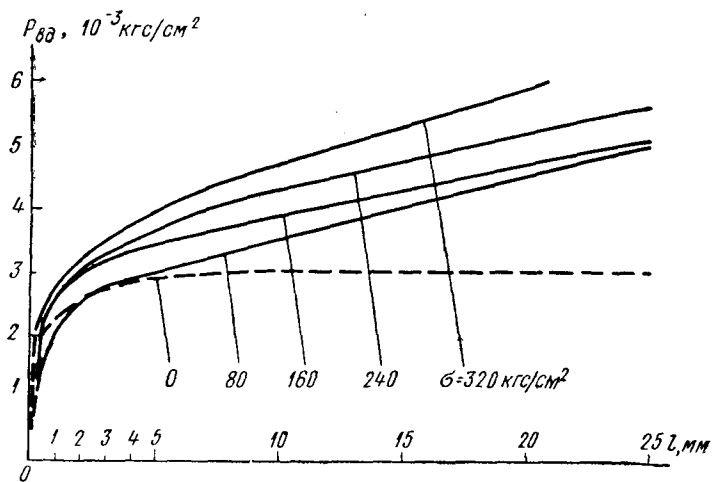


Рис. 70. Зависимость усилия вдавливания пуансона от величины напряжений в образце сильвинита.

Указанные показатели при испытаниях соляных пород будут зависеть, с одной стороны, от вида и величины напряженного состояния исследуемой породы, а с другой — от ее строения, структуры и текстуры. Например, наличие глинистых или других прослоек в образце исследуемой породы оказывает значительное влияние на общую закономерность изменения этих показателей. Как уже отмечалось, при прочих одинаковых условиях усилие вдавливания пуансона может быть использовано для оценки их относительного напряженного состояния.

Экспериментальные исследования свойств соляных пород методом вдавливания пуансона проводили в лабораторных и натуральных условиях. Исследования свойств каменной соли (слой I—II, Старобинское месторождение) в лабораторных условиях показали, что с увеличением глубины внедрения пуансона усилие вдавливания возрастает, точно так же, как и при увеличении нагрузки на образец (рис. 70).

Для оценки скорости внедрения пуансона испытывались образцы каменной соли и сильвинита без нагрузки и при напряжении $\sigma_{сж} = 240 \text{ кгс/см}^2$ при изменении скорости внедрения пуансона ($v_{пс}$) от 0,1 до 10 мм/мин. Было установлено, что как в образцах без нагрузки, так и в образцах с нагрузкой усилие вдавливания возрастало на 15—20%. Поэтому при оценке других показателей скорость внедрения пуансона была принята постоянной, равной 4—6 мм/мин.

Были выполнены лабораторные исследования с целью оценить напряженное состояние соляных пород на усилие вдавливания пуансона в специальной матрице, позволяющей создавать в образце равномерное объемное напряженное состояние. Результаты испытаний сильвинита при давлении от 0 до 320 кгс/см² показаны на рис. 70, аналогичные результаты были получены и для каменной соли. Графики зависимости усилий вдавливания от глубины внедрения пуансона и напряжений в образце имеют два характерных участка (см. рис. 70): первый — в области упругих деформаций, на начальном моменте испытания и на небольшой глубине внедрения; второй — в области пластических деформаций при глубине внедрения более 4—5 мм.

Углы наклона кривых усилия вдавливания в напряженных образцах закономерно возрастают с увеличением значения действующих напряжений, так как в процессе пластической деформации происходит упрочнение материала образца, возрастает модуль упругости и предел текучести соляных пород и, как следствие этого, возрастает удельное (отнесенное к единице площади штампа) усилие вдавливания пуансона.

Выполненные исследования позволили установить связь между усилием вдавливания пуансона и изменением напряжений рассматриваемых пород в виде

$$P_{\sigma} = P_0 + \sigma \operatorname{tg} \alpha, \quad (60)$$

где P_{σ} — усилие вдавливания в образце, находящегося под напряжением σ , кгс/см²; P_0 — то же, в ненапряженном образце, кгс/см²; $\operatorname{tg} \alpha$ — градиент приращения усилия вдавливания с увеличением напряжений.

Зная значения P_0 и $\operatorname{tg} \alpha$ и определив опытным путем P_{σ} , можно для конкретного вида соляных пород вычислить значения действующих в них напряжений.

Характер распределения усилий вдавливания в краевой части массива и целиках соляных пород исследовался в условиях I Солигорского рудника на III калийном горизонте (на глубине 580 м от поверхности). При испытаниях были приняты: диаметр призабойной части экспериментальных скважин 15 мм, диаметр пуансона 10 мм, глубина внедрения пуансона 30 мм, скорость вдавливания 4—6 мм/мин.

Характер распределения усилий вдавливания по длине столбчатого целика (размерами 3 × 4,5 м) и по слою I—II каменной соли

приведен на рис. 71. На этом же рисунке показан график распределения напряжений, подсчитанных по приведенной выше формуле. На основании экспериментальных исследований напряженных образцов в лабораторных условиях были получены численные значения параметров P_0 и $\operatorname{tg} \alpha$: для каменной соли I—II (III горизонт,

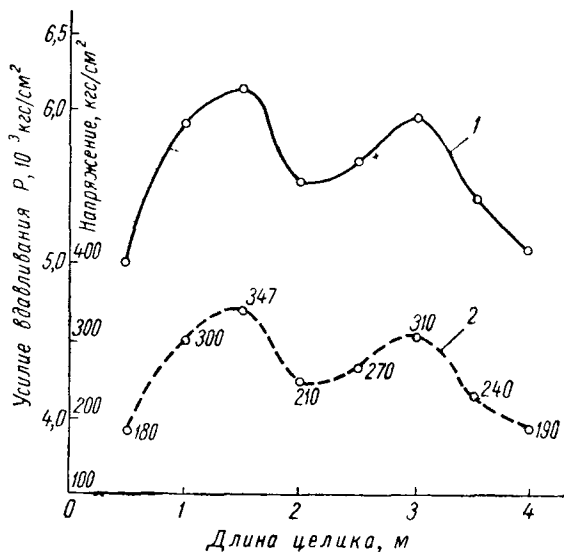


Рис. 71. Характер распределения усилий вдавливания пуансона (1) и напряжений (2) в столбчатом целике по слою каменной соли (слой I—II, III горизонт, $H = 580$ м).

Старобинское месторождение) — $P_0 = 4000 \text{ кгс/см}^2$; $\operatorname{tg} \alpha = 6,2$; для сильвинита — 3600 кгс/см^2 и $7,5$ соответственно.

Приведенные выше зависимости и параметры соляных пород при испытаниях их свойств методом вдавливания пуансона могут быть использованы для относительной оценки напряженного состояния соляных пород в зоне влияния горных выработок.

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД ПРИ РАСЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В практике разработки солей подземным способом в основном применяется камерная (реже камерно-столбовая) система разработки, что обусловлено необходимостью сохранять целостность водо-защитной толщи на срок службы рудника, а также наибольшей приспособленностью этой системы для комплексной механизации, обеспечивающей высокие технико-экономические показатели.

Существующие методы расчета геометрических параметров камерных систем разработки солей сводятся к расчету размеров целиков и устойчивых пролетов потолочин камер. Основные методы расчета целиков для соляных рудников подробно описаны М. Стаматиу [122]. Существенным дополнением к работе М. Стаматиу является работа [87]. Обе эти книги как бы подводят итог мировой практике расчета размеров целиков и устойчивых пролетов при камерных системах разработки и обобщают работы Турнера, К. Кегеля, Г. Гупийера, Л. Д. Шевякова, З. Церна, В. Д. Слесарева, П. М. Цимбаревича, Г. Н. Кузнецова и других исследователей.

Анализ существующих методов расчета размеров целиков и пролетов камер показывает, что они не учитывают возможность разрушения кровли и почвы камер в областях над и под целиками даже в тех случаях, когда вмещающие породы оказываются значительно менее прочными, чем сами целики. Между тем разрушение кровли и почвы более прочными целиками, как своеобразными штампами, в практике встречается часто и поэтому не может быть исключено при расчете геометрических параметров системы. Иногда лимитирующим элементом (элементом, разрушение которого приводит к разрушению отдельной выработки или рудника в целом) при выборе геометрических параметров систем разработки соляных месторождений может оказаться не целик, не почва и не кровля вместе с потолочиной, а водозащитная толща. Поэтому в дальнейшем при расчете параметров системы разработки будем исходить из расчетной схемы, анализируя систему целик — кровля — почва — водозащитная толща.

Существующие методики расчета размеров целиков и устойчивых пролетов камер непоследовательны в выборе расчетного метода. Расчет целиков ведется по разрушающим нагрузкам (реже по разрушающим деформациям), а потолочин камер (за исключением предложения Г. Н. Кузнецова [67]) — по допускаемым напряжениям. Недостатком этих методов является и то, что расчет параметров систем подземной разработки ведется, как правило, лишь по первому предельному состоянию и зачастую игнорируется необходимость расчета (за исключением методик К. Г. Хёфера [169] и И. А. Карманова [61]) по второму и третьему предельным состояниям. Это связано, по-видимому, с широко распространенным мнением, что целики с достаточной несущей способностью, безусловно, отвечают всем требованиям, необходимым для бесперебойной эксплуатации рудника, а также охраны подрабатываемых сооружений от вредного влияния выработок. Однако с этим согласиться нельзя.

Ниже описан метод расчета геометрических параметров систем разработки соляных месторождений по предельным состояниям. При этом предложена в весьма общем виде методика расчета геометрических параметров системы по разрушающим нагрузкам, а также проанализированы существующие методики расчета по разрушающим деформациям или скоростям деформаций. На примерах показано, как должны быть учтены геологическое строение окружающего выработку массива, состояние контактов плоскостей напластования, падение залежи, ее мощность, региональное напряженное состояние массива. Но основная направленность приведенных примеров — проиллюстрировать использование механических характеристик пород в массиве при расчете параметров систем разработки соляных месторождений.

Расчет геометрических параметров систем подземной разработки солей по предельному равновесию. Расчет по предельным состояниям (или предельному равновесию), как известно [38], сводится к расчету: 1) по разрушающим нагрузкам (по несущей способности); 2) по разрушающим деформациям (по развитию предельных деформаций); 3) по образованию или раскрытию трещин.

Параметры системы на месторождениях калийных солей рассчитываются, по существу, по схеме целик — кровля — почва — водозащитная толща. Цель расчета — придать системе целик — кровля — почва необходимую прочность и жесткость, а также не допустить появления трещин в водозащитной толще.

Рассчитывая прочность системы целик — кровля — почва, следует исходить из основного уравнения теории предельного равновесия:

$$P = k_3 Q, \quad (61)$$

где P — несущая способность элемента выработки; Q — фактическая нагрузка на элемент; k_3 — коэффициент запаса.

При этом данное уравнение — необходимое, но не достаточное условие обеспечения безопасной работы калийного рудника. Си-

стема целик — кровля — почва должна быть достаточно жесткой, так как предельные деформации отдельных элементов выработок могут привести к нарушению водозащитной толщи (появлению в ней трещин). Так как создание абсолютно жесткой системы практически невозможно, то на деформации этой системы должны быть наложены ограничения, являющиеся следствием сохранения водозащитной толщи на срок службы рудника, а также охраны искусственных сооружений на дневной поверхности от вредного влияния подземных работ.

При расчете жесткости системы целик — кровля — почва следует исходить из уравнения

$$v_* = k'_3 v, \quad (62)$$

где v_* — разрушающая скорость деформации элемента; v — фактическая скорость деформации элемента.

Расчет системы целик — кровля — почва по разрушающим скоростям деформаций тесно связан с расчетом водозащитной толщи по раскрытию трещин. А потому при назначении v_* следует исходить из решения задачи о появлении трещин в водозащитной толще. При этом необходимо учитывать допустимые деформации для искусственных сооружений на поверхности.

Определение нагрузок на элементы системы целик — кровля — почва. Важным в решении задачи об оптимальных параметрах системы разработки не зависящим от метода расчета является вопрос о нагрузке на целики. Эта нагрузка равна реакции со стороны целиков на кровлю и почву, а потому более правильно говорить о нагрузке не на целики, а на элементы подземной выработки. Однако это не принципиально, и в дальнейшем будем также пользоваться термином «нагрузка на целики».

Нагрузку на элементы подземной выработки при наличии целиков различных размеров и формы с достаточной для практических расчетов точностью, как правило, можно оценить, используя гипотезу Турнера — опорные целики несут нагрузку от веса всей покрывающей толщи пород. Против гипотезы Турнера имеются возражения, а потому выдвигаются другие гипотезы (например, гипотезы Г. Е. Гулевича, Ю. А. Модестова [87]).

Теоретические исследования вопроса о нагрузках на элементы подземных выработок, пройденных в неоднородных (слоистых) массивах, если предположить, что массив подчиняется закону Гука, можно провести аналитически — методом С. Г. Михлина — Д. С. Шермана [143], численно — методом конечных разностей или конечных элементов, экспериментально — методом разгрузки. При использовании метода разгрузки применительно к месторождениям калийных солей необходимо учесть замечания, высказанные нами ранее*. Учет этих замечаний встретит, по всей видимости, определенные

* Работа доложена на 3-м семинаре по измерению напряжений в массиве горных пород в Новосибирске в сентябре 1971 г.

трудности. То же самое можно сказать и об аналитическом методе Михлина — Шермана применительно к задаче об определении нагрузки на целики. Этот метод можно отнести в разряд теоретически возможных методов. Практически задачу следует решать численно.

В настоящее время при расчете междукамерных целиков на калийных месторождениях следует учитывать полный вес столба пород, т. е. нагрузка на целик должна определяться по формуле

$$Q = \gamma HS, \quad (63)$$

где γ — объемный вес пород; H — глубина разработки; S — грузовая площадь; HS — объем столба пород.

В ряде случаев формула (63) упрощается, так как величина S принимает более простой вид. Например, в случае ленточных целиков

$$S = (a + l) \cdot 1, \quad (64)$$

а потому

$$Q = \gamma H (a + l), \quad (65)$$

где a — ширина целика; l — ширина камеры. Если столбчатые целики разбиты по прямоугольной сетке $L \times L_1$, то независимо от формы целика в плане нагрузка на целик определится по формуле

$$Q = \gamma HLL_1. \quad (66)$$

Основное достоинство формулы (63) — простота и независимость от реологии покрывающей толщи — полностью перекрывает ее недостатки. Отметим также, что с накоплением данных, полученных при решении задачи о нагрузках на элементы выработок методом конечных элементов, формулу (63) можно будет уточнить.

При определении нагрузки на элементы системы целик — кровля — почва по формуле (63) достаточно знания одного лишь объемного веса налегающей толщи массива, который, вообще говоря, может быть определен по формуле

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i \frac{H_i}{H}, \quad (67)$$

где γ_i — объемный вес i -го слоя; H_i — его мощность; H — глубина разработки.

При теоретическом определении нагрузки на элементы системы (например, методом конечных элементов) знания γ_i уже недостаточно. Необходимо знать и некоторые другие показатели механических характеристик слоев (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент вязкости и т. п.), а также условия на контактах слоев (сцепление, возможность проскальзывания и т. п.). Иначе говоря, для уточнения соотношения (63) требуются значительно более обширные сведения как о строении самого массива, так и механических характеристиках слагающих его слоев.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ СОЛЕЙ ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

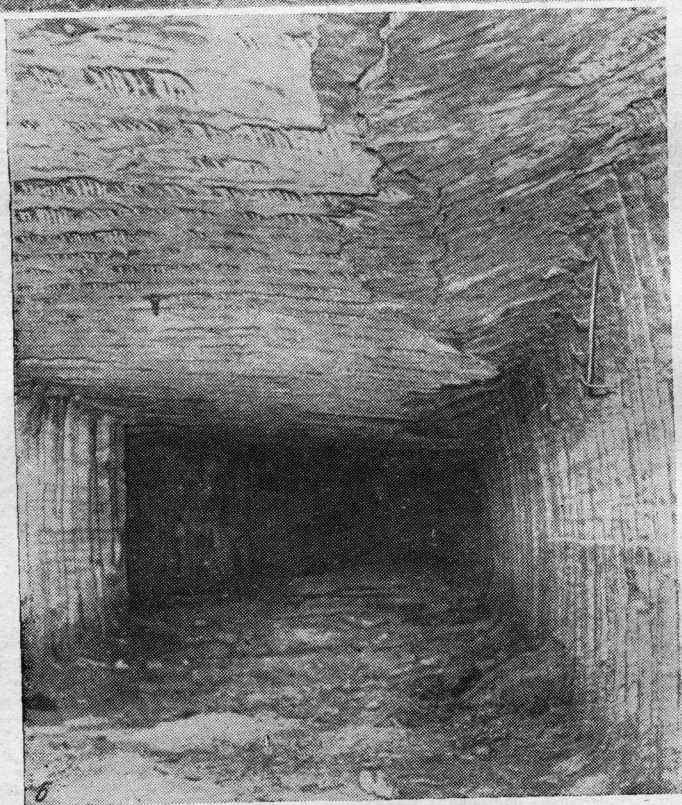
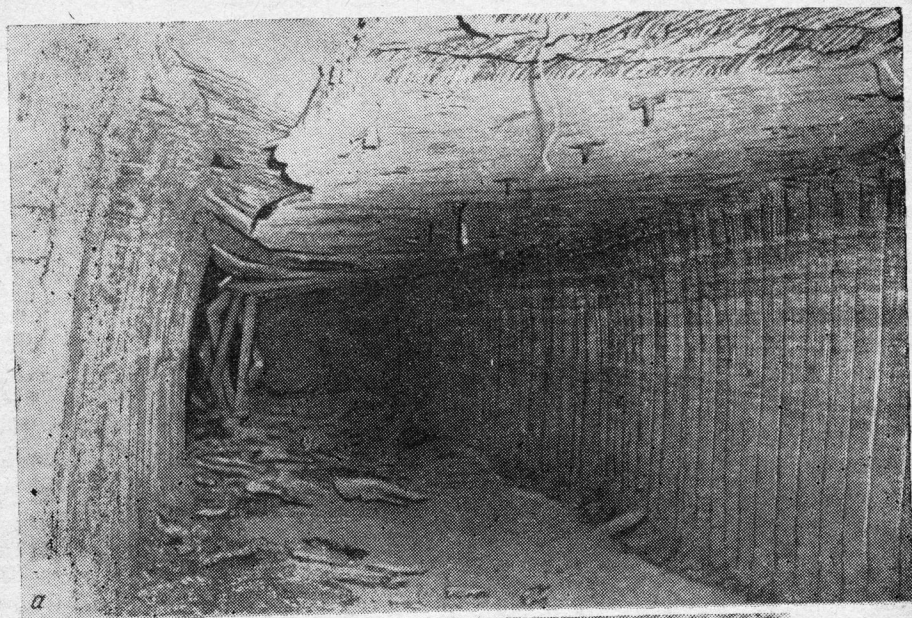
§ 1. Общие положения

Характерной особенностью месторождений калийных солей является неоднородность строения их массивов. Задача расчета оптимальных геометрических параметров подземной выработки (или системы выработок), пройденной в неоднородном, в частности слоистом, горном массиве, является весьма трудной и, как отмечается в работе [134], не может быть решена без схематизации явления разрушения и принятия упрощающих допущений, что требует знания процесса разрушения выработки.

Анализируя разрушение выработок в природных условиях, нельзя не заметить, что в подавляющем большинстве случаев в выработке имеется какой-нибудь наиболее уязвимый элемент, деформации или разрушение которого предопределяют разрушение всей выработки. Как отмечается в работе [64], это может быть, например, слабая кровля, для устойчивости которой требуется мощная (иногда даже опережающая) крепь. В других случаях это может быть слабая, пластичная, склонная к размоканию и набуханию почва, которая (особенно при увлажнении) вспучивается, загромождая сечение выработки и вызывая необходимость систематической подделки и уборки породы. Наконец, это может быть слабый слой в боках, выдавливающийся в выработку и оказывающий сильнейшее местное давление на ее крепь.

На рис. 72 и 73 приведены примеры разрушения выработок на одном из шахтных полей. На рис. 72 показано разрушение двух выработок прямоугольного сечения, пройденных в неоднородной слоистой среде. Особенность разрушения этих выработок — отсутствие симметрии в разрушении кровли. Причина такого разрушения кровли выработки ясна. Слабый слой 1 под действием реактивного давления со стороны жесткого элемента 2 выдавливается и разрушает потолочину 3, тогда как податливый элемент 4 не способен перевести слой 1 в неустойчивое состояние. В рассмотренном примере инициирующим элементом, разрушение которого приводит к разрушению всей выработки, является слабый слой 1.

На рис. 73 показаны этапы разрушения круглой выработки, пройденной в такой же среде. Как и в первом примере, инициирующим элементом также является слабый слой в кровле. На рис. 74 показано разрушение еще двух выработок, причиной которого оказался слабый слой в кровле. Характерно, что как на рис. 74 так и на рис. 73 виден процесс выдавливания слабого слоя



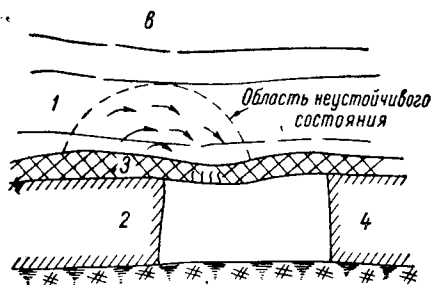


Рис. 72. Характер разрушения кровли выработки прямоугольного сечения, пройденной в неоднородной среде. Фото Э. Ф. Житкова и К. А. Степанова.

Отсутствие симметрии вызвано наличием жесткого элемента слева (а), (е) и справа (б).

и разрушение потолочины с образованием трех пластических шарниров.

Приведенные примеры подтверждают, что в подавляющем большинстве случаев процессу разрушения самой выработки предшествует разрушение наиболее слабого элемента массива. Поэтому можно сделать вывод, что разрушение выработки или системы выработок начинается с разрушения элемента с минимальной несущей способностью (инициирующего элемента).

Выделение слабого (инициирующего) элемента, разрушение которого ведет к разрушению всей выработки, существенно упрощает задачу о выборе геометрических параметров выработок, сводя ее, по существу, к решению задачи об определении несущей способности инициирующего элемента и об определении нагрузки на него [97]. Естественно, что инициирующий элемент, приводящий к неустойчивому состоянию системы в целом, будет иметь минимальную несущую способность, а потому, приравнивая фактическую нагрузку на элемент несущей способности наиболее слабого элемента, получим соотношение (61), которое в рассматриваемом случае следует записать в виде

$$P_{i \min} = k_3 Q, \quad (68)$$

где $P_{i \min}$ — минимальная несущая способность i -го элемента.

Исходя из соотношения (68) для определения по предельным нагрузкам геометрических параметров выработки, пройденной в неоднородной среде, достаточно расчленить окружающую выработку массив на систему элементов; определить несущую способность каждого элемента; выявить лимитирующий элемент выработки (элемент с минимальной несущей способностью); определить фактическое давление Q на элемент выработки.

При заданных геометрических параметрах выработок с учетом соотношения (68) легко решить и обратную задачу — об устойчивости того или иного элемента выработки и, следовательно, выработки в целом. Для этого удобно представить соотношение (68) в виде

$$k_y = \frac{P_{i \min}}{k_3 Q} \geq 1, \quad (69)$$

где k_y — коэффициент устойчивости выработки.

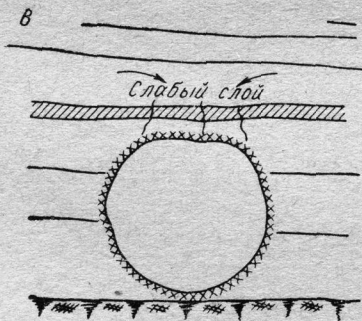
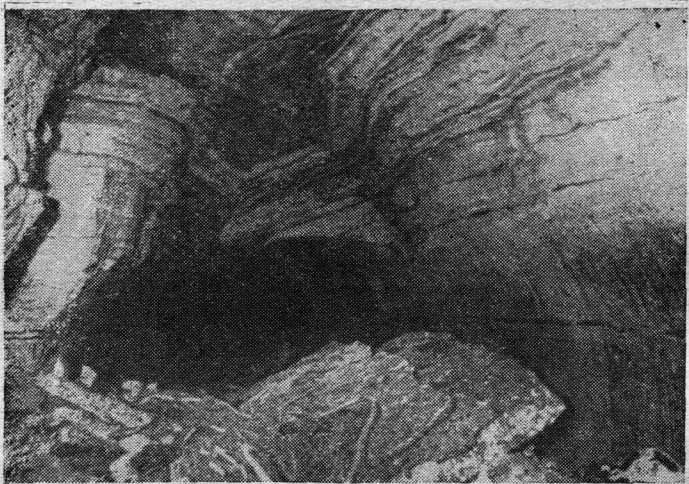
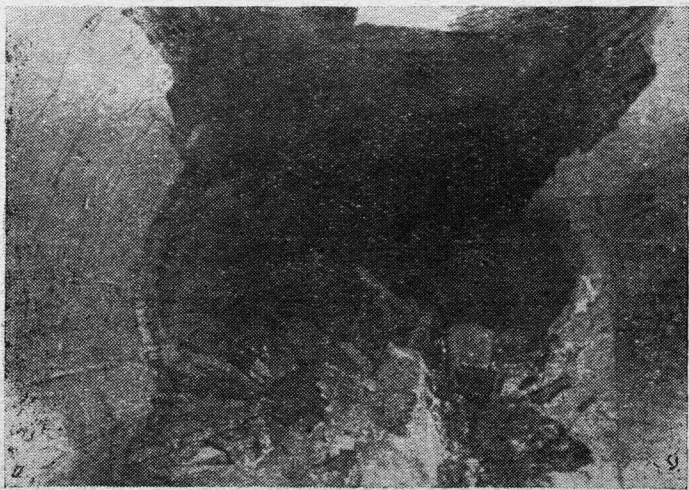
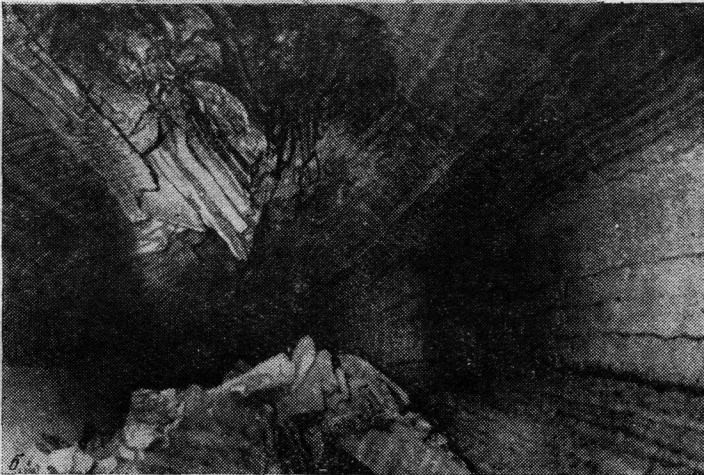


Рис. 73. Характер разрушения выработки круглого сечения. Фото Э. Ф. Житкова и К. А. Степанова.

превращается в
клетчатую структуру



7) V



8) V

Рис. 74. Типичный пример разрушения кровли выработки круглого сечения, пройденной в неоднородной среде. Фото Э. Ф. Житкова и К. А. Степанова.

Налицо разрушение потолочины, представленной той же средой, что и бока выработки (более прочной, чем вышележащие слои кровли), в результате выдавливания пород из областей над боками выработки.

Отметим, что определение входящих в соотношения (68) и (69) величин — задача весьма сложная. Тем не менее ее реализация возможна либо численно, либо экспериментально. Например, нагрузку Q можно, как это уже отмечалось, определить численно (с применением ЭВМ) методом конечных разностей, конечных элементов либо экспериментально — методом разгрузки. В отдельных случаях фактическую нагрузку на элемент выработки можно оценить сравнительно просто с достаточной степенью точности по формуле (63).

Аналогичным образом может быть решен вопрос с определением $P_{i, \min}$. В случае однородности в пределах элемента и неоднородности по элементам предельную нагрузку можно определить в замкнутой форме или методом характеристик [17, 124]. При неоднородности в пределах элемента определить несущую способность значительно сложнее. Однако в отдельных случаях ее удастся решить либо методом малого параметра, либо методом характеристик [135, 137]. Не исключена возможность и экспериментальной оценки несущей способности элементов выработки. Зная несущую способность каждого элемента выработки, выделить элемент с минимальной несущей способностью уже не вызывает каких-либо затруднений.

Несмотря на то, что вычисление $P_{i, \min}$ и Q связано с определенными трудностями, основная же трудность решения задачи заключается в правильном расчленении окружающего выработку массива на систему элементов. Эту задачу не всегда удастся решить положительно без моделирования. Поэтому, хотя в отдельных случаях задача выбора системы элементов решается сравнительно просто (например, для выработок, пройденных по слою), в общем случае расчленению окружающего выработку массива на систему элементов должно предшествовать моделирование на эквивалентных материалах по методу Г. Н. Кузнецова [56].

В настоящей работе будут рассматриваться выработки, пройденные по слою. В этом случае необходимость в моделировании отпадает, так как основная трудность, связанная с выделением системы элементов, решается просто. Естественной представляется разбивка окружающего выработку массива на такие элементы, как почва, кровля, бока или целики. А потому остается решить лишь вопрос об элементе с минимальной несущей способностью и о фактической нагрузке на него.

При разработке калийных солей выработки перерезают сразу несколько слоев. Тем не менее при расчете геометрических параметров системы и в этом случае принято выделять целик как некоторый элемент выработки. В дальнейшем будем придерживаться этой точки зрения (хотя она и нуждается в некотором обосновании). При расчете геометрических параметров системы разработки солей будем выделять и анализировать систему целик—кровля—почва.

Так как при этом разрушение выработки возможно из-за разрушения целиков в результате раздавливания их кровлей и почвой или почвы и кровли в результате внедрения в них целиков, или

расслоившейся кровли от изгиба, то в качестве $P_{i \min}$ могут быть приняты несущая способность целика, кровли или почвы либо разрушающий момент в потолочине. При этом совершенно очевидно, что отделять расчет целиков на прочность от общей проблемы расчета системы целик — кровля — почва возможно лишь в исключительных случаях.

Для плоской задачи (в случае ленточных целиков), как было показано в работе [136], соотношение (68) можно переписать в виде

$$\int_0^a [P_{i \min}(x) - k_3 q(x)] dx = 0; \quad (70)$$

$$M_* = k_3^* M_{\max}, \quad (71)$$

где $P_{i \min}$ — предельное давление на элемент выработки; $q(x)$ — фактическое давление на элемент выработки; a — ширина целика; M_* — разрушающий момент для потолочины; M_{\max} — максимальный момент в пролете.

При этом удобно перейти к средним величинам предельного и фактического давления, определяемых как

$$P_i^{\text{cp}} = \frac{1}{a} \int_0^a P_i(x) dx; \quad q^{\text{cp}} = \frac{1}{a} \int_0^a q(x) dx. \quad (72)$$

Тогда соотношение (70) упрощается:

$$P_{i \min} = k_3 q \quad (73)$$

(верхние индексы у величин P_i^{cp} и q^{cp} в дальнейшем везде опускаем).

Если при определении фактической нагрузки на элемент системы исходить из соотношения (65), то для выработки с однородностью в пределах элементов из уравнения (73) получаем простое выражение, связывающее оптимальные геометрические параметры выработки (ширину камеры l_* и ширину целика a_*):

$$l_* = a_* \left(\frac{P_{i \min}}{k_3 \gamma H} - 1 \right). \quad (74)$$

Соотношение (74) является обобщением известной формулы Л. Д. Шевякова [140], не учитывающей возможности разрушения кровли или почвы в результате вдавливания в них целиков как своеобразных штампов. Однако вдавливание целиков в кровлю или почву выработки и, как следствие этого, разрушение и деформирование наблюдаются на практике часто (рис. 72—74).

Расчет геометрических параметров выработок по несущей способности наиболее слабого элемента окружающего массива выработки можно использовать не только для расчета камерных систем разработки, но и для расчета одиночных выработок, а также всякий раз, когда выделение из массива таких элементов как почва, кровля

и бока, не вызывает особых нареканий. Заметим, что в случае камерной системы с ленточными целикками величины усилий в соотношении (61) собирались с площади, ограниченной шириной целика. В случае одиночной выработки такая очевидная величина отсутствует. Тем не менее известно, что концентрация напряжений вокруг одиночной выработки затухает на некотором расстоянии l_0 от выработки, равном нескольким «диаметрам» выработки. Суммируя усилия в соотношении (61) по длине l_0 , соотношения (70), (71) запишем в виде

$$\int_0^{l_0} [p_{i \min}(x) - k_3 q(x)] dx = 0; \quad (75)$$

$$M_* = k'_3 M_{\max} \quad (76)$$

или, переходя к средним величинам,

$$p_{i \min} = k_3 q. \quad (77)$$

Величину фактического давления на элемент выработки можно получить, интегрируя по длине l_0 эпюру нормального давления, используемую в широко известной методике В. Г. Гмошинского, однако ее можно оценить и по формуле

$$q = \gamma H \left(1 + \frac{l}{2l_0} \right). \quad (78)$$

Тогда для одиночной выработки получаем простое выражение, связывающее оптимальные геометрические параметры выработки:

$$l_* = 2l_0 \left(\frac{p_{i \min}}{k_3 \gamma H} - 1 \right). \quad (79)$$

В том случае, когда $p_{i \min}$ равно несущей способности боков выработки, предложенная методика является в некотором роде обобщением известной методики В. Г. Гмошинского.

Отметим, что если величину l_0 оценить по формуле

$$l_0 = nl \quad (\text{при } n = 2,5 \div 4), \quad (80)$$

то получим критерий устойчивости одиночной выработки, пройденной по слою:

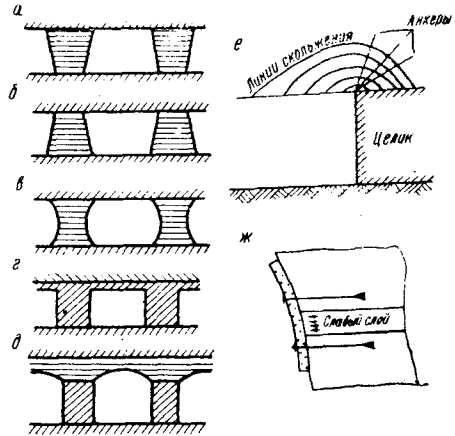
$$k_y = 2n \left(\frac{p_{i \min}}{k_3 \gamma H} - 1 \right) = 1 \quad (81)$$

Из соотношений (74), (79) вытекает, что расчет геометрических параметров одиночной выработки или системы выработок сводится по сути дела к определению несущей способности почвы, кровли и целиков или боков выработки. С изменением размеров элементов в системе целик—кровля—почва их несущая способность изменяется, а следовательно, меняется их устойчивость и устойчивость

выработки в целом. С изменением размеров целика несущая способность неоднородной кровли P_2 может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от соотношения прочных и слабых слоев или прослоек, попадающих в область предельного состояния. Что же касается несущей способности целика P_1 и фактического давления на элементы выработки q , то с увеличением ширины целика P_1 увеличивается, а q уменьшается. Уменьшение q связано с увеличением контакта целик — кровля, а потому с увеличением ширины целика (с увеличением опорной площадки) устойчивость кровли на сдвиг (срез) в областях над целиками увеличивается.

Рис. 75. Конструктивные мероприятия, направленные на повышение несущей способности элементов выработки.

а, б — увеличение опорной площади при слабой кровле или почве; а — криволинейная форма целика при слабой почве и кровле; г — повышение несущей способности кровли слоем полезного ископаемого с более высокими механическими свойствами, чем у кровли; д — повышение несущей способности потолочины путем придания ей формы балки с вутами; е — всеоробразное штангование кровли выработки для предотвращения скальвания кровли более прочным целиком-штанпом; ж — локальное крепление стенки выработки, препятствующее выдавливанию слабого слоя или прослойка в выработку.



Исходя из этого можно не только объяснить, но и обосновать ряд конструктивных мероприятий, направленных на увеличение несущей способности элементов и, следовательно, устойчивости выработки. Некоторые из этих мероприятий показаны на рис. 75. С уменьшением ширины целика несущая способность его может уменьшаться быстрее, чем несущая способность кровли (несущая способность кровли при этом может даже увеличиваться). В этом случае целики начнут деформироваться и разрушаться раньше, чем кровля. Иначе говоря, в ряде случаев повысить устойчивость кровли можно не только за счет увеличения опорной площадки целика (с целью уменьшения его реактивного давления на кровлю), но и путем уменьшения ширины целика, чтобы уменьшить его несущую способность по сравнению с таковой кровли. Последнее не всегда возможно, но в отдельных случаях может явиться эффективной мерой уменьшения потерь.

Метод расчета геометрических параметров подземных выработок по предельным нагрузкам, основанный на феноменологическом принципе, согласно которому разрушение выработки начинается с разрушения элемента с минимальной несущей способностью, может быть использован для расчета крепей подземных выработок. Однако

исходя из локальной неустойчивости элементов массива выработок предложенный метод позволяет решать вопрос лишь о локальном креплении выработок. Основной функцией крепи в этом случае является увеличение несущей способности наиболее слабого элемента окружающего выработку массива. Так как при расчете параметров выработки исходят из несущей способности именно наиболее слабого элемента, то следует учитывать сильное отличие несущей способности слабого элемента от таковой остальных элементов. Наиболее благоприятный случай — несущая способность всех элементов примерно равна. Именно к этому следует стремиться, выбирая тот или иной вид крепи.

Увеличить несущую способность отдельных элементов массива можно, в частности, за счет повышения расчетного коэффициента сцепления и угла внутреннего трения посредством, например, цементации, силикатизации, смолизации и пр. Несущая способность отдельных элементов выработки может быть увеличена также установкой штанг для этих элементов. При этом штанги, работающие в данном случае на срез, должны располагаться перпендикулярно к поверхностям предполагаемого сдвига (в частности, плоскостям ослабления). Поверхности предполагаемого сдвига следует определять при натурных обследованиях в шахтных условиях либо теоретически, решая задачу методом теории предельного равновесия.

В случае слабой кровли для предотвращения выдавливания породы из областей над целиками можно рекомендовать усиление кровли штанговым креплением с веерообразным расположением штанг (рис. 75, *е*). Штанговая крепь, устанавливаемая в кровле выработки, может выполнять две функции:

- 1) увеличивать несущую способность кровли за счет недопущения скалывания в месте контакта с целиком (или стенкой выработки);
- 2) увеличивать высоту потолочины.

Последнее имеет смысл проводить лишь при условии, когда ширина камеры l_{**} , получаемая из условия (71), меньше ширины камеры l_* , получаемой из условия (74),

$$l_{**} < l_* \quad (82)$$

Поэтому размер штанг для потолочины следует определять из условия

$$l_{**} = l_* \quad (83)$$

Увеличить несущую способность отдельных элементов массива можно и за счет локального крепления. На рис. 75, *ж* показан такой пример: одиночная выработка пройдена в крепком скальном массиве (пласты песчаников, алевролитов и сланцев), прорезанном серией слабых прослоек (уголь). Для предотвращения выжимания угольных прослоек достаточно установить локальную крепь.

Остановимся, наконец, на учете фактора времени при расчете геометрических параметров выработок по разрушающим нагрузкам. Известно, что со временем прочностные характеристики окружающего

выработку массива ухудшаются вследствие того, что коэффициент сцепления и угол внутреннего трения уменьшаются [$k = k(t)$; $\rho = \rho(t)$]. По имеющимся в литературе сведениям, угол внутреннего трения у некоторых горных пород уменьшается со временем незначительно. Поэтому для учета времени при расчете геометрических параметров выработок по разрушающим нагрузкам, пройденных в таких породах, достаточно ввести в расчет огибающую кругов Мора, смещенную по отношению к первоначальной на некоторую величину $k(t)$, определяемую экспериментально.

Для соляных пород графики зависимости коэффициента сцепления и угла внутреннего трения от времени отсутствуют. Это объясняется громоздкостью и длительностью эксперимента (необходимо выдерживать образцы пород под нагрузкой продолжительное время и лишь после этого испытывать их в стабилometре).

§ 2. Особенности расчета геометрических параметров камер выщелачивания

Расчет геометрических параметров выработок при разработке соляных залежей выщелачиванием через скважины с поверхности [44, 105] в общих чертах совпадает с принципами расчета параметров систем подземной разработки по несущей способности слабого элемента выработки. В то же время расчет выработок выщелачивания имеет ряд особенностей: 1) наличие в выработке рассола; 2) невозможность получения физико-механических характеристик массива в натуральных условиях; 3) невозможность проверки экспериментально в натуральных условиях фактического давления на элементы выработки и т. п.

Наличие рассола в выработке существенным образом повышает несущую способность элементов выработки. Так, в условиях сплошной системы выщелачивания (плоская задача) несущая способность* междукамерного (ленточного) целика будет

$$p = \sigma_{сж} + \gamma_p H \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho}, \quad (84)$$

где γ_p — объемный вес рассола; H — глубина заложения выработки; $\sigma_{сж}$ — предел прочности на одноосное сжатие.

Соотношение (84) показывает, что несущая способность целика при наличии рассола в выработке выше, чем несущая способность его в обычных условиях ($\gamma_p = 0$). Аналогичным образом обстоит дело и с несущей способностью кровли и почвы. Их несущая способность при наличии в выработке жидкости повышается. Учет пригрузки, равной $\gamma_p H$, не вносит затруднений при определении несущей способности элементов выработки и может быть учтен. В данном случае рассол играет положительную роль и позволяет при прочих

* Здесь и далее термин «несущая способность» употребляется наравне с терминами «среднее предельное давление» (p) и «разрушающая нагрузка» (P).

равных условиях получить большие геометрические параметры по сравнению с таковыми для выработок без жидкости. Повышение несущей способности элементов выработок при заполнении ее жидкостью справедливо лишь в том случае, когда влияние жидкости на механические свойства среды несущественно. Однако этот вопрос до конца не изучен.

По имеющимся в литературе сведениям влияние жидкости на параметры, характеризующие паспорт прочности, является существенным: коэффициент сцепления и угол внутреннего трения с увеличением влажности среды понижаются [18]. (Некоторые сведения по этому вопросу можно найти и в настоящей работе). Поэтому в ряде случаев несущая способность элементов выработки, заполненной жидкостью, не только не повысится, но и может существенно образом понизиться.

В заключение отметим следующее:

а) методика расчета геометрических параметров подземных выработок по предельным состояниям слабого элемента может быть применена и в том случае, когда выработки образуются выщелачиванием через скважины с поверхности;

б) однако отмеченные особенности данного способа образования выработок, такие, как наличие в выработке жидкости (рассола); невозможность получения в натуральных условиях физико-механических характеристик массива; трудности установления фактического давления на элементы выработки, позволяют в настоящий момент с помощью предложенной методики получить геометрические параметры выработок лишь весьма приближенно;

в) более достоверные результаты с помощью предложенной методики могут быть получены лишь после выяснения вопроса о влиянии влажности на физико-механические характеристики пород, а также установления корреляционной связи между физико-механическими характеристиками в образце и в массиве применительно к исследуемому месторождению.

§ 3. Расчет потолочин камер по предельному равновесию

При наличии слоистой кровли со слабыми межслоевыми контактами возможность выкалывания кровли в районе целика дополняется возможностью разрушения потолочины от изгиба с образованием пластических шарниров. При этом возможна следующая схема разрушения потолочины: после достижения предельного состояния слабых межслоевых контактов и их разрушения происходит ее расслоение. В дальнейшем равновозможно разрушение потолочины как в результате скола более прочным целиком — штампом (слоем), так и в результате изгиба расслоившейся пачки под действием собственного веса. Поэтому размеры выработки могут лимитироваться устойчивым пролетом потолочины.

Среди существующих методов определения устойчивых размеров потолочин можно назвать методы В. Д. Слесарева, П. М. Цимбаревича, Г. Н. Кузнецова, А. А. Борисова, Гомеса и К. В. Руппенейта, К. В. Руппенейта и Ю. М. Либермана и др. [87]. В основу всех известных методик, за исключением методики Г. Н. Кузнецова [67], положен расчет по допускаемым растягивающим напряжениям.

С точки зрения расчета геометрических параметров системы по разрушающим нагрузкам приемлемым следует признать лишь метод Г. Н. Кузнецова. Только в этом случае устраняется непоследовательность существующих методик в выборе метода: расчет системы целик—кровля—почва и потолочины ведется только по разрушающим нагрузкам.

Для определения полной несущей способности нижнего слоя кровли камеры после ее расслоения Г. Н. Кузнецовым [67] предложена следующая полумпирическая формула, учитывающая свойства горных пород:

$$q_* = \sigma_{сж} \frac{h_1^2}{l^2} \cdot \frac{\alpha(1 - \xi l/h_1)}{k}, \quad (85)$$

где h_1, l — соответственно высота и длина потолочины; q_* — интенсивность нагрузки, равномерно распределенной по пролету кровли и вызывающей в ней обрушение; α, k, ξ — эмпирические безразмерные коэффициенты, отражающие свойства породы и характер ее работы.

Из испытаний призматических образцов пород на изгиб с защемленными концами Г. Н. Кузнецов установил, что для известняков и песчаников $\alpha = 1$; $k = 1,1 \div 1,2$; $\xi = 0,02$, а для каменной соли $\alpha = 3$; $k = 0,95$; $\xi = 0,04$. Применимость формулы (85) ограничена из-за отсутствия значений коэффициентов α, k, ξ для других пород. Однако для калийных месторождений формулу (85) следует рекомендовать при расчете потолочин из каменной соли. Можно показать, что разрушающий момент для потолочины, как для балки высотой h_1 и шириной b , разрушающейся с образованием трех пластических шарниров, будет

$$M_* = 0,5(\sigma_{сж} h_1 + P_0/b) \frac{P_0 + \sigma_p b h_1}{\sigma_{сж} + \sigma_p} - P_0 \frac{h_1}{2}, \quad (86)$$

где $\sigma_{сж}, \sigma_p$ — предел прочности при одноосном сжатии и растяжении соответственно; P_0 — боковой распор (имеет размерность силы). При отсутствии бокового распора формула (86) упрощается и имеет вид [97, 136]:

$$M_* = 0,5 \sigma_{сж} \frac{b h_1^2}{\sigma_{сж}/\sigma_p + 1}. \quad (87)$$

Подставляя это выражение в соотношение (71) и определяя максимальный момент как полусумму максимального момента в пролете и в защемлении, получаем соотношение, из которого определим величину оптимального пролета выработки l_{**} .

Таким образом, при наличии слоистой кровли со слабыми межслоевыми контактами к оптимальным параметрам (l_* — ширине выработки; a_* — ширине целика), определяемым из соотношения (74), добавляется еще величина l_{**} — ширина камеры, определяемая из условия (71). За фактическую следует принять минимальную из двух l_* и l_{**} .

Интересно отметить, что для балки сечением $b \times h_1$ и длиной l , защемленной с двух сторон и разрушаемой сосредоточенной нагрузкой в середине пролета, разрушающая нагрузка, определяемая через соотношения (71) и (87), будет равна

$$P_* = \frac{4\sigma_{сж}}{l} \cdot \frac{bh_1^2}{\sigma_{сж}/\sigma_p + 1}. \quad (88)$$

Это соотношение хорошо согласуется с экспериментами Г. Н. Кузнецова [67]. Для балки сечением $1 \times h_1$ и длиной l , защемленной с двух сторон и разрушаемой равномерно распределенной нагрузкой q , разрушающая нагрузка q_* , определенная через соотношения (71) и (87), будет

$$q_* = \sigma_{сж} \frac{h_1^2}{l^2} \cdot \frac{8}{\sigma_{сж}/\sigma_p + 1}. \quad (89)$$

Сравнение соотношений (85) и (89) показывает, что они дают примерно один и тот же результат [97]. Зависимость эмпирического сомножителя $\frac{\alpha}{k} (1 - \xi l/h_1)$ в соотношении (85) от размеров потолочины указывает на возможную зависимость коэффициента $\sigma_{сж}/\sigma_p$ в сомножителе $8/(\sigma_{сж}/\sigma_p + 1)$ в соотношении (89) от размеров балки, что, вообще говоря, легко объяснить: с увеличением размеров образца σ_p уменьшается быстрее, чем $\sigma_{сж}$, а поэтому коэффициент $\sigma_{сж}/\sigma_p$ увеличивается.

Для того чтобы воспользоваться формулами (71), (87), необходимо знать максимальный момент в пролете, а следовательно, внешнюю нагрузку на потолочину. Нагрузку на потолочину следует определять, анализируя состояние породы, заключенной в объеме некоторого свода расслоения (возможного свода обрушения), если заведомо известно, что в областях над целиками или боками выработки массив находится в устойчивом состоянии. В противном случае весом породы, а также весом самой потолочины можно пренебречь по сравнению с давлением породной массы, выдавливаемой из областей над целиками. Величину давления в этом случае можно оценить, решив задачу об устойчивости полуплоскости.

Анализируя состояние породы, заключенной в объеме свода расслоения, необходимо выяснить, как ведет себя каждый слой расслоившейся пачки. При этом возможны следующие случаи: а) каждый слой работает отдельно, независимо от других; б) каждый слой лежит (и, следовательно, давит) на нижележащем; в) комбинация этих случаев. В первом случае приходится анализировать устой-

чивость каждого слоя (каждый слой имеет свою мощность, свой пролет и нагружен только своим собственным весом). Во втором случае нагрузка на потолочину определяется весом всей породы, заключенной в объеме параболического свода обрушения, и распределяется пропорционально его ординатам.

Приведенные рассуждения согласуются с исследованиями Г. Н. Кузнецова [56] и А. А. Борисова, проведенными на фотоупругих моделях и моделях из эквивалентных материалов.

Форма свода расслоения в поперечном сечении в первом приближении может быть принята в виде треугольника с углом в основании α . По данным А. А. Борисова, угол α равен 64° . Для Солигорских калийных рудников угол α , по данным Н. Г. Лукьянова [77], равен 55° . Ориентировочно он может быть определен по формуле

$$\alpha = \pi/4 + \rho/2, \quad (90)$$

где ρ — угол внутреннего трения в массиве. Уточнение формы свода расслоения можно провести методом теории предельного равновесия [126].

С увеличением пролета камеры свод расслоения увеличивается. При некотором пролете камеры l_0 водозащитная толща может попасть в область расслоения, что, вообще говоря, нежелательно, а потому l_{**} должно быть меньше l_0 .

Приведенный расчет потолочины на прочность по разрушающим нагрузкам необходимо дополнить расчетом по разрушающим деформациям или скоростям деформаций. При этом расчет по раскрытию трещин, по-видимому, не требуется.

Расчет потолочины, как плоской задачи (расчет бесконечно широкой плиты), проведенный в настоящем параграфе, справедлив лишь в случае систем разработки с ленточными целиками. В противном случае задача расчета потолочины становится существенно не плоской. Например, потолочина камеры при столбчатых целиках с шагом $l \times l_1$ может быть сведена к расчету пластинки (рис. 76, а) по предельному равновесию [38]. Граничные условия этой задачи ясны из рисунка. На рис. 76, б приведена расчетная схема еще одной задачи о несущей способности нижнего слоя кровли в камере разворота комбайна, которая может быть сведена к расчету полигональной в плане пластинки по предельному равновесию.

Отметим, что нахождение верхней оценки несущей способности пластинки во многих случаях осуществляется достаточно элементарными средствами. Соответствующая теория была первоначально построена применительно к расчету бетонных и железобетонных плит [38]. Разрушение бетонных плит имеет много общего с разрушением плит соляных пород: плиты разрушаются хрупко, с образованием трещин. А потому теория для бетонных плит справедлива и для расчета потолочин камер при разработке месторождений солей.

При расчете бетонных плит (для определения верхней оценки несущей способности) вводится понятие «кинематически допустимое состояние». Под кинематически допустимым состоянием понимается мгновенное распределение скоростей, осуществляемое в момент разрушения. Причем безразлично, как будет протекать сам процесс разрушения: будет ли материал течь неограниченно, что, вообще говоря, присуще горным породам соляных месторождений, или же разлетится на куски.

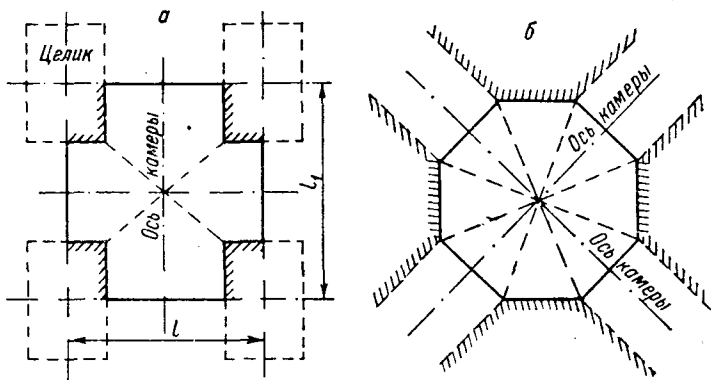


Рис. 76. Расчетные схемы к определению несущей способности потолочины камеры конечной длины: а — при столбчатых целиках; б — в камере разворота комбайна.

Пунктиром показаны возможные линии изломов.

Используя общую теорию, можно показать, что для нагруженной в центре пластинки в форме правильного n -угольника (рис. 76, б) предельная нагрузка определяется формулой:

$$P_* = 2\pi \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} M_*, \quad (91)$$

где M_* — изгибающий момент, приходящийся на единицу длины линии излома.

§ 4. Определение несущей способности элементов системы целик — кровля — почва

Как и определение нагрузки на элементы выработки, определение несущей способности каждого элемента в системе целик — кровля — почва является важным этапом в решении задачи об оптимальных геометрических параметрах системы разработки. Несущую способность элементов подземной выработки можно определить теоретически по предельному равновесию. Основная система уравнений теории предельного равновесия в напряжениях состоит из уравнений равновесия, условия предельного равновесия и условия полного предельного равновесия (последнее условие необходимо только для осесимметричной задачи) [17, 124].

В качестве условия предельного равновесия для пород калийных месторождений используем условие Кулона, которым будем аппроксимировать нелинейную огибающую кругов Мора. Собственным весом пород в областях предельного равновесия при решении практических задач можно пренебречь. В случае однородности среды в пределах элемента несущую способность элементов можно определить в замкнутой форме либо численно — методом характеристик (основная система уравнений теории предельного равновесия в напряжениях относится к гиперболическому типу). При этом уравнения характеристик для плоской и осесимметричной задач в случае однородной среды при условии Кулона имеют вид [17, 124]:

$$dy = dx \operatorname{tg}(\varphi \mp \varepsilon); \quad d\sigma \mp 2\sigma \operatorname{tg} \rho \, d\varphi = X \, dx + Y \, dy, \quad (92)$$

где φ — угол между первым главным направлением и осью x ; σ — приведенное среднее давление; ρ — угол внутреннего трения; $\varepsilon = \pi/4 - \rho/2$;

$$X = \left\{ \begin{array}{l} -\kappa \frac{\sigma}{x} \operatorname{tg} \rho [\cos \rho + \cos(2\varphi \pm \rho)] \mp \gamma \operatorname{tg} \rho; \end{array} \right.$$

$$Y = \left\{ \begin{array}{l} -\kappa \frac{\sigma}{x} \operatorname{tg} \rho [\pm \sin \rho + \sin(2\varphi \pm \rho)] + \gamma, \end{array} \right.$$

где $\kappa = 0$ в случае плоской задачи; $\kappa = 1$ — в случае осесимметричной задачи.

С помощью этих формул можно решить широкий круг задач о несущей способности однородной кровли, почвы и целиков. В случае слоистости элементов системы целик—кровля—почва (предполагается, что каждый слой массива имеет свой коэффициент сцепления и угол внутреннего трения) при определении несущей способности элементов соотношения (92) не применимы. Для решения этой задачи, следуя работе [135], аппроксимируем фактически дискретную неоднородность слоистой среды непрерывной неоднородностью, т. е. рассмотрим задачу о несущей способности элементов выработки, представленных средой с коэффициентом сцепления и углом внутреннего трения, являющимися функциями координат:

$$k = k(x, y); \quad \rho = \rho(x, y). \quad (93)$$

Основная система уравнений в напряжениях плоской и осесимметричной задач теории предельного равновесия непрерывно неоднородной среды при условии предельного равновесия Кулона приводится, как и в случае однородной среды, к гиперболической системе двух нелинейных уравнений в частных производных первого порядка [134]. Уравнения характеристик этой системы

в плоскости x, y декартовой системы координат запишем в виде [135, 137]:

$$dy = dx \operatorname{tg}(\varphi \mp \varepsilon); \quad d\sigma \mp 2\sigma \operatorname{tg} \rho \, d\varphi = (X + X_0) dx + (Y + Y_0) dy, \quad (94)$$

где

$$X_0 = \frac{\partial H}{\partial x} \mp \frac{\partial H}{\partial y} \operatorname{tg} \rho - \sigma \left[\cos(2\varphi \pm \rho) \frac{\partial \rho}{\partial x} + \sin(2\varphi \pm \rho) \frac{\partial \rho}{\partial y} \right];$$

$$Y_0 = \pm \frac{\partial H}{\partial x} \operatorname{tg} \rho + \frac{\partial H}{\partial y} - \sigma \left[\sin(2\varphi \pm \rho) \frac{\partial \rho}{\partial x} - \cos(2\varphi \pm \rho) \frac{\partial \rho}{\partial y} \right];$$

$H = k \operatorname{ctg} \rho$; k — коэффициент сцепления; остальные обозначения те же, что и в формуле (92).

С помощью уравнений характеристик (92), (94) могут быть решены задачи о несущей способности кровли, почвы и целиков лишь в том случае, если имеют место целики ленточные, круглые или близкие к круглым в плане. В первом случае решается плоская задача, во втором — осесимметричная. В случае целиков, прямоугольных в плане, задача определения несущей способности отдельных элементов выработки существенно усложняется, так как приходится решать трехмерную задачу. Трехмерная задача теории предельного равновесия не имеет удовлетворительного решения в напряжениях. Известны лишь частные случаи решения трехмерной задачи (см., например, [144]). Поэтому представляет интерес приближенный прием, предложенный в работе [139]: при решении задачи о несущей способности элемента прямоугольник аппроксимируется эллипсом; задача решается численно с использованием уравнений характеристик, записываемых в виде:

$$dy = dx \operatorname{tg}(\varphi \mp \varepsilon); \quad d\sigma \mp 2\sigma \operatorname{tg} \rho \, d\varphi = X dx + Y dy, \quad (95)$$

где

$$X = -\sigma \frac{x - \varepsilon \cos 2\theta}{x^2 - 2x\varepsilon \cos 2\theta + \varepsilon^2} \operatorname{tg} \rho [\cos \rho + \cos(2\varphi \pm \rho)];$$

$$Y = -\sigma \frac{x - \varepsilon \cos 2\theta}{x^2 - 2x\varepsilon \cos 2\theta + \varepsilon^2} \operatorname{tg} \rho [\pm \sin \rho + \sin(2\varphi \pm \rho)];$$

ε — полуразность полуосей эллипса; θ — полярный угол; остальные обозначения те же, что и в формуле (92).

При решении задачи о несущей способности кровли, почвы или целика достаточно получить решение при некоторых значениях угла θ , лежащих в пределах от 0 до $\pi/2$. При этом критерием точности данного приближенного решения будет выполнение условия $\partial\sigma/\partial\theta = 0$. Выполнение этого условия зависит от малости величины ε .

Основной метод решения задачи о несущей способности элементов системы целик — кровля — почва — численное интегрирование (может быть использовано и графическое интегрирование [39, 75]). Однако в ряде случаев могут быть получены и замкнутые решения [124, 135].

Приведем некоторые примеры, заимствованные из работы [124]. Несущую способность однородной невесомой полуплоскости при

внедрении в нее гладкого штампа можно определить по формуле

$$p = k \operatorname{ctg} \rho \left[\frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \exp(\pi \operatorname{tg} \rho) - 1 \right]. \quad (96)$$

К решению этой задачи можно свести и задачу о несущей способности почвы или кровли при внедрении ленточного целика, когда трением на контакте целик—кровля и целик—почва можно пренебречь. Несущую способность однородного невесомого откоса с углом при вершине $\pi - \alpha$ при внедрении в него гладкого штампа вычислим по формуле

$$p = k \operatorname{ctg} \rho \left\{ \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \exp[(\pi - 2\alpha) \operatorname{tg} \rho] - 1 \right\}. \quad (97)$$

К этой же задаче сводится определение несущей способности кровли при внедрении в нее жесткого «гладкого» целика, когда в кровле заведомо имеет место расслоение (мы предполагаем, что область расслоения над камерой должна быть исключена из рассмотрения при решении вопроса о несущей способности кровли). Отметим, что формулы (96), (97) обобщаются на случай, когда штамп шероховатый (иначе говоря, когда на контакте целик—кровля и целик—почва имеется трение). Несущую способность слоя шириной a и высотой h , сжимаемого двумя жесткими гладкими плитами, можно определить по формуле

$$p = \frac{2k \cos \rho}{1 - \sin \rho}. \quad (98)$$

Эта формула справедлива при условии

$$a \geq h \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \right). \quad (99)$$

Рассмотрим случай, когда отсутствует трение на контактах целик—почва и целик—кровля. Очевидно, что в этом случае несущая способность целика не зависит от его формы. На практике величина, определяемая соотношением (98), приравнивается пределу прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$, определяемому экспериментальным путем раздавливания образца кубической формы. Как следует из соотношения (99), эти величины не совпадают. Однако погрешность такой замены никем не оценивалась. Формулы (96)—(98) справедливы лишь в случае плоской задачи. В осесимметричном случае нам не известны замкнутые решения задач о несущей способности полупространства и слоя. Тем больший интерес представляет предложение Р. Шилда [144] для оценки несущей способности полупространства при внедрении в него гладкого прямоугольного в плане штампа

$$p = \frac{1}{2} k \operatorname{tg}^3 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} \right) [4 + \sin \rho + \sin^2 \rho + (1 + \sin \rho)(4 + \sin^2 \rho)^{1/2}] + 2k \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} \right). \quad (100)$$

Выписанные здесь простые решения основной системы уравнений плоской задачи теории предельного равновесия, а также некоторые простые решения, аналогичные приведенным, будут использованы при расчете параметров системы. Отметим, что и в случае неоднородности основная система уравнений плоской задачи также допускает простые решения. Некоторые из них можно найти в работе [135].

Остановимся теперь на вопросе определения несущей способности целиков. Со времени предложения Турнера о расчете параметров систем разработки вопрос о несущей способности целиков исследовался многими авторами. Было установлено, что несущая способность целика зависит не только от его механических свойств, но и от отношения его ширины a к высоте h , а вводимый коэффициент для учета влияния этого фактора получил название коэффициента формы. С учетом коэффициента формы несущая способность целика определяется по формуле

$$p = \sigma_{сж} k_{ц}, \quad (101)$$

где $\sigma_{сж}$ — предел прочности на одноосное сжатие (при $a/h = 1$).

В качестве коэффициента формы разными авторами предлагались различные зависимости, но наибольшую известность на калийных месторождениях получил коэффициент формы, предложенный З. Церном. Несущая способность целика выражалась через коэффициент Церна по формуле

$$p = \sigma_{сж} \sqrt{a/h}. \quad (102)$$

В дальнейшем формула (102) претерпела некоторые изменения. Так, К. Кегель [87] предложил определять несущую способность целика по формуле

$$p = (\sigma_{сж} + \beta a) \sqrt{a/h}, \quad (103)$$

где β — некоторый параметр, равный 2,2 кг/см³ для каменной соли и 1,2 — для карналлита.

М. Стаматиу [122] для определения несущей способности целика предложил формулу, аналогичную (103):

$$p = (\sigma_{сж} + \beta \sqrt{a}) \sqrt{a/h}. \quad (104)$$

Некоторые дополнительные сведения по этому вопросу можно найти в работе [87].

Дальнейшие исследования показали, что коэффициент $k_{ц}$ в формуле (101) зависит также от механических свойств целика и от граничных условий, выполняющихся на контактах целика с кровлей и почвой (учитывая это, коэффициент $k_{ц}$ в дальнейшем будем называть коэффициентом Церна). Именно потому, что формулы (102)—(104) совершенно не учитывают граничных условий на контактах целика, результаты, получаемые с их помощью, нельзя признать надежными.

Забегая несколько вперед, отметим, что в калийной промышленности ГДР для определения несущей способности целиков пользуются аналитико-экспериментальными формулами Хёфера — Менцеля [37], имеющими вид:

а) для прямоугольных в плане длинных целиков

$$p = \frac{k}{a/h} [2 + F(a/h, \rho)]; \quad (105)$$

б) для коротких целиков

$$p = \frac{k}{a/h} \left\{ \frac{2a}{b} + \left[1 - \frac{h}{b} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \right) \right] [2 + F(a/h, \rho)] \right\}; \quad (106)$$

в) для квадратных целиков

$$p = \frac{k}{a/h} \left\{ 2 + \left[1 - \frac{h}{a} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2} \right) \right] [2 + F(a/h, \rho)] \right\}, \quad (107)$$

где k — коэффициент сцепления; ρ — угол внутреннего трения; a — ширина целика; h — высота целика; b — длина целика; $F(a/h, \rho)$ — функция указанных аргументов (результат численного интегрирования). Формула же (102) используется лишь для ориентировочного определения предела прочности на одноосное сжатие.

Несущую способность целиков с учетом граничных условий, благодаря исследованиям В. В. Соколовского [124], С. С. Голушкевича [39] и В. Г. Березанцева [17], наиболее просто определять теоретически по предельному равновесию. Впервые несущая способность однородных ленточных целиков с симметричными граничными условиями исследовалась К. В. Руппенеитом [106]. В работе [87] был предложен упрощенный метод решения этой же задачи. В результате проведенных исследований было установлено, что при симметричных граничных условиях на контактах целика с кровлей и почвой вида

$$\tau_{nt} = (k \operatorname{ctg} \rho + \sigma_n) \operatorname{tg} \delta \quad (\delta \leq \rho) \quad (108)$$

(где k — коэффициент сцепления; δ — угол трения) коэффициент Церна имеет вид

$$k_{ц} = \frac{h}{a} F(a/h, \rho, \delta) \quad (109)$$

или

$$k_{ц} = k_{ц}(a/h, \rho, \delta), \quad (110)$$

где $F(a/h, \rho, \delta)$ и $k_{ц}(a/h, \rho, \delta)$ — функции указанных аргументов.

Отметим, что функция F затабулирована (рис. 77). Более того, в работе [89] на основе метода, предложенного в [87], даны замкнутые формулы для определения вертикальных предельных напряжений на средней линии поперечного сечения ленточного целика на различных участках. Все это позволяет использовать метод, изложенный в работе [87], для практических расчетов целиков.

Граничными условиями вида (108) не исчерпывается все многообразие практически возможных случаев. Более общим граничным условием, которое может фактически иметь место на контактах целик—кровля и целик—почва, следует считать условие неполного сцепления с трением:

$$\tau_{nt} = k_0 + \sigma_n \operatorname{tg} \delta_1$$

или

$$\tau_{nt} = (k_1 \operatorname{ctg} \rho + \sigma_n) \operatorname{tg} \delta_1 \quad (k_1 < k; \delta_1 < \rho), \quad (111)$$

где k_0 — коэффициент сцепления на контакте; δ_1 — угол трения на контакте; k , ρ — коэффициент сцепления и угол внутреннего трения целика.

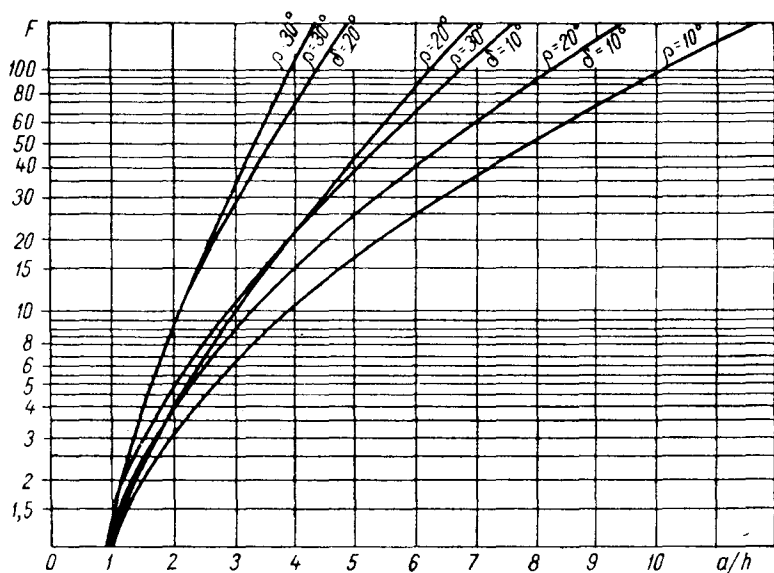


Рис. 77. Зависимость безразмерного параметра F ($F = k_{ц} \frac{a}{h}$) для однородных целиков с симметричными граничными условиями от соотношения их размеров, по данным работы [87].

Учитывая, что на контактных поверхностях могут иметь место условия вида (111) (несимметричные контактные условия), но с различным сцеплением k_i и углом трения δ_i ($i = 1, 2$), коэффициент Церна в общем виде можно записать так:

$$k_{ц} = k \left(\frac{a}{h}, \rho, \frac{k_1}{k}, \frac{k_2}{k}, \delta_1, \delta_2 \right), \quad (112)$$

т. е. зависящим не от трех параметров, как это показано в работе [87], а от шести. В случае неоднородных целиков вид коэффициента Церна еще больше усложняется.

С целью подхода к анализу соотношения (112), а также проверки и уточнения графика (рис. 77) и замкнутых формул (работа [89]) нами была решена задача о несущей способности ленточного целика (плоская задача) в постановке В. В. Соколовского — К. В. Руппенейта при симметричных граничных условиях типа (108), (111):

$$\tau_{nt} = k + \sigma_n \operatorname{tg} \rho. \quad (113)$$

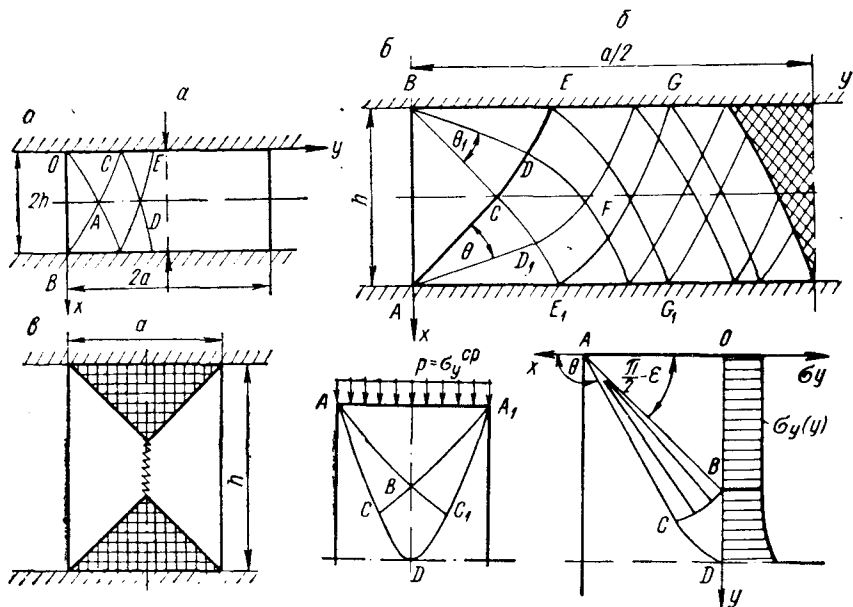


Рис. 78. Расчетная схема к задаче о несущей способности невесомого однородного целика: а, в — с симметричными контактными условиями; б — с несимметричными контактными условиями.

Зависимость (113) выражает условие полного контакта целика с вмещающими породами, которое вместе с условием отсутствия на контакте трения и сцепления

$$\tau_{nt} = 0 \quad (114)$$

представляет особый интерес, так как в случае симметрии граничных условий приводит к максимальной и минимальной несущей способности целика соответственно. Заметим, что несущая способность целика при граничных условиях (114) определяется соотношением (98). В случае же условия (113) наиболее просто ее определить численно — методом характеристик с использованием соотношений (92).

Рассмотрим задачу о несущей способности слоя, сжимаемого двумя жесткими плитами, к которой, как известно, сводится задача о несущей способности целика. Будем полагать, что под каждой

плитой выполняется условие полного контакта (113). В этом случае $k_1/k = k_2/k = 1$, $\delta_1 = \delta_2 = \rho$, потому соотношение (112) имеет вид

$$k_{\text{ц}} = k_{\text{ц}}(a/h, \rho).$$

В силу симметрии задачи рассмотрим только одну четверть слоя (рис. 78). Направив ось y по контактной поверхности, а ось x по боковой поверхности слоя (рис. 78, а), построим решение для правой верхней четверти слоя при граничных условиях вида

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = \sigma_y = 0 & \quad \text{при } y = 0; \\ \tau_{xy} = 0 & \quad \text{при } x = h; \\ \tau_{xy} = k + \sigma_x \operatorname{tg} \rho & \quad \text{при } x = 0. \end{aligned} \quad (115)$$

При этом будем различать на плоскости xy следующие области: OAB , OAC , ACD и CDE . Решение задачи о несущей способности слоя сводится по существу к численному интегрированию системы (92) при $\gamma = 0$ в областях ACD и CDE по типу смешанной задачи при таких граничных условиях:

$$\begin{aligned} \varphi = 0 & \quad \text{при } x = h \text{ (на оси симметрии);} \\ \varphi = \pi/2 + \rho/2 & \quad \text{при } x = 0, \end{aligned} \quad (116)$$

так как в области OAB и OAC решение определяется элементарно и выражается через приведенное среднее давление σ и угол φ следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi = 0; \quad \sigma = \frac{k \operatorname{ctg} \rho}{1 - \sin \rho} & \quad \text{в области } OAB; \\ \varphi \in \left[0, \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} \right]; \quad \sigma = \frac{k \operatorname{ctg} \rho}{1 - \sin \rho} \exp(2\varphi \operatorname{tg} \rho) & \quad \text{в области } OAC. \end{aligned} \quad (117)$$

В табл. 34 приведено решение поставленной задачи в безразмерных величинах (σ отнесено к коэффициенту сцепления k , а координаты x и y отнесены к полувысоте целика h) для $\rho = 25^\circ$. На рис. 79, а построена сетка характеристик — линий скольжения по координатам узловых точек, приведенных в табл. 34. Аналогично предыдущему выполнено решение этой же задачи для различных углов внутреннего трения. Значения безразмерного предельного давления σ_x/k вдоль оси $x = h$ сведены в табл. 35.

Эта же задача совсем недавно была решена Д. М. Ильичевым (ВНИМИ). Для ее решения был использован метод Каратеодори — Шмидта — Хилла, основанный на применении второй обобщенной теоремы Генки. Решение задачи о несущей способности целика с симметричными граничными условиями сведено к решению телеграфного уравнения, функция Римана для которого выражена через Бесселевы функции. По результатам проведенных вычислений Д. М. Ильичевым построена номограмма (рис. 80), позволяющая

Таблица 34

Численное решение задачи о несущей способности однородного ленточного целика с симметричными контактными условиями вида (113) при $\rho = 25^\circ$

		$i \backslash j$	0	1	2	3	4	5	6	7
x	0		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
y			0,77	1,08	1,26	1,65	2,11	2,67	3,24	3,74
σ			5,04	6,12	6,75	8,20	9,96	12,11	14,63	17,78
φ			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
x	1		0,80	0,78	0,76	0,71	0,65	0,66	0,69	0,68
y			0,89	1,23	1,42	1,84	2,34	2,91	3,44	3,95
σ			5,55	6,75	7,44	9,04	10,98	13,31	16,13	19,60
φ			0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
x	2		0,60	0,54	0,50	0,39	0,35	0,39	0,41	0,39
y			0,97	1,33	1,53	1,97	2,48	3,02	3,57	4,08
σ			6,13	7,44	8,20	9,96	12,07	14,67	17,78	21,61
φ			0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
x	3		0,39	0,28	0,21	0,14	0,16	0,18	0,18	0,16
y			1,02	1,39	1,59	2,03	2,52	3,07	3,62	4,13
σ			6,76	8,20	9,04	10,95	13,31	16,18	19,60	23,82
φ			0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
x	4		0,19	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
y			1,02	1,40	1,60	2,04	2,53	3,08	3,62	4,14
σ			7,45	9,04	9,94	12,07	14,67	17,83	21,61	26,19
φ			0,73	0,74	0,73	0,73	0,73	0,73	0,74	0,73
x	5		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
y			0,99	1,39	1,60	2,03	2,52	3,07	3,62	4,13
σ			8,22	9,94	10,95	13,31	16,18	19,66	23,75	28,87
φ			0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

Таблица 35

Значения безразмерного предельного давления σ_x/k вдоль средней линии целика с симметричными контактными условиями вида (113) при некоторых значениях угла внутреннего трения

ρ°	a/h						
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
10	2,96	4,5	6,03	7,52	8,5	10,17	12,5
15	3,95	6,0	8,0	10,99	13,07	16,6	20,94
20	4,6	8,0	12,1	17,0	22,72	31,4	42,8
25	6,0	12,0	19,8	29,1	45,68	71,0	109,0
30	8,2	19,0	35,7	62,1	114,5	200,0	—
35	12,9	34,9	77,2	167,5	—	—	—

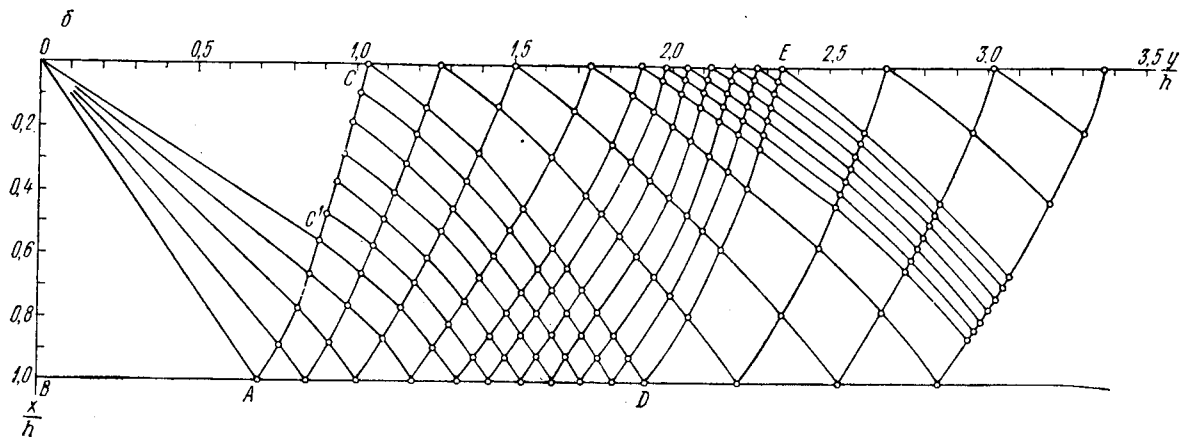
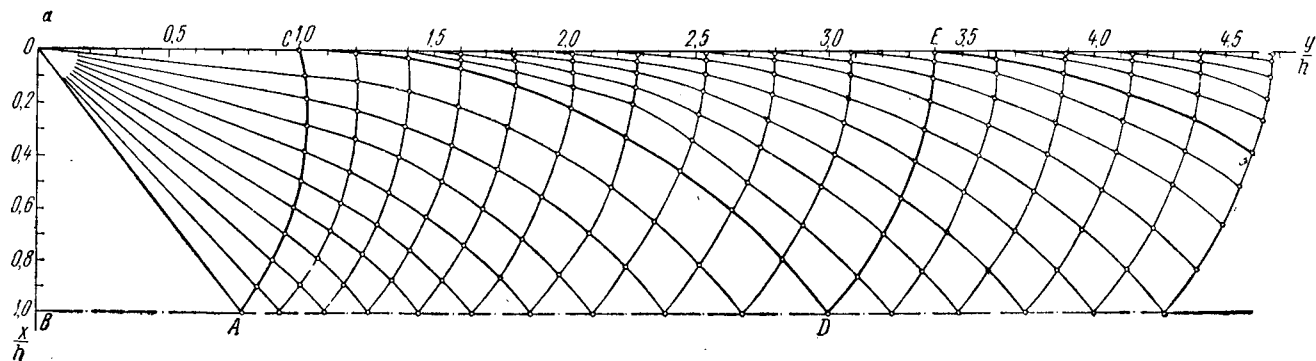


Рис. 79. Сетка характеристик — линий скольжения в левой верхней четверти однородного цилиндра с симметричными контактными условиями вида (108): $a - k = 1$; $\delta = \rho = 25^\circ$; $b - k = 1$; $\delta = 10^\circ$; $\rho = 20^\circ$.

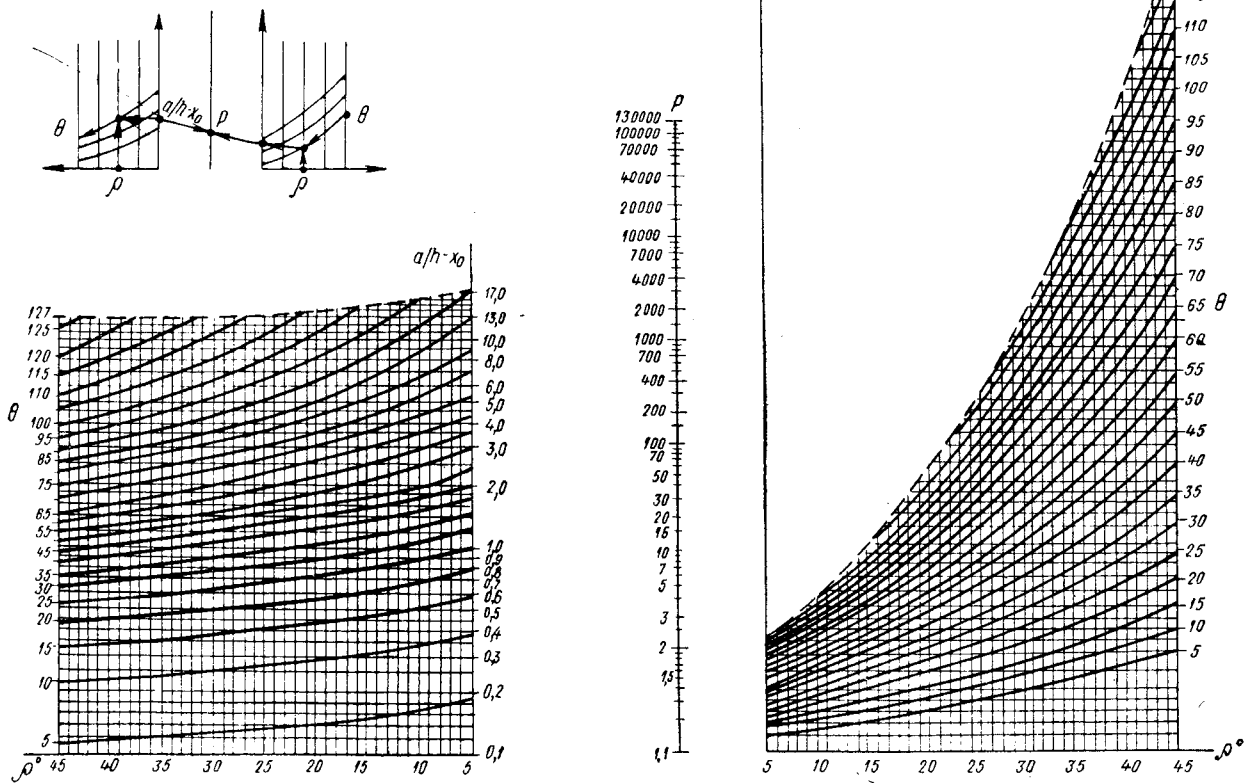


Рис. 80. Номограмма Д. М. Ильичева для определения несущей способности однородных целиков с симметричными контактными условиями вида (113).

сравнительно просто определить нагрузку на целик при любом ρ , изменяющемся в пределах от 5° до 45° при $a/h \leq 13$.

Рассмотрим теперь ту же задачу о несущей способности слоя, когда на контактах выполняется условие (108). Отметим, что и в этом случае $k_1/k = k_2/k = 1$, однако $\delta_1 = \delta_2 = \delta$ будет меньше угла внутреннего трения ρ , а потому соотношение (112) имеет вид (110). В этом случае веер OAC' не раскрывается полностью, а потому на плоскости xy приходится различать области OAB , OAC' , OCC' , ACD и CDE . Но решение задачи и в этом случае сводится по существу к численному интегрированию системы (92) при $\gamma = 0$ в обла-

Таблица 36

Численное решение задачи о несущей способности однородного ленточного целика с симметричными контактными условиями вида (108) при $\rho = 20^\circ$ и $\delta = 10^\circ$

		$i \backslash j$	0	1	2	3	4	5	6	7
x	0		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
y			0,70	1,01	1,33	1,53	1,72	1,92	2,53	2,85
σ			4,17	5,59	6,96	6,96	6,96	6,96	9,31	10,78
φ			0	0	0	0	0	0	0	0
x	1		0,77	0,77	0,85	0,85	0,85	0,58	0,64	0,83
y			0,82	1,15	1,43	1,63	1,82	2,16	2,74	2,96
σ			4,83	6,24	6,96	6,96	6,96	8,05	10,39	11,18
φ			0,20	0,15	0	0	0	0,20	0,15	0,05
x	2		0,56	0,61	0,71	0,71	0,47	0,26	0,57	0,76
y			0,89	1,23	1,53	1,72	2,05	2,28	2,78	3,00
σ			5,40	6,24	6,96	6,96	8,05	8,98	10,39	11,18
φ			0,35	0,15	0	0	0,20	0,35	0,15	0,05
x	3		0,37	0,45	0,57	0,36	0,17	0,17	0,49	0,69
y			0,94	1,31	1,63	1,93	2,15	2,30	2,82	3,05
σ			5,40	6,24	6,96	8,05	8,98	8,98	10,39	11,18
φ			0,35	0,15	0	0,20	0,35	0,35	0,15	0,05
x	4		0,18	0,28	0,25	0,08	0,08	0,08	0,42	0,43
y			0,99	1,39	1,81	2,03	2,18	2,32	2,85	3,20
σ			5,40	6,24	8,05	8,98	8,98	8,98	10,39	12,02
φ			0,35	0,15	0,20	0,35	0,35	0,35	0,15	0,15
x	5		0	0	0	0	0	0	0	0
x			1,04	1,50	1,90	2,05	2,20	2,35	3,02	3,37
σ			5,40	7,22	8,98	8,98	8,98	8,98	12,02	13,92
φ			0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

стях ACD и CDE по типу смешанной задачи при следующих граничных условиях:

$$\varphi = 0 \quad \text{при} \quad x = h;$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{\sin \delta}{\sin \rho} + \frac{1}{2} \delta \quad \text{при} \quad x = 0. \quad (118)$$

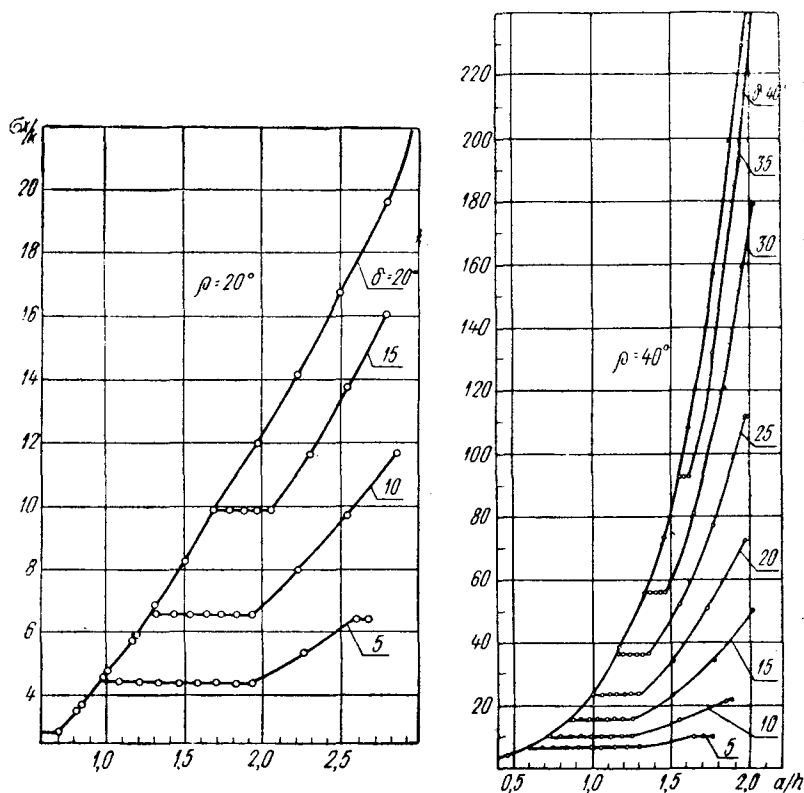


Рис. 81. Распределение безразмерного предельного давления вдоль средней линии поперечного сечения целика с симметричными контактными условиями вида (108) при некоторых значениях угла δ ($k_1/k = 1$).

В табл. 36, аналогичной табл. 34, приведено решение этой задачи в безразмерных величинах для $\rho = 20^\circ$ и $\delta = 10^\circ$. Сетка характеристик, построенная по данным табл. 36, приведена на рис. 79, б. По аналогии с этим решением выполнено численное решение для ρ , изменяющегося в диапазоне от 10 до 40° при различных значениях δ , изменяющихся в диапазоне от 5° до ρ . Для иллюстрации решения на рис. 81 показано распределение безразмерного предельного давления σ_x/k вдоль оси $x = h$ для $\rho = 20$ и 40° при $\delta \in [5^\circ, \rho]$, а на рис. 82 представлены графики изменения безразмерного среднего предельного давления $\sigma_x^{\text{ср}}/k$ в зависимости от отношения

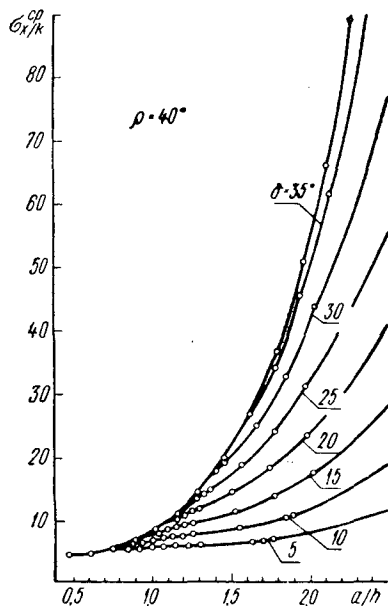
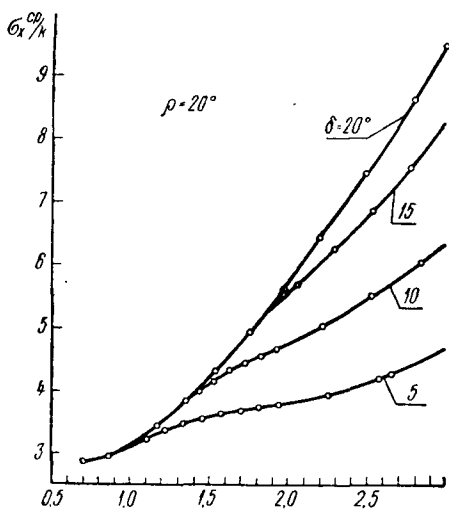


Рис. 82. Характер изменения безразмерного среднего предельного давления σ_x^{cp}/k для однородного целика с симметричными контактными условиями вида (108) от отношения его размеров a/h и угла δ ($k_1/k = 1$).

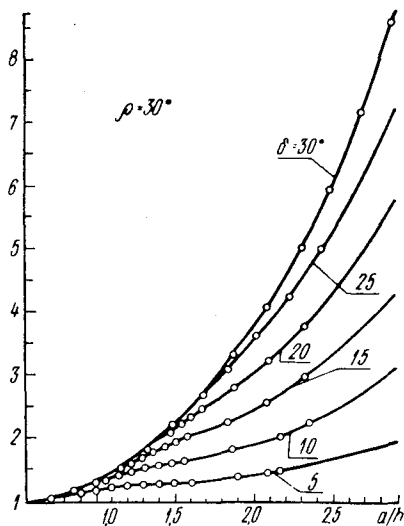
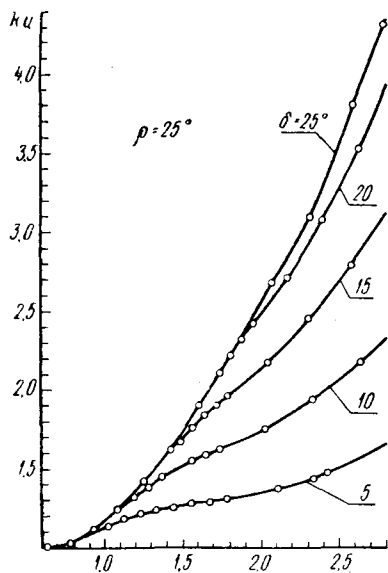


Рис. 83. Зависимость коэффициента Церна для однородного целика с симметричными контактными условиями вида (108) от отношения его размеров a/h и угла δ ($k_1/k = 1$).

a/h при $\rho = 20$ и 40° и при $\delta \in [5^\circ, \rho]$. Кроме того, на рис. 83 показано изменение коэффициента Церна (110) при некоторых значениях углов ρ и δ . Результаты остальных вычислений этой задачи в виде зависимости коэффициента Церна от отношения a/h при некоторых значениях углов ρ и δ сведены в табл. 37.

Таблица 37

Значения коэффициентов Церна $k_{ц}$ для целика с симметричными контактными условиями вида (108)

ρ°	δ°	a/h						
		1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
35	5	1,1	1,2	1,39	1,5	1,7	1,9	2,2
	10	1,3	1,5	1,8	2,2	2,8	3,4	4,3
	15	1,4	1,8	2,4	3,4	4,3	6,0	16,9
	20	1,4	2,2	3,1	4,6	7,1	10,8	—
	25	1,4	2,3	3,8	6,1	10,4	17,3	—
	30	1,4	2,4	4,3	7,4	13,3	—	—
	35	1,4	2,4	4,7	8,5	16,1	—	—

Анализ проведенных вычислений и их сопоставление с результатами работ [87] и [89] показало, что:

1) метод, предложенный в работе [87], позволяет получить решение задачи о несущей способности целика с удовлетворительной для практических расчетов точностью;

2) при малых значениях угла внутреннего трения ρ ($\rho \leq 10 \div 15^\circ$) за несущую способность целика с достаточной для инженерных расчетов точностью можно принимать предел прочности при одноосном сжатии;

3) проведенные вычисления и, как следствие этих вычислений, графики (рис. 82, 83) существенно упрощают задачу о геометрических параметрах системы разработки.

Все расчеты при решении задачи о несущей способности целиков были проведены на ЭВМ БЭСМ-4. Составленная для решения этой задачи на ЭВМ программа, записанная на алгоритмическом языке АЛГОЛ-60, позволяет рассмотреть некоторые актуальные, но не решенные до сих пор задачи, тесно связанные с расчетом целиков для реальных условий. Остановимся на некоторых из них.

Рассмотрим возможность получения решения задачи о несущей способности целика, сжимаемого вмещающими породами, когда на контактах целика с кровлей и почвой выполняются условия типа (111), но симметрия в граничных условиях при этом отсутствует. Отметим, что вопрос о несущей способности целиков в такой постановке с несимметричными граничными условиями никем не исследовался. Причина этого кроется, по-видимому, в громоздкости численного анализа этого вопроса. По сравнению с симметричным случаем здесь в общем виде число входящих в решение параметров,

как это следует из сопоставления уравнений (110) и (112), увеличивается ровно в 2 раза. Принципиальных же трудностей решение этой задачи не представляет. Из-за отсутствия симметрии рассматривается половина целика. При этом на плоскости xy (рис. 79, б) приходится различать области ABC , ACD_1 , BCD , BDE , AD_1E_1 и т. д. Однако решение задачи сводится по существу к численному решению задачи Гурса в области $CEFE_1$ и смешанной задачи в областях EFG и E_1FG_1 при граничных условиях вида:

$$\sigma [\sin \rho \sin (2\varphi - \delta_i) - \sin \delta_i] = k_i \cos \delta_i - k \operatorname{ctg} \rho \sin \delta_i \quad (119)$$

при $x = 0$ и $x = h$.

В остальном решение не отличается от рассмотренного ранее. Некоторые предварительные результаты решения задачи о несущей способности целика с симметричными граничными условиями типа (111), полученные расчетом на ЭВМ, в виде зависимости коэффициента Церна $k_{ц} = k_{ц}(a/h, \rho, k_1/k, \delta)$ при некоторых значениях ρ , δ и отношения k_1/k , не равного единице, показаны на рис. 84 и приведены в табл. 38.

Рассмотрим вопрос о несущей способности неоднородных (слоистых) целиков. Для частного вида неоднородности этот вопрос исследовался экспериментально Ф. П. Бубликом [21] и др. Для слоистых целиков с прочными контактами между слагающими целик слоями задача о несущей способности без особых осложнений может быть решена численно с использованием уравнений характеристик (94). При этом принцип построения решения независимо от граничных условий совпадает с решением для целика с несимметричными граничными условиями. Исключение составляет лишь то, что начиная от задачи Коши в области, примыкающей к боковой поверхности целика, и кончая смешанной задачей в областях, примыкающих к контактам целик—кровля и целик—почва, решение строится только численно. Что же касается задачи о несущей способности целиков со слабыми межслоевыми контактами, то в силу возникающих при этом принципиальных трудностей, о которых речь пойдет дальше, эта задача еще ждет своего решения.

Приведенные рассуждения относятся исключительно к ленточным целикам. Для столбчатых целиков квадратной или прямоугольной формы необходимо решать не плоскую, а трехмерную задачу теории предельного равновесия. Для определения несущей способности квадратных целиков в плане можно рекомендовать аппроксимировать квадрат кругом, решая осесимметричную задачу с использованием уравнений характеристик (92) для однородных целиков или уравнений характеристик (94) — для неоднородных. При этом все рассуждения, приведенные для ленточных целиков, легко обобщаются на этот случай. Для определения несущей способности прямоугольных в плане целиков можно рекомендовать аппроксимировать прямоугольник эллипсом, решая задачу методом, изложенным в работе [139], с использованием уравнений характеристик (95).

Рассмотрим целики, у которых отношение a/h меньше $\text{ctg } \varepsilon$. Анализируя разрушение образцов горных пород и проводя аналогию между разрушением образцов горных пород и целиков, считаем возможной следующую схему разрушения высоких целиков.

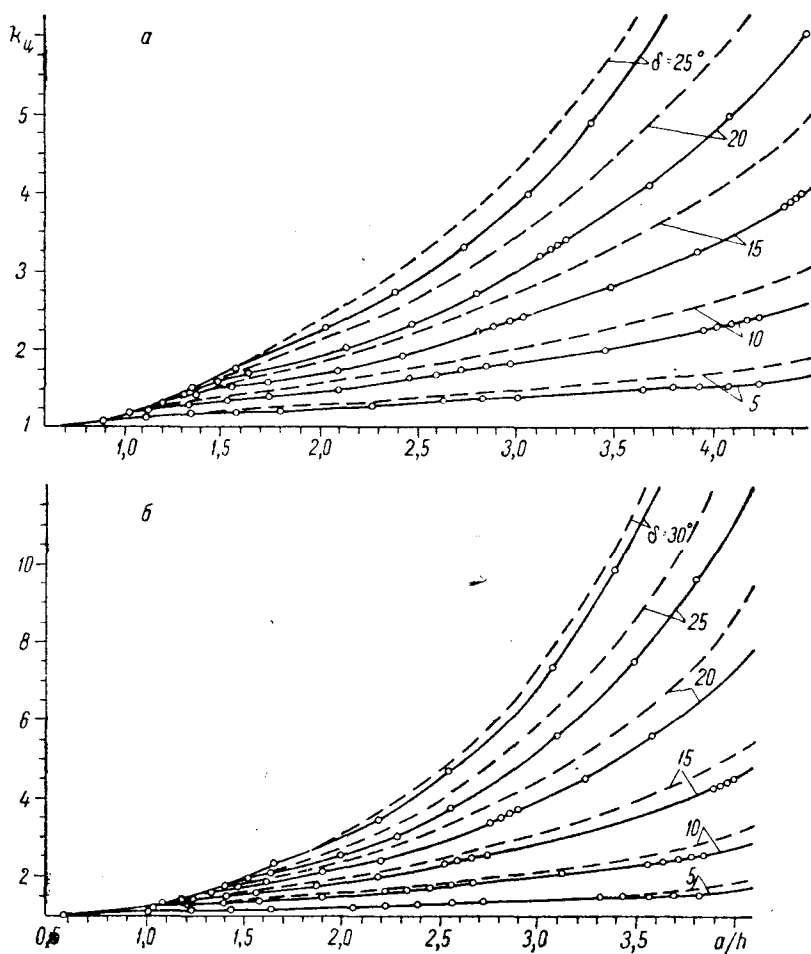


Рис. 84. Зависимость коэффициента Церна для однородного целика с симметричными контактными условиями вида (111) от отношения его размеров a/h , параметра k_1/k и угла δ .

$a - \rho = 25^\circ$; $b - \rho = 30^\circ$; $k_1/k = 0$ — сплошные линии; $k_1/k = 0,5$ — штриховые.

Под нагрузкой возникают две треугольные области (рис. 78, в), которые, вдавливаясь внутрь навстречу друг другу, стараются расколоть целик на две половины (ср. с бразильским методом испытания образцов на раскалывание). Разрушающую нагрузку в этом случае можно определить численно — методом характеристик.

Значения коэффициентов Церна для целика с симметричными контактными условиями вида (111) при $\rho = 20^\circ$

$\frac{k_1}{k}$	δ°	a/h								
		0,7	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
0	5	1	1,12	1,24	1,30	1,37	1,44	1,50	1,56	1,63
	10	1	1,14	1,36	1,48	1,60	1,77	1,92	2,09	2,29
	15	1	1,15	1,46	1,65	1,85	2,13	2,45	2,78	3,20
	20	1	1,15	1,52	1,86	2,20	2,61	3,18	3,84	4,66
0,25	5	1	1,12	1,26	1,33	1,41	1,49	1,56	1,64	1,72
	10	1	1,13	1,38	1,53	1,68	1,88	2,06	2,26	2,51
	15	1	1,13	1,49	1,74	1,98	2,30	2,69	3,12	3,74
	20	1	1,13	1,53	1,95	2,31	2,73	3,47	4,25	5,12
0,5	5	1	1,13	1,28	1,36	1,46	1,54	1,64	1,72	1,82
	10	1	1,13	1,40	1,58	1,76	2,00	2,22	2,46	2,72
	15	1	1,13	1,50	1,82	2,10	2,48	2,92	3,40	3,99
	20	1	1,13	1,53	2,01	2,46	3,00	3,69	4,56	5,57
0,75	5	1	1,14	1,32	1,40	1,50	1,61	1,71	1,80	1,92
	10	1	1,14	1,45	1,65	1,85	2,10	2,35	2,62	2,95
	15	1	1,14	1,50	1,88	2,20	2,60	3,11	3,66	4,29
	20	1	1,14	1,51	2,01	2,55	3,11	3,85	4,78	5,93
1	5	1	1,14	1,32	1,43	1,55	1,66	1,78	1,90	2,02
	10	1	1,14	1,49	1,72	1,92	2,20	2,50	2,82	3,18
	15	1	1,14	1,53	1,93	2,30	2,74	3,30	3,94	4,67
	20	1	1,14	1,53	1,99	2,55	3,16	3,90	4,86	6,00

Ограничиваясь вследствие симметрии задачи верхней половиной целика и притом его левой частью ($x \geq 0$), будем рассматривать на плоскости xy (рис. 78, в) три области: ABO ; ABC ; BCD . В области ABO имеет место равномерное напряженное состояние:

$$\varphi = \frac{\pi}{2}; \quad \sigma_y = p; \quad \sigma_x = (p + H) \frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho} - H, \quad (120)$$

а сетка характеристик состоит из прямых, наклоненных к оси y под углом $\pm \varepsilon$. В области ABC

$$\varphi = \theta; \quad \left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \varepsilon \right); \quad (121)$$

$$\sigma = \frac{H}{1 - \sin \rho} \exp(2\varphi \operatorname{tg} \rho),$$

а сетка характеристик состоит из семейства логарифмических спиралей с центром в точке A и прямых, проходящих через эту точку.

В области BCD решение строится численно по типу смешанной задачи. Причем на BD

$$\varphi = \pi/2; \quad x = 0. \quad (122)$$

Интегрируя эпюру σ_x в пределах от 0 до $h/2$ и приравнивая нулю горизонтальную равнодействующую всех сил, для определения искомой разрушающей нагрузки получаем соотношение вида

$$\int_0^{h/2} \sigma_x dy = 0. \quad (123)$$

Отсюда, принимая во внимание, что на OB

$$\sigma_x = p \frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho} - \frac{2k \cos \rho}{1 + \sin \rho} \quad 0 \leq y \leq \frac{a}{2} \operatorname{ctg} \varepsilon, \quad (124)$$

на BD

$$\sigma_x = p \frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho} - \varphi(y) \quad \frac{a}{2} \operatorname{ctg} \varepsilon \leq y \leq \frac{h}{2},$$

получим разрушающую нагрузку

$$p = \frac{2k \cos \rho}{1 - \sin \rho} \operatorname{ctg} \varepsilon \frac{a}{h} + \frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \cdot \frac{2}{h} \int_{\frac{a}{2} \operatorname{ctg} \varepsilon}^{\frac{h}{2}} \varphi(y) dy. \quad (125)$$

Анализ соотношения (125) показывает, что с увеличением расстояния между вершинами треугольников (рис. 78, ϵ) или просто с увеличением высоты целика при прочих равных условиях разрушающая нагрузка увеличивается. Это можно объяснить тем, что с увеличением расстояния между вершинами треугольников (рис. 78, ϵ) энергия, затрачиваемая на разрушение (раскалывание) целика, должна увеличиваться.

После достижения некоторой критической высоты h_* целик должен разрушаться от потери устойчивости, причем предельная нагрузка должна уменьшаться. Предложенная расчетная схема для высоких целиков позволяет найти высоту h_* как функцию ширины целика, угла внутреннего трения и коэффициента сцепления из условия полного раскрытия веера на угол $(\pi/4 - \rho/2)$. Отметим, что В. В. Соколовским [125] решена задача о перекусывании полосы двумя жесткими штампами. Это решение можно использовать при расчете целиков, представленных идеально связной средой ($\rho = 0$), если отношение h/a для целика не превышает 3,62. Проведенные исследования о несущей способности целиков используем в дальнейшем при решении некоторых частных примеров.

Остановимся на расчете несущей способности кровли и почвы выработок. Так как несущая способность кровли в случае плоской задачи определяется элементарно по формулам (96) или (97), то основное внимание обратим на несущую способность неоднородной кровли и почвы с неоднородностью частного вида. Что же касается несущей способности кровли и почвы в случае осесимметричной задачи, то здесь проведем исследования как для однородной, так и неоднородной среды.

Задача о несущей способности кровли или почвы выработки сводится, как уже отмечалось, к задаче о несущей способности полуплоскости или полупространства при внедрении в него штампа с плоским гладким или шероховатым основанием.

Рассмотрим задачу о несущей способности невесомой неоднородной полуплоскости $y \geq 0$ (рис. 85, а) при внедрении в нее плоского жесткого штампа ($-B \leq x \leq 0$). Пусть вдоль оси $x \geq 0$ пригрузка отсутствует, а вдоль оси $x < -B$ имеет место пригрузка бесконечно большой величины. В силу этого при решении задачи будем исходить из схемы одностороннего выдавливания. Иначе говоря, будем различать в плоскости xy (рис. 85, а) три области: A_0A_1O ; A_1A_2O ; A_2A_3O . Поставленную задачу будем рассматривать как плоскую задачу теории предельного равновесия неоднородной среды при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \sigma_y = \tau_{xy} = 0 & \quad \text{при } y = 0; \quad x > 0; \\ \tau_{xy} = (\sigma_y + H) \operatorname{tg} \delta_1 & \quad \text{при } y = 0; \quad 0 \leq x \leq -B, \end{aligned} \quad (126)$$

которые можно записать в виде [124]:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{H}{1 - \sin \rho}; \quad \varphi = 0 \quad \text{на } OA_0; \\ \sigma &= \frac{H}{1 - \sin \rho} \exp(2\varphi \operatorname{tg} \rho); \quad \varphi \in [0, \varphi_0] \quad \text{в точке } O; \\ \varphi &= \varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{\sin \delta_1}{\sin \rho}\right) - \frac{1}{2} \delta_1 \quad \text{на } OA_3, \end{aligned} \quad (127)$$

где σ — приведенное среднее давление ($\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + H$); φ — угол между первым главным направлением и осью x ; $H = k \operatorname{ctg} \rho$; k — коэффициент сцепления; ρ — угол внутреннего трения; δ_1 — угол трения под штампом.

Для решения этой задачи используем уравнения характеристик (94). Численное решение задачи удобно провести в безразмерных величинах, относя в случае невесомой среды σ к k_0 , а координаты x, y — к ширине штампа B . Рассмотрим частный случай неоднородности. Пусть коэффициент сцепления и угол внутреннего трения изменяются с глубиной по экспоненциальному закону:

$$k = k_0 \exp(\delta y); \quad \rho = \rho_0 \exp(\delta_0 y). \quad (128)$$

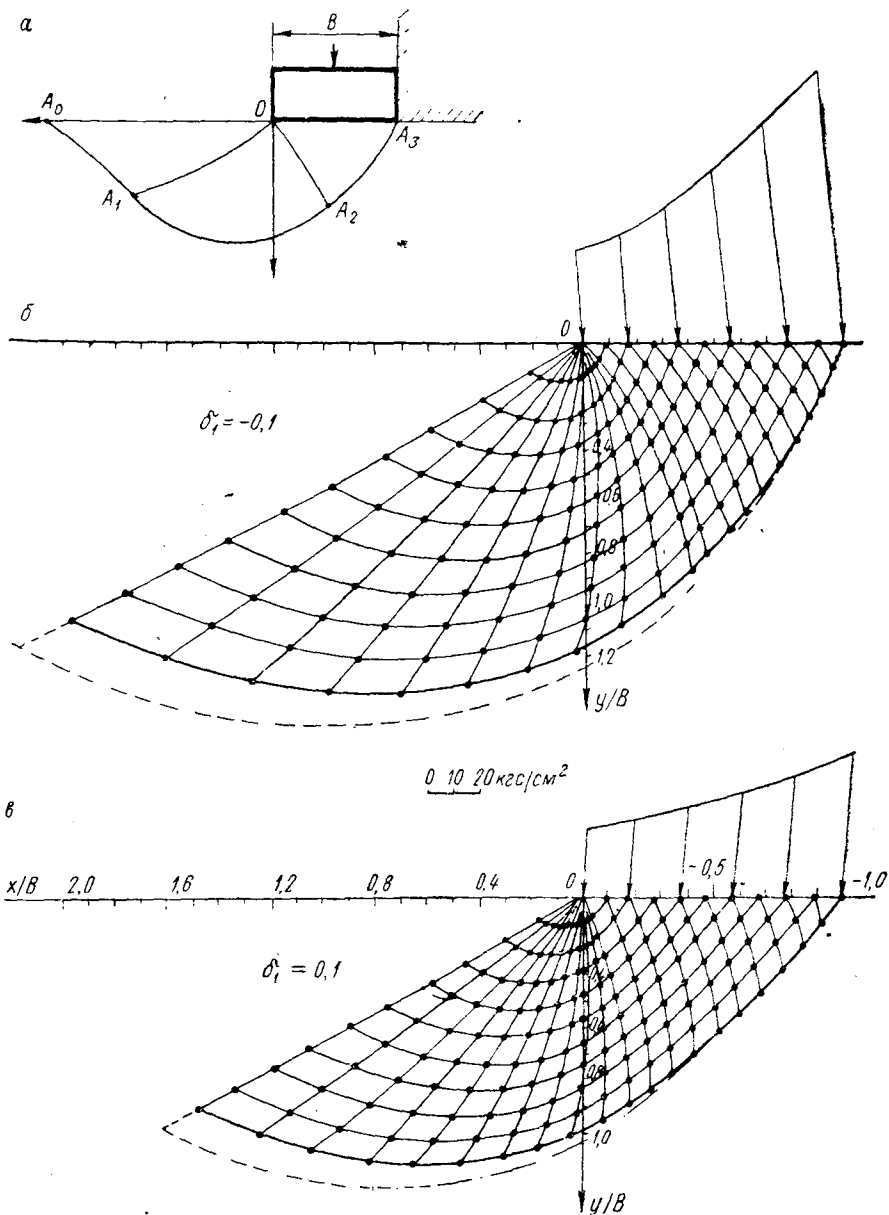


Рис. 85. Задача о несущей способности неоднородной полуплоскости с неоднородностью вида (128) ($k_0 = 1$; $\rho_0 = 30^\circ$; $\delta = \delta_0 = 0,2$) при одностороннем выдавливании из-под штампа.

a — расчетная схема; b, c — сетка характеристик и эпюра предельного давления.

При неоднородности такого вида уравнения характеристик (94) принимают вид

$$\begin{aligned} dy &= dx \operatorname{tg}(\varphi \pm \varepsilon); & d\sigma \pm 2\sigma \operatorname{tg} \rho d\varphi = \\ &= [\pm A - B \sin(2\varphi \pm \rho)] dx + [A \operatorname{ctg} \rho + B \cos(2\varphi \pm \rho)] dy, \end{aligned} \quad (129)$$

где

$$A = k \left(\delta - \frac{2\rho\delta_0}{\sin 2\rho} \right); \quad B = \sigma\rho\delta_0.$$

Переходя к безразмерным величинам, проведем численное решение этой задачи для гладкого ($\delta_1 = 0$) и шероховатого штампа. Решение задачи сводится к численному интегрированию системы (129) по типу вырожденной задачи Гурса в области OA_1A_2 и смешанной задачи в области OA_2A_3 . На рис. 85, б, в приведены сетки характеристик и эпюры предельного давления при внедрении в полуплоскость шероховатого ($\delta_1 \neq 0$) штампа единичной ширины ($\rho_0 = 30^\circ$; $k_0 = 1$) при некоторых значениях параметров δ и δ_0 . Распределение предельного давления под гладким и шероховатым штампом единичной ширины при $k_0 = 1$, некоторых значениях параметров δ и δ_0 , а также угла δ_1 в зависимости от угла внутреннего трения ρ_0 показано на рис. 86. В дополнение к рис. 86 в табл. 39 представлены следующие результаты численного решения рассмотренной задачи: σ_y^{cp}/k_0 — безразмерное среднее давление под штампом и OA_0/OA_3 — отношение ширины области выдавливания к ширине штампа.

Рассмотрим теперь несколько более общий вид неоднородности. Пусть коэффициент сцепления и угол внутреннего трения изменяются по экспоненциальному закону под углом α к горизонту

$$\begin{aligned} k &= k_0 \exp[\delta(x \cos \alpha + y \sin \alpha)]; \\ \rho &= \rho_0 \exp[\delta_0(x \cos \alpha + y \sin \alpha)]. \end{aligned} \quad (130)$$

Этот случай является более общим по сравнению с рассмотренным ранее, где $\alpha = \pi/2$. При неоднородности такого вида уравнения характеристик имеют вид

$$\begin{aligned} dy &= dx \operatorname{tg}(\varphi \pm \varepsilon); & d\sigma \pm 2\sigma \operatorname{tg} \rho d\varphi = \\ &= [A \cos(\alpha \mp \rho) - B \cos(2\varphi \mp \rho - \alpha)] dx + \\ &+ [A \sin(\alpha \mp \rho) - B \sin(2\varphi \mp \rho - \alpha)] dy, \end{aligned} \quad (131)$$

где

$$A = \frac{k}{\sin \rho} \left(\delta - \frac{2\rho\delta_0}{\sin 2\rho} \right); \quad B = \sigma\rho\delta_0;$$

остальные обозначения те же, что и в формуле (92).

Численное решение этой задачи сводится к решению задачи Коши в области OA_0A_1 , вырожденной задачи Гурса в области OA_1A_2 и смешанной задачи в области OA_2A_3 . Переходя к безразмерным величинам, проведем численное решение этой задачи для гладкого

Значения безразмерного среднего предельного давления и отношения ширины области выдавливания к ширине целика-штампа в задаче о несущей способности кровли (почвы) выработки с неоднородностью вида (128)

δ	δ_0	δ_1	ρ°					
			15	20	25	30	35	40
σ_y^c/k_0								
0,1	0,1	0	11,98	16,70	24,41	38,08	65,49	130,11
0,2	0,2	0,1	10,17	14,90	22,74	37,46	69,63	157,72
0,2	0,2	0	13,16	19,02	29,37	49,84	97,74	241,27
0,2	0,2	-0,1	15,66	22,95	36,37	64,26	133,91	362,45
0,3	0,3	0	14,39	21,65	35,32	65,56	148,28	467,24
0,3	0,3	-0,1	17,37	—	—	—	—	—
0,4	0,4	0	15,66	24,47	42,25	85,99	228,95	962,76
0,4	0,4	-0,1	19,22	—	—	—	—	—
0,5	0,5	0	17,03	27,72	50,89	115,14	363,33	1968,95
0,5	0,5	-0,1	21,27	—	—	—	—	—
0	0,1	0	11,40	15,78	22,90	35,44	60,48	119,09
0	0,2	0,1	9,42	13,64	20,45	33,55	61,69	139,09
0	0,2	0	11,99	17,17	26,28	44,06	85,74	211,79
0	0,2	-0,1	14,04	20,42	32,05	56,22	116,43	316,13
0	0,4	0	13,34	20,56	35,29	71,48	190,51	811,17
0	0,6	0	14,93	24,93	48,65	122,43	465,77	3354,76
0	0,8	0	16,80	30,69	68,90	219,47	1187,17	14391,55
0,1	0	0	11,43	15,47	21,61	31,40	48,59	79,75
0,15	0	0	—	—	—	32,63	—	—
0,2	0	0	—	—	—	33,86	—	—
0,3	0	0	—	—	—	36,37	—	—
0,5	0	0	13,65	18,99	27,40	41,47	66,62	116,11
1,0	0	0	16,43	23,53	35,08	55,30	92,78	171,09
1,5	0	0	19,30	28,27	43,33	70,38	123,30	238,10
OA_0/OA_3								
0,1	0,1	0	1,762	2,232	2,865	3,726	4,955	6,740
0,2	0,2	0,1	1,244	1,683	2,223	2,952	3,946	5,368
0,2	0,2	0	1,637	2,074	2,658	3,451	4,564	6,157
0,2	0,2	-0,1	1,953	2,416	3,051	3,923	5,157	6,920
0,3	0,3	0	1,537	1,952	2,505	3,256	4,303	5,809
0,3	0,3	-0,1	1,821	—	—	—	—	—
0,4	0,4	0	1,453	1,848	2,377	3,095	4,119	5,594
0,4	0,4	-0,1	1,714	—	—	—	—	—
0,5	0,5	0	1,383	1,765	2,280	2,989	3,981	5,397
0,5	0,5	-0,1	1,626	—	—	—	—	—
0	0,1	0	1,885	2,385	3,057	3,980	5,304	7,229
0	0,2	0,1	1,375	1,856	2,453	3,243	4,320	5,844
0	0,2	0	1,842	2,321	2,962	3,825	5,033	6,750
0	0,2	-0,1	2,230	2,730	3,427	4,388	5,718	7,611
0	0,4	0	1,752	2,185	2,762	3,534	4,611	6,130
0	0,6	0	1,662	2,056	2,587	3,302	4,292	5,693
0	0,8	0	1,578	1,944	2,435	3,110	4,048	5,471
0,1	0	0	1,788	2,273	2,919	3,800	5,088	6,935

δ	δ_0	δ_1	ρ°					
			15	20	25	30	35	40
0,15	0	0	—	—	—	3,665	—	—
0,2	0	0	—	—	—	3,545	—	—
0,3	0	0	—	—	—	3,333	—	—
0,5	0	0	1,437	1,829	2,340	3,018	3,944	5,268
1,0	0	0	1,185	1,516	1,942	2,498	3,244	4,271
1,5	0	0	1,027	1,316	1,685	2,168	2,808	3,679

Примечание. На контакте целик—кровля (целик—почва) выполняется условие специального предельного равновесия (108).

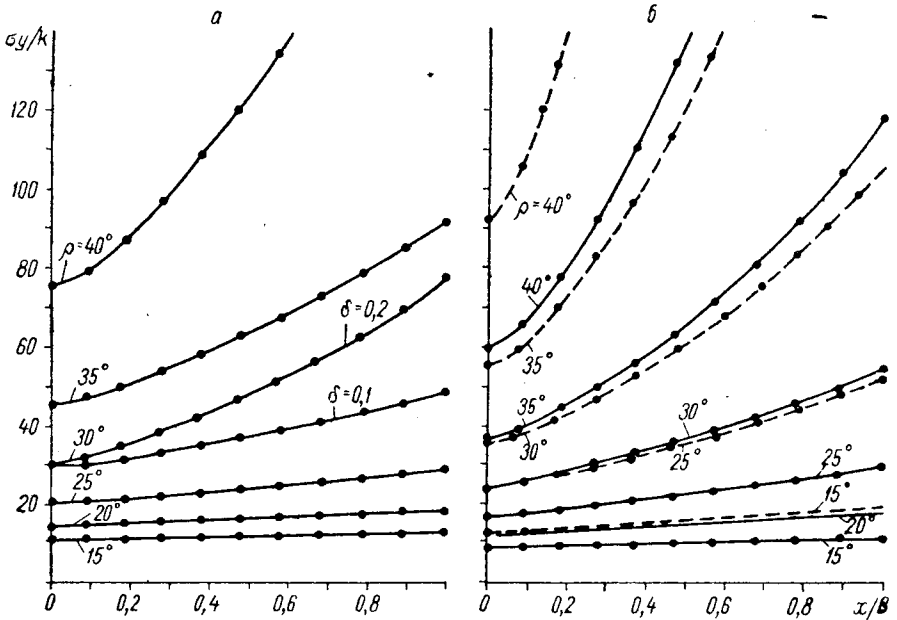


Рис. 86. Характер изменения безразмерного предельного давления под штампом единичной ширины в зависимости от угла внутреннего трения ρ и параметров δ и δ_0 при неоднородности вида (128)
 $\delta = \delta_0 = 0,1$.

$a - \delta_1 = 0$; $b - \delta_1 = 0,1$ и $\delta_1 = -0,1$ (штриховые линии).

($\delta_1 = 0$) штампа. На рис. 87 приведены сетка характеристик и эпюра предельного давления под единичным штампом ($B = 1$) при $k_0 = 1$, $\rho = 20^\circ$, некоторых значениях параметра δ и δ_0 в зависимости от угла α , изменяющегося в пределах от 0 до 120° . Рас-

пределение предельного давления под штампом в зависимости от угла α при

$$\rho_0 = 20^\circ; \quad k_0 = 1; \quad \delta = 0,2; \quad \delta_0 = \begin{cases} 0,2 \\ 0 \end{cases}; \quad \delta_1 = 0$$

показано на рис. 88. В табл. 40, как и в табл. 39, приведена величина σ_y^{cp}/k_0 и отношение OA_0/OA_3 .

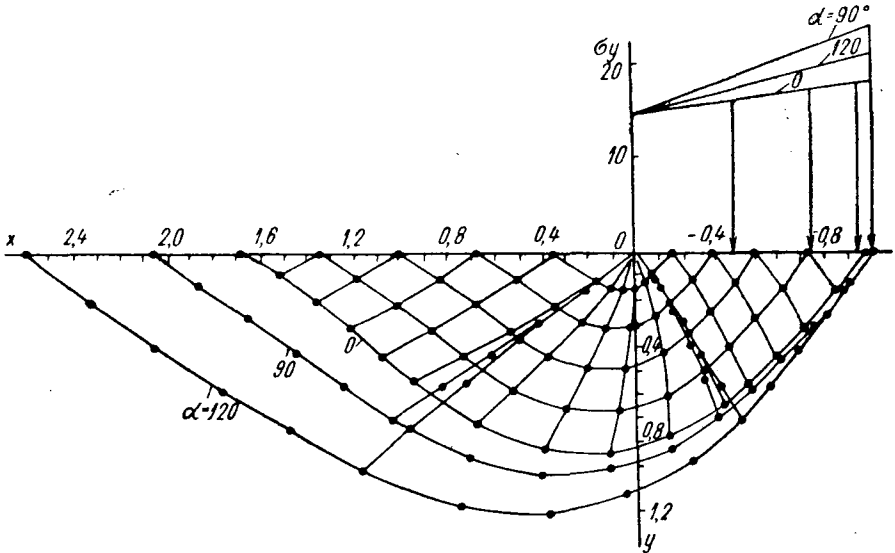


Рис. 87. Сетка характеристик и эпюры предельного давления под штампом, внедряемым в полуплоскость с неоднородностью вида (130).

$$k_0 = 1; \quad \rho = 20^\circ; \quad \delta = \delta_0 = 0,2; \quad \alpha \in [0, 120^\circ].$$

В работе [135] задача о несущей способности полуплоскости с неоднородностью (130) решалась методом малого параметра. В результате решения получена зависимость для определения несущей способности полуплоскости при $\delta_0 = \delta_1 = 0$:

$$p = k_0 \operatorname{ctg} \rho \left[\frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \exp(\pi \operatorname{tg} \rho) - 1 \right] - \left(C_1 + \frac{2 \cos \alpha \cos \rho}{1 - \sin \rho} \right) \delta k_0 x, \quad (132)$$

где

$$C_1 = \frac{\left\{ A \exp(1,5\pi \operatorname{tg} \rho) + \frac{1}{9 \operatorname{tg}^2 \rho + 1} [\sin(\varepsilon - \alpha) - 3 \operatorname{tg} \rho \cos(\varepsilon - \alpha)] + [\sin \alpha \cos \varepsilon (1 - \sin \rho) - \cos \alpha \sin \varepsilon (1 + \sin \rho)] \right\}}{\left\{ [\sin \varepsilon \cos \rho + \cos \varepsilon (1 + \sin \rho)] \frac{\sin \rho}{1 + \sin \rho} \right\}};$$

$$A = \frac{1}{9 \operatorname{tg}^2 \rho + 1} [3 \operatorname{tg} \rho \sin(\varepsilon - \alpha) + \cos(\varepsilon - \alpha)] - (1 + \sin \rho) [\cos(\varepsilon - \alpha) + 2 \sin \varepsilon \cos \alpha \operatorname{tg} \rho].$$

Значения безразмерного среднего предельного давления и отношения ширины области к ширине целика-штампа в задаче о несущей способности кровли (почвы) выработки с неоднородностью вида (130) при внедрении в нее «гладкого» целика

α°	$\delta = 0,2; \delta_0 = 0; \delta_1 = 0$				$\delta = \delta_0 = 0,2; \delta_1 = 0$	
	$\rho = 20^\circ$		$\rho = 30^\circ$		$\rho = 20^\circ$	
	σ_y^p/k_0	OA_0/OA_3	σ_y^p/k_0	OA_0/OA_3	σ_y^p/k_0	OA_0/OA_3
0	16,39	1,843	36,77	2,833	16,34	1,690
15	16,75	1,813	37,72	2,801	17,24	1,657
30	16,98	1,812	38,08	2,821	18,02	1,661
45	17,12	1,840	37,93	2,897	18,65	1,700
60	16,99	1,901	36,98	3,026	19,51	1,776
75	16,76	1,991	35,84	3,231	19,23	1,890
90	16,35	2,129	33,85	3,540	19,02	2,074
105	15,85	2,306	31,76	3,984	18,46	2,286
120	15,20	2,551	29,19	4,705	17,52	2,595

Формула (132) дает результаты, хорошо согласующиеся с результатами, приведенными на рис. 88. Другие примеры использования метода малого параметра при решении задач теории предельного равновесия можно найти в работе [138].

Полученные выше решения задачи о предельном равновесии неоднородной среды под жестким штампом при условии одностороннего выдавливания могут быть использованы для решения аналогичной задачи при условии двустороннего выдавливания из-под штампа. На рис. 89 представлены результаты решения такой задачи в виде сетки характеристик и эпюры предельного давления под штампом, внедряемым наклонной силой в полуплоскость с неоднородностью вида (128). Решение получено наложением двух решений по методу М. В. Малышева [18].

Рассмотрим теперь задачу о несущей способности полупространства $z \geq 0$ при внедрении в него жесткого штампа с круглым в плане плоским гладким основанием ($r \leq R$) (рис. 90). Пусть нагрузка на штамп прикладывается в центре, и пусть среда подчиняется условию Кулона. Будем полагать, что условие Хаара—Кармана имеет место.

Рассматриваемая задача является осесимметричной задачей теории предельного равновесия при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} \sigma_z = q; \quad \tau_{rz} = 0 \quad & \text{при } z = 0; \quad r > R; \\ \tau_{rz} = 0 \quad & \text{при } z = 0; \quad r \leq R, \end{aligned} \quad (133)$$

где q — пригрузка (можно считать, что штамп первоначально заглублен). Поскольку имеет место гладкий штамп, будем различать в плоскости rz три области: $A_0O_1A_1$; $A_1O_1A_2$; A_2O_1O (рис. 90).

Рассмотрим вначале случай весомой несвязной среды ($\gamma \neq 0$; $k = 0$). Граничные условия (133) для этого случая можно записать в виде

$$\sigma = \frac{q}{1 - \sin \rho}; \quad \varphi = 0 \text{ на } A_0O_1;$$

$$\sigma = \frac{q}{1 - \sin \rho} \exp(2\varphi \operatorname{tg} \rho); \quad \varphi \in [0, \pi/2] \text{ в точке } O_1; \quad (134)$$

$$\varphi = \pi/2 \text{ на } OO_1.$$

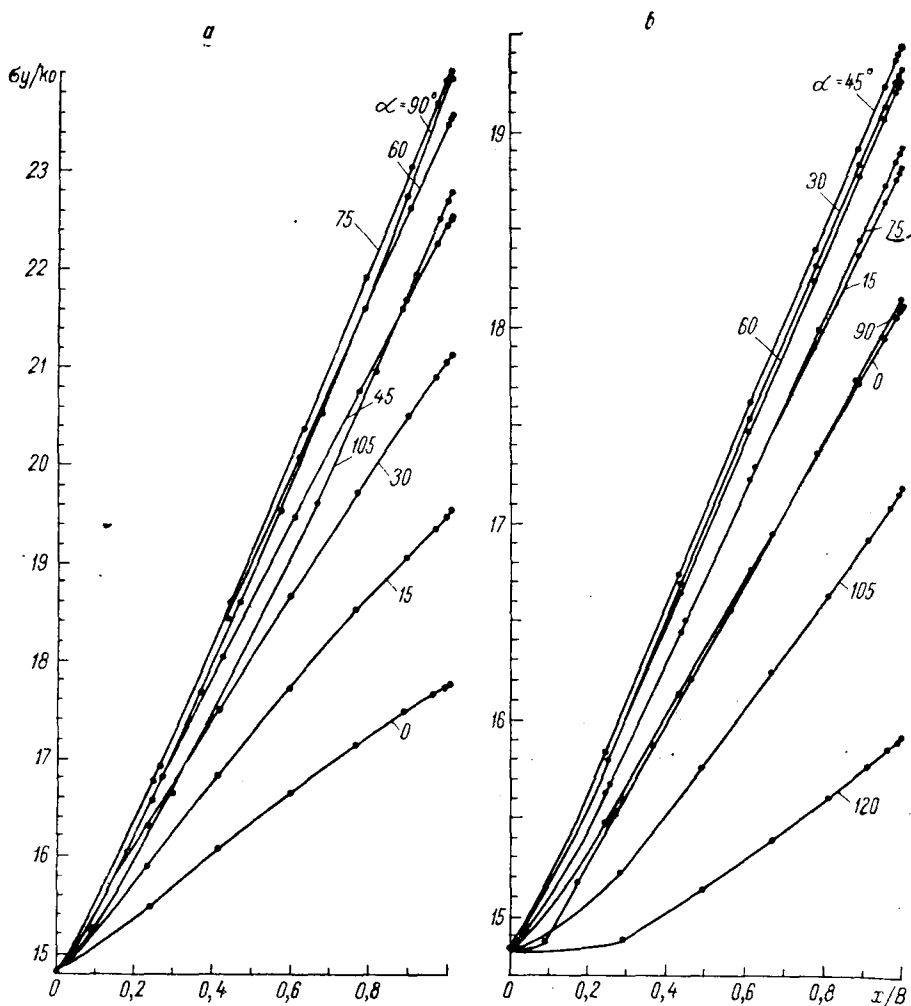


Рис. 88. Характер изменения безразмерного предельного давления под штампом в зависимости от угла α при неоднородности вида (130).

$\rho = 20^\circ$; $\delta = 0,2$; $\delta_1 = 0$. а — $\delta_0 = 0,2$; б — $\delta_0 = 0$.

Рис 89. Сетка характеристик и эпюра предельного давления под шероховатым штампом, внедряемым наклонной силой в полуплоскость с неоднородностью вида (128).

$$\rho = 30^\circ; \delta = 0; \delta_0 = 0,2; \delta_1 = 0,1.$$

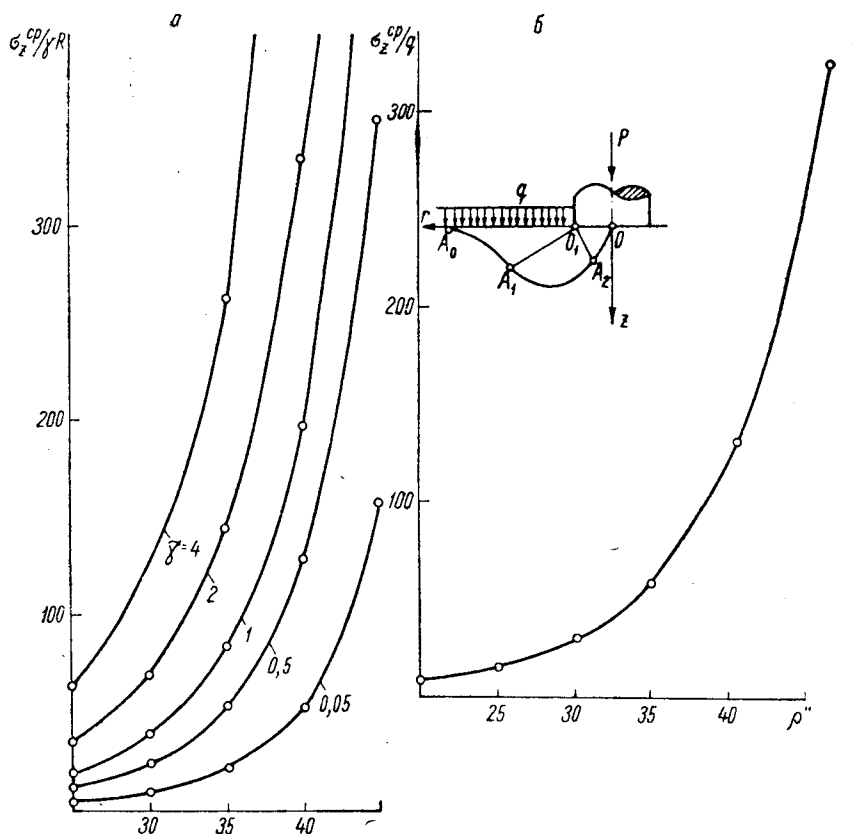
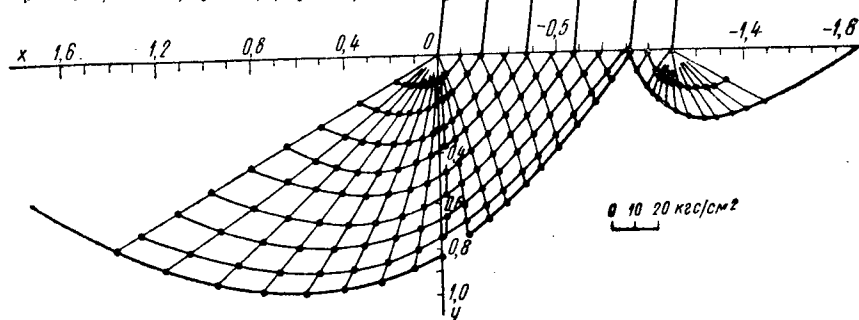


Рис. 90. Зависимость безразмерного среднего предельного давления под круглым штампом в задаче о несущей способности однородного полупространства от угла внутреннего трения.

а — для весомой несвязной среды; б — для невесомой несвязной среды.

Численное решение проведем в безразмерных координатах, относя σ и q к γR , а координаты r, z к радиусу штампа R . Для решения задачи воспользуемся уравнениями характеристик (92). Решение задачи сводится к численному интегрированию системы (92) в области $A_0O_1A_1$ по типу задачи Коши, в области $A_1O_1A_2$ по типу вырожденной задачи Гурса и в области A_2O_1O по типу смешанной задачи с учетом граничных условий (134).

Результаты численного решения задачи о внедрении штампа в полупространство, представленное весоной несвязной средой, при некоторых значениях $\tilde{q} = q/(\gamma R)$ и ρ сведены в табл. 41.

Таблица 41

Значения безразмерного среднего предельного давления $\sigma_z^{CP}/(\gamma R)$ и отношения радиуса области предельного состояния к радиусу штампа OA_0/OO_1 в задаче о несущей способности полупространства, представленного однородной весоной несвязной средой

\tilde{q}	$\rho = 25^\circ$	$\rho = 30^\circ$	$\rho = 35^\circ$	$\rho = 40^\circ$	$\rho = 45^\circ$
$\sigma_z^{CP}/(\gamma R)$					
0.05	4.03	9.02	21.15	53.74	158.08
0.5	11.79	24.07	53.12	128.58	354.23
1.0	19.60	39.28	84.04	198.48	532.49
2.0	34.89	68.42	144.31	334.53	873.92
4.0	64.98	126.58	263.02	598.08	1540.60
OA_0/OO_1					
0.05	2.00	2.37	2.81	3.51	4.60
0.5	2.30	2.63	3.24	4.00	5.12
1.0	2.40	2.84	3.40	4.21	5.40
2.0	2.50	2.90	3.52	4.40	5.60
4.0	2.60	3.00	3.60	4.59	5.78

По значениям, приведенным в табл. 41, построен график зависимости безразмерного среднего предельного давления $\sigma_z^{CP}/(\gamma R)$ от угла внутреннего трения ρ при некоторых значениях \tilde{q} (рис. 90, а). Эта графическая зависимость позволяет сравнительно просто определить несущую способность полупространства при внедрении в него круглого в плане жесткого гладкого штампа.

В случае невесоной несвязной среды ($\gamma = k = 0$) табулирование решения задачи о внедрении жесткого гладкого штампа существенно упрощается. Для перехода к безразмерным координатам в этом случае достаточно отнести σ и q к \tilde{q} , а координаты r, z — к R . Результаты численного решения задачи о внедрении штампа в полупространство, представленное невесоной несвязной средой, при некоторых значениях ρ сведены в табл. 42, где даны величины безразмерного среднего предельного давления под штампом σ_z^{CP}/q , как и в табл. 41, и отношение OA_0/OO_1 .

Таблица 42

Значения безразмерного среднего предельного давления и отношения радиуса области предельного состояния к радиусу штампа в задаче о несущей способности полупространства, представленного однородной невесомой несвязной средой

ρ°	$N_q = \sigma_z^{cp}/q$	OA_0/OO_1
20	8,24	2,36
25	14,98	2,72
30	28,71	3,18
35	58,87	3,84
40	131,42	4,80
45	329,55	6,18

Таблица 43

Значения безразмерного среднего предельного давления σ_z^{cp}/k и отношения радиуса области предельного равновесия к радиусу штампа OA_0/OO_1 в задаче о несущей способности полупространства, представленного однородной весомой связной средой ($\bar{\gamma} = 1$)

ρ°	σ_z^{cp}/k	OA_0/OO_1
15	14,82	1,996
20	22,13	2,227
25	34,97	2,528
30	58,92	2,913
35	108,93	3,481
40	224,84	4,261

По данным табл. 42 построен график (рис. 90, б), позволяющий определять несущую способность полупространства, представленного невесомой несвязной средой при любом ρ без громоздких вычислений.

Рассмотрим теперь случай невесомой неоднородной связной среды ($\gamma = 0$; $k \neq 0$) с неоднородностью частного вида:

$$k = k_0(1 + \delta z); \quad \rho = \text{const.} \quad (135)$$

Отметим, что при неоднородности вида

$$k = k_0 + k_1(r; z); \quad \rho = \text{const} \quad (136)$$

задача о несущей способности неоднородного полупространства при внедрении в него круглого в плане штампа всегда может быть сведена к задаче о несущей способности однородного полупространства с массовыми силами вида [138]:

$$X = \frac{\partial k_1}{\partial r} \text{ctg } \rho; \quad Y = \frac{\partial k_1}{\partial z} \text{ctg } \rho + \gamma. \quad (137)$$

Если k_1 — функция первой степени от r , z , то массовые силы X , Y — константы и задача о несущей способности неоднородного полупространства сводится к задаче о несущей способности однородного полупространства с постоянными массовыми силами.

Для неоднородности (135), согласно сказанному выше, достаточно иметь решение задачи о несущей способности основания, представленного весомой однородной средой. Рассмотрим эту задачу для случая, когда пригрузка q равна нулю. Решение этой задачи строится

численно по аналогии с рассмотренными ранее при следующих граничных условиях:

$$\sigma = \frac{k \operatorname{ctg} \rho}{1 - \sin \rho}; \quad \varphi = 0 \quad \text{на} \quad A_0 O_1;$$

$$\sigma = \frac{k \operatorname{ctg} \rho}{1 - \sin \rho} \exp(2\varphi \operatorname{tg} \rho); \quad \varphi \in [0, \pi/2] \quad \text{в точке} \quad O_1; \quad (138)$$

$$\varphi = \pi/2 \quad \text{на} \quad O O_1.$$

Численное решение проведем в безразмерных величинах, относя σ к k , а координаты r, z к R при единственном параметре $\tilde{\gamma} = \gamma R/k$, равном единице. Результаты численного решения задачи о несущей способности однородного весомого полупространства при различных значениях угла ρ сведены в табл. 43.

Рассмотрим теперь задачу о несущей способности неоднородного невесомого полупространства $z \geq 0$ (рис. 90) с неоднородностью вида

$$k = k_0 \exp(\delta z), \quad \rho = \operatorname{const}. \quad (139)$$

Пусть, как и в предыдущем случае, пригрузка q отсутствует. В этом случае уравнения характеристик (94) примут вид [137]:

$$dz = dr \operatorname{tg}(\varphi \mp \varepsilon); \quad d\sigma \mp 2\sigma \operatorname{tg} \rho d\varphi =$$

$$= \left\{ -\frac{\sigma}{r} \operatorname{tg} \rho [\cos \rho + \cos(2\varphi \pm \rho)] \mp k\delta \right\} dr +$$

$$+ \left\{ -\frac{\sigma}{r} \operatorname{tg} \rho [\pm \sin \rho + \sin(2\varphi \pm \rho)] + k\delta \operatorname{ctg} \rho \right\} dz. \quad (140)$$

Численное решение задачи заключается в интегрировании этой системы по типу задачи Коши, вырожденной задачи Гурса и смешанной задачи при граничных условиях (138). Переходя к безразмерным величинам и относя σ к k_0 , а координаты r, z к радиусу штампа R , приведем результаты численного решения поставленной задачи при некоторых значениях угла внутреннего трения ρ и параметра δ . Отметим, что при $\delta = 0$ сформулированная задача переходит в однородную, анализ которой был выполнен В. Г. Березанцевым [18] и А. Коксом, Г. Исоном, Х. Хопкинсом [157].

Результаты численного решения задачи о несущей способности невесомого неоднородного полупространства с неоднородностью вида (139) при внедрении в него круглого гладкого штампа при различных значениях угла ρ и параметра δ сведены в табл. 44. Там же для сравнения приведены некоторые величины (они помещены в скобках), полученные другими авторами (В. Г. Березанцевым, А. Коксом, Г. Исоном и Х. Хопкинсом).

Вернемся к весомой однородной связной среде ($\gamma \neq 0$; $k \neq 0$). Табулирование решения задачи о внедрении штампа в полупространство, представленное такой средой, при $q \neq 0$, является наиболее трудоемким, так как переход к безразмерным координатам

Значения безразмерного среднего предельного давления и отношения радиуса области предельного равновесия к радиусу штампа в задаче о несущей способности невесомого неоднородного полупространства с неоднородностью вида (139)

ρ°	σ_z^{CP}/k_0					OA_0/OO_1					$N_c = \pi \frac{\sigma_z^{CP}}{k_0}$
	$\delta = 0,5$	0,2	0,1	0	-0,1	0,5	0,2	0,1	0	-0,1	0
0				(5,69)					(1,58)		(17,8)
10				(9,98)					(1,88)		(29,0)
15	15,19	14,74	14,19	13,78 (13,9)	13,26	1,920	2,008	2,044	2,084 (2,09)	2,128	43,4
20	23,27	21,25	20,55	19,87 (20,1)	19,21	2,160	2,265	2,308	2,354 (2,37)	2,407	62,5 (62,4)
25	36,04	32,29	31,16	30,02 (30,5)	28,93	2,480	2,6017	2,654	2,710 (2,73)	2,773	94,2
30	58,85	52,43	50,14	48,02 (49,3)	46,05	2,897	3,0540	3,117	3,188 (3,21)	3,269	151,0 (146,0)
35	105,69	91,31	86,60	82,86 (85,8)	78,64	3,468	3,6800	3,757	3,853 (3,39)	3,960	261,0
40	205,46	174,99	164,59	155,67 (164)	146,41	4,278	4,575	4,675	4,811 (4,86)	4,970	490,0

приводит к необходимости табулирования решения при двух параметрах $\tilde{\gamma} = \gamma R/k$ и $\tilde{q} = q/k$. На рис. 91 приведен график изменения величины σ_z^{cp}/k в зависимости от ρ при $\tilde{q} = 0$ и двух значениях $\tilde{\gamma}$ ($\tilde{\gamma} = 0$ и $\tilde{\gamma} = 1$), построенный по данным табл. 43 и 44. Отметим, что почти все практически интересные случаи (при $\tilde{q} = 0$) лежат в пределах изменений $\tilde{\gamma}$ от нуля до единицы; при больших значениях коэффициента сцепления $\tilde{\gamma}$ близко к нулю.

Учитывая, что зависимость между $\sigma_z^{cp}/(\gamma R)$ и $q/(\gamma R)$ (табл. 41) с достаточной для инженерных расчетов точностью аппроксимируется линейной функцией, представим σ_z^{cp} в случае несвязной среды ($k = 0$) в виде

$$p = \sigma_z^{cp} = N_\gamma \gamma R + N_q q. \quad (141)$$

Таблица 45

Значения
безразмерных коэффициентов
 N_γ и N_q при некоторых значениях
угла внутреннего трения

ρ°	N_γ	N_q
25	4,5	15,0
30	9,5	29,8
35	23,0	60,0
40	69	131
45	180	350

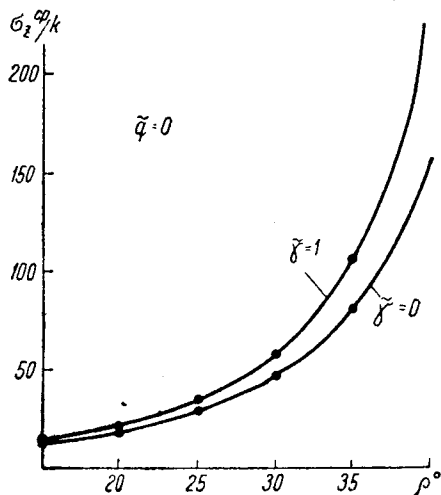


Рис. 91. Зависимость безразмерного среднего предельного давления под круглым штампом в задаче о несущей способности однородного полупространства от угла внутреннего трения ρ при некоторых значениях параметра $\tilde{\gamma}$ при $\tilde{q} = 0$.

Безразмерные коэффициенты N_γ и N_q для этого выражения при некоторых значениях угла ρ , вычисленные по данным табл. 41 и 42, приведены в табл. 45.

Учитывая, что зависимость между $(\sigma_z^{cp} + k \operatorname{ctg} \rho)/(\gamma R)$ и $(q + k \operatorname{ctg} \rho)/(\gamma R)$ также линейна, представим σ_z^{cp} в случае связной среды ($k \neq 0$) в виде следующего выражения:

$$p = \sigma_z^{cp} = N_\gamma \gamma R + N_q q + N_k k, \quad (142)$$

коэффициенты N_γ , N_q , N_k для которого, определенные по данным табл. 43 и 44, сведены в табл. 46.

По средним значениям табл. 42, 45 и 46 построен график (рис. 92) изменения коэффициентов N_γ , N_q и N_k в зависимости от угла внутреннего трения. Там же, по данным работы [179], приведены кривые изменения этих же коэффициентов в зависимости от ρ для шероховатого штампа. Заштрихованные на графике области между кривыми

Значения безразмерных коэффициентов N_γ , N_q и N_k
при некоторых значениях угла внутреннего трения

ρ°	$N_\gamma = (\sigma_z^{cp}/k)_{\gamma=1} -$ $-(\sigma_z^{cp}/k)_{\gamma=0}$	$N_q = N_k \operatorname{tg} \rho + 1$	$N_k = (\sigma_z^{cp}/k)_{\gamma=0}$
15	1,0	4,7	13,8
20	2,2	8,2	19,9
25	5,0	15,1	30
30	10	29,5	48
35	24	60	82,7
40	69	132	156

для гладкого и шероховатого штампов являются областями теоретически возможных значений коэффициентов N_γ , N_q и N_k для реальных жестких штампов. Для сравнения на графике (рис. 92) приведены также кривые N_γ , N_q и N_k , построенные по данным К. Терцаги, Р. Пека и В. Г. Березанцева [18]. Некоторые из этих кривых, как и следовало ожидать, проходят через области «возможных значений».

Преимущество графика (рис. 92) над графиками (рис. 90, 91) бесспорно, однако график на рис. 92 является приближенным, поскольку зависимости

$$\sigma_z^{cp}/(\gamma R) = f[q/(\gamma R)] \quad \text{и} \quad (\sigma_z^{cp} + k \operatorname{ctg} \rho)/(\gamma R) = F[(q + k \operatorname{ctg} \rho)/(\gamma R)] \quad (143)$$

не являются линейными. При этом наибольшее отклонение от линейности наблюдается в области малых значений величины $q/(\gamma R)$. По-видимому, оно будет иметь место и в области малых значений величины $(q + k \operatorname{ctg} \rho)/(\gamma R)$.

При решении рассмотренных задач изменением формы границы пренебрегалось. Это допущение, широко используемое в механике сплошной среды, справедливо для широкого круга вязных сред (в том числе, для горных пород, типичных для месторождений калийных солей). Однако в ряде случаев для некоторых сред при внедрении в них штампа предельному состоянию среды под штампом и выдавливанию среды из-под штампа предшествует внедрение штампа в полупространство на глубину h_0 , соизмеримую с диаметром самого штампа. Однако, как показывают эксперименты [134], и в этом случае можно исходить из полученных решений, в частности формул (141) и (142). Однако величину заглубления h_0 следует при этом ввести в соотношения (141) и (142) в качестве пригрузки

$$q = \gamma h_0. \quad (144)$$

Так как процесс осадки до момента «предельного равновесия» можно с удовлетворительной точностью описать уравнением

$$h_0/R = m p^n, \quad (145)$$

где m и n — некоторые константы материала, то соотношения (141) и (142) следует записывать в виде

$$p = N_\gamma \gamma R + N_q (q + \gamma R m p^n); \quad (146)$$

$$p = N_\gamma \gamma R + N_q (q + \gamma R m p^n) + N_k k, \quad (147)$$

откуда p может быть получено простой итерацией.

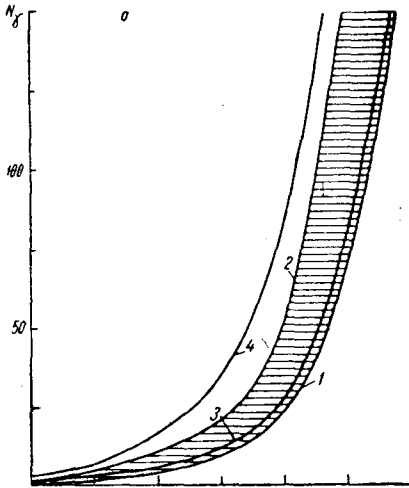
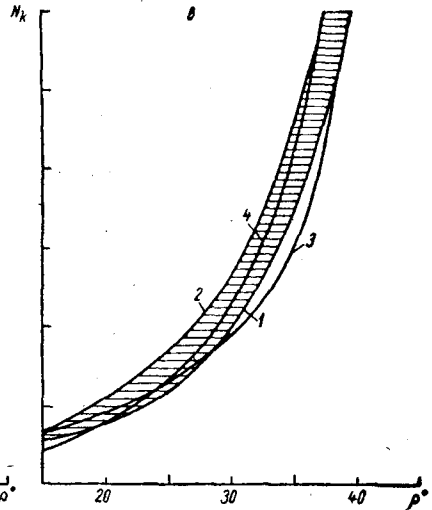
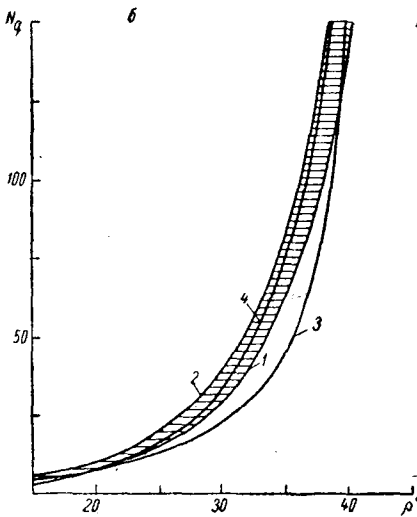


Рис. 92. Зависимость безразмерных коэффициентов N_γ , N_q и N_k от угла внутреннего трения.

1 — гладкий штамп; 2 — шероховатый штамп; 3 — по данным К. Терцаги и Р. Пека; 4 — по данным В. Г. Безрезанцева [18].



Остановимся теперь на точности полученных решений, а также точности проведенных вычислений.

Чтобы решения теории предельного равновесия, полученные в этом параграфе, были полностью строгими, необходимо дополнить их полями скоростей, показав, что мощность напряжений в зоне

предельного равновесия положительна и что в принятой жесткой зоне существует статически допустимое поле напряжений. Кроме того, для осесимметричной задачи необходимо еще показать, что вектор скорости деформации на ребре пирамиды предельного равновесия лежит между нормальными к граням, проходящим через это ребро.

Отметим, что если для грунта и горных пород считать справедливым постулат устойчивости материала (постулат Друкера) и следующий из него ассоциированный закон течения, то уравнения для скоростей не зависят явно от вида неоднородности и совпадают с уравнением скорости для однородной среды [134].

В настоящей работе статически допустимые поля напряжений не были дополнены полями скоростей. Однако нет никаких оснований для опасений, что мощность напряжений в области предельного равновесия в рассмотренных задачах будет отрицательна, а потому можно полагать, что полученные величины предельного давления, согласно первой предельной теореме [173], являются верхними границами для точных их значений. Более того, метод, основанный на теоремах Дж. Бишопа [153], может быть использован и в рассмотренных задачах для того, чтобы показать возможность продолжения статически допустимых полей напряжения в жесткую область без нарушения равновесия и условия предельного равновесия. А потому, согласно второй предельной теореме [173], полученные величины предельного давления являются также и нижними границами для точных их значений и, следовательно, точными значениями.

Для получения численных решений задач о несущей способности неоднородной полуплоскости при внедрении в нее жесткого штампа в работе использовался метод Массо в варианте Милна: поправка в узлах сетки характеристик проводилась последовательно несколько раз до получения совпадения n -го и $n - 1$ -го приближений в пределах наперед заданной точности. Понимая, что метод Массо в любом варианте существенно зависит от шага h , в работе были проведены специальные исследования по выбору оптимального шага и групп десятичных знаков для заданной точности в итерационном процессе поправки в узлах сетки. Этот вопрос решался путем последовательного сгущения сетки характеристик и сопоставления получающихся при этом результатов.

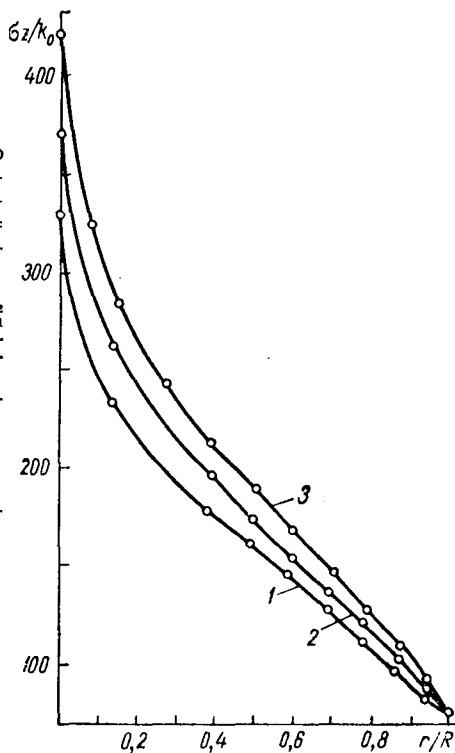
На рис. 93 приведены результаты решения задачи о несущей способности однородного невесомого полупространства (осесимметричная задача) при различной частоте сетки. Как видно из рис. 93 (кривая 2), при делении отрезка O_1A_0 на 10 частей, а угла $A_1O_1A_2$ на 20 частей величина несущей способности увеличилась. При последующих более частых разбиениях отрезка O_1A_0 и угла $A_1O_1A_0$ наблюдалось дальнейшее увеличение предельного давления, однако процесс нарастания затухал. И, наконец, после того, как был получен результат при разбиении отрезка O_1A_0 на 20 частей, а угла $A_1O_1A_2$ на 40 частей (кривая 3), дальнейшее увеличение частоты (густоты)

сетки характеристик практически не влияло на величину несущей способности. Отметим, что кривая 3 получена при поправке угла φ в узлах сетки с точностью до 10^{-5} рад в отличие от кривых 1 и 2, полученных при поправке угла φ в узлах сетки с точностью до 10^{-3} рад. Исходя из этих соображений при решении осесимметричных задач теории предельного равновесия методом Массо в варианте Милна с целью получения решения с ошибкой менее 4—5% рекомендуется отрезок O_1A_0 разбивать на 20 частей, угол $A_1O_1A_2$ —

Рис. 93. Распределение предельного давления под штампом в задаче о несущей способности однородного невесомого полупространства ($k_0 = 1$; $\rho = 40^\circ$) при различной частоте сетки характеристик.

1 — при делении отрезка O_1A_0 и угла $A_1O_1A_2$ на 10 частей; 2 — при делении отрезка O_1A_0 на 10 частей и угла $A_1O_1A_2$ на 20 частей; 3 — при делении отрезка O_1A_0 на 20 частей и угла $A_1O_1A_2$ на 40 частей.

Номера кривых	σ_{\min} / k_0	σ_{\max} / k_0	$\sigma_{\text{ср}} / k_0$	$OA_0 / 100$
1	75,31	329,35	133,00	4,700
2	75,31	371,46	144,03	4,732
3	75,31	421,57	155,67	4,810



на 40 частей; поправку угла φ в узлах сетки проводить с точностью 10^{-5} рад.

Решение этого же вопроса для плоской задачи было проведено аналогичным образом. Величина предельного давления под штампом с достаточной для инженерных расчетов точностью в плоской задаче может быть определена при соблюдении следующих условий: отрезок OA_0 области A_0OA_1 (рис. 85) должен быть разбит на 10 частей; угол A_1OA_2 — на 20 частей; поправка угла φ в узлах сетки должна быть не менее 10^{-3} рад. Эти рекомендации использовались при решении рассмотренных выше задач.

Значение приведенных рассуждений становится ясным после сопоставления одного численного решения осесимметричной задачи, полученного при разбивке отрезка O_1A_0 на 4 части, а угла $A_1O_1A_2$

на 6 частей, с решением этой же задачи, полученным с соблюдением вышеперечисленных условий (рис. 94, а). Касаясь вопроса точности метода характеристик, попутно отметим, что графический метод Массо в варианте Ишлинского — Голушкевича позволяет получать решение осесимметричной задачи теории предельного равновесия с хорошей точностью. Это следует из сопоставления графического решения А. Ю. Ишлинского [59] с численным решением этой же задачи Р. Т. Шилда [145]. Сопоставление одного графического

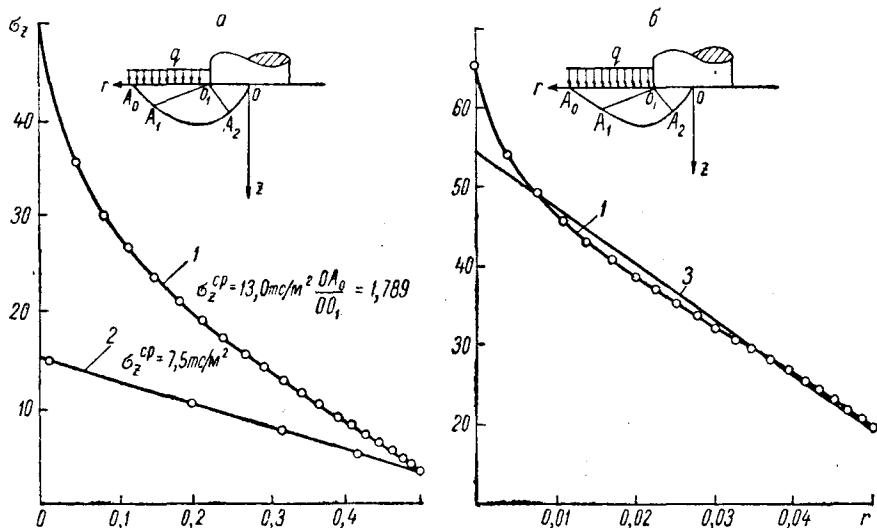


Рис. 94. Распределение предельного давления под штампом в задаче В. Г. Березанцева [17].

а — $\rho = 30^\circ$; $k = 0$; $\gamma = 1,6 \text{ т/м}^3$; $q = 0,2 \text{ тс/м}^2$; б — $\rho = 30^\circ$; $k = 0,58$; $\gamma = 0$; $q = 0,10 \text{ тс/м}^2$. 1 — с соблюдением требований к частоте сетки характеристики; 2 — без соблюдения этих требований (численное решение); 3 — решение, выполненное графически (методом Ишлинского — Голушкевича).

решения В. Г. Березанцева [17] с численным решением (рис. 94, б) подтверждает этот вывод.

Нами не проводилось сопоставления полученных в работе решений о несущей способности целиков с аналогичными решениями М. А. Липсона [75], полученными графическим методом С. С. Голушкевича. Но можно надеяться, что эти решения также совпадают. А потому можно полагать, что графический метод Массо в варианте А. Ю. Ишлинского — С. С. Голушкевича позволяет получать решение задач теории предельного равновесия с хорошей точностью и, следовательно, может быть рекомендован для практического использования.

Ранее рассматривались примеры, в которых коэффициент сцепления и угол внутреннего трения изменялись плавно по линейному или экспоненциальному закону. Рассмотренные примеры легко дополнить случаями, когда неоднородность описывается некоторой

показательной или степенной функцией. Такой плавно изменяющейся неоднородностью можно аппроксимировать широкий класс слоистых сред с прочными контактами, механические свойства которых близки к среднему арифметическому самих слоев, а механические свойства каждого из слоев незначительно отличаются от свойств смежных слоев. Естественно, что этими случаями не исчерпывается все многообразие неоднородности строения реального массива.

В частности, представляет интерес задача о несущей способности слоистой полуплоскости и полупространства со слабыми контактами, т. е. с контактами, на которых коэффициент сцепления весьма близок к нулю. Частным видом такой слоистой среды является однородная среда с трещинами, которые можно при решении задачи о несущей способности отождествить со слабыми прослойками. Представляет интерес и задача о влиянии более прочного подстилающего слоя на несущую способность полуплоскости или полупространства с неоднородностью вида:

$$\begin{aligned} k = k_0 = \text{const}; \quad \rho = \rho_0 = \text{const} \quad \text{при } 0 \leq y \leq h; \\ k = k_1 = \text{const}; \quad \rho = \rho_1 = \text{const} \quad \text{при } y > h, \end{aligned} \quad (148)$$

когда оба слоя имеют соизмеримые коэффициенты сцепления и угол внутреннего трения. Во всех этих случаях аппроксимирующие функции получаются «скачкообразными». Это существенно усложняет решение по сравнению со случаем «плавно изменяющейся» неоднородности.

Проведенные предварительные исследования показали, что разбивка, принятая для «плавно изменяющейся» неоднородности, в этом случае оказывается малоэффективной: вблизи «особенности» линии скольжения одного семейства начинают разбегаться либо, наоборот, пересекаться. Поэтому для успешного построения численного решения задач со «скачкообразной» неоднородностью требуется более густая сетка характеристик вблизи «особенности». Более того, предварительное численное решение этих задач показало, что при некоторой малой толщине переходного слоя ε построить решение указанным методом практически не удастся. В таких случаях, как нам представляется, необходимо строить разрывное решение.

§ 5. Примеры расчета геометрических параметров выработок по разрушающим нагрузкам

Пример 1. Определение основных параметров камерной системы при следующих данных: глубина заложения выработок $H = 500$ м; средний объемный вес налегающей толщи массива $\gamma = 2,5$ т/м³; высота слоя и высота выработки $h = 3,0$ м.

Схематический геологический разрез налегающей толщи массива представлен на рис. 95, а. Физико-механические характеристики слоев, находящихся в непосредственной близости от выработки, проходимой по слою 2, сведены в табл. 47. Контакты между слоями — тонкие глинистые прослойки, позволяющие пренебречь трением и сцеплением на контактах слоев.

Механические характеристики массива к примеру 1

Номер слоя	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	ρ°	k , кгс/см ²	$\sigma_{сж}/\tau_p$	E , 10 ⁵ кгс/см ²
1'	195	15	75	—	1,0
1	155	10	66	11	1,5
2	600	20	210	—	—
3	260	15	100	—	—

Расчет параметров системы в рассматриваемом случае проведем по несущей способности наиболее слабого элемента системы целик — кровля — почва. Нагрузку на каждый элемент этой системы оценим по формуле (65).

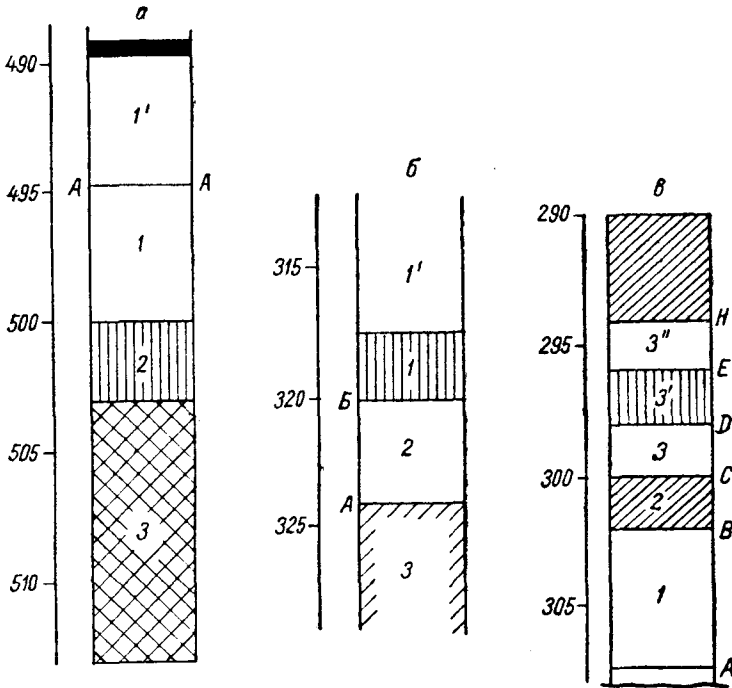


Рис. 95. Схематический геологический разрез налегающей толщи массива к примерам 1, 2, 4.

Перейдем к определению несущей способности элементов выработки. В силу того, что целик представлен однородной средой, а на контактах слоев трение отсутствует, несущая способность целика не зависит от отношения a/h и может быть найдена по формуле (98):

$$p_2 = \sigma_{сж} = 600 \text{ кгс/см}^2. \quad (149)$$

Так как формула (98) справедлива при условии (99), то при вычислении ширины целика a будем иметь в виду, что a должно быть больше или равно 2,1 м.

Несущая способность почвы в рассматриваемом примере в силу ее однородности и отсутствия трения на контакте целик — почва определится по формуле (96):

$$p_3 = 100 \operatorname{ctg} 15^\circ \left[\frac{1 + \sin 15^\circ}{1 - \sin 15^\circ} \exp(\pi \operatorname{tg} 15^\circ) - 1 \right] = 1100 \text{ кгс/см}^2. \quad (150)$$

В рассматриваемом примере кровля представлена пачкой слоев со слабыми глинистыми прослойками. Поэтому, как представляется на первый взгляд, для определения устойчивости кровли необходимо решать задачу о несущей способности неоднородной полушпоскости численно с использованием уравнений характеристик (94). Однако мощность нижнего слоя кровли, равная 5 м, достаточна для того, чтобы локальная область разрушения кровли в результате внедрения в него целика, как своеобразного штампа, не вышла на слабый контакт АА. Естественно, что для этого необходимо ограничить ширину целика некоторой величиной a_0 . Несущая способность кровли p_1 в этом случае будет найдена по формуле (96) и равна

$$p_1 = 66 \operatorname{ctg} 10^\circ \left[\frac{1 + \sin 10^\circ}{1 - \sin 10^\circ} \exp(\pi \operatorname{tg} 10^\circ) - 1 \right] = 550 \text{ кгс/см}^2. \quad (151)$$

Ширина целика, необходимая для выполнения данного условия, должна быть ограничена величиной

$$a = a_0 \leq 4h_2 \sin \epsilon \exp(-\epsilon \operatorname{tg} \rho) = 7.2 \text{ м}. \quad (152)$$

Сопоставив несущую способность целика, кровли и почвы, приходим к выводу, что в данном примере наиболее слабым элементом является кровля, т. е.

$$P_i \min = p_1 = 550 \text{ кгс/см}^2. \quad (153)$$

Подставляя в выражение (74) величину $p_1 = 550 \text{ кгс/см}^2$, получим соотношение, связывающее оптимальный пролет выработки l_* и оптимальную ширину целика a_* :

$$l_* = 1.2a_* \quad (2.1 \leq a_* \leq 7.2 \text{ м}). \quad (154)$$

Коэффициент запаса k_3 в соотношении (74) принят равным двум. Введение коэффициента запаса связано с тем обстоятельством, что не все исходные данные, необходимые в расчете, могут быть получены с одинаковой степенью достоверности.

Отметим, что если параметры системы определять из условия прочности целика, как того требует методика Л. Д. Шевякова [140], то соотношение между шириной целика и шириной камеры в рассматриваемом примере будет

$$l_* = 1.4 a_* \quad (a_* \geq 2.1 \text{ м}). \quad (155)$$

Сопоставление соотношений (153) и (155) показывает, что следование методике Л. Д. Шевякова в некоторых случаях может привести к существенно неверным результатам. Рассмотренный пример лишний раз подтверждает это, а также тот факт, что при выборе оптимальных параметров системы необходимо анализировать систему целик — кровля — почва в целом, а не только целик, как это следует из методики Л. Д. Шевякова. Если заранее известен наиболее слабый элемент в системе целик — кровля — почва, то, естественно, необходимость в определении несущей способности каждого элемента отпадает. Например, если известно, что вмещающие породы значительно прочней рудного тела, слагающего целики, то в расчете по первому предельному состоянию следует исходить из несущей способности целиков, и, следовательно, методика Л. Д. Шевякова в подобных случаях является единственно правильным решением.

Естественно возникает вопрос, при каком соотношении механических характеристик системы кровля — почва — целик можно ожидать разрушения кровли и почвы в областях над и под целиком. Иначе говоря, в каком случае использование методики Л. Д. Шевякова может привести к неверным результатам? На этот вопрос в случае неоднородности кровли и почвы дать однозначный ответ

не представляется возможным. Все будет зависеть от соотношения прочных и слабых слоев, попадающих в область предельного состояния, а также слабых глинистых прослоек. В случае однородной почвы и кровли задача упрощается и такие исследования можно провести.

На рис. 96 приведены соотношения между шириной целика и шириной камеры при одинаковых значениях предела прочности на одноосное сжатие и угла внутреннего трения кровли и целика (несущая способность кровли и целика определены по формулам (96) и (98) соответственно). В случае, если над камерой образуется область расслоения, то несущую способность кровли следует определять по формуле (97). Для этого случая соотношение между шириной целика и шириной камеры при одинаковых значениях предела прочности на одноосное

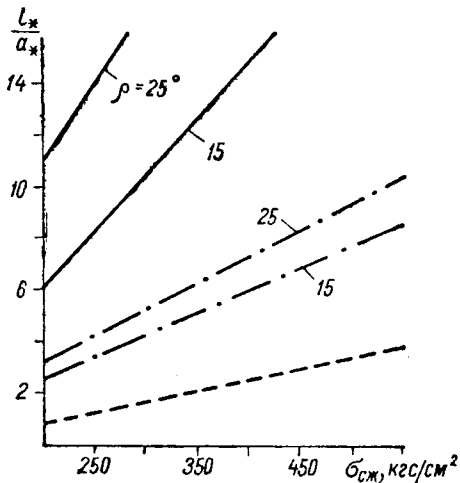


Рис. 96. Отношение оптимальной ширины камеры и целика при некоторых значениях предела прочности на одноосное сжатие, определенных по формуле (74) ($H = 500$ м; $\gamma = 2,2$ т/м³; $\alpha = 55^\circ$), где в качестве $p_{i \min}$ принимаются соотношения (96) и (97) — штрих-пунктирные линии и (98) — сплошные линии.

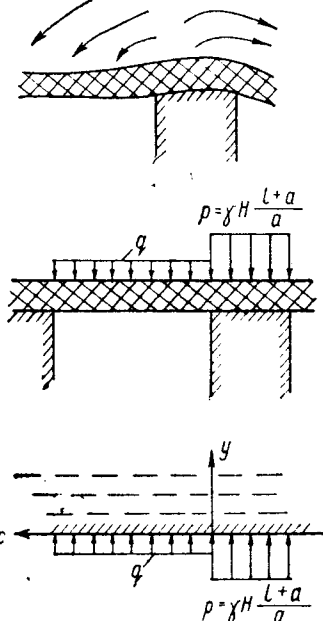


Рис. 97. Расчетная схема к задаче о несущей способности потолочины, разрушающейся породной средой, выдвинутой целиком из области неустойчивого состояния над целиком.

сжатие и угла внутреннего трения кровли и целика и угла расслоения α , равного 55° , показано также на рис. 96.

Назначая параметры системы в рассматриваемом примере из соотношения (154), необходимо еще убедиться, что принимаемый пролет выработки l_* меньше пролета l_{**} , определяемого из условия (71). Иначе говоря, при принятой ширине камеры ее потолочина, представленная слоем I , будет устойчива. Так как модуль Юнга потолочины выше, чем у слоя I' (табл. 47), то после расслоения она будет работать независимо от слоя I' (изгибаться только под действием собственного веса). Тогда из соотношения (89) (боковым распором пренебрегаем) получим

$$l_{**} = \sqrt{\frac{8\sigma_{сж}}{k_s^2\gamma} \cdot \frac{h_1}{\sigma_{сж}/\sigma_p + 1}} = 32 \text{ м.} \quad (156)$$

Окончательно в рассматриваемом примере параметры системы следует назначать из условия:

$$l_* = 1,2 a_*; \quad 2,1 \leq a_* \leq 7,2 \text{ м}; \quad l_* \leq l_{**} = 32 \text{ м}. \quad (157)$$

Пример 2. Определение параметров камер и ленточных целиков при следующих условиях: глубина разработки $H = 320$ м; средний объемный вес залегающей толщи массива $\gamma = 2,2$ т/м³; угол падения $\alpha_0 = 0^\circ$; высота камеры $h = 3,0$ м.

Схематический геологический разрез представлен на рис. 95, б. Физико-механические свойства слоев, находящихся в непосредственной близости от разрабатываемого пласта 2, приведены в табл. 48. Контакты между слоями — тонкие глинистые прослойки, позволяющие пренебречь трением на контактах слоев. Кроме того, пласт 1 пересечен серией тонких глинистых прослоек.

Таблица 48

Механические характеристики массива к примеру 2

Номер слоя	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	ρ	k , кгс/см ²	$\sigma_{сж}/\sigma_p$
1'	80	10°	34	—
1	250	—	—	11
2	250	15	96	—
3	300	15	115	—

Сопоставительный анализ физико-механических свойств окружающего выработку массива показывает, что наиболее слабым (лимитирующим) элементом в рассматриваемом случае является кровля из-за слабого слоя 1'. При переходе в неустойчивое состояние этот слой, выдавливаясь из области над целиком (рис. 97), способен разрушить слой 1. Собственным весом потолочины (слоя 1) и собственным весом выдавливаемой массы пренебрегаем. Так как из-за глинистых прослоек макрообъему слоя 1' присуща анизотропия механических свойств (причем сцеплением и трением по глинистым прослойкам можно также пренебрегать), то для определения несущей способности кровли в этом случае применима формула П. Е. Паукера [124]. А потому нагрузку на потолочину найдем по формуле

$$q = (p + k \operatorname{ctg} \rho) \left(\frac{1 - \sin \rho}{1 + \sin \rho} \right)^2 - k \operatorname{ctg} \rho, \quad (158)$$

где k , ρ — коэффициент сцепления и угол внутреннего трения слоя 1'; p — реакция целика, определяемая соотношением (65). Найдем момент в пластическом шарнире M_* по формуле (87), а максимальный момент в пролете — по формуле

$$M_{\max} = ql^2/16. \quad (159)$$

Тогда из условия прочности потолочины (соотношение [71]) получим соотношение, связывающее ширину целика с шириной камеры

$$k'_3 \left[\left(\gamma H \frac{l+a}{a} + k \operatorname{ctg} \rho \right) \left(\frac{1 + \sin \rho}{1 - \sin \rho} \right)^2 - k \operatorname{ctg} \rho \right] l^2 = 8 \sigma_{сж} \frac{h_1^2}{\sigma_{сж}/\sigma_p + 1}. \quad (160)$$

Из соотношения (160) при $k'_3 = 2$ следует, что в рассматриваемом примере ширина целика должна быть не менее 10 м при ширине камеры 16 м. Исходные данные рассмотренного примера весьма близки к данным пласта АБ одного из шахтных полей Верхнекамского месторождения калийных солей, где слабый

слой I' представлен карналлитовым пластом В. Проведенный расчет показывает что принятая на месторождении ширина целика $a = 11$ м при ширине камеры 16 м весьма близка к предельной. Учитывая, что эти величины (11 и 16 м) получены опытным путем в процессе эксплуатации месторождения, можно с уверенностью отметить, что методика расчета геометрических параметров выработок по несущей способности наиболее слабого элемента окружающего выработку массива дает результаты, весьма близкие к результатам натурных данных.

Пример 3. Определение геометрических параметров камерной системы разработки для следующих условий: глубина разработки $H = 400$ м; средний объемный вес налегающей толщи массива $\gamma = 2,1$ т/м³; высота выработки $h = 2$ м.

Физико-механические свойства кровли и почвы значительно выше таковых свойств целиков. Предел прочности на одноосное сжатие для целика $\sigma_{сж} = 125$ кгс/см² (коэффициент сцепления $k = 40$ кгс/см²; угол внутреннего трения $\rho = 25^\circ$). На контактах целика выполняется условие специального предельного равновесия (108): угол трения на контакте δ равен 20° .

Для определения ширины междуканерных целиков по предельному состоянию воспользуемся графиком (рис. 82) зависимости несущей способности целика $\sigma_{ср}^p/k$ от отношения ширины целика к его высоте a/h . Нагрузку на целик q оценим по формуле (65). Задаввшись различными значениями a/h и l , определим соответствующие им значения $\sigma_{ср}^p$ и q . Результаты вычислений сведены в табл. 49.

Таблица 49

Результаты вычислений к примеру 3 (высота выработки 2 м)

a/h	σ_y^p/k (при $\delta = 20^\circ$)	a , м	σ_y^p , кгс/см ²	q , кгс/см ²		
				$l=6$	$l=8$	$l=10$
1,5	5,5	3	220	252	308	364
2,0	7,9	4	316	210	252	294
2,5	10,4	5	416	185	218	252

По полученным значениям a строим кривые $\sigma_{ср}^p - a$ и $q - a$ (рис. 98, а). Точка пересечения двух кривых на графике соответствует искомому значению ширины целика a , отвечающему заданным условиям рассматриваемого примера. Таким образом, в нашем примере ширине камеры 6, 8 и 10 м соответствует ширина целика 3,2; 3,6 и 3,9 м.

Отметим, что в рассмотренном примере для определения $\sigma_{ср}^p$ можно было воспользоваться графиками (рис. 83) зависимости коэффициента Церна $k_{ц}$ от отношения a/h . При этом рассуждения остаются прежними.

Пример 4. Определение основных размеров камер и целиков для следующих условий: глубина разработки $H = 300$ м; средний объемный вес налегающей толщи массива $\gamma = 2,2$ т/м³; высота выработки $h = 2,0$ м.

Схематический геологический разрез представлен на рис. 95, в. Физико-механические характеристики слоев, находящихся в непосредственной близости от выработки, проходимой по слою 2, сведены в табл. 50. Контакты AA и HH представлены слабыми глинистыми прослойками, позволяющими пренебречь трением и сцеплением на этих контактах. Все остальные контакты весьма прочные. Угол трения δ_1 на контактах BB и CC равен 6° .

Несущую способность целика определим, используя график рис. 83. Зададимся величиной отношение a/h и по графику рис. 83 найдем $k_{ц}$. По заданной величине h и k находим $p_1 = \sigma_{ср}^p$ и a (все вычисления сведены в табл. 51).

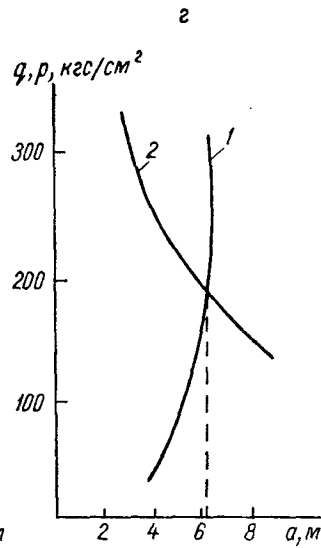
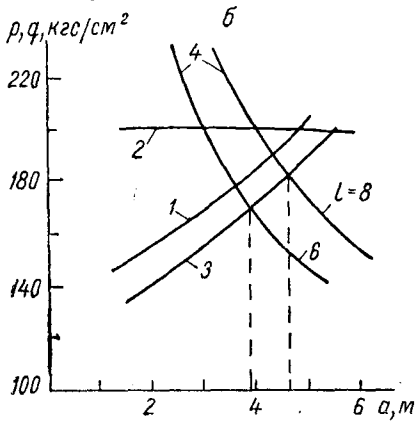
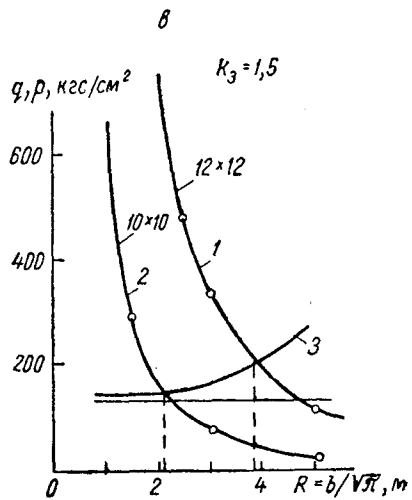
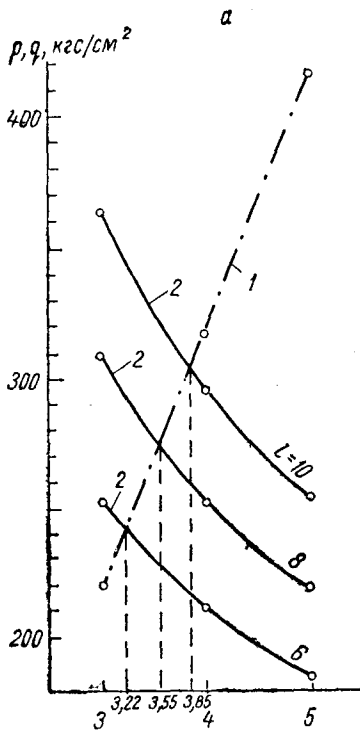


Рис. 98. Графическое определение ширины цемлика: а — к примеру 3; б — к примеру 4; в — к примеру 6; г — к примеру 9.

1, 3, 4 — зависимость несущей способности цемлика, почвы и кровли соответственно от ширины цемлика; 2 — зависимость среднего давления на цемлик при некотором значении ширины камеры от ширины цемлика.

Механические характеристики массива к примеру 4

Номер слоя	$\sigma_{сж}$, кгс/см ²	ρ	k , кгс/см ²
1	34	20°	12
2	129	30	37
3	33	18	12
3'	58	27	18
3''	115	40	27

Результаты вычислений к примеру 4

a/h	$k_{ц}$	a , м	p_1 , кгс/см ²
1	1,2	2	155
1,5	1,3	3	168
2	1,45	4	185

На графике «напряжение — ширина целика» (рис. 98, б) откладываем эти величины (кривая 1). Затем определяем несущую способность однородной почвы:

$$p_2 = k \operatorname{ctg} \rho \left[\frac{1 - \sin \rho \cos 2\varphi_0}{1 - \sin \rho} \exp(2\varphi_0 \operatorname{tg} \rho) - 1 \right] = 203 \text{ кгс/см}^2, \quad (161)$$

где φ_0 получено как (127). Величина p_2 не зависит от ширины целика, поэтому на графике (рис. 98, б) она изображена в виде прямой, параллельной оси a (линия 2).

Определим теперь несущую способность кровли. Механические характеристики кровли (значения коэффициента сцепления и угла внутреннего трения слоев и прослоек) позволяют аппроксимирующие функции для k и ρ принять в виде

$$k = k_0 \exp(\delta y); \quad \rho = \rho_0 \exp(\delta_0 y); \quad (162)$$

$$(k_0 = 10 \text{ кгс/см}^2; \quad \rho_0 = 15^\circ; \quad \delta = \delta_0 = 0,2).$$

Несущую способность кровли с неоднородностью вида (162) в рассматриваемом случае (угол трения δ_1 на контакте целик — кровля равен $-0,4$) определим, используя данные табл. 39. Несущая способность кровли при ширине целика $a = 2$ м

$$p = 15,66k = 156,6 \text{ кгс/см}^2.$$

Несущую способность кровли при иной ширине целика получим по подобию из решения задачи при ширине целика $a = 2$ м, но при ином значении δ и δ_0 . Тогда, согласно данным табл. 39:

$$p = 17,37 \quad k = 173,7 \text{ кгс/см}^2 \quad (\text{при } a = 3 \text{ м});$$

$$p = 19,22 \quad k = 192,2 \text{ кгс/см}^2 \quad (\text{при } a = 4 \text{ м});$$

$$p = 21,27 \quad k = 212,7 \text{ кгс/см}^2 \quad (\text{при } a = 5 \text{ м}).$$

Откладывая найденные величины на рис. 98, б, построим кривую 4. Задавая шириной выработки и используя соотношение (65), построим серию кривых 4 (рис. 98, б). Пересечение линий 1, 3, 2 с кривыми 4 дает величину ширины целика из несущей способности целика, почвы и кровли соответственно при заданной величине l . За расчетную следует принять максимальное значение a . В рассматриваемом случае следует принять ширину целика, равную 3,9 (при ширине выработки 6 м) и 4,6 м (при ширине выработки 8 м).

П р и м е р 5. Определение ширины целика b .

При камерно-столбовой системе разработки оставляются квадратные в плане столбчатые целики шириной b по сетке 10×6 м. Глубина

разработки $H = 500$ м, средний объемный вес налегающей толщи $\gamma = 2,2$ т/м³. Наиболее слабым элементом системы целик — кровля — почва является слабая почва (коэффициент сцепления $k = 40$ кгс/см²; угол внутреннего трения $\rho = 20^\circ$). Контакты целик — кровля и целик — почва таковы, что позволяют пренебречь трением и сцеплением.

Нагрузку на целик оценим по формуле (66):

$$Q = 2,2 \cdot 500 \cdot 10 \cdot 6 = 66\,000 \text{ тс.} \quad (163)$$

Определим теперь несущую способность почвы. Для этого аппроксимируем квадратный в плане целик круглым с радиусом R , получаемым из условия

$$\pi R^2 = b^2. \quad (164)$$

Зная величину R , оценим несущую способность почвы, решив задачу о несущей способности невесомого однородного полупространства при внедрении в него гладкого круглого в плане штампа. Для этого воспользуемся соотношением (142), коэффициенты для которого определим по графику (рис. 92). Тогда среднее предельное давление под штампом будет

$$p = \sigma_{\frac{1}{2}}^{\text{ср}} = N_k k = 19,9 \cdot 40 = 796 \text{ кгс/см}^2. \quad (165)$$

Если же при этом учитывать и объемный вес среды, то среднее предельное давление под штампом будет равно

$$p = \sigma_{\frac{1}{2}}^{\text{ср}} = N_{\gamma} \gamma R + N_k k = 4,85R + 796. \quad (166)$$

В этом случае в выражение для среднего предельного давления под штампом входит неизвестная величина R . Подставив величину Q (163) и $p b^2$ (165) в формулу (61), получим соотношение, из которого определим b окончательно:

$$b = \sqrt{\frac{k_3 Q}{p}} = \sqrt{\frac{1,5 \cdot 66\,000}{796}} = 3,6 \text{ м.} \quad (167)$$

Если же при этом учитывать собственный вес почвы, то ширина целика b будет найдена из кубического уравнения

$$\left(N_{\gamma} \gamma \frac{b}{\sqrt{\pi}} + N_k k \right) b^2 = k_3 Q. \quad (168)$$

Однако в рассматриваемом примере в учете собственного веса почвы, как это следует из сопоставления соотношений (165) и (166), так же как и во всех рассмотренных ранее примерах, нет необходимости.

Если в примере 5 запрокинуть камерную систему разработки с расстоянием между осями ленточных целиков 10 м, то ширина целиков будет

$$a = \frac{k_3 \gamma H \cdot 10 \cdot 1}{p} = \frac{1,5 \cdot 2,2 \cdot 500 \cdot 10 \cdot 1}{400 \cdot 14,83} = 2,8 \text{ м.} \quad (169)$$

Ширина ленточного целика в этом случае значительно меньше ширины столбчатого целика (167). Однако потери в случае камерно-столбовой системы составят всего лишь 22%, тогда как при камерной системе — 28%.

Так как несущая способность ленточных целиков выше таковой столбчатых целиков, то в тех случаях, когда вмещающие породы менее прочны, чем само полезное ископаемое, как это имеет место в ряде случаев при разработке солей, камерно-столбовая система разработки позволяет добиться более рационального распределения несущей способности по элементам системы целик — кровля — почва и, следовательно, приводит к более рациональным параметрам, чем камерная система.

Пример 6. Определение ширины целика при различной их разбивке, оценка потерь и выбор наиболее рационального варианта системы.

При камерно-столбовой системе разработки предполагается, как и в предыдущем примере, оставить квадратные в плане столбчатые целики шириной b . Эти целики разбиты по сетке 10×10 и 12×12 м. Глубина разработки $H = 300$ м; средний объемный вес налегающей толщи $\gamma = 2,2$ т/м³. Пусть и в этом примере наиболее слабым элементом системы целик — кровля — почва является слабая слоистая почва. Геологический разрез слоистой почвы и механические характеристики ее слоев и прослоек (контактов между слоями) таковы, что фактически дискретную неоднородность слоистой почвы представляется возможным аппроксимировать непрерывной неоднородностью вида

$$\begin{aligned} k &= k_0 \exp(\delta z); & \rho &= \text{const}; \\ (k_0 &= 15 \text{ кгс/см}^2; & \delta &= 0,1; & \rho &= 15^\circ). \end{aligned} \quad (170)$$

Контакт целик — почва представлен слабым глинистым прослойком, позволяющим пренебречь сцеплением и трением.

Решение этой задачи, так же как и решение задач 3 и 4, проведем графически с использованием данных табл. 44. Нагрузку на элементы системы оценим по формуле (66). В частности, нагрузка на целик и почву при разбивке целиков по сетке 12×12 м будет равна

$$Q = 2,2 \cdot 300 \cdot 12 \cdot 12 = 95\,000 \text{ тс}. \quad (171)$$

Эта величина не зависит от ширины целика b . Однако давление на целик зависит от опорной площади целик — почва и определяется по формуле

$$q = \frac{95\,000}{\pi R^2} = \frac{30\,100}{R^2}, \quad (172)$$

где R — радиус круга, которым, как и в предыдущем примере, аппроксимируется квадрат. Зависимость (172) построим на графике (рис. 98, в; кривая 1). Аналогичным образом построим зависимость $q-R$ при разбивке целиков по сетке 10×10 (кривая 2).

В отличие от предыдущего примера, несущая способность почвы зависит от радиуса целика. При R , равном единице (согласно табл. 44),

$$p = \sigma_{\Sigma P} = 15 \cdot 14,19 = 212 \text{ кгс/см}^2 \quad (173)$$

или с учетом коэффициента запаса ($k_3 = 1,5$) p будет равна 141,9 кгс/см². Рассуждая аналогичным образом, на рис. 98, в построим кривую $p-R$ (кривая 3), пересечение которой с кривыми 1 и 2 дает искомую величину радиуса R : при разбивке 10×10 $R = 2,2$ м; при разбивке 12×12 — 3,8 м. Окончательно принимаем ширину целика b равной 3,9 и 6,75 м при разбивках 10×10 и 12×12 соответственно. Отметим, что потери в первом случае составят всего лишь 15,2%, тогда как во втором случае — 31%. Поэтому в рассматриваемом примере следует рекомендовать оставление целиков по сетке 10×10 м.

В нашем примере кривая 3 с увеличением R возрастает. Однако, как это следует из табл. 44, она может и убывать. При δ , равном нулю, несущая способность почвы не зависит от радиуса и согласно (142) будет равна

$$p = \sigma_{\Sigma P} = N_k k = 13,8 \cdot 15 = 207 \text{ кгс/см}^2 \quad (174)$$

или с учетом коэффициента запаса

$$p = 138 \text{ кгс/см}^2. \quad (175)$$

Откладывая эту величину на графике (рис. 98, в), приходим к выводу, что пренебрежение неоднородностью строения реального массива может привести к ошибочным результатам при расчете параметров систем разработки.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКИ СОЛЕЙ ПО РАЗВИТИЮ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Вопрос об учете деформаций целиков при выборе параметров системы подземной разработки поднимался еще Л. Д. Шевяковым [140]. Им же была подчеркнута важность этого вопроса для калийных рудников, где рекомендовалось вести систематические наблюдения за деформацией целиков и увязкой этих деформаций с оседанием земной поверхности. Этот вопрос поднимался не случайно. Обеспечение прочности элементов системы целик — кровля — почва еще не является достаточным условием для обеспечения безопасной работы каменносоляных и калийных рудников. Как уже отмечалось, деформируемость элементов системы целик — кровля — почва должна быть лимитирована. По этому расчет параметров системы по несущей способности должен быть дополнен расчетом по разрушающим деформациям, а в некоторых случаях и по деформациям, приводящим лишь к появлению трещин. Этого уже может оказаться достаточно, чтобы привести к катастрофе и затоплению рудника.

При расчете параметров системы по предельным (разрушающим) деформациям или скоростям деформаций следует исходить из соотношения (62). При выборе критерия разрушения необходимо руководствоваться: 1) недопущением трещин в водозащитной толще, а иногда и разрушения искусственных сооружений на дневной поверхности; 2) локальными критическими деформациями отдельных элементов системы целик — кровля — почва.

Дополнение методики расчета параметров системы разработки по несущей способности (по прочности) методикой расчета по предельным деформациям или скоростям деформаций позволило бы перейти к расчету параметров систем подземной разработки солей по предельным состояниям.

§ 1. Общие положения

Пусть почва и кровля системы целик — кровля — почва представлены однородной средой, а целик — неоднородной (слоистой) средой с серией горизонтальных глинистых прослоек. Допустим, что продольной деформацией (сминаемостью) почвы и кровли по сравнению с продольной деформацией (сжатием) целика можно пренебречь. В этом случае продольная деформация системы целик — кровля — почва под действием собственного веса вышележащей толщи складывается исключительно из деформации целика. А потому задача о деформации системы целик — кровля — почва сводится к задаче о деформации целика. На эту задачу, в свою очередь, можно смотреть, как на задачу о деформации слоя (целика), сжима-

емого двумя недеформируемыми плитами (кровлей и почвой), когда нижняя плита остается в процессе деформирования целика неподвижной, а верхняя поступательно опускается вслед за целиком.

При таком деформировании целик сжимается в продольном направлении и расширяется в поперечном. Продольная деформация целика суммируется из деформации каждого слоя (в том числе и деформаций глинистых прослоек). Причем большая доля продольной деформации может приходиться именно на деформацию глинистых прослоек. Что касается поперечной деформации (поперечного расширения) целика, то она, вообще говоря, является функцией продольной деформации и связана с последней через коэффициент поперечного расширения k (не следует смешивать этот коэффициент с коэффициентом Пуассона ν), который может быть $>0,5$ и даже больше единицы. Последнее связано с возможностью возникновения в целике продольных трещин, которые существенно увеличивают общую поперечную деформацию целика.

Причину возникновения продольных трещин в целике можно объяснить за счет превышения несущей способности целика в отдельных областях, когда еще общая несущая способность остается выше фактической нагрузки на целик, а также за счет разрушения наиболее слабых слагающих целик слоев в результате выдавливания глинистых прослоек, деформация которых может значительно превосходить деформации более жестких прилегающих элементов. При этом разрушение целика за счет разрушения слагающих его слоев от раздавливания, вообще говоря, возможно лишь после выдавливания глинистых прослоек. Однако целик может разрушаться гораздо раньше: по достижении целиком поперечной деформации, превышающей критическую.

Поэтому в рассматриваемом случае при расчете параметров системы разработки можно исходить из функциональной зависимости между фактической и критической поперечной деформациями целика. Учитывая, что поперечная деформация целика нарастает во времени, при расчете параметров системы можно исходить и из соотношения (62). Именно с такой точки зрения к расчету параметров системы подошел К. Г. Хёфер [169].

Если при расчете параметров системы (в случае жесткой почвы и кровли) исходить из локальной прочности (или жесткости) целика, то наиболее рациональным следует считать расчет параметров системы по критической поперечной деформации целика (или некоторого его слоя). Однако безопасность соляных рудников зависит не только от прочности целиков. Главным является условие недопущения образования трещин в водозащитной толще. Это условие накладывает определенное ограничение на продольную деформацию или скорость деформаций целика. Расчет геометрических параметров системы (в случае жесткой кровли и почвы) по раскрытию трещин в водозащитной толще был предложен И. А. Кармановым.

Отметим, что в общем случае деформируются не только целики, но и кровля, и почва. Причем продольная деформация кровли и

почвы на соляных месторождениях соизмерима с продольной деформацией целиков, а потому допущение о ее недеформируемости возможно лишь в исключительных случаях. Что же касается поперечной деформации целиков, то она практически свободна от допущения о недеформируемости кровли и почвы.

Нарастание поперечной деформации целиков, ведущей к разрушению целиков, а также нарастание продольной деформации системы целик — кровля — почва и, как следствие этого, нарушение водозащитной толщи протекают одновременно. Причем трудно предсказать заранее, какая деформация, поперечная или продольная, приведет раньше к нарушению нормальной эксплуатации рудника. А потому представляется необходимым при расчете параметров системы по второму и третьему предельным состояниям исходить из методики, являющейся в некотором роде комбинацией методик К. Г. Хёфера и И. А. Карманова. Отметим, что создание теоретической методики расчета параметров системы разработки по разрушающим деформациям или скоростям деформаций встречает определенные трудности из-за ряда факторов, в том числе из-за отсутствия надежной связи между тензором напряжений и тензором деформаций или скоростей деформаций для соляных пород. Некоторые попытки решения этой задачи предпринимались В. Л. Водопьяновым [30—34] и И. Х. Габдрахимовым [36]. Однако сложность проблемы позволяет в большей степени надеяться на успех в данном случае не аналитических, а аналитико-экспериментальных методик, являющихся следствием обобщения натурального экспериментального материала.

§ 2. Примеры расчета параметров системы по предельным поперечным деформациям целиков (по методике К. Г. Хёфера)

Исследуя деформируемость соляных пород во времени, К. Г. Хёфер пришел к выводу, что деформация междукамерных целиков затухает во времени лишь тогда, когда нагрузка на целики не превосходит некоторой определенной величины. В противном случае деформация целиков не прекращается и заканчивается, как правило, разрушением целиков. Причем скорость деформирования с увеличением нагрузки возрастает. Поэтому весьма важно было установить связь между нагрузкой на целики и скоростью их деформирования.

С этой целью К. Г. Хёфером были предприняты специальные натурные наблюдения за деформированием целиков во времени (за скоростью поперечного расширения целиков). На основании результатов натуральных замеров К. Г. Хёфером установлена зависимость между скоростью поперечного расширения целиков и средним теоретическим давлением на них. Нагрузка на целики определяется по формуле (63). Для обычных условий бассейна Южный Гарц эта зависимость графически изображена кривой на рис. 99, а. Из приведенного графика видно, что обычные междукамерные целики на шахтах Южного Гарца с отношением высоты к ширине, равным

единице или большим единицы ($l = 8 \div 10$ м; $a = 5 \div 8$ м; $h = 5 \div 10$ м), при глубине разработки от 400 до 1000 м не в состоянии длительно поддерживать кровлю, предотвращая ее деформирование.

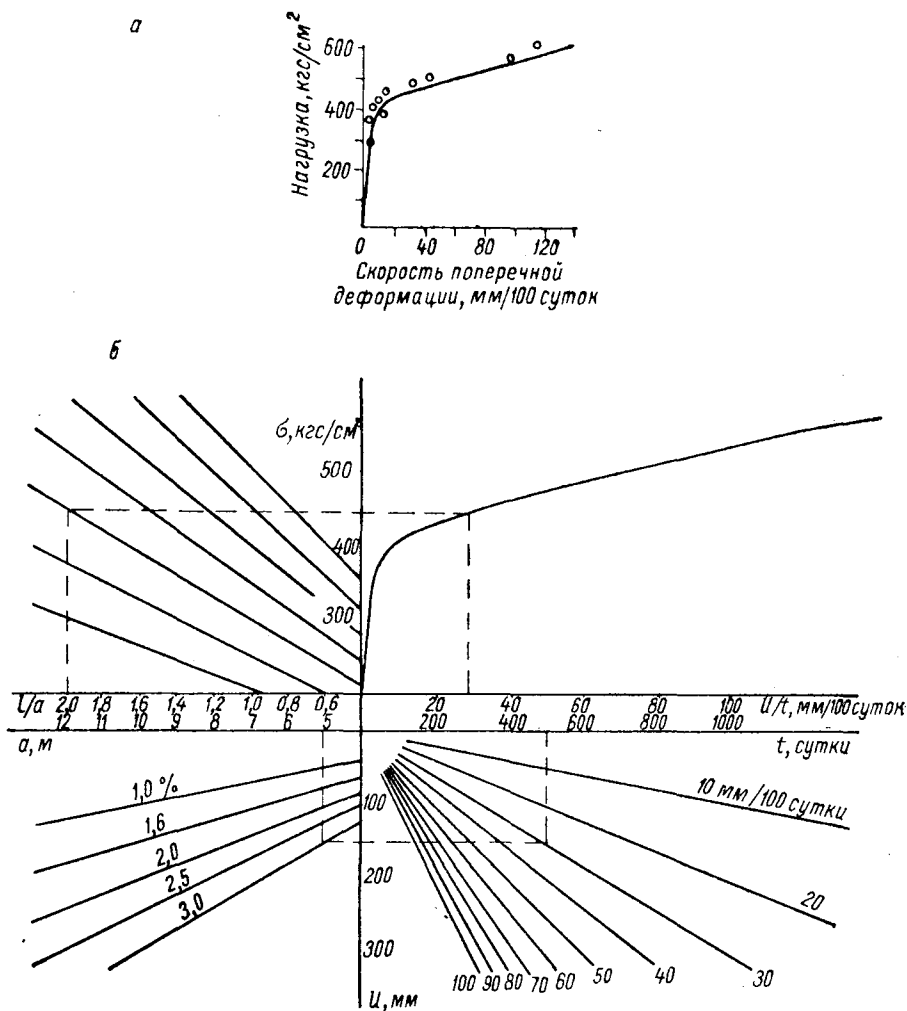


Рис. 99. График зависимости скорости поперечной деформации целиков от действующей на них нагрузки на шахтах Южного Гарца (а) и номограмма для расчета параметров системы по поперечным скоростям деформации целиков (б), по К. Г. Хёферу.

В конце концов они раздавливаются, если их не подкрепить достаточно быстро закладкой, которая препятствует их боковому расширению или, по крайней мере, ограничивает его.

Отметим, что эталонный график (рис. 99, а) построен по данным натуральных наблюдений за целиками с отношением a/h , равным или близким 1—1,25. Как отмечает сам К. Г. Хёфер, скорость ползучести существенно зависит от отношения между высотой и шириной целиков. Причем скорость поперечной деформации целиков уменьшается при снижении их высоты при прочих равных условиях разработки. Например, на калийной шахте «Томас Мюнцер» ($H = 590$ м, $l = 10$; $a = 6$) скорость поперечной деформации целиков при высоте забоя 7,5 м равнялась 4,3 мм за 100 суток, что вообще говоря, соответствует эталонному графику (рис. 99, а); при снижении высоты забоя до 2,5 м скорость поперечной деформации уменьшилась до 2,9 мм/100 суток. На калийной шахте им. Карла Маркса ($H = 720$ м; $l = 10$ м, $a = 6$ м) скорости поперечной деформации колеблются от 32,4 (при $h = 5$ м) до 20,6 мм/100 суток (при $h = 3$ м); на калийной шахте «Глюкауф» ($H = 580$; $l = 8$ м; $a = 5$ м) — от 13 (при $h = 8$ м) до 6,6 мм/100 суток (при $h = 4,5$ м).

Все это не может быть учтено эталонным графиком (рис. 99, а). Более того, этот график (рис. 99, а) не учитывает влияние механических свойств среды, а также масштабный фактор. Но несмотря на это, с помощью эталонного графика (рис. 99, а) можно делать ориентировочные прогнозы, предсказывая скорость поперечного расширения целиков и при a/h , меньшем 1—1,25, учитывая, что фактические скорости поперечного расширения будут несколько меньше, чем те, которые можно рассчитать на основании этого графика.

Для упрощения вычислений при решении задачи о времени разрушения целиков К. Г. Хёфер построил номограмму (рис. 99, б), ядром которой явился график (рис. 99, а). В основе расчета, по предложенной К. Г. Хёфером номограмме, лежит соотношение (62): фактическая скорость поперечного расширения целиков, определяемая с помощью эталонного графика (рис. 99, а), сравнивается с предельной, которая в зависимости от ряда условий принимается равной 0,01—0,03 от ширины целика.

Пример 7. Определение времени разрушения целиков камерной системы разработки со следующими параметрами: $H = 600$ м; $\gamma = 2,5$ т/м³; $l/a = 2/1$; $h = 5,6$ м. Отметим, что эти параметры определены уже из условия прочности системы. Для решения вопроса о времени разрушения целиков воспользуемся номограммой (рис. 99, б).

Примем в одном случае ширину камеры равной 10 м, тогда ширина целика будет 5 м, а в другом случае пусть ширина камеры равна 14 м, а ширина целика — 7 м. В обоих случаях отношение h/a таково, что мы вправе воспользоваться номограммой (рис. 99, б). Среднее давление на целик в рассматриваемом примере оказывается равным 450 кгс/см². Соответствующая ему скорость поперечного расширения 30 мм/100 суток. При 3%-ном допустимом поперечном расширении целика предельная поперечная деформация целика, равная у 5-метрового целика 150 мм, достигается через 500 дней (рис. 99, б). При том же допустимом поперечном расширении разрушающая поперечная деформация у 7-метрового целика, равная 210 мм, достигается только через 700 дней.

Пример 8. Определение параметров камерной системы разработки при глубине разработки $H = 600$ м; объемном весе залегающей толщи $\gamma = 2,2$ т/м³; выемочной мощности 6 м; сроке существования целиков 6 лет; кубиковой прочности целиков $\sigma_{сж} = 350$ кгс/см².

Определим параметры системы из условия несущей способности целиков, воспользовавшись соотношением (74). За несущую способность целика примем его кубиковую прочность. Тогда получим

$$l = 1,65 a. \quad (176)$$

Окончательно при ширине целика, равной 6 м, ширина камеры получается 10 м. При принятых параметрах отношение $h/a = 1$. Это в какой-то степени оправдывает допущение — несущая способность целика равна его кубиковой прочности, а также позволяет воспользоваться графиком (рис. 99, б).

Определим теперь параметры системы из условия деформируемости целиков, полагая, что допустимая поперечная деформация целика 3%. Среднее давление на целик в рассматриваемом случае 350 кгс/см². Соответствующая ему скорость поперечного расширения 10 мм/100 суток. При 3%-ном допустимом поперечном расширении целика критическая поперечная деформация 6-метрового целика в 180 мм достигается через 1800 суток или через 5 лет. А потому принятые параметры системы не проходят из условия ее жесткости или деформируемости. Сохраняя соотношение (176), т. е. не нарушая условия прочности целика, можно показать, что из условия жесткости целика следует принять параметры системы: $l = 12$ м; $a = 7$ м; $h = 6$ м, если это возможно из условий прочности потолочины.

§ 3. Примеры расчета параметров системы по предельным продольным деформациям целиков (по методике И. А. Карманова)

Как и методика К. Г. Хёфера, методика И. А. Карманова — результат обобщения натурных замеров деформаций междукамерных целиков. Основные положения этой методики изложены в отчете ВНИИГалургии (1960).

В течение длительного времени ВНИИГалургии проводил замеры продольных деформаций целиков на Соликамском, Березниковском и Калужском калийных рудниках. Эти измерения велись самопишущими приборами. Причем замерялась непосредственно конвергенция кровли и почвы выработки вблизи целика, величина которой принималась за деформацию самого целика.

Результаты проведенных измерений (табл. 52) позволили установить зависимость величины скорости сжатия целика от среднего давления на него, а также выявить влияние на эту зависимость таких факторов, как формы и абсолютные размеры целиков, а также их механических свойств.

Если по данным табл. 52 построить график изменения скорости сжатия целиков, различно удаленных от границ отработки (рис. 100, а) то легко установить, что с удалением целиков от массива скорость их сжатия возрастает. Причем своего максимального значения скорость достигает в зоне полной подработки, при удалении от массива на расстояние 300—350 м, где она сохраняется постоянной. В переходной области от границ отработки до зоны полной подработки скорость сжатия целиков изменяется по линейному закону.

Полагая, что в зоне полной подработки целики воспринимают нагрузку от веса налегающих пород, нагрузка на целики определялась по формуле (65). Учитывая линейный характер изменения

скорости сжатия целиков в переходной области, предполагалось, что в направлении к массиву от зоны полной подработки нагрузка на целики уменьшается также по линейному закону.

Принятое допущение о величине нагрузки на целики и установленная закономерность изменения величины скорости сжатия целиков (рис. 100, а) позволили установить зависимость скорости сжатия целиков от величины среднего давления на целик (рис. 100, б). Как следует из графика (рис. 100, б), эта зависимость линейна. С увеличением нагрузки на целик растет соответственно и величина скорости сжатия целика. Однако при одних и тех же нагрузках на различных пластах одного калийного рудника или на разных рудниках наблюдаются различные скорости сжатия. Причина этого усматривалась в зависимости величины скорости сжатия от ряда факторов: кубиковой прочности, формы целиков и т. п.

Для того чтобы выяснить влияние кубиковой прочности на величину скорости сжатия целиков, были проведены специальные исследования, в результате которых была установлена зависимость величины скорости сжатия от кубиковой прочности (рис. 100, в). Анализ этой зависимости позволил сделать вывод с достаточной для практических расчетов точностью, что в пределах значений кубиковой прочности от 200 до 400 кгс/см² последняя не способна оказать существенного влияния на величину скорости сжатия.

Для определения зависимости величины скорости сжатия целиков от их формы (отношения высоты целика к его ширине — h/a) также был проведен специальный анализ данных наблюдений по всем рудникам. На рис. 100, г приведены кривые зависимости скорости сжатия от характеристики формы при некоторых значениях величин среднего давления, построенные по данным наблюдений на Северном поле Калужского рудника (табл. 52) с использованием графика (рис. 100, а). Приведенные кривые достаточно наглядно показывают влияние характеристики формы целика на величину скорости его сжатия.

Подводя итог и обобщая обширный материал данных наблюдений, И. А. Карманов предложил расширенный график зависимости величины скорости сжатия междукамерных целиков от величины среднего давления при некоторых значениях коэффициента формы (рис. 101, а).

Анализ зависимости величины скорости сжатия междукамерных целиков от нагрузки при некоторых значениях коэффициента формы h/a и при постоянной скорости сжатия позволил И. А. Карманову прийти к выводу, что скорость сжатия междукамерных целиков существенно зависит не только от коэффициента формы h/a , но и от абсолютных размеров целиков. Для учета этого фактора И. А. Карманов вводит безразмерный эмпирический коэффициент $1/a$ (отношение единицы длины ленточного целика к его ширине).

Тогда график зависимости величины скорости сжатия междукамерных целиков от величины среднего давления при некоторых значениях безразмерного коэффициента $a/h \cdot a/1$, учитывающего форму целика и его абсолютные размеры, приведен на рис. 101, б.

Результаты натурных наблюдений за деформированием междукammerных

целиков на Верхнекамском и Старобинском месторождениях калийных солей

Руд-ник	Пласт, горизонт, блок	Номера гнезд	Год измерения	Глубина разработки, м	Временное сопротивление сжатию, кгс/см ²
Кадушский	VI	125, 126, 128, 127, 129, 129a, 93—95, 104, 105, 117, 118, 5, 4, 7, 16—18	1959 1958	185	310
	VII	85—87, 32, 33	1959 1959	270	310
	П/Я VII	57, 28—31	1958 1958	240	310
	VII	50, 45a	1958	290	310
Соликамский	В, блок 35	802, 801, 799, 797—798, 447—448, 443—444, 313—314, 310—312	1960	230	80
	Кр. II, блок 89	367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 391, 392, 379, 380, 501, 502	1957 1958	300	380

Расстояние до границ отработки, м	Сжатие целиков, мкм/сутки	Расчетная нагрузка в зоне полной подработки, кгс/см ²	Ширина целика, м	Высота целика, м	Ширина камеры, м	h/a	a ² /h
10 40 150	50 60 105	125	5	3	11	0,6	8,3
70 174	347 419	182	5	8	11	1,6	3,1
50 180	266 770	150	5,5	12,2	11	2,2	2,48
—	900	183	5,5	12,0	11	2,2	2,52
11 44 74 121 195 248 327 384	7,5 28,0 51,0 80,0 112,0 142,0 177,0 193,0	70	19,0	10,0	8,0	0,53	36
27 54 81 108 135 162 189 216 318	10,0 6,6 10,0 10,3 13,5 10,2 12,8 13,6 13,8	143	12	9	15	0,75	16,0

Руд-ник	Пласт, горизонт, блок	Номера гнезд	Год измерения	Глубина разработки, м	Временное сопротивление сжатию, кгс/см ²	Расстояние до границ отработки, м	Сжатие целиков, мкм/сутки	Расчетная нагрузка в зоне полной подработки, кгс/см ²	Ширина целика, м	Высота целика, м	Ширина камеры, м	h/a	a ² /h
Соликамский	АБ, блок 15	561 559 558 557 556 554 553	1960	240	270	80 135 162 189 216 324 351	6,7 6,9 7,2 8,8 7,7 8,3 11,9	115	12	4	15	0,33	36
	АБ, блок 47	130, 131, 143, 138, 139 144, 145, 152, 153 154, 155, 162, 163 174—177 178—181	1957	240	270	20 63 113 214 268	4,1 6,2 7,1 8,3 11,4	115	12	4	15	0,33	36
Березниковский	АБ, Вторая восточная панель	166—168, 175 64 120, 122 67 134, 135 138	1959	230	270	70 140 200 260 340 345	7,0 10,0 13,1 10,1 11,4 13,5	104	12	4	14	0,33	36
	АБ, Первая западная панель	353, 354 366, 367 362, 363	1950	240	270	48 110 110	9,0 10,6 16,4	104	12	12	14	1,0	12
	Кр. II, Третья восточная панель	252 253, 254 256, 257 258, 259 260—262 263—265 267—269	1960	240	380	0 25 105 135 185 240 385	0,0 4,4 2,8 4,1 5,1 4,0 12,6	131	10	7,5	16	0,5	13,3

Используя эталонный график (рис. 101, б), можно, следуя К. Г. Хёферу, построить номограмму для расчета параметров системы разработки по величине предельной продольной деформации целика.

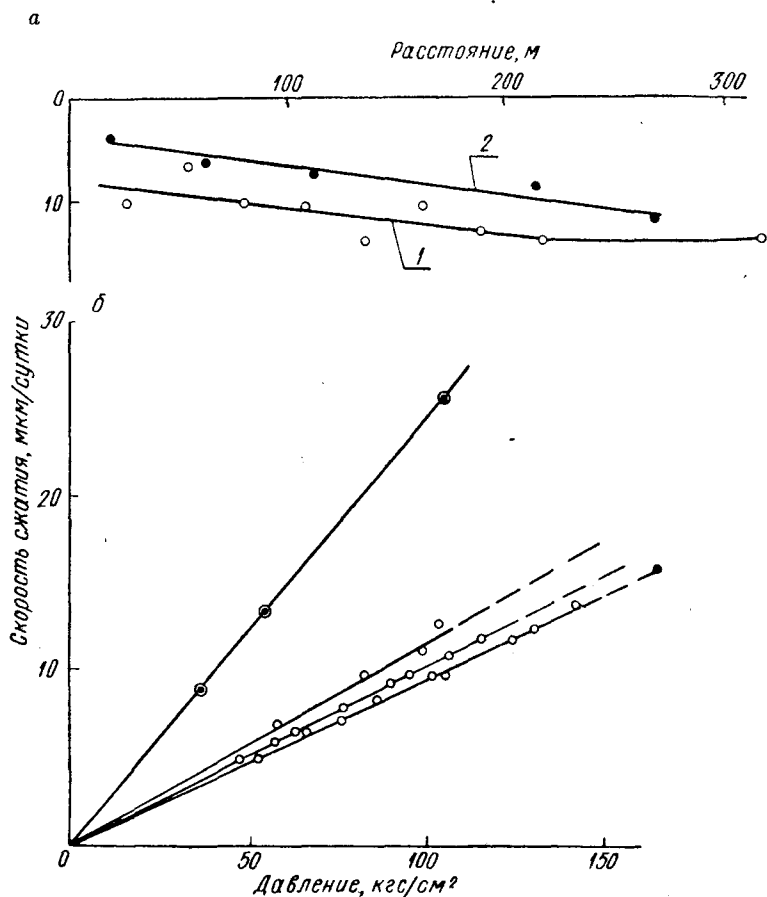
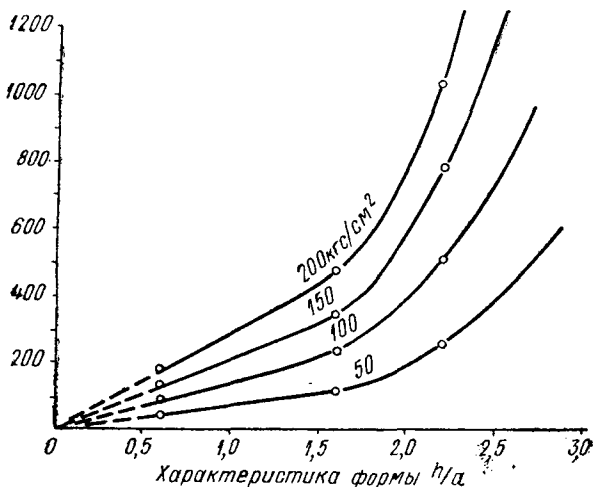
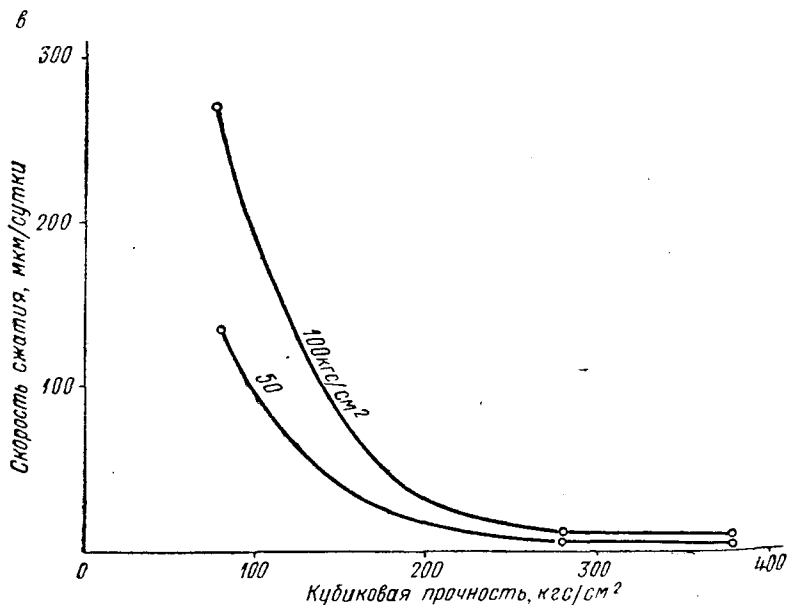


Рис. 100. Зависимость величины скорости сжатия междукамерных целиков от: а — расстояния до границ отработки на Соликамском руднике (1 — пласт Кр. II, блок 89; 2 — пласт АБ, блок 47); б — величины среднего давления; в — кубиковой прочности; г — их характеристики формы.

И. А. Карманов предложил задаваться предельной скоростью деформации целиков, определяя последнюю из условий раскрытия трещин в водозащитной толще, а также безопасности искусственных сооружений на дневной поверхности. Тем самым И. А. Карманову удалось в одном расчетном методе определить параметры системы по второму и третьему предельным состояниям.

Пример 9. Определение ширины междукамерных целиков при следующих исходных данных: глубина разработки $H = 500$ м; ширина камеры $l = 8$ м; средний объемный вес пород покрывающей толщи $\gamma = 2,1$ т/м³; высота целика $h = 3$ м; предельно допустимая скорость деформирования целиков, принимаемая из условия допустимости величины прогиба водозащитной толщи



на срок эксплуатации рудника $v = 5,5$ мм/100 суток. Фактическое давление на целик найдем по формуле (65).

Вычисления сведены в табл. 53. Порядок этих вычислений следующий: задаемся величиной a^2/h и по эталонному графику (рис. 101, б) определяем величину предельно допустимого среднего давления на целик при заданной величине скорости v . Затем по известной величине h находим ширину целика и строим график «предельно допустимое давление — ширина целика» (рис. 98, в). Там же

Результаты вычислений к примеру 9

$k = a^2/h$	$h, \text{ м}$	$\sigma, \text{ кгс/см}^2$	$a = \sqrt{kh}, \text{ м}$	$q = \gamma H \frac{a+l}{a}$
5	3	30	3,9	260
8		70	4,9	220
10		110	5,5	206
13		320	6,3	194

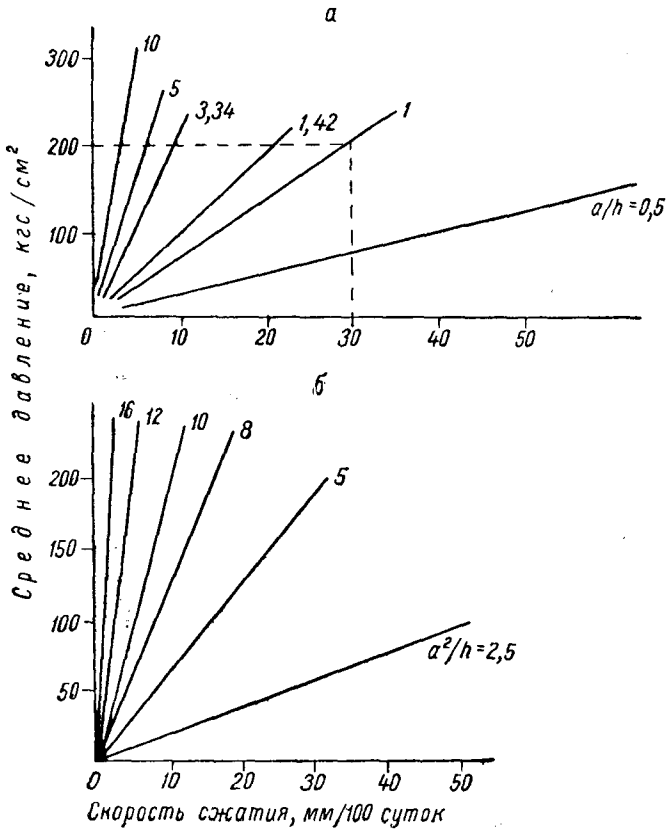


Рис. 101. Зависимость величины скорости сжатия целиков от величины среднего давления: а — при некоторых значениях коэффициента формы a/h ; б — при некоторых значениях безразмерного параметра a^2/h , учитывающего форму и абсолютные размеры целика.

наносится график «фактическое давление — ширина целика», определяемый по формуле (65). Точка пересечения двух кривых на графике соответствует искомому значению ширины целика a в метрах, отвечающему заданным исходным данным. Таким образом, на основании проведенных вычислений при заданной ширине камеры 8 м ширина целика получается равной 6,2 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авчян Г. М. Физические свойства осадочных пород при высоких давлениях и температурах. М., «Недра», 1972.
2. Андреев А. Н. Разработка калийных месторождений. М., «Недра», 1966.
3. Андреев А. Н. Классификация калийных месторождений по гидрогеологическим и инженерно-геологическим условиям. — «Горн. журнал», 1968, № 5.
4. Андреев А. Н. Разработка калийных и каменносоляных месторождений, ч. I. М., Госхимиздат, 1953.
5. Барон Л. И. Экспериментальное определение коэффициентов крепости горных пород по шкале проф. М. М. Протодияконова путем испытания буровых кернов на раздавливание. — В кн.: Разрушение углей и пород. М., Углетехиздат, 1958.
6. Барон Л. И. О показателе динамической контактной пластичности горных пород. В кн.: Разрушение горн. пород шарошечн. инструм. М., «Наука», 1966.
7. Барон Л. И., Бондарев К. Д. Метод определения абразивности пород калийного комплекса. — Изв. вузов. «Горн. журнал», 1967, № 6.
8. Барон Л. И., Глатман Л. Б. Контактная прочность горных пород. М., «Недра», 1966.
9. Барон Л. И., Глатман Л. Б. Методика определения коэффициента трения горных пород. М., Изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1961.
10. Барон Л. И., Казанский А. С. Резание угля. М., Госгорехиздат, 1962.
11. Барон Л. И., Курбатов В. М. К оценке сопротивляемости пластичных (мягких) пород разрушению механическими способами. — «Физико-техн. проблемы разработки полезн. ископ.», 1970, № 3.
12. Барон Л. И., Глатман Л. Б., Шляпин К. Б. Оценка сопротивляемости горных пород резанию. — В кн.: Сопротивл. горн. пород резанию. М., Изд-во АН СССР, 1962.
13. Барон Л. И., Кузнецов А. В. Методика испытаний горных пород на абразивность. М., Изд. ИГД им. А. А. Скочинского, 1960.
14. Барон Л. И., Коняшин Ю. Г., Курбатов В. М. Дробимость горных пород. М., Изд-во АН СССР, 1963.
15. Барон Л. И., Логунцов Б. М., Позин Е. З. Определение свойств горных пород. М., Госгортехиздат, 1962.

16. Баженов А. И. Исследование особенностей и разработка методики прогноза ударов на угольных шахтах Сучанского месторождения и Кузбасса. Автореф. дис. Л., 1969.
17. Березанцев В. Г. Осесимметричная задача теории предельного равновесия сыпучей среды. М., Госстройиздат, 1952.
18. Березанцев В. Г. Расчет оснований сооружений. Л., Госстройиздат, 1970.
19. Брусловский Д. В. Исследование сплошной и щелевой схем разрушения соляных пород калийных рудников роторными исполнительными органами комбайнов. Автореф. дис. М., 1969.
20. Брусиловский Д. В., Садков С. П., Иванова В. Т. Определение сопротивляемости соляных пород резанию. М., Изд. НИИТЭХИМ, 1965, вып. 4.
21. Бублик Ф. П. Несущая способность целиков. Автореф. дис. Л., 1971.
22. Бурение глубоких геологопоисковых скважин на суше и на море Л., «Недра». 1965, Авт.: А. А. Андрианов, Ю. В. Бакланов и др.
23. Булатов В. В. Механика разрушения горных пород при сверхглубоком бурении. Новосибирск, «Наука», 1966.
24. Валяшко М. Г. Закономерности формирования месторождений калийных солей. М., Изд-во МГУ, 1962.
25. Валяшко М. Г. Генезис рассолов осадочной оболочки. — В кн.: Химия земной коры. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1963.
26. Ватолин Е. С. Некоторые динамические свойства и природа деформирования горных пород. М., «Наука», 1966.
27. Вериго А. О. О характере соляной массы в районе Куяльницкого и Хаджибейского лиманов. — «Горн. журнал», 1880, № 3.
28. Власова Н. К. Экспериментальное изучение процессов формирования хлоркальциевых рассолов. — В кн.: Тезисы докладов Междунар. геохим. конгресса, т. 2. М., «Наука», 1971.
29. Вопросы механики горных пород. Алма-Ата, «Наука», 1964.
30. Водопьянов В. Л. Исследование длительной устойчивости междукамерных целиков при разработке калийных месторождений с закладкой. Автореф. дис. Л., 1964.
31. Водопьянов В. Л. К расчету междукамерных целиков. Пермь, Пермск. книжн. изд-во, 1963. (Труды ПермНИУИ, сб. 5).
32. Водопьянов В. Л., Паточкин Л. К. Влияние времени и положения в шахтном поле на деформации выработок Соликамского рудника. Пермь, Пермск. книжн. изд-во, 1964. (Труды ПермНИУИ, сб. 7).
33. Водопьянов В. Л., Барковский В. М., Артемов Е. Г. Упрочающее воздействие закладки на междукамерные целики. Пермь, Пермск. книжн. изд-во, 1964. (Труды ПермНИУИ, сб. 7).
34. Водопьянов В. Л., Уразова А. М. Механические свойства карналлита при сжатии. Пермь, Пермск. книжн. изд-во, 1963. (Труды ПермНИУИ, сб. 5).
35. Временные технические требования на проведение испытаний механических свойств пород для оценки условий поддержания выработок подземных газонефтехранилищ. Л., Изд. ВНИМИ, 1965.
36. Габдрахимов И. Х. Исследование длительной прочности горных

пород и совершенствование параметров систем разработки в условиях Верхнекамских калийных рудников. Автореф. дис. Фрунзе, 1968.

37. Гимм В., Хёфер К. Г., Духров Г. Новые научные данные горной механики в соляных залежах и их практическое использование при современной технологии. Перевод № 1024, ВНИИГ.

38. Гвоздев А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. Сущность метода и обоснование. М., Стройиздат, 1949.

39. Голушкевич С. С. Статика предельных состояний грунтовых масс, М., Изд. ГИТТЛ, 1957.

40. Григорьев Д. П. Онтогенез минералов. Львов, Изд. Львовск. ун-та, 1961.

41. Геология и петрография калийных солей Белоруссии. Минск, «Наука и техника», 1969.

42. Гулевич Г. Е. Камерная система разработки с опорными и подерживающими целиками. — В кн.: Методы определения размеров опорных целиков и потолочин. М., Изд-во АН СССР, 1962.

43. Давиденко Н. Н. О влиянии размеров образцов на их механические свойства. — «Заводская лаборатория», 1960, № 3.

44. Долгих М. А., Матвиенко В. В., Хачатурьян Н. С. Оценка прочности камер выщелачивания в отложениях каменной соли. — Тр. ВНИИСТ, 1962, вып. 12.

45. Ержанов Ж. С. Теория ползучести горных пород и ее приложение. Алма-Ата, «Наука», 1964.

46. Ержанов Ж. С., Парчевский Л. П. Ползучесть пород Донбасса при изгибе. — Изв. вузов. «Горн. журнал», 1958, № 19.

47. Ержанов Ж. С., Розовский М. И. Методика лабораторного определения характеристик ползучести и расчета деформаций ползучести вокруг шахтного ствола. — В кн.: Исследов. горн. давления. М., Госгортехиздат, 1960.

48. Жарков М. А., Жаркова Г. М. Наборы и ассоциация пород соленосных формаций хлоридного типа, их сравнительная характеристика и механизм образования. — Труды ИГГ СО АН СССР, 1969, вып. 83.

49. Журков С. Н., Санфилова Т. П. Связь между прочностью и ползучестью металлов и сплавов. — «Журн. техн. физики», 1958, т. 28, № 8.

50. Журков С. Н., Нарзуллаев Б. Н. Временная зависимость прочности твердых тел. — «Журн. техн. физики», 1953, т. 23, вып. 10.

51. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов: от интуиции к общности. — Сб. переводов «Механика», 1970, № 6.

52. Иванов А. А. О глубинах солеродных бассейнов геологического прошлого. — «Литология и полезн. ископ.», 1967, № 2.

53. Инструкция по отбору проб горных пород. Л., Изд. ВНИМИ, 1965.

54. Иоффе А. Ф. Физика кристаллов. Л., 1929.

55. Иоффе А. Ф., Кирпичев М. В., Левицкая М. А. Деформация и прочность кристаллов. — Журн. Русск. физико-хим. о-ва, 1924, т. 56, вып. 5—6.

56. Изучение проявлений горного давления на моделях. М., Углетехиздат, 1959. Авт.: Г. Н. Кузнецов, М. Н. Будько и др.

57. Исследования реологических свойств грунтов. Л., «Энергия», 1968. (Труды координац. совещ. по гидротехнике, вып. 38).
58. Исследование механических свойств горных пород Донецкого бассейна. М., Углетехиздат, 1951.
59. Ишлинский А. Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бринеля. — ПММ, 1944, т. 8, вып. 3.
60. Карташов Ю. М., Мазур-Джуриловский Ю. Д., Грохольский А. А. Об определении прочности горных пород на одноосное сжатие. — «Физико-техн. проблемы разраб. полезн. ископ.», 1970 № 3.
61. Карманов И. А., Шалужкина Е. А., Львова А. В. Исследования проявлений горного давления на калийных рудниках. — В кн.: Методы определения размеров опорных целиков и потолочин. М., Изд-во АН СССР, 1962.
62. Классен-Неклюдова М. В. Механическое двойникование кристаллов. М., Изд-во АН СССР, 1960.
63. Классен-Неклюдова М. В., Урусовская А. А. Деформация кристаллов каменной соли при повышенной температуре. — «Кристаллография», 1960, т. 5, вып. 5.
64. Крупеников Г. А. Аналитические и лабораторные исследования проявлений горного давления в одиночных горизонтальных выработках глубоких горизонтов. — Труды ВНИМИ, 1970, сб. 78.
65. Кузнецов В. Д. Физика твердого тела. Томск, Томск. кн. изд-во, 1941.
66. Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород. М., Углетехиздат, 1947.
67. Кузнецов Г. Н. Определение полной несущей способности кровли подземных выработок. В кн.: Исследования по вопросам горн. и маркшейд. дела, сб. 22. М., Углетехиздат, 1950.
68. Кузнецов Г. Н., Слободов М. А. Определение методом разгрузки напряжений, действующих в междуканальных целиках каменной соли Артемовских рудников. — Там же, 1950.
69. Кузнецов Ю. Ф. Методика и результаты исследований реологических свойств твердых горных пород применительно к некоторым вопросам устойчивости горных выработок. Автореф. дис. Л., 1970.
70. Кузнецов Ю. Ф. Исследование ползучести некоторых пород. Л., «Недра», 1969. (Зап. ЛГИ, т. 57, вып. 1).
71. Курнаков Н. С., Жемчужный С. Ф. Магниеые озера Переконской группы. — Изв. Рос. АН, 1917.
72. Курнаков Н. С., Николаев В. И. Солнечное испарение морской воды и озерных рассолов. — Изв. Ин-та физико-хим. анализа АН СССР, 1938, т. 10.
73. Лебедев В. И. Седиментационно-диагенетическая теория образования хлоридных кальциевых вод. — В кн.: Мат-лы научн. семинара по проблеме формирования хлоридно-кальц. нейтрализации подземн. вод. М., Изд. ВСЕГИНГЕО, 1968.
74. Лейбов Б. М. Исследование механических процессов разрушения углей. М., Углетехиздат, 1950.

75. Л и п с о н М. А. Определение полной несущей способности целиков графическим методом. — Изв. АН СССР, 1956, ОНТ, № 5.
76. Л о м т а д з е В. Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. Л., «Недра», 1972.
77. Л у к ъ я н о в Н. Г. К расчету параметров железобетонной штанговой крепи для условий Солигорских калийных рудников. Л., «Недра», 1969. (Труды ВНИИГ, вып. 51).
78. Л у н и н П. И. К вопросу о направлении развития учения о морских осадках. М., Изд-во АН СССР, 1954.
79. М а л и н и н Н. И. Прикладная теория пластичности и ползучести. М., «Машиностроение», 1968.
80. М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я по испытанию прочности горных пород на одноосное растяжение. Л., Изд. ВНИМИ, 1964.
81. М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я по испытанию горных пород на растяжение методом сжатия цилиндрических образцов по образующей. Л., Изд. ВНИМИ, 1969.
82. М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я по лабораторным испытаниям деформируемости крепких горных пород при одноосном сжатии. Л., Изд. ВНИМИ, 1967.
83. М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я по испытаниям горных пород в натуральных условиях. Л., Изд. ВНИМИ, 1969.
84. М е т о д и ч е с к о е п о с о б и е по натурным методам механических испытаний горных пород. Л., Изд. ВНИМИ, 1969.
85. М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я по упрощенным испытаниям и приближенной оценке пластических свойств горных пород. Л., Изд. ВНИМИ, 1968.
86. М е т о д и ч е с к и е у к а з а н и я по длительным испытаниям горных пород. Л., Изд. ВНИМИ, 1968.
87. М е т о д ы расчета целиков и потолочин камер рудных месторождений. М., «Наука», 1964. Авт.: А. М. Ильштейн, Ю. М. Либерман и др.
88. Н а д а н А. Пластичность и разрушение твердых тел. М., ИЛ, 1948.
89. Н е с т е р о в М. П. Об инженерных методах расчета ленточных целиков. — «Горн. журнал», 1967, № 9.
90. Н и к о л а и В. Влияние скорости нагружения на прочность бетона. — «Бетон и железобетон», 1959, № 3.
91. О б щ и е методические положения комплексного исследования проблем горной геомеханики. Л., Изд. ВНИМИ, 1970, сб. 81.
92. О с т р о у х о в И. В. Изучение физико-механических свойств каменной соли. М., Пищепромиздат, 1960. [Труды УкрНИИСоль, вып. 3 (II)].
93. П а в л о в а Н. Н., Ш р е й н е р Л. А. Разрушение горных пород при динамическом нагружении. М., «Недра», 1964.
94. П а в л о в а Н. Н., Ш р е й н е р Л. А., П о р т н о в а А. Т. Экспериментальное исследование механических свойств горных пород при динамическом вдавливании. — В кн.: Вопр. деформирования и разруш. горн. пород при бурении. М., ГосИНТИ, 1961.
95. П е л ь ш А. Д. Динамика десульфатизационного процесса. — Труды соляной лаб. АН СССР (ВИГ), 1937, вып. 14.

96. Пеньков А. М., В о п и л к и н А. А. Расчет опорных целиков при добыче каменной соли. Киев, Изд-во АН УССР, 1950.
97. П е р м я к о в Р. С., Б о р е й к о Ф. И., Ч е р н и к о в А. К. К методике расчета геометрических параметров горных выработок, пройденных в неоднородной связной среде. — Труды ВНИИГ, 1972, т. 58.
98. П е р м я к о в Р. С., П р о с к у р я к о в Н. М. Внезапные выбросы соли и газа. Л., «Недра», 1972.
99. П о в а р е н н а я соль и ее растворы. Л., «Химия», 1970.
100. П р о с к у р я к о в Н. М., А н т о н о в А. А., Л и в е н с к и й В. С. Исследование физико-механических свойств соляных пород Старобинского месторождения. Л., «Недра», 1972. (Зап. ЛГИ, т. 61, вып. 1).
101. П р о т о д ь я к о в о в М. М., В о б л и к о в В. С. Определение крепости горных пород на образцах неправильной формы. — «Уголь», 1957, № 4.
102. Р а б о т н о в Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966.
103. Р а у н О. Б. Смещение рассолов. — В кн.: Тезисы докладов Междунар. геохим. конгресса, т. 2. М., «Наука», 1971.
104. Р е о л о г и ч е с к и е вопросы механики горных пород. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1960.
105. Р о м а н о в В. С. Определение радиуса камер выщелачивания при разработке соляных залежей через буровые скважины. Л., «Недра», 1967. (Труды ВНИИГ, вып. 53).
106. Р у п н е й т К. В. Некоторые вопросы механики горных пород. М., Углетехиздат, 1954.
107. Р у п н е й т К. В. Механические свойства горных пород. М., Углетехиздат, 1956.
108. Р у к о в о д с т в о по механическим испытаниям горных пород методом соосных пуансонов. Л., Изд. ВНИМИ, 1960.
109. С а в ч е н к о А. Ф. О предельных деформациях сжатия каменной соли Артемовского месторождения. — В кн.: Технология и механика горн. работ на солян. шахтах, ч. 1. Труды ВНИИСоль, 1970, вып. 14 (22).
110. С а в ч е н к о А. Ф., С е р а я А. Р. Результаты исследования прочностных свойств каменной соли Артемовского месторождения. — Там же, 1970.
111. С а в ч е н к о А. Ф. Методика расчета размеров опорных целиков на соляных шахтах Артемовского месторождения. — Там же, 1970.
112. С в е т л и ч н ы й Д. М., Д е в я т ь е в В. З., У р а з о в а А. М. Исследование пород Верхнекамского месторождения на одноосное сжатие, контактную прочность и абразивность. Пермь, Пермск. книжн. изд-во, 1964. (Труды ПермНИУИ, сб. 7).
113. С в о й с т в а горных пород и методы их определения. М., «Недра», 1969. Авт.: Е. И. Ильницкая, Р. И. Тедер и др.
114. С и в о к о н ь Е. П. Исследование влияния закладки на устойчивость междукамерных целиков калийных рудников. Автореф. дис. Л., 1966.
115. С и л а е в а О. И. Исследование с помощью ультразвука скоростей распространения упругих волн и упругих параметров в образцах горных пород при одностороннем давлении. — Труды Ин-та физики Земли им. О. Ю. Шмидта, 1962, № 27.

116. Скрамтаев Б. Г., Лещинский М. Ю. Испытание прочности бетона. М., Стройиздат, 1964.
117. Слесарев В. Д. Определение оптимальных размеров целиков различного назначения. М., Углетехиздат, 1948.
118. Ставрогин А. Н. Прочность и деформация горных пород. Автореф. дис. М., 1968.
119. Ставрогин А. Н. Экспериментальные исследования ползучести и долговечности горных пород. — В кн.: Исследования реологич. свойств грунтов, вып. 38. Л., «Энергия», 1968.
120. Ставрогин А. Н. Деформация и прочность горных пород. В кн.: Горное давление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ. Труды ВНИМИ, т. 70, 1968.
121. Ставрогин А. Н. Исследование горных пород в сложных напряженных состояниях. — «Горн. журнал», 1961, № 3.
122. Стаматиду М. Расчет целиков на соляных рудниках. М., Госгортехиздат, 1963.
123. Страхов Н. М. Бурение на дне океанов и его значение для познания послерифейского литогенезиса. — «Литология и полезн. ископ.», 1971, № 5.
124. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М., Физматгиз, 1960.
125. Соколовский В. В. Теория пластичности. М.—Л., Гостехтеориздат, 1950.
126. Соколовский В. В. О формах устойчивых полусводов и сводов. — ПММ, 1956, т. 20, вып. 1.
127. Трумбачев В. Ф., Мельников Е. А. О распределении напряжений в междукамерных целиках и потолочинах. М., Госгортехиздат, 1961.
128. Фивег М. П. О значении колебаний уровня рапы солеродных бассейнов при седиментации соленосных серий. — Труды ВНИИГ, 1964, вып. 45.
129. Фивег М. П. К вопросу о закономерностях накопления ископаемых солей. — «Сов. геология», 1968, № 5.
130. Физико-механические свойства горных пород, вскрытых шахтным стволом № 1 Солигорского калийного комбината. Л., 1962.
131. Хёфер К. Г. Закономерности ползучести солей и их общее значение для горного дела. — В кн.: Междунар. конгресс по горн. давлению. Лейпциг, 1958.
132. Хёфер К. Г., Духров Г., Хоттевиц К. Пути снижения потерь при разработке калийных солей в ГДР. — В кн.: V Междунар. горн. конгресс. М., «Недра», 1968.
133. Черкасов Н. Е. Исследование усилий на резцах тоннельных механизированных щитов. — В кн.: Лабораторн. и производств. исследов. механизир. разработки горн. пород при сооруж. тоннелей метрополитенов. М., Изд. ЦНИИС Минтрансстроя, 1959.
134. Черников А. К. Исследование устойчивости гидротехнических подземных выработок в неоднородной связной среде. Автореф. дис. Л., 1972.
135. Черников А. К. Об устойчивости протяженной горизонтальной выработки прямоугольного сечения, пройденной в неоднородной связной среде. — Труды ВНИМИ, 1970, сб. 78.

136. Черников А. К. К определению оптимальных параметров выработки, пройденных по слою в неоднородной вязкой среде. — В кн.: Исследование проявлен. горн. давления на глубоких горизонтах шахт. Л., Изд. ВНИИМ, 1971.
137. Черников А. К. Осесимметричная задача теории предельного равновесия неоднородной вязкой среды. — Труды ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1971, вып. 97.
138. Черников А. К. Приближенный способ оценки несущей способности основания, представленного неоднородной весомой вязкой средой. — В кн.: Сборник докл. по гидротехнике, вып. 12. Л., Изд. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1972.
139. Черников А. К. Предельное равновесие основания под действием нормального давления, распределенного по площади эллипса. — Труды ВНИИГ, 1972, вып. 10.
140. Шевяков Л. Д. О расчете прочных размеров и деформаций опорных целиков. — Изв. АН СССР, 1941, ОТН, № 7—9.
141. Шевяков Л. Д. О системах разработки месторождений каменной соли в Бахмутском районе. — В кн.: Сб. статей по горному искусству. М., Донуголь, 1927.
142. Шевяков Л. Д., Скуратов Г. А. Известия Екатеринбургского горного института, 1926, т. 14, ч. 2.
143. Шерман Д. И. Плоская деформация в изотропной неоднородной среде. — ПММ, 1943, вып. 7.
144. Шилд Р. Т. О критерии Кулона разрушения грунтов. J. Mech. and Phys. Solids, 1955, vd. 4, p. 10—16 (перевод 1054, ВНИИГ).
145. Шилд Р. Т. О пластическом течении в условиях осевой симметрии. — Сб. переводов «Механика», 1957, вып. 1.
146. Широко Г. И. О расчете междукамерных целиков при камерной системе разработки. Л., Госхимиздат, 1953. (Труды ВНИИГ, вып. 28).
147. Широко Г. И. Механические свойства горных пород. — В кн.: Бурение глубоких геол. скважин на суше и на море. М., «Недра», 1965.
148. Юшкин Н. П. Механические свойства минералов. — Л., «Наука», 1971.
149. Ягодкин Г. И., Мохначев М. П., Кунтыш М. Ф. Прочность и деформируемость горных пород в процессе их нагружения. М., «Наука», 1971.
150. Яншин А. Л. О глубине солеродных бассейнов и некоторых вопросах формирования мощных соляных толщ. — «Геология и геофизика», 1961, № 1.
151. Яржемский Я. Я. Микроскопическое изучение галогенных пород. Новосибирск, «Наука», 1966.
152. Яржемский Я. Я. Калийные и калиеносные галогенные породы. Новосибирск, «Наука», 1967.
153. Vishop J. F. W. On the complete solution to problems of deformation of a plastic-rigid material. J. Mech. and Physik. Solids, 1953, vol. 2, № 1.
154. Blanke. Zeitschrift für Physik, 1930, Bd. 61.
155. Vorchert H. Ozeane Salzlagertstätten. Berlin, 1959.

156. Borchert H. Geologische, Strukturelle und Physikochemische Grundfragen bei der primären Ausscheldung und sekundären Fazientwicklung der ozeanischen Kalilager. Berlin, 1967.
157. Cox A., Eason G., Hopkins H. Axially symmetric plastic deformations. Phil. Trans. Roy. Soc., 1961, A-254, № 1036.
158. D'Ans, Künn R. Bemerkungen zur Bildung und zu Umbildungen ozeanischer Salzlagerstätten. Kali und Steinsalz, 1960, Bd. 3, H. 3.
159. Dreyer W. Zur Druckfestigkeit von Salzgesteinen. Kali und Steinsalz, 1961, № 7.
160. Dreyer W. Die Festigkeitseigenschaften natürlichen Gesteine, insbesondere der Salz- und Karbongesteine. Berlin, Verlag Bornträger, 1967.
161. Dreyer W. Über die Bruchfestigkeit mono- und polikristallinen Gesteines in Abhängigkeit von Prüfkopfform, Belastungsgeschwindigkeit und Art Einspannung. Bergbauwissenschaft, 1957.
162. Dreyer W., Borchert H. Neuere Untersuchungen auf dem Gebiet der Modelmechanik zur Erfassung der Standfestigkeit von Grubenbannen. Freib.-Forsch. H., A-226, 1967.
163. Dreyer W. Die Bedeutung von Modellversuchen an Salzgesteinen für die Beurteilung gebursmechanischer Probleme im Kalibergbau. Bergakademie, 1964, № 16.
164. Duchrow G., Winter U. Einige Arbeitsergebnisse aus der Kalibergbauforschung in der DDR. Kalibuchreihe, Bd. 5. Leipzig, 1967.
165. Fulda E. Die Chemie und Mineralogie der Kalisalze, die Geologie der Kalisalzlagerstätten. Verlag von Ferdinand Enke, Stuttgart, 1928.
166. Gimm W. Kali- und Steinsalz Bergbau. Bd. 1. Aufschluss und Abbau von Kali- und Steinsalzlagerstätten. Leipzig, 1966.
167. Goolbaugh M. I. Spezial problem of mining in deep potash. Min. Eng., 1967, vol. 19, № 5.
168. Holwerda I. G., Hutchinson R. W. Potash-bearing evaporites in the Danakil area. Ethiopia. Econ. Geol., 1968, vol. 63, H. 2.
169. Höfer K. H. Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von Bergfesten im Kalibergbau. Freib.-Forsch. H., A-100. Berlin, 1958.
170. Höfer K. H., Hegne K. H. Zur Durchführung echter Triakialversuche. Bergakademie, 1968, № 1.
171. Höfer K. H., Pickert N. Untersuchungen über das Festigkeitsverhalten von Garnallit-Kriechversuchen und zügige schnelle Belastung. Bergakademie, 1960, № 7.
172. Höfer K. H., Berthold E., Menzel W. Rheologische Modelle und in situ-Messungen im Salzgebirge. Bericht über das E. Landertreffen des IBG. Berlin, 1965.
173. Hill R. On the state of stress in a plastic-rigid body at the yield point. Philosophical Mag., 1951, vol. 42, № 331.
174. Kick F. Die Prinzipien der mechanischen Technologie und die Festigkeitslehre. Vereines deutscher Ingenieure. Berlin, 1892, Bd. 36, № 10.
175. Kvapil R. Natürliche Gesteinerstörung. Freiburger Forschungshefte, 1961, A-156.
176. Lehmann K. Bewegungsvorgänge bei der Bildung von Pingen und Trögen. Glückauf, 1919, № 48.

177. Lotze F. Steinsalz und Kalisalze, t. 1. Berlin, 1957.
178. Müller H. Zeitschrift für Physik, Bd. 25. 1924.
- 179. Negre R. Contribution à l'étude de l'équilibre limite des sole et des matériaux pulvérisés et cohérents. Arch. Hydrotechniki, 1970, vol. 17.
180. O bert L. Greep in model pillars. Rapport of Investigation 6703, US Bur. Mines, 1965.
181. P forr H., Rosetz G. P. Ergebnisse und Erfahrungen bei Druck- und Zugversuchen an Gesteinen des Kalibergbaus. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig, 1966.
182. P forr H., Michalzik A. Über die geburgsmechanische Wirkung des Spülversatzes im Kalibergbau unter besonderer Berücksichtigung von Festigkeitsversuchen. Bergakademie, 1963, № 15.
183. Potts E. L. I., Hedleg G. H. Der Einfluss Zeitabhängiger Effekte auf die Dimensionierung von Grubenpfeilern. G. Ländertreffen I. B. G. M., 1965.
184. Richter-Bernburg G. Über saline Sedimentation. Zeitschrift der Deutschen Geol. Gesellsch., Bd. 105, H. 4. Hannover, 1955.
185. Smekal A. Zum Problem der Kristallfestigkeit. Zeitschrift für Physik, 1933, Bd. 83.
186. Spackeler G. Lehrbuch des Kali- und Steinsalzbergbaues. Berlin, 1957.
187. Spackeler G., Siben F. Gegenüberstellung und Ausnutzung der Zahlenangaben über physische Eigenschaften der Steinsalz- und Kaligesteine. — «Kalie», 1944, № 6, 7.
188. Schenfeld K. Zeitschrift für Physik, 1932, Bd. 75.
189. Schütz P. Zeitschrift für Physik, 1932, Bd. 76.
190. Schmalz R. F. Deep-water evaporite depositions A. genetic Model. — Amer. Assoc. Petr. Geolog. Bull., 1969, vol. 53, H. 4.
191. Starfield A. M., Fairhurst C. How high-speed computers advance design of practical mine pillar systems. Eng. and Min. J., 1968, № 5, p. 78—84.
192. Stöchin T. Salt deposits of the Middle East.-Geol. Soc. Amer., Spec. Papers, 1968, № 88.
193. Schuppe F. Ein rheologisches Modell für das Salzgebirge. Bergakademie, 1963, № 15.
194. Voigt W. Lehrbuch der Kristallphysik. Leipzig, 1960.
195. Uhlenbecker F. W. Verformungsmessungen in der Grube und ergänzende Laboruntersuchungen auf dem Kaliwerk Hattorf (Werra-Revier) im Hinblick auf eine optimale Festlegung des Abbauverlustes bei grösstmöglicher Sicherheit der Grubenbaue. Freiberg, 1968.
196. Winkler H. Struktur und Eigenschaften der Kristalle. Wien, Urban-Verlag, 1950.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. Закономерности образования солей и особенности разработки соляных месторождений	5
<i>Глава I. Геологические и физико-химические условия формирования калийных месторождений</i>	—
§ 1. Краткие сведения о калийных месторождениях и их геологических условиях	—
§ 2. Физико-химические условия	7
<i>Глава II. Классификация, строение и текстура пород соленосных толщ. Особенности разработки соляных месторождений</i>	13
§ 1. Классификация галогенных пород	—
§ 2. Структурные и текстурные особенности толщ соленосных пород	15
§ 3. Особенности разработки соляных месторождений	24
ЧАСТЬ ВТОРАЯ. Методы лабораторных и натуральных исследований физико-механических свойств соляных пород	29
<i>Глава III. Отбор проб и изготовление образцов соляных пород</i>	—
§ 1. Отбор проб для лабораторных исследований	—
§ 2. Изготовление образцов	31
<i>Глава IV. Механические свойства кристаллов соляных пород</i>	32
§ 1. Связь между структурой и механическими свойствами кристаллов	33
§ 2. Структура основных породообразующих соляных минералов	34
§ 3. Механические свойства кристаллов соляных пород	35
<i>Глава V. Влияние различных факторов на определение прочности соляных пород при одноосном сжатии</i>	40
§ 1. Геометрическая форма и абсолютные размеры образцов	41
§ 2. Вертикальный размер образцов	48
§ 3. Минералогический состав и структура соляных пород	51

	§ 4. Влияние условий на контактах на характер разрушения и величину прочности . . .	59
	§ 5. Скорость приложения нагрузки	66
	§ 6. Увлажнение соляных пород	70
	§ 7. О характере и механизме разрушения образцов соляных пород при испытаниях на сжатие	72
<i>Глава</i>	<i>VI.</i> Прочность соляных пород при растяжении . . .	76
	§ 1. Метод прямого растяжения	77
	§ 2. Метод раздавливания и раскалывания	82
	§ 3. Метод разрыва изнутри образца	85
<i>Глава</i>	<i>VII.</i> Прочность соляных пород на изгиб	86
	§ 1. Методы определения прочности соляных пород на изгиб	—
	§ 2. Результаты исследований прочностных и деформационных характеристик соляных пород при изгибе	88
<i>Глава</i>	<i>VIII.</i> Модуль пропорциональности напряжений и деформаций (модуль упругости) и коэффициент поперечных деформаций (коэффициент Пуассона) соляных пород	93
	§ 1. Модуль пропорциональности напряжений и деформаций (модуль упругости)	—
	§ 2. Коэффициент Пуассона	96
<i>Глава</i>	<i>IX.</i> Паспорта прочности соляных пород и методы их построения	100
<i>Глава</i>	<i>X.</i> Методы определения и оценка пластичности и хрупкости соляных пород	107
<i>Глава</i>	<i>XI.</i> Исследование соляных пород при сложных напряженных состояниях	110
	§ 1. Методы исследования соляных пород	—
	§ 2. Результаты экспериментальных исследований свойств соляных пород	111
<i>Глава</i>	<i>XII.</i> Реологические свойства соляных пород	118
	§ 1. Реологические (механические) модели соляных пород	—
	§ 2. Основные теории ползучести	121
	§ 3. Ползучесть соляных пород при одноосном сжатии	124
	§ 4. Влияние влажности и скорости нагружения на деформации ползучести соляных пород при длительных испытаниях	133
	§ 5. Ползучесть соляных пород при изгибе	136
	§ 6. Определение релаксационных характеристик соляных пород	139
	§ 7. Длительная прочность соляных пород	142
<i>Глава</i>	<i>XIII.</i> Динамические свойства соляных пород	146
<i>Глава</i>	<i>XIV.</i> Определение прочности соляных пород в массиве	149
	§ 1. Методы определения прочности	—
	§ 2. Прочность при сжатии	152
	§ 3. Прочность на изгиб	159

§ 4. Длительные испытания соляных пород в натуральных условиях	162
ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ. Методы определения свойств соляных пород при реза- нии и вдавливании	164
Глава XV. Свойства соляных пород при резании	—
§ 1. Методы определения сопротивляемости ре- занию	—
§ 2. Свойства соляных пород как объекта раз- рушения механическими способами	171
Глава XVI. Свойства соляных пород при вдавливании	173
ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ. Примеры использования показателей механичес- ких свойств пород при расчете параметров систем разработки соляных месторождений	177
Глава XVII. Примеры расчета геометрических параметров систем подземной разработки солей по несущей спо- собности	181
§ 1. Общие положения	—
§ 2. Особенности расчета геометрических пара- метров камер выщелачивания	191
§ 3. Расчет потолочин камер по предельному равновесию	192
§ 4. Определение несущей способности элемен- тов системы целик — кровля — почва	196
§ 5. Примеры расчета геометрических пара- метров выработок по разрушающим на- грузкам	235
Глава XVIII. Примеры расчета параметров систем подзем- ной разработки солей по развитию предельных де- формаций	245
§ 1. Общие положения	—
§ 2. Примеры расчета параметров системы по предельным поперечным деформациям це- ликов (по методике К. Г. Хёфера)	247
§ 3. Примеры расчета параметров системы по предельным продольным деформациям це- ликов (по методике И. А. Карманова)	250
Список литературы	259

МИНИСТЕРСТВО ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНЫЙ
ИНСТИТУТ ГАЛУРГИИ

**Николай Максимович Проскуряков,
Рудольф Сергеевич Пермяков,
Анатолий Кузьмич Черников**

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СОЛЯНЫХ ПОРОД**

Редактор издательства *Э. М. Бородинская*
Технический редактор *И. Г. Сидорова*
Корректор *Л. И. Зайцева*
Переплет художника *Ю. И. Прошлецова*

Сдано в набор 20/XII 1972 г. Подписано к печати 24/V 1973 г. М-35095. Формат 60×90^{1/16}.
Бумага № 2. Печ. л. 17. Уч.-изд. л. 18,70. Тираж 1500 экз. Заказ 2248/836. Цена 2 р. 11 к.

Издательство «Недра». Ленинградское отделение. 193171, Ленинград, С-171,
ул. Фарфоровская, 12.
Ленинградская типография № 6 «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете
Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, г. Ленинград, Московский проспект, 91.

2 p. 11 r.

04

2686

HEAPA