МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Проф. И. А. ТИЩЕНКО

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ МНОГОКОРПУСНОГО ВЫПАРНОГО АППАРАТА

МОСКВА — 1938 г.
ИЗДАНИЕ НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОТДЕЛА МИХМ

КОВСКИЙ ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Проф. И. А. ТИЩЕНКО

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ МНОГОКОРПУСНОГО ВЫПАРНОГО АППАРАТА

МОСКВА — 1938 г.

ИЗДАНИЕ НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКОГО ОТДЕЛА МИХМ

Ответ. редактор инж. *А. И. Чацкий* Техред. *Н. М. Иппа*

Сдано в производство 1/XII—37 г. Подписано к печати 1/II—38 г.

Уполномоченный Главлита Б—721 Зак. тип. № 1633. Тираж 1000

Формат 62×94¹/₁₆. Авторск. лист. 8 Печ. листов 7

16-я типография треста «Полиграфкнига», Москва, Трехпрудный пер., 9.

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. Введение

Выпаривание, как технологический процесс, применяется в химической и пищевой промышленности с целью сгущения растворов или выделения из них растворенных веществ. В последнем случае наряду с выпариванием происходит осаждение растворенного вещества в кристаллическом или аморфном виде. Иногда выпаривание раствора производится в две стадии: в первой производится сгущение раствора до определенной повышенной концентрации, а во второй—дальнейшее выпаривание до насыщения или даже пересыщения раствора, причем растворенное вещество выпадает в осадок, отделяемый при помощи фильтров или центрифуг. В первой стадии сгущения из раствора могут выделяться различные примеси, обладающие меньшей растворимостью, чем интересующее нас растворенное вещество. В таких случаях после первой стадии выпаривания сгущенный раствор подвергается механической или химической очистке. Очищенный сгущенный раствор подвергается уже второй стадии сгущения путем дальнейшего выпаривания растворителя.

Растворителем обыкновенно является вода. Хотя на ряду с водой встречаются и другие растворители, применяемые в значительно меньших масштабах, мы здесь этих растворителей касаться не будем, так как теория и расчеты по выпариванию водных растворов могут быть полностью применены и ко всякому другому растворителю с учетом частных значений его физических констант. Выпаривание применяется также при перегонке смесей различных жидкостей для их разделения. Масштабы промышленного выпаривания колоссальны. В одной только сахарной промышленности СССР во время производственного сезона на всех заводах ежедневно выпаривается до 150 тыс. *т* воды. Кроме этого большие количества воды выпариваются из растворов поваренной соли, едкого натра, хромпика, крахмальной патоки и других продуктов, а также при перегонке и опреснении морской воды.

Так как для испарения одного килограмма воды при нормальном атмосферном давлении вместе с нагревом ее от 0° необходимо затратить около 640 *кал* тепла, то выпаривание в промышленном масштабе требует затраты громадных количеств топлива. Поэтому с целью экономии тепла и топлива обычно стараются на стадиях технологического процесса, предшествующих выпариванию, получить максимально концентрированные растворы. Так, например, соляная рапа, получаемая путем растворения подземных залежей каменной соли, перед выпариванием должна быть доведена почти до состояния насыщенного раствора. Диффузионный сок, получаемый из сахарной свеклы, должен по своей концентрации быть близким к клеточному природному соку. Нужно избегать значительных разбавлений растворов перед их выпариванием, допуская добавку воды только в тех строго определенных количествах, какие необходимы для целей подготовки раствора перед выпариванием.

Все эти предварительные меры хотя и дают возможность получить перед выпариванием растворы оптимальной концентрации, но все же не могут в ощутительном размере снизить расходы тепла на выпаривание.

До тех пор, пока техника выпаривания знала и применяла только однократное использование тепла, расход топлива на выпаривание был слишком большим. Для тех отраслей промышленности, в которых выпаривание является основным обязательным процессом, непомерное возрастание абсолютного расхода топлива могло явиться большим тормозом к развитию и расширению производства.

Благодаря изобретению Рилльe, открывшему возможность многократного использования одного и того же тепла для выпаривания, расход топлива оказалось возможным сократить в 5—6 и даже более раз. Изобретение Рилльe открыло дорогу применению многокорпусных выпарных аппаратов, в которых за счет 1 *кг* греющего пара выпаривается 4—6 *кг* и более воды. Техника различных отраслей промышленности (главным образом сахарной) пользуется этими аппаратами уже более восьмидесяти лет. В связи с применением многокорпусных аппаратов расход топлива на выпаривание воды по сравнению с прежним действительно сократился в несколько раз.

Так как в качестве теплоносителя в выпарных аппаратах применяется пар, то оказалась возможной весьма плодотворная комбинация парового двигателя с выпаркой. Пар промежуточного отбора от турбины или отработавший мятый пар из паровой машины и турбины, отдавший за счет температурного перепада незначительную долю своего тепла, превратившегося в механическую работу, используется затем в многократной выпарке, которая для парового двигателя является конденсационной установкой.

Поразительно плодотворная идея многократного использования тепла при выпаривании растворов не сразу нашла себе техическое применение. И теперь еще многим эта идея кажется парадоксальной и противоречащей закону сохранения энергии. Но в сахарной, соляной и химической промышленности многократная выпарка, благодаря своей чрезвычайной эффективности, заняла уже давно центральное место в тепловой схеме производства. В соляной промышленности, например, многократное выпаривание очень удачно комбинируется с тепло-электроцентралью. Мятый пар из турбин централи, произведя выпаривание соляного раствора, возвращается в паровые котлы в виде чистого конденсата. В сахарном заводе при такой же комбинации выпарки с паровым двигателем и паровым котлом, тепловая схема включает в себя еще различных потребителей пара, отбираемого из разных корпусов выпарки для нагрева промежуточных продуктов.

Конструктивно многокорпусная выпарка оформлена в виде разнообразных систем, отличающихся друг от друга числом корпусов (кратностью) устройством поверхности нагрева, способами питания корпусов раствором и греющим паром и другими деталями. Во всех этих конструкциях тёплота греющего пара используется многократно, а именно от 2 до 10 раз.

2. Схема многокорпусного выпарного аппарата

Принцип многократного использования тепла состоит в том, что пар, выделяющийся при кипении раствора в одном сосуде, используется как теплоноситель в другом подобном сосуде, куда поступает кипящий раствор из первого сосуда. Пар, выделяющийся во втором сосуде, используется в третьем и т. д. Такое многократное использование одного и того же количества тепла возможно при наличии в каждом сосуде условий для теплопередачи, т. е. если температура греющего пара всегда будет выше температуры кипения раствора. А эта разность температур достигается понижением давления над кипящим раствором по направлению от первого сосуда к последнему.

Многокорпусный выпарной аппарат имеет устройство, схематически изображенное на рис. 1.

В закрытый металлический котел I, называемый первым корпусом и, снабженный трубчатой обогревательной камерой A_1, по трубе a_1 непрерывно поступает жидкий раствор, предназначенный для выпаривания. Параллельно с раствором в обогревательную камеру первого корпуса по трубе b_1 поступает греющий пар из парового котла, машины или турбины. В обогревательной камере пар, конденсируясь, отдает через стенки трубок свою скрытую теплоту раствору, который закипает и дает при кипении вторичный пар более низкого давления, чем первоначальный греющий (первичный) пар в камере A_1. Конденсат, полученный из первичного пара из обогревательной камеры A_1, по трубе c_1 стекает в автоматический водоотводчик, откуда самотеком или насосом отводится в сборник конденсата. Неконденсирующиеся газы, насыщенные водяным паром, по особым стяжным трубкам d_1 отводятся из обогревательной камеры первого корпуса и автоматического водоотводчика в обогревательную камеру второго корпуса.

Раствор, отчасти сгущенный после выпаривания в первом корпусе, по трубе a_2 поступает во второй корпус, имеющий устройство одинаковое с первым. Из надрастворного пространства B_1 первого корпуса вторичный пар этого корпуса через брызголовушку поступает в обогревательную камеру второго корпуса по трубе b_2. В эту же трубку по трубкам d_1 отводятся неконденсирующиеся газы из камеры и водоотводчика первого корпуса. Таким образом вторичный пар, выделяющийся из кипящего раствора в первом корпусе, служит греющим, первичным паром для второго корпуса. Конденсируясь в обогревательной камере второго корпуса A_2, этот пар через стенки трубок отдает свою скрытую теплоту раствору и поддерживает его кипение, вследствие чего получается вторичный пар второго корпуса, обладающий еще более низким давлением.

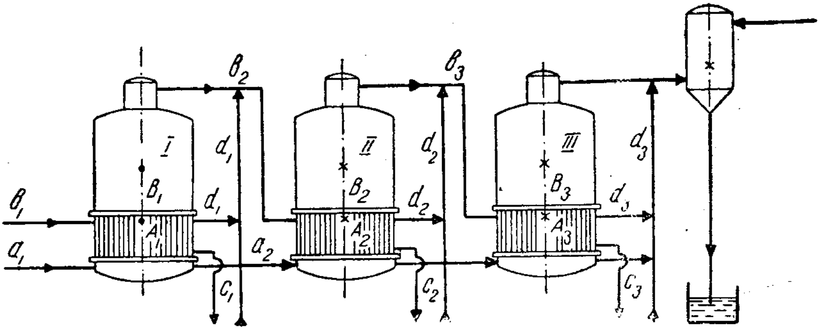

Рис. 1. Многокорпусный выпарной аппарат.

Из обогревательной камеры второго корпуса A_2 конденсационные воды поступают в другой водоотводчик. Раствор из второго корпуса по трубе a_3 перетекает в третий корпус, а вторичный пар из пространства B_2 по трубе b_3 поступает в обогревательную камеру третьего корпуса и т. д. Вторичный пар из последнего корпуса поступает на барометрический или поверхностный конденсатор.

Необходимым условием передачи тепла в каждом корпусе является наличность некоторой разницы температур греющего первичного пара и кипящего раствора, или, что то же, наличность соответствующей разности давлений первичного и вторичного пара. Поэтому для того чтобы выпаривание в каждом корпусе было возможно, необходимо понижение давления над раствором от первого корпуса к последнему. Давление пара, греющего первый корпус, должно быть больше, чем давление пара над раствором в этом корпусе, давление вторичного пара в первом корпусе должно быть больше, чем давление вторичного пара во втором корпусе и т. д. Эта разность давлений создается за счет повышения давления в первом корпусе или путем создания разрежения в последнем корпусе или же комбинацией обоих этих условий.

Температура кипения в первом корпусе имеет практические пределы, определяемые свойствами растворенного вещества. Многие органические вещества разлагаются при повышенной температуре кипения раствора, поэтому возможности повышения давления в первом корпусе для них ограничены. Для растворов минеральных веществ температура кипения в первом корпусе обычно может быть выше, чем для органических веществ. Поэтому общий температурный перепад от первого корпуса к последнему бывает различным в зависимости от того, с каким растворенным веществом мы имеем дело. Величина общего температурного перепада по всей выпарке определяется как разность между температурой первичного пара, греющего первый корпус, и температурой вторичного пара последнего корпуса. Так, например, если первый корпус обогревается паром с температурой в 139°, а в последнем корпусе, где кипение идет под вакуумом, температура вторичного пара будет 56°, то общий температурный перепад во всем аппарате будет 139 — 56 = 83°. Этот температурный перепад за вычетом некоторых потерь должен быть распределен между всеми корпусами выпарки.

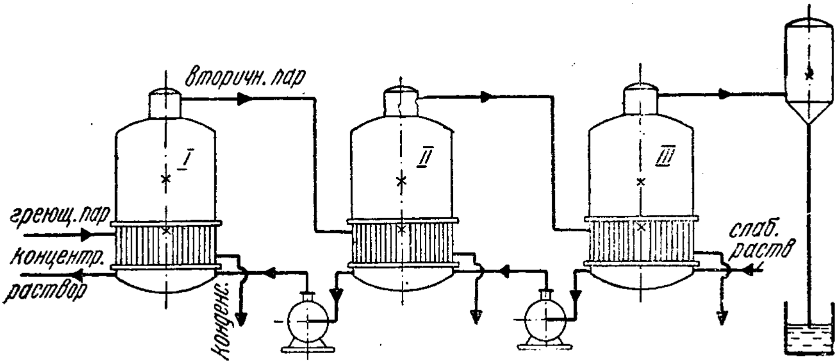

Рис. 2. Противоточная выпарка.

Прочие модификации принципиальной схемы многокорпусного выпарного аппарата обусловливаются частными обстоятельствами.

Так, например, в отличие от нашей схемы (рис. 1), изображающей прямоточную выпарку, в которой пар и раствор идут параллельно от первого корпуса к последнему, существуют выпарки противоточные (рис. 2), в которых раствор двигается навстречу греющему пару. В таких аппаратах начальный пар наиболее высокой температуры поступает в первый корпус, а жидкий начальный раствор поступает в последний корпус, затем в предпоследний, и т. д. Так как давление от первого корпуса к последнему понижается, то раствор в таких выпарках не может самотеком переходить из корпуса в корпус, а должен перекачиваться насосами. Такая выпарка требует добавочной затраты энергии, но имеет перед прямоточной то преимущество, что для сгущенного раствора, кипящего в первом корпусе, создаются более благоприятные условия теплопередачи, т. е. наивысшая разность температур.

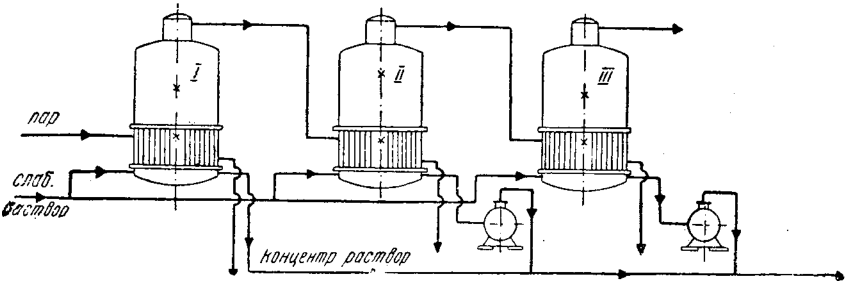

Рис. 3. Выпарка с параллельным питанием корпусов.

В том случае, если выпариваемый раствор имеет концентрацию, близкую к состоянию насыщения, нет нужды создавать последовательное питание корпусов раствором, т. е. заставлять раствор переходить из корпуса в корпус. В таких случаях устанавливается параллельное питание всех корпусов выпарки раствором одной и той же концентрации (рис. 3). Из каждого корпуса получается окончательно сгущенный раствор, а греющий пар последовательно переходит из корпуса в корпус.

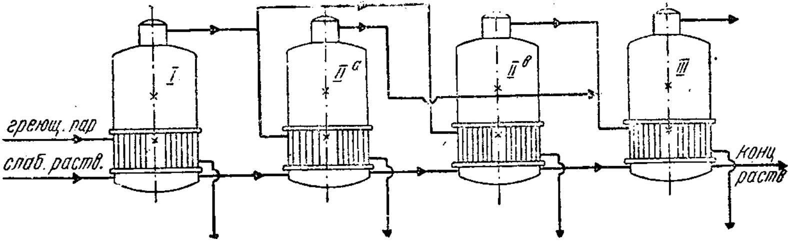

Рис. 4. Выпарка с двойным корпусом.

При расширении существующей выпарки иногда вместо замены одного из корпусов добавляют к нему новый, причем питание этих двух частей одного и того же корпуса раствором производят последовательно, а питание греющим паром параллельно (рис. 4).

В том случае, если для выпаривания нехватает мятого пара, из паровых двигателей в обогревательную камеру первого корпуса подают кроме мятого пара прямой пар (острый пар) из парового котла, причем его редуцируют до давления одинакового с давлением мятого пара (рис. 5). Если же мятый пар отсутствует, т. е. паровых двигателей нет, обогревание первого корпуска ведут острым паром непосредственно из паровых котлов, редуцируя давление в случае необходимости.

При недостаче мятого пара чаще всего можно встретить следующую комбинированную схему обогревания выпарного аппарата острым и мятым паром (рис. 6). Перед первым корпусом устанавливают добавочный, так называемый ноль-корпус, обогреваемый исключительно острым паром. Раствор поступает в ноль-корпус, а давление вторичного пара в ноль-корпусе поддерживается равным давлению мятого пара. Поэтому мятый пар может быть смешан со вторичным паром из ноль-корпуса и вместе с ним введен в обогревательную камеру первого корпуса. При такой комбинированной схеме ноль-корпус заменяет собой редукционный вентиль, но представляет по сравнению с ним то преимущество, что, понижая давление греющего пара, попутно отчасти выпаривает раствор, т. е. усиливает действие выпарки.

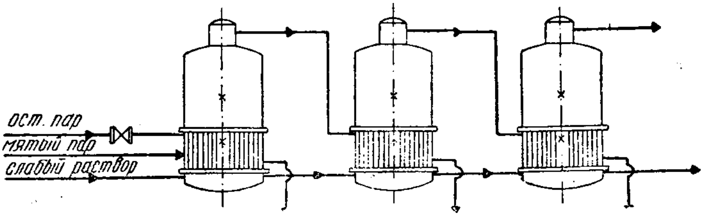

Рис. 5. Выпарка с параллельным обогревом острым и мятым паром.

Как мы видели выше, многокорпусный выпарной аппарат при затрате греющего пара только в первом корпусе позволяет использовать его скрытую теплоту несколько раз. По отношению к греющим парам этот аппарат является многократным конденсатором или многоступенчатым перегонным аппаратом, позволяющим при сравнительно незначительной затрате греющего пара получить во много раз большее количество перегнанной воды.

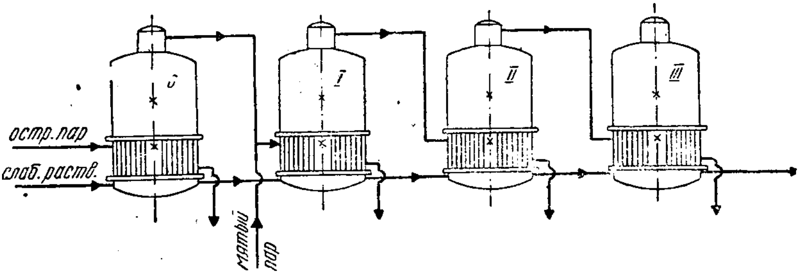

Рис. 6. Выпарка с ноль-корпусом.

Применение многокорпусного аппарата поэтому может преследовать двоякую цель: или сгущение разбавленного начального раствора, или же получение чистой дистиллированной воды, например, опреснение морской воды, или очистку питательной воды для паровых котлов высокого давления. На сахарных и др. заводах выпарному аппарату ставят еще третью задачу, а именно, снабжение паром (экстра-паром) различных потребителей в виде нагревательных приборов для повышения температуры некоторых продуктов. В этом смысле многокорпусный выпарной аппарат можно рассматривать как сложный паровой котел, дающий пар разных давлений, как выше, так и ниже атмосферного.

Для отбора экстра-пара от труб, проводящих вторичный пар, делают ответвления, по которым часть вторичного пара из того или иного корпуса отводится в нагревательный аппарат, из которого конденсационная вода отводится через автоматический водоотводчик, соединенный стяжной трубкой со вторичным паром следующего корпуса, как показано на схеме (рис. 7).

В смысле возможности пароотбора многокорпусный выпарной аппарат представляет сравнительное разнообразие и может дать

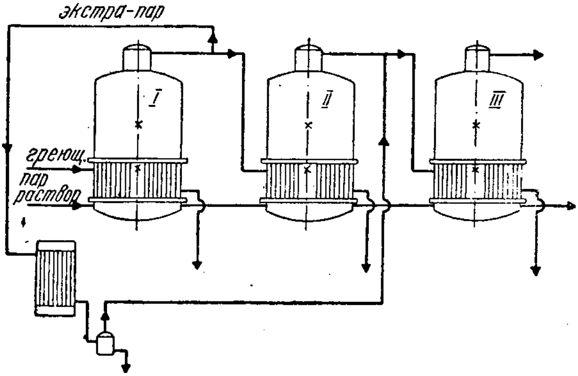

Рис. 7. Выпарка с пароотбором на сторону.

пар, наиболее подходящий для поставленной цели. Но более выгодным представляется отбор экстра-пара не из первых, а из последующих корпусов. Пар из этих корпусов, как многократно использованный для выпаривания, является более дешевым, чем пар из первых корпусов. Вообще же включение нагревательных приборов в тепловую схему выпарки с пароотбором ведет к экономии в расходе топлива на предприятии. Если в последнем корпусе выпарки выпаривание идет под атмосферным давлением, то вторичный пар из последнего корпуса целиком используется для нагрева посторонней аппаратуры, причем потребители этого пара являются поверхностными конденсаторами для выпарки и особых конденсаторов не требуется. В этом случае выпарка называется «выпаркой под давлением», в отличие от «выпарки под разрежением». При выпарке под давлением сгущенный раствор из последнего корпуса выходит с температурой значительно выше 100°. Такой раствор при поступлении в разреженное пространство может выпарить заметное количество воды за счет понижения температуры кипения, т. е. самоиспарением. Для использования самоиспарения там, где есть возможность создать разрежение, раствор из последнего корпуса переводят в закрытый аппарат, соединенный с конденсатором. Такой аппарат называется концентратором.

В концентраторе дополнительно испаряется некоторое количество воды и температура сгущенного раствора понижается соответственно разрежению. Пар из концентратора поступает на конденсатор. При неравномерном отборе экстра-пара из последнего корпуса в нем может оказаться излишек вторичного пара, который также используется в концентраторе в качестве греющего пара. Для этого концентратор снабжают поверхностью нагрева. В этом случае концентратор является условным последним корпусом, добавочной ступенью выпарки или буфером, поглощающим избытки экстра-пара. Схема выпарки под давлением с концентратором дана на рис. 8.

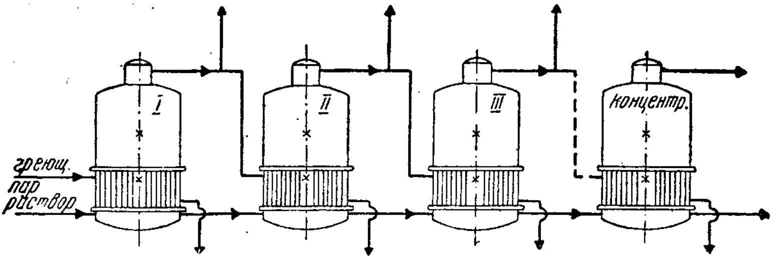

Рис. 8. Выпарка с концентратором.

С некоторыми ограничениями можно сказать, что производительность выпарных аппаратов, т. е. количество выпариваемой воды на затраченную весовую единицу греющего пара растет с увеличением кратности, т. е. числа последовательно соединенных корпусов. Но так как вместе с этим растут также и потери температуры, зависящие от нескольких причин, то полезная разность температур, представляющая собой основное условие для теплопередачи, уменьшается, вследствие чего поверхность нагрева всего аппарата растет не пропорционально числу корпусов, а скорее. Кроме того, при некотором большом, переходящем известные пределы числе корпусов возрастающая потеря разности температур может стать очень близкой и даже равной общему температурному перепаду, при чем полезная разность температур сведется к нулю и выпаривание станет невозможным.

Потери разности температур при выпаривании растворов обусловливаются следующими причинами. Наибольшая потеря зависит от понижения упругости (депрессия) паров растворителя при растворении в нем твердого тела. По этой причине температура кипения раствора всегда выше температуры насыщенного пара растворителя при том же давлении. Это повышение точки кипения увеличивается с повышением концентрации раствора. Следовательно, потеря разности температур вследствие понижения упругости пара (потеря от депрессии) увеличивается по направлению от первого корпуса к последнему. Так, например, температура кипения 15% сахарного раствора выше температуры кипения чистой воды при атмосферном давлении на 0,2°, каковая величина и представляет собой потерю разности температур при использовании вторичного пара 15% сахарного раствора. При концентрации сахарного раствора в 60%—эта потеря составляет уже 3°. Высокой депрессией и весьма большой потерей разности температур отличаются растворы веществ с малым молекулярным весом. Так, например, 25% раствор поваренной соли дает повышение точки кипения на 7°, а 35% раствор едкого натра на 22°. Потери от депрессии при выпаривании таких растворов сильно понижают полезную разность температур.

Второй причиной потери разности температур является так называемый гидростатический эффект, состоящий в том, что в высоком слое кипящей жидкости температура кипения низшего слоя жидкости, находящейся под повышенным давлением, всегда несколько выше, чем в верхнем слое. Разность между средней температурой кипения всего раствора и температурой кипения верхнего его слоя представляет собой потерю разности температур от гидростатического эффекта. Влияние давления столба жидкости на температуру кипения увеличивается с повышением удельного веса, т. е. концентрации раствора. Поэтому потеря от гидростатического эффекта возрастает по направлению от первого корпуса к последнему при прямоточной и в обратном направлении при противоточной выпарке.

Наконец, при переходе вторичного пара по трубам из одного корпуса в обогревательную камеру следующего температура пара понижается вследствие торможения. Потеря давления пара при прочих равных условиях почти пропорциональна квадрату скорости пара, которая в свою очередь при прочих равных условиях пропорциональна удельному объему пара.

Точное определение величины потерь разности температур от гидростатического эффекта и от торможения довольно затруднительно. Так как эти потери невелики по сравнению с потерей от депрессии, то их обычно не вычисляют, а оценивают суммарно по практическим данным примерно в 1 — 2° на каждый корпус. Потери от депрессии, достигающие в некоторых случаях очень большой величины, определяют по сравнительно точным формулам и таблицам в зависимости от средней концентрации растворов в каждом корпусе.

Учитывая потери разности температур, необходимо ограничивать кратность выпарного аппарата с таким расчетом, чтобы на каждый корпус приходилось не менее 7—8° полезной разности температур.

3. О концентрации растворов

Содержание растворенного вещества в растворе, называемое «концентрацией» раствора, выражается несколькими способами. Наиболее удобным для аналитических расчетов является выражение концентрации в весовых процентах растворенного сухого вещества по отношению к весу всего раствора. Так, например, если A *г* сухого вещества содержатся в N *г* раствора, то концентрация в весовых процентах будет:

$$\frac{100\,A}{N}\ \%\ \text{по весу раствора.}$$

Согласно принятой размерности абсолютно чистый растворитель имеет концентрацию равную нулю, а абсолютно сухо вещество имеет концентрацию 100%. Концентрация всяко раствора находится в пределах 0 до 100%.

Так как в научной литературе и в справочниках встреч ются и другие размерности концентрации, то необходимо уме перечислять различные выражения для концентрации в вес вые проценты.

Концентрация выражается, например, в **долях моля**, для чего дается отношение числа молей растворенного вещества к числу молей всего раствора. Так, например, если a молей сухого вещества растворено в b молях растворителя, то общее число молей раствора будет $a+b$, а на один моль раствора будет приходиться $x=\frac{a}{a+b}$ молей растворенного вещества.

Доля растворителя при этом будет $(1-x)$ молей на один моль раствора. Обозначая молекулярный вес растворенного вещества через M, а молекулярный вес растворителя через m, найдем, что в данном растворе содержится Mx *г* растворенного вещества и $m(1-x)$ *г* растворителя. Концентрация в весовых процентах будет:

$$\frac{100\,Mx}{Mx+(1-x)m}=b$$

или

$$b=\frac{100}{1+\frac{m}{M}\,\frac{1-x}{x}}\,.$$

По этой формуле, зная молярную долю x, можем вычислить концентрацию b в весовых процентах и обратно.

Встречается выражение концентрации в виде числа молей растворенного вещества на 1000 *г* растворителя. Если, например, N молей сухого вещества содержится в 1000 *г* растворителя, то общая масса раствора будет $MN+1000$, а весовой процент растворенного вещества будет:

$$b=\frac{100\,MN}{MN+1000}\ \%\ \text{по весу раствора.}$$

По этой формуле, зная величину N, можно найти b, и наоборот.

Иногда выражают концентрацию в граммах растворенного вещества, приходящихся на один литр раствора. Если в одном литре раствора содержится g *г* растворенного вещества, то весовая концентрация будет:

$$b = \frac{100\,g}{1000\,d},$$

где d—удельный вес раствора.

При графических расчетах выпарки представляется удобным выражать концентрацию в виде отношения количества растворителя к количеству растворенного вещества. Так как при выпаривании раствора меняется только количество растворителя, абсолютное количество растворенного вещества остается по- оянным, то концентрации, выраженные таким путем, дают воз- ожность сразу определять производительность выпаривания, е. количество растворителя, удаляемое при выпаривании на *г* или *кг* растворенного вещества. Так, например, 10% раствор одержит $\frac{90}{10} = 9$ *кг*, а 50%—$\frac{50}{50} = 1$ *кг* растворителя на 1 *кг* растворенного вещества. Поэтому, если при выпаривании 10% раствора получается 50% раствор, то производительность выпаривания будет равна $9 - 1 = 8$ *кг* растворителя на 1 *кг* растворенного вещества.

Пользуясь вышеприведенными формулами, обычно приводят все данные величины концентрации к весовому процентному выражению и полученными цифрами пользуются при расчетах по выпариванию растворов.

4. Степень сгущения раствора при выпаривании. Определение количества воды, подлежащей выпариванию. Диаграмма сгущения

Степень необходимого сгущения раствора обыкновенно задается начальной и конечной концентрациями выпариваемого раствора. Концентрация выражается в процентах растворенного вещества по весу раствора.

Обозначим концентрацию жидкого раствора (до выпаривания) через b, а концентрацию сгущенного раствора (после выпаривания) через B. Количество воды, выпаренной из 1 *кг* начального раствора, обозначим W. Величины b и B должны быть заданы, величина W является искомой.

Количество сгущенного раствора, получаемого из 1 *кг* начального раствора, будет $1 - W$. Концентрация раствора изменяется в обратном отношении к количеству получаемого при выпаривании раствора. Поэтому $1 : (1 - W) = B : b$. Из этой пропорции находим величину W по формуле:

$$W = 1 - \frac{b}{B}$$

или

$$W = \frac{B-b}{B}. \qquad (1)$$

Из формулы видно, что W всегда будет правильной дробью. Для того чтобы выразить количество выпариваемой воды в весовых процентах по отношению к начальному весу раствора — нужно величину W умножить на 100.

Иногда задача формулируется так: определить конечную концентрацию раствора B, если известно количество воды W, выпариваемой из 1 *кг* раствора, имеющего начальную концентрацию b.

Из формулы (1) находим:

$$B = \frac{b}{1-W}. \qquad (2)$$

Из этой же формулы находим:

$$\frac{B}{b} = \frac{1}{1-W}.$$

Отношение $\frac{B}{b} = \varphi$ показывает во сколько раз конечная концентрация больше начальной. Величину φ можно назвать **коэфициентом сгущения**. Для определения φ имеем формулу:

$$\varphi = \frac{1}{1-W}. \qquad (3)$$

В выражение для φ величина концентрации не входит. Для того чтобы по начальной концентрации определить конечную, если φ известно, пользуются формулой:

$$B = \varphi \cdot b, \qquad (4)$$

вытекающей из определения коэфициента сгущения.

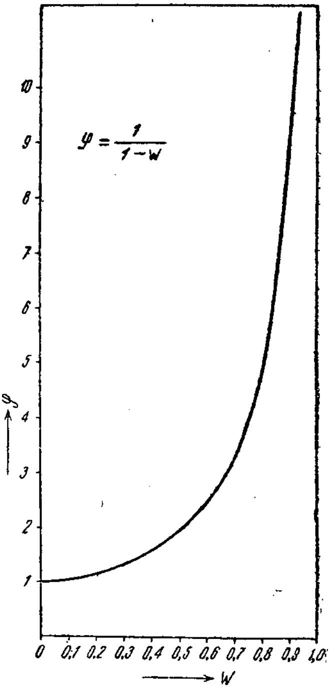

Рис. 9. Диаграмма коэфициента сгущения.

Зависимость между W и φ — гиперболическая. Ее можно изобразить в виде графика (рис. 9).

График показывает, что при низких начальных сгущенных растворах по сравнению с высокими одно и то же количество выпариваемой воды производит гораздо меньшее дальнейшее сгущение. В самом деле, при начальном сгущении $\varphi = 1{,}25$, выпаривание воды $W = 0{,}1$, т. е. от 0,2 до 0,3, дает повышение коэфициента сгущения от 1,25 до 1,43, т. е. всего лишь на 0,18. Между тем, выпаривая ту же 0,1 *кг* воды при начальном сгущении 3,33 ($W = 0{,}7$), повышаем коэфициент сгущения φ до 5, т. е. уже на 1,67 единиц, что дает повышение концентрации почти в десять раз большее, чем в первом случае, и наоборот, прибавление незначительных количеств воды к сильно сгущенным растворам производит понижение концентрации гораздо более сильное, чем прибавление тех же количеств воды к менее концентрированным растворам.

5. Температура кипения растворов. Депрессия

Температура кипения имеет исключительно важное значение при всех расчетах, связанных с выпариванием растворов. По температуре кипения раствора в каждом отдельном случае определяется полезная разность температур между греющим паром и кипящим раствором. Эта полезная разность температур, как основной фактор теплопередачи, входит в формулы для определения количества передаваемого тепла и величины поверхности нагрева. Ошибки в определении температуры кипения являются причиной ошибочных вычислений поверхностей нагрева выпарных аппаратов, в результате чего или не достигается в эксплоатации расчетная производительность выпарки, или создается удорожающий аппаратуру необоснованный запас поверхности нагрева.

Мы рассмотрим исключительно водные растворы твердых нелетучих веществ. Согласно этому ограничению в парах кипящего раствора содержатся только пары чистого растворителя и отсутствуют пары растворенного вещества. Для большинства растворов твердых веществ действительная картина выпаривания практически совпадает с таким ограничением.

То, что нам известно относительно температур кипения растворов твердых веществ, сводится к следующим основным положениям:

1) при одном и том же растворителе и при прочих одинаковых условиях (внешнее давление, концентрация раствора) точка кипения раствора зависит от химической природы растворенного вещества. Каждому растворенному веществу свойственна особая температура кипения раствора при прочих одинаковых условиях;

2) для одного и того же вещества температура кипения раствора зависит от растворителя при прочих одинаковых условиях;

3) при одном и том же давлении температура кипения раствора всегда выше температуры кипения чистого растворителя;

4) с повышением концентрации раствора температура кипения его повышается при прочих одинаковых условиях;

5) для одного и того же раствора температура кипения повышается при повышении внешнего давления.

Факт повышения температуры кипения раствора по сравнению с температурой кипения чистого растворителя при одном и том же внешнем давлении объясняется тем, что упругость пара растворителя над раствором всегда ниже, чем упругость пара над чистым растворителем при той же температуре. При растворении твердого тела упругость пара растворителя понижается тем больше, чем выше концентрация раствора.

Это понижение упругости называется депрессией. С увеличением депрессии повышается температура кипения раствора.

В отдельных случаях депрессия, а стало быть и повышение температуры кипения достигают весьма значительных размеров. Так, например, водный раствор едкого натра при концентрации в 95% весовых (по весу раствора) кипит под атмосферным давлением при температуре 275,5°, т. е. точка кипения его на 175,5° выше точки кипения чистой воды при том же внешнем давлении. Водный 85% раствор едкого кали кипит при температуре 336°, т. е. на 236° выше точки кипения воды. При таких условиях пар, развивающийся при кипении раствора едкого натра, в момент образования имеет давление около 60 *ата* (соответственно температуре 275,5°). Для указанного раствора едкого кали давление пара, образующегося при кипении, будет около 140 *ата* (соответственно температуре 336°). Так как при кипении этих растворов над ними находится пар с давлением только 1 *ата*, то отсюда ясно, как велико в этих двух случаях значение депрессии.

Вообще для определения величины понижения упругости пара достаточно знать температуру кипения раствора при каком-нибудь внешнем давлении P_1. По температуре кипения раствора, пользуясь таблицами насыщенного пара, находят давление паров чистого растворителя P_2. Разность давления $P_2 - P_1$ определяет количественно величину понижения упругости пара ΔP, т. е.

$$\Delta P = P_2 - P_1.$$

В этой формуле P_2 показывает давление пара, образующегося в растворе при его кипении, а P_1—давление пара, образующегося при кипении чистого растворителя при одном и том же внешнем давлении P_1.

Мы видим, что парообразование внутри раствора происходит при давлении большем, а иногда значительно большем, чем внешнее давление над раствором, т. е. всегда $P_2 > P_1$. И только для чистого растворителя при кипении $P_2 = P_1$. Необходимость этого большего давления P_2, при парообразовании, т. е. при кипении растворов, объясняется тем, что для превращения растворителя в пар молекулы растворителя в растворе должны преодолеть силы внутрирастворного притяжения между молекулами растворителя и молекулами растворенного вещества. Между тем при кипении чистого растворителя преодолевается только взаимное притяжение молекул растворителя. Поэтому при кипении раствора молекулы растворителя должны развить большую скорость, а стало быть и большее давление, чем при кипении чистого растворителя. А большему давлению насыщенного пара соответствует и более высокая температура. Поэтому температура кипения раствора всегда выше температуры кипения чистого растворителя при одинаковом внешнем давлении. Обозначая абсолютную температуру кипения чистого растворителя при внешнем давлении P_1—через T_1, а температуру кипения раствора при том же внешнем давлении P_1

через T_2, получим разность $T_2 - T_1 = \Delta T$, показывающую степень повышения точки кипения раствора по сравнению с температурой кипения растворителя.

В дальнейшем эту разность ΔT будем называть сокращенно депрессией.

В самом общем виде величину депрессии ΔT можно определить из уравнения Клаузиуса-Клапейрона:

$$(V_s - \sigma)\,dp = 427\,\frac{r}{T}\cdot dT,$$

где V_s —удельный объем насыщенного пара при температуре T,
σ—удельный объем воды при температуре T,
dp—элементарное повышение давления,
r—скрытая теплота парообразования при T,
dT—элементарное повышение температуры или элементарная депрессия по нашей терминологии.

Переходя от бесконечно малых к конечным разностям при весьма близких P_1 и P_2 и пренебрегая удельным объемом жидкой воды, т. е. принимая $\sigma = 0$, получаем уравнение в таком виде:

$$V_s(P_2 - P_1) = 427\,\frac{r}{T}\,\Delta T,$$

откуда

$$\Delta T = \frac{V_s T}{427 r}(P_2 - P_1). \qquad (1)$$

Допуская без больших погрешностей, что насыщенный пар подчиняется газовому характеристическому уравнению, т. е. что

$$P_1 V_s = RT,$$

находим:

$$V_s = \frac{RT}{P_1}.$$

Подставляя полученное значение V_s в уравнение (1), имеем:

$$\Delta T = \frac{RT^2}{427 r}\cdot\frac{P_2 - P_1}{P_1}. \qquad (2)$$

Согласно закону Рауля:

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} = i\,\frac{n}{N+n},$$

где n—число молей вещества, растворенного в N молях растворителя, i—коэфициент, зависящий от степени диссоциации растворенного электролита. Для неэлектролитов $i = 1$. Подставляя значение $\frac{P_2 - P_1}{P_1}$ в уравнение (2), имеем:

$$\Delta T = \frac{RT_i^2}{427 r}\cdot\frac{n}{N+n}. \qquad (3)$$

Заметим, что закон Рауля справедлив только для разбавленных растворов, поэтому вычисление депрессии для концентрированных растворов по формуле (3) не дает результатов, хорошо согласующихся с опытными данными.

Вместе с тем из закона Рауля для данной постоянной концентрации, т. е. при $i\frac{n}{N+n}=\text{const}$ получается

$$\frac{P_2-P_1}{P_1}=\text{const} \text{ и } \frac{P_2}{P_1}=\text{const}.$$

Последнее равенство представляет собой закон Бабо, найденный опытным путем и показывающий, что отношение упругости пара чистого растворителя к упругости пара раствора представляет собой величину постоянную, независящую от температуры при одной и той же концентрации раствора. Для многих растворов закон Бабо в действительности хорошо согласуется с данными опыта. Вообще же говоря, так как тепловой эффект при разбавлении раствора по формуле Кирхгоффа равен:

$$dQ=ART^2\left(\frac{d\lg\frac{P_2}{P_1}}{dt}\right)_n\cdot dN,$$

что при $\frac{P_2}{P_1}=\text{const}$ дает $dQ=0$, то закон Бабо оказывается правильным только для таких растворов, для которых дальнейшее разбавление не вызывает никакого теплового эффекта.

На основании уравнения (3) для другой температуры кипения растворителя T_1 и соответственных давлений пара для чистого растворителя и для раствора можем написать формулу для депрессии ΔT_1, при кипении раствора той же концентрации:

$$\Delta T_1=\frac{RT_1^2\cdot i}{427\,r_1}\cdot\frac{n}{N+n}. \tag{4}$$

Коэфициент i очень мало зависит от температуры, поэтому мы принимаем его за постоянную величину.

Разделяя почленно уравнение (4) на уравнение (3), получаем:

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T}=\left(\frac{T_1}{T}\right)^2\cdot\frac{r}{r},$$

откуда

$$\Delta T_1=\Delta T\left(\frac{T_1}{T}\right)^2\cdot\frac{r}{r}. \tag{5}$$

Это уравнение является правильным только в тех случаях, когда тепловой эффект разбавления dQ и коэфициент i не зависят от температур раствора.

Во многих случаях это уравнение даже для концентрированных растворов дает результаты, хорошо согласующиеся с опытными данными.

Уравнение (5) дает возможность вычислить депрессию ΔT_1 для раствора данной концентрации при какой угодно температуре кипения растворителя T_1, если известна депрессия ΔT того же раствора при какой-нибудь другой температуре кипения растворителя T.

На основании весьма обильных экспериментальных данных для многих растворов различных концентраций имеются числовые значения депрессии при нормальном атмосферном давлении 760 *мм* рт. ст. Будем называть депрессию при внешнем давлении 760 *мм* нормальной депрессией. Придавая в формуле (5) величине ΔT значение нормальной депрессии, можем всегда легко вычислить ΔT_1, т. е. депрессию того же раствора при каком угодно внешнем давлении.

Для водных растворов при нормальной депрессии $T = 373°$ и $r = 538{,}7$ *кал*. Подставляя эти значения в уравнение (5), получаем для водных растворов:

$$\Delta T_1 = 0{,}003872 \ \Delta T \frac{T_1^2}{r_1}. \qquad (6)$$

Легко видеть, что по данной нормальной депрессии ΔT величина ΔT_1 может быть вычислена при какой угодно температуре T_1. Задаваясь разными значениями T_1 и находя в таблицах насыщенного водяного пара соответствующие значения r_1, можем вычислить величину коэфициента $0{,}003872 \frac{T_1^2}{r_1}$ раз навсегда для всяких температур T_1. Так, например, для T_1 равного $273 + 60 = 333°$ находим по таблицам $r_1 = 562{,}9$. Находим далее

$$0{,}003872 = \frac{333^2}{562{,}9} = 0{,}7628.$$

Пользуясь значением этого коэфициента, определим, что в тех случаях, когда нормальная депрессия ΔT будет иметь частное значение, например 5°, депрессия, соответствующая кипению чистого растворителя при температуре 60° С, будет соответственно $5 \cdot 0{,}7628 = 3{,}8$ и т. д.

Вообще для вычисления депрессии будем пользоваться следующей рабочей формулой:

$$\Delta T_1 = \Delta T \cdot \eta, \qquad (7)$$

где

$$\eta = 0{,}003872 \cdot \frac{T_1^2}{r_1};$$

Значения коэфициента η для разных температур T_1 от 35° С до 135° С с интервалами в 5° вычислены нами при температуре 100° или $T = 373°$.

Эти значения получились следующими:

t° C	η	t° C	η	t° C	η
35	0,6370	70	0,8177	105	1,0333
40	0,6609	75	0,8463	110	1,0674
45	0,6854	80	0,8755	115	1,1025
50	0,7106	85	0,9056	120	1,1384
55	0,7364	90	0,9362	125	1,1757
60	0,7628	95	0,9677	130	1,2135
65	0,7899	100	1,0000	135	1,2525

Значения нормальной депрессии для растворов некоторых минеральных и органических соединений при разных концентрациях приводятся в прилагаемых таблицах (см. приложение). Эти таблицы составлены путем графической интерполяции на основании экспериментальных данных, взятых из эбулиоскопических таблиц (Справочник технической энциклопедии, т. 6).

Вышеизложенный метод дает возможность в каждом отдельном случае вычислить депрессию и определить соответствующую потерю разности температур. Так, например, если известно, что в данном корпусе кипящий раствор имеет определенную концентрацию, то по этой концентрации находим в соответствующей таблице нормальную депрессию ΔT. Если кроме того известно давление над кипящим раствором, то величину r можно найти по паровым таблицам (см. приложение).

6. Общая и полезная разность температур. Потери разности температур

Для того чтобы выпаривание во многокорпусном аппарате вообще было возможно, необходимо чтобы налицо была некоторая разность температур между греющим паром и паром выделяющимся при кипении. Для каждого корпуса в отдельности эта разность температур определяется в общем виде величиной $(T_n - \Theta_n)$, а для всей системы—величиной $(T_1 - \Theta_n)$, где T_1— температура пара, греющего первый корпус, а Θ_n—температура паров, выделяющихся при кипении раствора в последнем корпусе. Величина $T_1—\Theta_n$ называется полной разностью температур для всего выпарного аппарата, а величины общего вида $T_n - \Theta_n$ называются частными разностями температур для каждого отдельного корпуса. Если бы в каждом отдельном корпусе температура выделяющихся паров растворителя была равна температуре кипения t_n, то передача тепла шла бы за счет частной разности температур $T_n - \Theta_n$. На самом деле равенство $t_n = \Theta_n$ может соблюдаться только при кипении чистого растворителя. При выпаривании же растворов, вследствие понижения упругости паров растворителя (депрессия) температура кипения раствора всегда выше температуры насыщенных паров растворителя при том же давлении. Поэтому всегда $t_n > \Theta_n$ и передача тепла в каждом корпусе идет не за счет разности температур $T_n - \Theta_n$, а за счет разности $T_n - t_n$. В виду того, что вследствие депрессии $t_n > \Theta_n$, имеем всегда неравенство

$$T_n - t_n < T_n - \Theta_n. \tag{24}$$

Величина $T_n - t_n$ называется полезной разностью температур для данного корпуса. На основании неравенства (24) можем сказать, что при кипении растворов полезная разность температур всегда меньше, чем разность температур при кипении чистого растворителя.

Иными словами, при выпаривании растворов мы имеем потерю разности температур в каждом корпусе. Величина этой потери будет вообще для n-го корпуса:

$$(T_n - \Theta_n) - (T_n - t_n) = t_n - \Theta_n = \Delta t_n. \tag{25}$$

Таким образом в каждом корпусе потеря разности температур Δt_n равна разности между температурой кипения раствора и температурой паров растворителя в этом корпусе. Эта потеря разности температур называется потерей от депрессии. Сумма всех этих потерь для всех корпусов увеличивается с увеличением числа корпусов и может значительно уменьшить общую полезную разность температур. Потеря от депрессии увеличивается с увеличением концентрации раствора, поэтому она растет по направлению от первого корпуса к последнему. Потеря разности температур от депрессии является неизбежной естественной потерей, величина которой зависит от концентрации раствора и давления пара над ним.

При расчете выпарки потеря от депрессии определяется предварительно по приближенным значениям концентрации раствора в каждом корпусе, пользуясь таблицами (см. приложение).

Кроме потери от депрессии имеются еще другие причины потерь разности температур, которые оцениваются суммарно в округленных цифрах. Потеря при переходах вторичного греющего пара принимается в 0,5—1° на каждый корпус.

Полезная разность температур находится путем вычитания суммы всех потерь из общей разности температур $T_1 - \Theta_n$.

Абсолютная величина $T_1 - \Theta_n$ зависит от нескольких причин.

Величина T_1 зависит от задания и от местных условий. Для обогревания первого корпуса может быть взят острый пар из паровых котлов непосредственно, или же редуцированный острый пар, или же, наконец, мятый пар из паровых двигателей (машины или турбины). В зависимости от стойкости выпариваемых веществ температура T_1 может быть более или менее высокой. Во всяком случае всегда необходимо стремиться использовать мятый (ретурный) пар.

Величина Θ_n зависит от вакуума, достигаемого в последнем корпусе. При обыкновенных заводских технических возможностях в смысле достижения устойчивых разрежений, температуру водяных паров в последнем корпусе можно принять $\Theta_n = 50—55°$.

Распределение полной полезной разности температур по отдельным корпусам выпарки производится согласно некоторым определенным закономерностям, как это будет показано ниже. Если по тем или иным соображениям это распределение полезной разности температур известно, то можно составить таблицу температурного режима для всей выпарки.

Предположим, что первый корпус обогревается острым паром, имеющим температуру 150°, а в последнем (5-м) корпусе выпарки выделяется под вакуумом пар, имеющий температуру 55°. Общая разность температур во всей выпарке будет 150—55=95°.

Допустим, что потери от депрессии и других причин будут: в первом корпусе 2°, во втором—4°, в третьем—7°, в четвертом—10° и в пятом—15°. Кроме того, температура вторичного пара при переходе из корпуса в корпус падает в каждом на 0,5°, Эту потерю для пара пятого корпуса не принимаем во внимание, так как пар из пятого корпуса не идет на нагрев выпарки, а уходит в конденсатор. Общая потеря разности температур от всех причин выразится суммой:

$$2+4+7+10+15+4\cdot 0,5=40°\cdot$$

Полезная разность температур будет:

$$95-40=55°.$$

Если эта полезная разность температур распределится между всеми пятью корпусами поровну, то на каждый корпус придется $\frac{55}{5}=11°$ полезной разности температур.

По всем этим данным легко составить следующую таблицу распределения температур по корпусам. Температуру конденсатов, образующихся из греющих паров, можно принимать в расчетах равной температуре греющего пара, из которого данный конденсат получается. Практически конденсат имеет всегда более низкую температуру, так как он задерживается на поверхности нагрева и частично отдает свою теплоту кипящему раствору.

Пример температурного режима в пятикорпусной выпарке

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус	4-й корпус	5-й корпус
Греющего пара T	150	136,5	121	102,5	81
Кипящего раствора t . . .	139	125,5	110	91,5	70
Вторичного пара θ	137	121,5	103	81,5	55
Конденсата τ	150	136,5	121	102,5	81

Глава II

ОБЩИЙ МЕТОД РАСЧЕТА МНОГОКОРПУСНОГО ВЫПАРНОГО АППАРАТА

1. Введение

Расчет многокорпусного выпарного аппарата представляет весьма сложную задачу, требующую установления математической зависимости между множеством факторов, влияющих на процесс выпаривания, расход греющего пара, количество выпариваемой воды и величины поверхностей нагрева отдельных корпусов. Сложностью задачи объясняется то обстоятельство, что несмотря на столетнюю давность аппарата, общий метод его расчета был разработан сравнительно недавно, а именно в 1923—24 г. Окончательное же завершение найденного метода относится к текущему 1937 г. и появляется впервые в этой книге. В первой своей стадии расчет имеет в виду определение расхода греющего пара и количества воды, выпариваемой по корпусам. Во второй стадии задачей расчета является определение поверхностей нагрева отдельных корпусов, рациональных соотношений между ними и рационального паротбора. В виду некоторой трудности усвоения метода расчета в самой общей форме, в дальнейшем изложении соблюдается переход от частного к общему, т. е. последовательно рассматриваются однокорпусный, двухкорпусный и трехкорпусный аппараты с числовыми примерами. Затем на основе частностей делаются обобщения в форме закономерностей, формул и уравнений.

2. Однокорпусный аппарат

Представим себе выпарной аппарат в виде цилиндрического сосуда, снабженного трубчатой поверхностью нагрева (рис. 10). По трубке *a* в аппарат притекает жидкий раствор, предназначенный для выпаривания, труба *b* подает греющий пар из парового котла или двигателя (мятый пар), по трубе *c* уходят из аппарата пары кипящего растворителя, по трубе *d* вытекает сгущенный раствор, по трубке e отводится конденсат, образовавшийся из греющего пара.

Для того чтобы кипение в таком аппарате было возможно, необходимо, чтобы температура греющего пара T_1 была выше температуры кипения раствора t_1 при данном давлении, так как только при этом условии возможна теплопередача от греющего пара к раствору.

Пусть из 1 *кг* жидкого раствора, поступающего в аппарат, выпаривается w_1 *кг* воды. Количество полученного при этом сгущенного раствора будет $(1 - w_1)$ *кг*. Концентрация жидкого и сгущенного раствора, обозначенные через B и B_1, будут обратно пропорциональны массам растворов, т. е.

$$B : B_1 = (1 - w_1) : 1,$$

откуда

$$B = B_1(1 - w_1) \quad \text{и} \quad W = \frac{B_1 - B}{B_1}. \qquad (1)$$

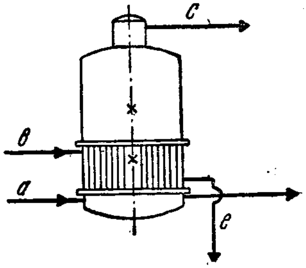

Рис. 10. Однокорпусный выпарной аппарат.

Согласно уравнению (1) можем по заданным начальной и конечной концентрациям определить количество воды, подлежащей выпариванию на 1 *кг* раствора.

Так, например, для сгущения раствора выпариванием от концентрации в 10% по весу раствора до концентрации в 60% на каждый килограмм раствора необходимо выпарить:

$$w_1 = \frac{60 - 10}{60} = \frac{5}{6} = 0{,}833 \text{ кг воды},$$

при чем получится 1—0,833=0,167 *кг* сгущенного раствора.

Пусть для целей выпаривания на 1 *кг* раствора расходуется D_1 *кг* греющего пара. Обозначим, кроме того, полное теплосодержание греющего пара через λ_1, теплосодержание выделяющихся при кипении паров воды через i_1, температуру конденсата через τ_1, температуру жидкого раствора через t и удельную теплоту жидкого раствора через c, а сгущенного через c_1. Составим тепловой баланс выпаривания.

В аппарат поступает тепла:

с 1 *кг* раствора	ct	*ккал*
» D_1 *кг* греющего пара	$D_1\lambda_1$	»

Из аппарата уходит тепла:

с парами воды	$w_1 i_1$	*ккал*
» $(1 - w_1)$ *кг* сгущенного раствора . .	$(1 - w_1)c_1 t_1$	
» D *кг* конденсата	$D_1\tau_1$	

Если пренебречь тепловыми потерями, то поступающее количество тепла должно быть равно уходящему, т. е.

$$ct + D_1\lambda_1 = w_1 i_1 + (1 - w_1) c_1 t_1 + D_1\tau_1.$$

В правой части этого уравнения, во втором слагаемом, произведение $(1 - w_1) c_1$ обозначает число калорий, содержащееся в $(1 - w_1)$ *кг* сгущенного раствора на каждый градус температуры. Так как $(1 - w_1)$ сгущенного раствора образовалась из 1 *кг* жидкого раствора, содержащего в себе на каждый градус c калорий, то при удалении w_1 *кг* воды жидкий раствор потеряет на каждый градус w_1 *ккал* тепла и остающееся в сгущенном растворе тепло будет $(c - w_1)$ *ккал*, поэтому

$$(1 - w_1) c_1 = c - w_1.$$

Подставляя последнее выражение взамен произведения $(1 - w_1) c_1$, получим уравнение баланса в следующем виде: или

$$ct + D_1\lambda_1 = w_1 i_1 + (c - w_1) t_1 + D_1\tau_1$$

или

$$w_1 (i_1 - t_1) = D_1 (\lambda_1 - \tau_1) + c (t - t_1),$$

откуда

$$w_1 = D_1 \frac{\lambda_1 - \tau_1}{i_1 - t_1} + c \frac{t - t_1}{i_1 - t_1}. \qquad (2)$$

Выражение $\frac{\lambda_1 - \tau_1}{i_1 - t_1}$ в числителе содержит величину, показывающую количество тепла, отданного 1 *кг* греющего пара, а в знаменателе количество тепла, затраченного на испарение 1 *кг* воды, поэтому отношение $\frac{\lambda_1 - \tau_1}{i_1 - t_1}$ показывает количество воды, испаряемое за счет использования теплоты 1 *кг* греющего пара. Назовем это отношение коэфициентом испарения и обозначим его буквой α_1, таким образом

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1 - \tau_1}{i_1 - t_1}; \qquad (3)$$

выражение $c \frac{t - t_1}{i_1 - t_1}$ может быть положительным, отрицательным или равным нулю. Знак его зависит от знака числителя, так как знаменатель $i_1 - t_1$ всегда положителен. Если жидкий раствор нагрет выше температуры кипения, т. е. если $t > t_1$, то величина $c (t - t_1)$ обозначает количество тепла, освобождающегося при падении температуры раствора при поступлении его в аппарат. За счет этого количества тепла, полученного из самого раствора, испаряется $c \frac{t - t_1}{i - t_1}$ *кг* воды. Испарение за счет теплоты раствора называют самоиспарением, а величину $\frac{t - t_1}{i_1 - t_1}$ назовем коэфициентом самоиспарения и обозначим буквой β_1.

Таким образом

$$\beta_1 = \frac{t - t_1}{i_1 - t_1}. \tag{4}$$

Если раствор, поступающий в аппарат, предварительно нагрет до температуры кипения, то $t = t_1$ и $\beta_1 = 0$.

Если раствор предварительно перегрет, то $t > t_1$, β_1 положительно и $c\beta_1$ показывает количество воды, превратившееся в пар путем самоиспарения.

В том случае, если $t_1 > t$, т. е. раствор не догрет до температуры кипения, то β_1 и величина $c\frac{t - t_1}{i_1 - t}$ отрицательны и $c\beta_1$ будет показывать количество недоиспаренной воды, получившееся вследствие того, что пришлось затратить $c(t - t_1)$ *ккал* на подогрев раствора в аппарате от температуры t до t_1.

Приняв во внимание уравнение (3) и (4), получим уравнение (2) в новой форме:

$$w_1 = D_1\alpha_1 + c\beta_1 \tag{5}$$

Из этого уравнения можем определить расход пара на выпаривание. А именно:

$$D_1 = \frac{w_1 - c\beta_1}{\alpha_1}. \tag{6}$$

Пример 1. Водный раствор, имеющий начальную концентрацию 10% весовых, выпаривается в однокорпусном аппарате до концентрации 30%. Средняя температура кипения $t_1 = 105°$ C, температура греющего пара $T_1 = 150°$ C, температура конденсата $\tau = 120°$ C. Определить количество выпариваемой воды и расход греющего пара на 1 *кг* раствора. Раствор поступает в аппарат при $t = 80°$ C. Начальная удельная теплота раствора $c = 0{,}9$.

Решение. 1. Согласно уравнению (1) количество выпариваемой воды будет:

$$w_1 = \frac{30 - 10}{30} = \frac{2}{3} = 0{,}67 \text{ кг на 1 кг раствора.}$$

2. Определяем коэфициенты испарения α_1 по уравнению (3):

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1 - \tau_1}{i_1 - t_1} = \frac{654{,}7 - 120}{640{,}4 - 105} = \frac{534{,}7}{535{,}4} = 0{,}9987.$$

Величины λ_1 и i_1 взяты из таблиц сухого насыщенного пара.

3. Определяем β_1 по уравнению (4):

$$\beta_1 = \frac{t - t_1}{i_1 - t_1} = \frac{80 - 105}{640{,}4 - 105} = \frac{-25}{535{,}4} = -0{,}0468.$$

В данном случае отрицательный знак при β_1 показывает, что происходит недоиспарение воды вследствие необходимости затратить тепло на подогрев раствора в аппарате от температуры 80° до средней температуры кипения 105°.

4. Определяем расход греющего пара на 1 *кг* раствора. Согласно уравнению (6):

$$D_1 = \frac{w_1 - c\beta_1}{\alpha_1} = \frac{0{,}67 + 0{,}9 \cdot 0{,}0468}{0{,}9987} = \frac{0{,}7121}{0{,}9987} = 0{,}713 \text{ кг}.$$

Таким образом для данного случая расход греющего пара составляет 71,3%, при чем воды выпаривается 67% по весу раствора.

Пример 2. Раствор поступает в аппарат нагретым до температуры кипения, т. е. $t = 105°$. Остальные условия, как в примере 1.

Решение. В этом случае не требуется расходовать пара на подогрев раствора в аппарате и нет самоиспарения, при чем согласно уравнению (4)

$$\beta_1 = \frac{105 - 105}{535{,}4} = 0.$$

При прочих одинаковых данных расход пара на выпаривание будет по уравнению (6):

$$D_1 = \frac{0{,}67}{0{,}9987} = 0{,}671 \text{ кг на 1 кг раствора},$$

или 67,1% по весу раствора.

Пример 3. Раствор поступает в аппарат перегретым при $t = 120°$ C. Остальные условия, как в предыдущих примерах.

Решение. В этом случае при поступлении раствора в аппарат происходит частичное самоиспарение воды за счет теплоты перегрева раствора, при чем β_1 положительно и равно:

$$\beta_1 = \frac{120 - 105}{535{,}4} = 0{,}0281.$$

Вследствие самоиспарения расход греющего пара уменьшится и будет:

$$D = \frac{0{,}67 - 0{,}9 \cdot 0{,}0281}{0{,}9987} = 0{,}6455 \text{ кг},$$

или 64,55% по весу раствора.

3. Двухкорпусный аппарат

Представим себе, что пары растворителя, выделяющиеся из однокорпусного выпарного аппарата или из «первого корпуса», поступают в обогревательную камеру «второго корпуса», а раствор, частично сгущенный в первом корпусе, перетекает для дальнейшего выпаривания во второй корпус. Необходимым условием выпаривания во втором корпусе является наличие разности температур между паром из первого корпуса и температурой кипения во втором корпусе. Для этого нужно, чтобы давление во втором корпусе было ниже, чем в первом.

Схема расположения корпусов и обозначения ясны из черт. 11.

Кроме того обозначим через λ_2 и i_2 полное теплосодержание греющего пара и вторичного пара, получающегося при кипении во втором корпусе.

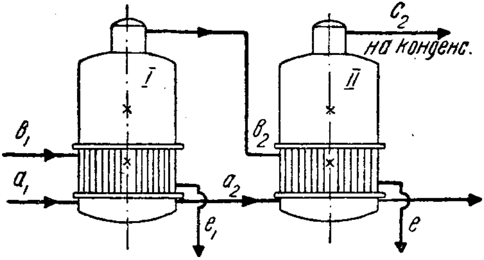

Рис. 11. Двухкорпусный выпарной аппарат.

Определим w_2, т. е. количество воды, выпариваемой во втором корпусе. Составим тепловой баланс для второго корпуса. Согласно предыдущему. во второй корпус поступает w_1 *кг* греющего пара и $(1—w_1)$ *кг* раствора, имеющего удельную теплоту c_1, а из второго корпуса уходит w_2 *кг* вторичного пара, w_1 *кг* конденсат аи $(1 — w_1 — w_2)$ *кг* сгущенного раствора, имеющего уд. теплоту c_2. По этим данным составляем тепловой баланс:

во второй корпус поступает тепла:

с греющим паром . . . . $w_1\lambda_2$ *ккал*

» раствором . . . . $(1 — w_1) c_1 t_1$

из второго корпуса уходит тепла:

с вторичным паром . . . . . . $w_2 i_2$ *ккал*

» сгущенным раствором . . . . . $(1 — w_1 — w_2) c_2 t_2$

» конденсатом . . . . $w_1 \tau_2$

Уравнение теплового баланса будет:

$$w_1\lambda_2 + (1 - w_1) c_1 t_1 = w_2 i_2 + (1 - w_1 - w_2) c_2 t_2 + w_1 \tau_2. \tag{7}$$

Тепловыми потерями пренебрегаем.

В уравнении (7) произведения $(1 — w_1) c_1$ и $(1 — w_1 — w_2) c_2$ согласно предыдущему можно заменить соответственно на $(c — w_1)$ и $(c — w_1 — w_2)$.

Тогда уравнение (7) примет следующий вид:

$$w_1\lambda_2 + (c - w_2) t_1 = w_2 i_2 + (c - w_1 - w_2) t_2 + w_1 \tau_2,$$

откуда находим:

$$w_2 = w_1 \frac{\lambda_2 - t_2}{i_2 - t_2} + (c - w_1) \frac{t_1 - t_2}{i_2 - t_2}$$

или, заменяя $\frac{\lambda_2 - t_2}{i_2 - t_2}$ на α_2 (коэфициент испарения во втором корпусе) и $\frac{t_1 - t_2}{i_2 - t_2}$ на β_2 (коэфициент самоиспарения во втором корпусе), получим для второго корпуса уравнение аналогичное уравнению (5), а именно:

$$w_2 = w_1 \alpha_2 + (c - w_1) \beta_2. \tag{8}$$

Подставляя в это уравнение вместо w_1 его значение из уравнения (5), получим выражение для количества воды, выпаренной во втором корпусе:

$$w_2 = D_1(\alpha_1\alpha_2 - \alpha_1\beta_2) + c(\beta_1\alpha_2 - \beta_1\beta_2 + \beta_2). \qquad (9)$$

Складывая w_1 и w_2, найдем общее количество воды, выпаренной в двухкорпусном аппарате. Имеем:

$$w_1 = D_1\alpha_1 + c\beta_1,$$

$$w_2 = D_1(\alpha_1\alpha_2 - \alpha_1\beta_2) + c(\beta_1\alpha_2 - \beta_1\beta_2 + \beta_2).$$

Складывая, получим:

$$w_1 + w_2 = W_2 = D_1(\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2 - \alpha_1\beta_2) + \\ + c(\beta_1 + \beta_1\alpha_2 - \beta_1\beta_2 + \beta_2), \qquad (10)$$

где W_2 обозначает полное количество воды, выпаренной в двух корпусах.

Из уравнения (10) легко определить расход греющего пара на двухкорпусную выпарку, а именно:

$$D_1 = \frac{W_2 - c(\beta_1 + \beta_1\alpha_2 - \beta_1\beta_2 + \beta_2)}{\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2 - \alpha_1\beta_2}. \qquad (11)$$

Величина W_2 определяется по заданным начальной и конечной концентрации раствора по уравнению (1).

Пример 4. Определить расход греющего пара и количество выпариваемой воды в каждом корпусе в отдельности, для двухкорпусной выпарки, если начальная концентрация раствора 10%, а конечная 30% весовых. Уд. теплота начального раствора $c = 0{,}9$; температура раствора при входе в первый корпус $t = 80°$, температура кипения в первом корпусе $t_1 = 105°$, во втором $t_2 = 70°$, температура греющего пара для первого корпуса $T_1 = 150°$, для второго $T_2 = 104°$; температура конденсата из первого корпуса $\tau_1 = 120°$, из второго $\tau_2 = 100°$. Температура вторичного пара из второго корпуса $\Theta_2 = 65°$.

Решение: 1) общее количество выпариваемой воды находим по уравнению (1) по заданным начальным и конечным концентрациям:

$$W_2 = \frac{30-10}{30} = 0{,}67 \text{ кг на 1 кг начального раствора;}$$

2) определяем коэфициенты испарения:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1 - \tau_1}{i_1 - t_1} = \frac{654{,}7 - 120}{640{,}4 - 105} = 0{,}9987,$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2 - \tau_2}{i_2 - t_2} = \frac{640{,}06 - 100}{624{,}9 - 70} = \frac{540{,}06}{554{,}9} = 0{,}9742;$$

3) определяем коэфициенты самоиспарения β_1 и β_2:

$$\beta_1 = \frac{t - t_1}{i_1 - t_1} = \frac{80 - 105}{640{,}4 - 105} = -0{,}0468;$$

$$\beta_2 = \frac{t_1 - t_2}{i_2 - t_2} = \frac{105 - 70}{624{,}9 - 70} = \frac{35}{554{,}9} = 0{,}0631;$$

4) определяем расход пара, греющего первый корпус по уравнению (11):

$$D_1 = \frac{0{,}67 - 0{,}9(-0{,}0468 - 0{,}0468 \cdot 0{,}9742 + 0{,}0468 \cdot 0{,}0631 + 0{,}0631)}{0{,}9987 + 0{,}9987 \cdot 0{,}9742 - 0{,}9987 \cdot 0{,}0631}$$

$D_1 = \frac{0{,}6708}{1{,}9086} = 0{,}3514$ *кг* на 1 *кг* начального раствора,

или 35,14% по весу начального раствора;

5) количество воды, выпариваемой в первом корпусе, находим по уравнению (5), а именно:

$$w_1 = 0{,}3514 \cdot 0{,}9987 - 0{,}9 \cdot 0{,}0468 = 0{,}3032 \text{ кг}.$$

Количество воды, выпариваемой во втором корпусе, определяем по уравнению (9):

$$w_2 = 0{,}3514(0{,}9987 \cdot 0{,}9742 - 0{,}9987 \cdot 0{,}0631) +$$
$$+ 0{,}9(-0{,}0468 \cdot 0{,}9742 + 0{,}0468 \cdot 0{,}0631 + 0{,}0631) = 0{,}362 \text{ кг}.$$

Полное количество выпариваемой воды будет:

$$W_2 = w_1 + w_2 = 0{,}3032 + 0{,}362 = 0{,}6652 \sim 0{,}67 \text{ кг}.$$

4. Трехкорпусный аппарат

Представим себе, что пары растворителя из второго корпуса поступают на обогревание третьего, имеющего такое же устройство, как и первые два корпуса. Раствор из второго корпуса для окончательного выпаривания поступает в третий, где и приобретает конечную заданную концентрацию. Для того чтобы выпаривание в третьем корпусе было возможно, необходимо, чтобы температура пара, греющего третий корпус, была выше температуры кипения раствора в том же корпусе, т. е. чтобы давление над раствором во втором корпусе было выше давления над раствором в третьем корпусе. Подобно предыдущему обозначим для третьего корпуса температуру греющего пара через T_3, температуру кипения через t_3, температуру конденсата τ_3. Полное теплосодержание греющего пара λ_3, полное теплосодержание вторичного пара i_3, количество выпариваемой воды w_3. Количество греющего пара для третьего корпуса будет w_2, количество поступающего раствора $(1 - w_1 - w_2)$, количество

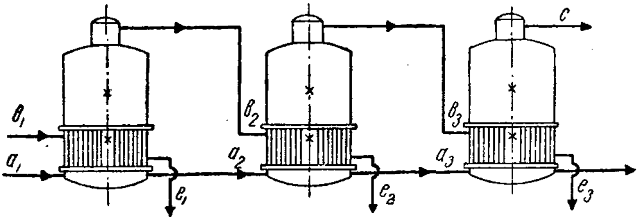

Рис. 12. Трехкорпусный выпарной аппарат.

получающегося раствора $(1-w_1-w_2-w_3)$, количество конденсата w_2, уд. теплота сгущенного раствора c_3, полное количество воды, выпаренное в трех корпусах, будет $W_3 = w_1 + + w_2 + w_3$ на 1 *кг* жидкого раствора, поступающего в первый корпус.

Тепловой баланс третьего корпуса выразится уравнением:

$$w_2\lambda_3 + (1-w_1-w_2)\,c_2t_2 = w_3i_3 + (1-w_1-w_2-w_3)\,c_3t_3 + w_2\tau_3, \quad (12)$$

в котором левая часть представляет суммарное количество поступающего, а правая—количество уходящего тепла.

Заменяем в уравнении (12) $(1-w_1-w_2)\,c_2$ на $(c-w_1-w_2)$ и $(1-w_1-w_2-w_3)\,c_2$ на $(c-w_1-w_2-w_3)$, тогда уравнение (12) принимает следующий вид:

$$w_2\lambda_3 + (c-w_1-w_2)\,t_2 = w_3i_3 + (c-w_1-w_2-w_3)\,t_3 + w_2\tau_3,$$

откуда находим:

$$w_3 = w_2\frac{\lambda_3-t_3}{i_3-t_3} + (c-w_1-w_2)\frac{t_2-t_3}{i_3-t_3}.$$

Заменяя $\frac{\lambda_3-\tau_3}{i_3-t_3}$ на α_3 (коэфициент испарения) и $\frac{t_2-t_3}{i_3-t_3}$ на β_3 (коэфициент самоиспарения), получаем:

$$w_3 = w_2\alpha_3 + (c-w_1-w_2)\,\beta_3 \quad (13)$$

или

$$w_3 = w_2\alpha_3 + (c-W_2)\,\beta_3. \quad (13a)$$

Уравнение (13а) аналогично уравнению (5) для первого корпуса и уравнению (8) для второго корпуса.

Подставим в уравнение (13а) вместо w_2 и W_2 их значения соответственно уравнениям (8) и (10), тогда получим:

$$w_3 = D_1\,[(\alpha_1\alpha_2-\alpha_1\beta_2) + c\,(\beta_1\alpha_2-\beta_1\beta_2+\beta_3)]\,\alpha_3 +$$
$$+ [c - D_1(\alpha_1+\alpha_1\alpha_2-\alpha_1\beta_2) - c\,(\beta_1+\beta_1\alpha_2-\beta_1\beta_2+\beta_2)]\,\beta_3.$$

Раскрывая скобки и произведя приведения подобных членов, преобразуем это последнее уравнение в следующее:

$$w_3 = D_1\,[(\alpha_1\alpha_2-\alpha_1\beta_2)\,\alpha_3 - (\alpha_1+\alpha_1\alpha_2-\alpha_1\beta_2)\,\beta_3] +$$
$$+ c\,[(\beta_1\alpha_2-\beta_1\beta_2+\beta_2)\,\alpha_3 - (\beta_1+\beta_2\alpha_2-\beta_1\beta_2+\beta_2)\,\beta_3 + \beta_3]. \quad (14)$$

По этому уравнению определяется количество воды, выпаренной в третьем корпусе.

Сравним между собою уравнения (5), (9) и (14), выражающие соответственно количества воды, выпаренной в первом, во втором и третьем корпусах. Для этого выпишем их рядом:

$$w_1 = D_1\alpha_1 + c\beta_1,$$
$$w_2 = D_1\,(\alpha_1\alpha_2-\alpha_1\beta_2) + c\,(\beta_1\alpha_2-\beta_1\beta_2+\beta_2),$$
$$w_3 = D_1\,[(\alpha_1\alpha_2-\alpha_1\beta_2)\,\alpha_3 - (\alpha_1+\alpha_1\alpha_2-\alpha_1\beta_2)\,\beta_3] +$$
$$+ c\,[(\beta_1\alpha_2-\beta_1\beta_2+\beta_2)\,\alpha_3 - (\beta_1+\beta_1\alpha_2-\beta_1\beta_2+\beta_2)\,\beta_3 + \beta_3].$$

Как видим, все эти уравнения в правой части имеют два слагаемых, из которых первое представляет собою величину D_1 со своим коэфициентом. Обозначим коэфициенты при D_1, соответственно через x_1, x_2 и x_3, а коэфициенты при c соответственно через y_1, y_2 и y_3. Тогда уравнения для w_1, w_2, w_3 примут следующий вид:

$$w_1 = D_1x_1 + cy_1,$$
$$w_2 = D_1x_2 + cy_2,$$
$$w_3 = D_1x_3 + cy_3.$$

Если сравним коэфициент x_3 с коэфициентами x_1 и x_2, то увидим, что

$$x_3 = x_2\alpha_3 - (x_1 + x_2)\beta_3, \tag{15}$$

т. е. коэфициент при D_1 в выражении для w_3 равен предыдущему (x_2), помноженному на коэфициент испарения в третьем корпусе (α_3), минус сумма предыдущих ($x_1 + x_2$) помноженная на коэфициент самоиспарения (β_3) в третьем корпусе.

Поэтому коэфициент x_3 можно вычислить, зная x_1 и x_2. Заметим кроме того, что $x_1 = \alpha_1$. Сравнивая величину коэфициента y_3 с y_1 и y_2, заметим, что

$$y_3 = y_2\alpha_3 - (y_1 + y_2)\beta_3 + \beta_3, \tag{16}$$

т. е. коэфициент при c в выражении для w_3 равен предыдущему (y_2), помноженному на коэфициент испарения (α_3) в третьем корпусе, минус сумма предыдущих ($y_1 + y_2$), помноженная на коэфициент самоиспарения (β_3) плюс коэфициент самоиспарения (β_3) в третьем корпусе.

Поэтому коэфициент y_3 также может быть вычислен по известным y_1 и y_2. Заметим, что $y_1 = \beta_1$.

Если сравним между собой соответственно x_2 и x_1, а также y_2 и y_1, то увидим, что x_2 составляется из x_1 по этому же правилу, как и x_3, а y_2 по тому же правилу, как и y_3. Поэтому для вычисления коэфициентов x_3 и y_3 достаточно знать только первые коэфициенты x_1 и y_1, и соответственные коэфициенты испарения и самоиспарения для всех последующих корпусов.

Теперь для определения расхода пара, греющего первый корпус в трехкорпусной выпарке, достаточно сложить уравнения для w_1, w_2 и w_3. Тогда получим уравнение:

$$w_1 + w_2 + w_3 = W_3 = D_1(x_1 + x_2 + x_3) + c(y_1 + y_2 + y_3). \tag{17}$$

Пусть будет:

$$x_1 + x_2 + x_3 = X. \tag{18}$$
$$y_1 + y_2 + y_3 = Y. \tag{19}$$

Тогда уравнение (17) примет следующий вид:

$$W_3 = D_1X + cY, \tag{20}$$

откуда

$$D_1 = \frac{W_3 - cY}{X}. \qquad (21)$$

Уравнение (21) дает возможность определить расход пара, греющего первый корпус трехкорпусной выпарки. Величина W_3 находится предварительно по заданным начальной и конечной концентрации раствора.

Пример 5. Водный раствор, имеющий начальную концентрацию 10%, сгущается в трехкорпусном выпарном аппарате до конечной концентрации 30% весовых. Начальная температура раствора при поступлении в первый корпус $t = 80°$, уд. теплота его $c = 0{,}9$.

Распределение температур по корпусам дано согласно следующей таблице.

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Температура греющего пара	$T_1 = 150°$	$T_2 = 104$	$T_3 = 78$
» кипения раствора . .	$t_1 = 105$	$t_2 = 80$	$t_3 = 60$
» вторичного пара . . .	$\theta_1 = 104{,}5$	$\theta_2 = 79$	$\theta_3 = 57$
» конденсата	$\tau_1 = 120$	$\tau_2 = 92$	$\tau_3 = 70$

Определить расход пара D_1, греющего первый корпус, на 1 *кг* начального жидкого раствора.

Решение: 1) по таблицам сухого насыщенного пара находим прежде всего величины λ и i для каждого корпуса.

Эти величины будут соответственно:

для 1-го корпуса по температуре 150 — $\lambda_1 = 654{,}70$ *ккал*
104,5 — $i_1 = 640{,}23$ »
» 2-го » » » 104 — $\lambda_2 = 640{,}05$ »
79 — $i_2 = 630{,}40$ »
» 3-го » » » 78 — $\lambda_3 = 630{,}20$ »
57 — $i_3 = 621{,}48$ »

2) далее определяем коэфициенты испарения и самоиспарения:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1 - \tau_1}{i_1 - t_1} = \frac{654{,}7 - 120}{640{,}23 - 105} = \frac{534{,}7}{535{,}23} = 0{,}9990$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2 - \tau_2}{i_2 - t_2} = \frac{640{,}06 - 92}{630{,}40 - 80} = \frac{548{,}06}{550{,}40} = 0{,}9957$$

$$\alpha_3 = \frac{\lambda_3 - \tau_3}{i_3 - t_3} = \frac{630{,}20 - 70}{621{,}48 - 60} = \frac{560{,}20}{561{,}48} = 0{,}9977$$

$$\beta_1 = \frac{t - t_1}{i_1 - t_1} = \frac{-25}{535{,}23} = -0{,}0467$$

$$\beta_2 = \frac{t_1 - t_2}{i_2 - t_2} = \frac{25}{550{,}4} = 0{,}0454$$

$$\beta_3 = \frac{t_2 - t_3}{i_3 - t_3} = \frac{20}{561{,}48} = 0{,}0356;$$

3) вычисляем коэфициенты x_1, x_2, x_3 и X:

$$x_1 = \alpha_1 = 0{,}999$$

$$x_2 = \alpha_1\alpha_2 - \alpha_1\beta_2 = 0{,}999 \cdot 0{,}9957 - 0{,}999 \cdot 0{,}0454 = 0{,}9493$$

$$x_3 = x_2\alpha_3 - (x_1 + x_2)\beta_3 = 0{,}9493 \cdot 0{,}9977 - (0{,}999 + \\ + 0{,}9493)\,0{,}0356 = 0{,}8777$$

$$X = 0{,}999 + 0{,}9493 + 0{,}8777 = 2{,}826;$$

4) вычисляем коэфициенты y_1, y_2, y_3 и Y:

$$y_1 = \beta_1 = -0{,}0467$$

$$y_2 = \beta_1\alpha_2 - \beta_1\beta_2 + \beta_2 = -0{,}0467 \cdot 0{,}9957 + 0{,}0467 \cdot 0454 + \\ + 0{,}0454 = 0{,}001$$

$$y_3 = y_2\alpha_3 - (y_1 + y_2)\,\beta_3 + \beta_3 = 0{,}001 \cdot 0{,}9977 - \\ - (-0{,}0467 + 0{,}001)\,0{,}0356 + 0{,}356 = 0{,}044$$

$$Y - = -0{,}0467 + 0{,}001 + 0{,}044 = -0{,}0017;$$

5) общее количество выпаренной воды как и в предыдущих примерах будет:

$$W_3 = \frac{30 - 10}{30} = 0{,}67 \text{ кг на 1 кг жидкого раствора;}$$

6) расход пара, греющего первый корпус, найдется по уравнению (21):

$$D_1 = \frac{0{,}67 + 0{,}9 \cdot 0{,}0017}{2{,}826} = 0{,}\ 2376 \text{ кг на 1 кг жидкого раствора,}$$

или 23,76% по весу начального жидкого раствора;

7) количество выпаренной воды по отдельным корпусам будет соответственно:

в первом — $w_1 = 0{,}2376 \cdot 0{,}999 - 0{,}9 \cdot 0{,}0467 = 0{,}1954$ *кг*

во втором — $w_2 = 0{,}2376 \cdot 0{,}9493 + 0{,}9 \cdot 0{,}001 = 0{,}2265$ »

в третьем — $w_3 = 0{,}2376 \cdot 0{,}8777 + 0{,}9 \cdot 0{,}044 = 0{,}2481$ »

Всего — $W_3 = 0{,}1954 + 0{,}2265 + 0{,}2481 = 0{,}67$ »

5. Обобщения для произвольного числа корпусов

Если бы выведенное нами правило составления коэфициентов x_3 и y_3 оказалось справедливым для какого-нибудь числа корпусов n, то коэфициенты x_n и y_n имели бы следующее значение:

$$x_n = x_{n-1} \cdot \alpha_n - X_{n-1} \cdot \beta_n$$

и

$$y_n = y_{n-1} \cdot \alpha_n - Y_{n-1} \cdot \beta_n + \beta_n,$$

а величина D_1—расход пара на первый корпус—выразилась бы следующим уравнением:

$$D_1 = \frac{W_n - cY_n}{X_n} \quad \text{и} \quad W_n = D_1X_n + cY_n.$$

В этих выражениях:

$$X_n = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$$
$$X_{n-1} = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_{n-1}$$
$$Y_n = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n$$
$$Y_{n-1} = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{n-1}$$

Допустим, что эти общие выражения для X_n, Y_n и D_1 справедливы, как это мы видели для трехкорпусной выпарки.

Дакажем, что в таком случае выведенное правило составления коэфициентов соблюдается и для числа корпусов $(n+1)$, т. е. что

$$x_{n+1} = x_n \cdot \alpha_{n+1} - X_n \cdot \beta_{n+1}$$

и

$$y_{n+1} = y_n x_{n+1} - Y_n \beta_{n+1} + \beta_{n+1}.$$

Так как в $n+1$-корпус поступает W_n *кг* греющего пара и $1 - W_n$ *кг* раствора из n-го корпуса, то, согласно предыдущему, тепловой баланс $(n+1)$ первого корпуса выразится уравнением:

$$W_n \lambda_{n+1} + (1 - W_n) c_n t_n = w_{n+1} \cdot i_{n+1} + \\ + (1 - W_n - w_{n+1}) c_{n+1} t_{n+1} + w_n \tau_{n+1}$$

или

$$w_n \lambda_{n+1} + (c - W_n) t_n = w_{n+1} \cdot i_{n+1} + (c - W_n - w_{n+1}) t_{n+1} + w_n \tau_{n+1},$$

откуда

$$w_{n+1} = w_n \alpha_{n+1} + (c - W_n) \beta_{n+1}. \qquad (22)$$

А так как

$$W_n = D_1 x_n + c y_n$$

и

$$W_n = D_1 X_n + c Y_n,$$

то, подставляя эти выражения в уравнение (22), найдем:

$$w_{n+1} = (D_1 x_n + c y_n) \alpha_{n+1} + (c - D_1 X_n - c Y_n) \beta_{n+1}.$$

Раскрывая скобки и делая приведение подобных членов,

$$w_{n+1} = D_1 (x_n \alpha_{n+1} - X_n \beta_{n+1}) + c (y_n \alpha_{n+1} - Y_n \beta_{n+1} + \beta_{n+1}).$$

Таким образом коэфициенты при D_1 в выражении для w_{n-1} будут соответственно:

$$x_{n+1} = x_n \alpha_{n+1} - X_n \beta_{n+1}$$
$$y_{n+1} = y_n x_{n+1} - Y_n \beta_{n+1} + \beta_{n+1},$$

что и требовалось доказать.

Мы доказали, что, если правило составления коэфициентов x и y справедливо для n-корпусов, то оно соблюдается и для $(n+1)$-корпусов. Но выше мы вывели это правило для трех корпусов, поэтому оно будет справедливо и для четырех и т. д. корпусов. Иными словами, найденное нами правило составления коэфициентов x и y обладает совершенной общностью и справедливо для какого угодно числа корпусов. В общем виде эти правила можно формулировать так:

а) Правило составления коэфициентов при D_1

Коэфициент x_n при D_1 в выражении для w_n равен предыдущему коэфициенту x_{n-1}, умноженному на коэфициент испарения α_n в n-ом корпусе, минус сумма всех предыдущих коэфициентов x от первого до $(n-1)$, помноженная на коэфициент самоиспарения (β_n) в n-ом корпусе.

б) Правило составления коэфициентов при c

Коэфициент y_n при c в выражении для w_n равен предыдущему коэфицинту y_{n-1}, умноженному на коэфициент испарения (α_n) в n-ом корпусе, минус сумма всех предыдущих коэфициентов от первого до $(n-1)$, помноженная на коэфициент самоиспарения β_n в n-ом корпусе, плюс коэфициент самоиспарения β_n.

Согласно этим правилам, зная для всех корпусов коэфициенты испарения и самоиспарения и имея в виду, что $x_1 = \alpha_1$ и $y_1 = \beta_1$, легко последовательно вычислить коэфициенты x и y, начиная со второго и до произвольного последнего. Зная все коэфициенты x и складывая их, найдем коэфициент X_n; точно так же складывая все y, найдем коэфициент Y_n. По этим коэфициентам определяем расход пара, греющего первый корпус по общему уравнению:

$$D_1 = \frac{W_n - c \cdot Y_n}{X_n}, \tag{23}$$

или

$$D_1 = \frac{W_n - S_c Y}{X} \text{ на } S \text{ кг начального раствора.}$$

Пример. Водный раствор, имеющий начальную концентрацию 10% весовых, должен быть сгущен в пятикорпусном выпарном аппарате до конечной концентрации 30%. Жидкий раствор, имеющий удельную теплоту $c = 0{,}9$, поступает в первый корпус при температуре $t = 80°$. Определить расход греющего пара и количество воды, выпариваемое в каждом отдельном корпусе при следующем распределении температур.

Температура °С	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус	4-й корпус	5-й корпус
Температура греющего пара	$T_1=150°$	$T_2=118$	$T_3=105$	$T_4=94$	$T_5=76$
» кипения раствора	$t_1=120$	$t_2=108$	$t_3=95$	$t_4=81$	$t_5=60$
Температ. вторичного пара	$\theta_1=119$	$\theta_2=106$	$\theta_3=92$	$\theta_4=77$	$\theta_5=55$
Температура конденсата .	$\tau_1=135$	$\tau_2=113$	$\tau_3=99$	$\tau_4=84$	$\tau_5=66$

Решение: 1) по таблицам сухого насыщенного пара находим для всех пяти корпусов по заданным T и θ полные теплосодержания паров λ и i:

для 1-го корпуса по температуре 150 $\lambda_1 = 654{,}70$ *ккал*
119 $i_1 = 645{,}18$ »
» 2-го » » » 118 $\lambda_2 = 644{,}86$ »
106 $i_2 = 640{,}75$ »
» 3-го » » » 105 $\lambda_3 = 640{,}40$ »
92 $i_3 = 635{,}90$ »
» 4-го » » » 91 $\lambda_4 = 635{,}30$ »
77 $i_4 = 629{,}80$ »
» 5-го » » » 76 $\lambda_5 = 629{,}60$ »
55 $i_5 = 620{,}60$ »

2) вычисляем коэфициенты испарения и самоиспарения:

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_1 - \tau_1}{i_1 - t_1} = \frac{654{,}7 - 135}{645{,}18 - 120} = \frac{519{,}7}{525{,}18} = 0{,}9896$$

$$\beta_1 = \frac{t - t_1}{i_1 - t_1} = \frac{80 - 120}{525{,}18} = -0{,}0762$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2 - \tau_2}{i_2 - t_2} = \frac{644{,}86 - 113}{640{,}75 - 108} = \frac{531{,}86}{532{,}75} = 0{,}9983$$

$$\beta_2 = \frac{t_1 - t_2}{i_2 - t_2} = \frac{120 - 108}{532{,}75} = 0{,}0225$$

$$\alpha_3 = \frac{\lambda_3 - \tau_3}{i_3 - t_3} = \frac{640{,}4 - 99}{635{,}9 - 95} = \frac{541{,}4}{540{,}9} = 1{,}0009$$

$$\beta_3 = \frac{t_2 - t_3}{i_3 - t_3} = \frac{108 - 95}{540{,}9} = 0{,}0240$$

$$\alpha_4 = \frac{\lambda_4 - \tau_4}{i_4 - t_4} = \frac{635{,}3 - 84}{629{,}8 - 81} = \frac{551{,}3}{548{,}8} = 1{,}0046$$

$$\beta_4 = \frac{t_3 - t_4}{i_4 - t_4} = \frac{95 - 81}{548{,}8} = 0{,}0255$$

$$\alpha_5 = \frac{\lambda_5 - \tau_5}{i_5 - t_5} = \frac{629{,}4 - 66}{620{,}6 - 60} = \frac{563{,}4}{560{,}6} = 1{,}0050$$

$$\beta_5 = \frac{t_4 - t_5}{i_5 - t_5} = \frac{81 - 60}{560{,}6} = 0{,}0375;$$

3) по найденным α и β вычисляем коэфициенты x и y для всех корпусов и общие коэфициенты X_5 и Y_5:

$$x_1 = 0{,}9896$$

$$x_2 = 0{,}9896 \cdot 0{,}9983 - 0{,}9896 \cdot 0{,}0225 = 0{,}9657$$

$$x_3 = 0{,}9657 \cdot 1{,}0009 - (0{,}9896 + 0{,}9657)\,0{,}024 = 0{,}9197$$

$$x_4 = 0{,}9197 \cdot 1{,}0046 - (0{,}9896 + 0{,}9657 + 0{,}9197) \cdot 0{,}0255 = \\ = 0{,}8506$$

$$x_5 = 0{,}8506 \cdot 1{,}005 - (0{,}9896 + 0{,}9657 + 0{,}9197 + \\ + 0{,}8506) \cdot 0{,}0375 = 0{,}7152,$$

откуда величина X_5 получится, как сумма:

$$X_5 = 0{,}9896 + 0{,}9657 + 0{,}9197 + 0{,}8506 + 0{,}7152 = 4{,}4408.$$

Далее:

$$\begin{aligned}
y_1 &= -0{,}0762\\
y_2 &= -0{,}0762 \cdot 0{,}9983 + 0{,}0762 \cdot 0{,}0225 + 0{,}0225 = -0{,}0744\\
y_3 &= -0{,}0744 \cdot 1{,}0009 + 0{,}1506 \cdot 0{,}024 = -0{,}0709\\
y_4 &= -0{,}0709 \cdot 1{,}0046 + 0{,}2215 \cdot 0{,}0255 = 0{,}0147\\
y_5 &= -0{,}0147 \cdot 1{,}005 + 0{,}2362 \cdot 0{,}0375 = -0{,}0059,
\end{aligned}$$

откуда величина Y_5 найдется, как сумма:

$$Y_5 = -0{,}2421;$$

4) количество воды, выпаренное во всех пяти корпусах, будет как и в предыдущих примерах:

$$w_5 = \frac{30 - 10}{30} = 0{,}67 \text{ кг на 1 кг жидкого раствора;}$$

5) определяем расход пара, греющего первый корпус, по уравнению (23):

$$D_1 = \frac{0{,}67 + 0{,}9 \cdot 0{,}2421}{4{,}4408} = 0{,}2 \text{ кг на 1 кг,}$$

или 20% по весу начального жидкого раствора;

6) количество воды, выпаренной в каждом отдельном корпусе, найдется по следующим уравнениям:

$$\begin{aligned}
w_1 &= 0{,}2 \cdot 0{,}9896 - 0{,}9 \cdot 0{,}0762 = 0{,}1293 \text{ кг}\\
w_2 &= 0{,}2 \cdot 0{,}9657 - 0{,}9 \cdot 0{,}0744 = 0{,}1262 \text{ »}\\
w_3 &= 0{,}2 \cdot 0{,}9197 - 0{,}9 \cdot 0{,}0709 = 0{,}1201 \text{ »}\\
w_4 &= 0{,}2 \cdot 0{,}8506 + 0{,}9 \cdot 0{,}0147 = 0{,}1569 \text{ »}\\
w_5 &= 0{,}2 \cdot 0{,}7152 + 0{,}9 \cdot 0{,}0059 = 0{,}1376 \text{ »}
\end{aligned}$$

6. Метод расчета аппарата с ноль-корпусом

Наиболее выгодным для целей выпаривания является использование в качестве греющего пара мятого пара из паровой машины или турбины. В этом случае мятый пар вместо конденсатора поступает в греющую камеру первого корпуса и отдает там свою скрытую теплоту, которая многократно используется во всех остальных корпусах. Так как при наличии парового двигателя или нескольких паровых двигателей с определенной суммарной мощностью, можно располагать определенным количеством мятого пара, колеблющимся в довольно узких пределах, то в некоторых отдельных случаях, подсчитав количество мятого (ретурного) пара, каким мы располагаем, можем подобрать такое неслишком большое число корпусов, что выпарка сможет целиком обслуживаться имеющимся количеством мятого пара. Иными словами, при надлежаще подобранном числе корпусов мятого пара будет хватать для получения заданного эффекта выпаривания. Если же количество мятого пара будет так мало, что для данного сгущения раствора придется ставить слишком большое число корпусов и тем значительно повысить затраты на установку выпарки, то при наличии достаточно мощной котельной установки возможно использовать в качестве греющего пара наряду с мятым и острый пар из паровых котлов. При этом если выпариваемый раствор допускает повышение температуры кипения, нет нужды редуцировать давление острого пара и смешивать редуцированный пар с мятым паром, а лучше перед первым корпусом поставить добавочный, так называемый ноль-корпус, который обогревается только острым паром. Пары растворителя из ноль-корпуса должны иметь давление, равное давлению мятого пара и в смеси с ним поступают на обогрев первого корпуса. Схема совместного обогрева острым и мятым паром дана на рис. 6.

При таком устройстве давление паров растворителя в ноль-корпусе создает противодавление в паровой машине.

При установке ноль-корпуса количество ретурного пара, приходящееся на 1 *кг* начального жидкого раствора, предполагается известным и требуется определить, какое количество острого пара необходимо добавлять для того, чтобы при данном числе корпусов достигался заданный эффект выпаривания. В этом случае для решения задачи будем обозначать расход острого пара на ноль-корпус через D_0, а добавляемое в первый корпус количество ретурного (мятого) пара через R на 1 *кг* жидкого начального раствора. При общем числе корпусов n (не считая ноль-корпуса) теплота острого пара будет использоваться $n+1$ раз, а теплота мятого пара n раз. Поэтому тем же приемом, которым мы пользовались ранее, найдем количество воды, выпаренное в каждом корпусе по следующим уравнениям:

в ноль-корпусе

$$w_0 = D_0\alpha_0 + c\beta_0 \qquad (26)$$

в первом корпусе

$$w_1 = (w_0 + R)\alpha_1 + (c - w_0)\beta_1$$

или

$$w_1 = w_0(\alpha_1 - \beta_1) + c\beta_1 + R\alpha_1.$$

Подставляя вместо w_0 его значения из уравнения (26), находим:

$$w_1 = D_0(\alpha_0\alpha_1 - \alpha_0\beta_1) + c(\beta_0\alpha_1 - \beta_0\beta_1 + \beta_1) + R\alpha_1. \qquad (28)$$

Во втором корпусе $w_2 = w_1\alpha_2 + (c - w_0 - w_1)\beta_2$. Подставляя вместо w_0 и w_1 их значения, находим:

$$w_2 = D_0[(\alpha_0\alpha_1 - \alpha_0\beta_1)\alpha_2 - (\alpha_0 + \alpha_0\alpha_1 - \alpha_0\beta_1)\beta_2] + c[(\beta_0\alpha_1 - \beta_0\beta_1 + \beta_1)\alpha_2 - (\beta_0 + \beta_0\alpha - \beta_0\beta_1 + \beta_1)\beta_2 + \beta_2] + R(\alpha_1\alpha_2 - \alpha_1\beta_2).$$

Продолжая составление выражений для w_3 и w_4 и т. д., увидим, что правая часть этих формул содержит три слагаемых, из которых первое представляет собой величину D_0 с некоторым коэфициентом x, второе — величину c со своим коэфициентом y и третье—величину R со своим коэфициентом z. Правило составления коэфициентов x и y остается без изменения, при чем первыми коэфициентами будут уже $x_0 = \alpha_0$ и $y_0 = \beta_0$. Коэфициенты z при R составляются по тому же правилу, как и коэфициенты x, при чем коэфициент $z_1 = \alpha_1$.

Общая формула для расхода острого пара, греющего ноль-корпус, видоизменится следующим образом:

$$D_0 = \frac{W_n - cY_n - RZ_n}{X_n}, \tag{29}$$

где

$$X_n = x_0 + x_1 + x_2 + \ldots + x_n$$
$$Y_n = y_0 + y_1 + y_2 + \ldots + y_n$$
$$Z_n = z_1 + z_2 + z_3 + \ldots + z_n.$$

Пример 7. Для двухкорпусной выпарки, сгущающей раствор в условиях предыдущих примеров, требуется добавить нуль-корпус, так как наличное количество мятого пара $R = 0{,}2$ *кг* на 1 *кг* начального раствора недостаточно для целей выпаривания. Острый пар из парового котла имеет температуру $T_0 = 189°$. Температура кипения в ноль-корпусе—151°, температура паров растворителя из ноль-корпуса при поступлении в первый корпус $T_1 = 150°$ равна температуре ретурного пара. Температура конденсата из ноль-корпуса равна 170°.

Определить расход острого пара на ноль-корпус при следующем распределении температур по корпусам:

Температура	Ноль-корпус	1-й корпус	2-й корпус
Температура греющего пара	$T_0 = 189$	$T_1 = 150$	$T_2 = 118$
» кипения раствора . .	$t_0 = 151$	$t_1 = 120$	$t_2 = 80$
» паров растворителя .	$\theta_0 = 150{,}5$	$\theta_1 = 119$	$\theta_2 = 75$
» конденсата	$\tau_0 = 170$	$\tau_1 = 135$	$\tau_2 = 99$

Решение: 1) по таблицам сухого насыщенного пара находим все λ и i по температурам T и θ:

для ноль-корпуса по температуре 189 $\lambda_0 = 667{,}10$ *ккал*
150,5 $i_0 = 654{,}86$ »
» первого » » » 150 $\lambda_1 = 654{,}60$ »
119 $i_1 = 645{,}18$ »
» второго » » » 118 $\lambda_2 = 644{,}86$ »
75 $i_2 = 629{,}00$ »

2) вычисляем все коэфициенты α и β:

$$\alpha_0 = \frac{667,1 - 170}{654,86 - 151} = \frac{497,1}{503,86} = 0,9866 \qquad \beta_0 = \frac{80 - 151}{503,86} = -0,1409$$

$$\alpha_1 = \frac{654,7 - 135}{415,18 - 120} = \frac{519,7}{525,18} = 0,9896 \qquad \beta_1 = \frac{151 - 120}{525,18} = 0,0590$$

$$\alpha_2 = \frac{644,86 - 99}{629,0 - 80} = \frac{545,86}{549,0} = 0,9943 \qquad \beta_2 = \frac{120 - 80}{549,0} = 0,0729;$$

3) вычисляем коэфициенты x, y и z:

$$x_0 = 0,9866$$
$$x_1 = 0,9866 \cdot 0,9896 - 0,9866 \cdot 0,059 = 0,9705$$
$$x_2 = 0,9705 \cdot 0,9943 - 1,9571 \cdot 0,0729 = 0,8223$$
$$X = 0,9866 + 0,9705 + 0,8223 = 2,7794$$
$$y_0 = -0,1409$$
$$y_1 = -0,1409 \cdot 0,9896 + 0,1409 \cdot 0,059 = -0,1311$$
$$y_2 = -0,1311 \cdot 0,9943 + 0,272 \cdot 0,0729 = -0,0679$$
$$Y = -0,1409 - 0,1311 - 0,0679 = -0,2041$$
$$z_1 = 0,9896$$
$$z_2 = 0,9896 \cdot 0,9943 - 0,9896 \cdot 0,0729 = 0,9118$$
$$Z = 0,9896 + 0,9118 = 1,9014;$$

4) по уравнению (29) определяем расход острого пара:

$$D_0 = \frac{0,67 + 0,9 \cdot 0,2041 - 0,2 \cdot 1,9014}{2,4734} = \frac{0,4734}{2,7794}$$

$$D_0 = 0,1703 \text{ кг на 1 кг жидкого раствора}$$

или 17,03% по весу начального жидкого раствора.

Таким образом для того чтобы произвести заданное выпаривание, необходимо кроме затрачиваемого на первый корпус ретурного пара (20%) израсходовать еще 17,03% острого пара на ноль-корпус.

7. Расчет многокорпусного аппарата с паротбором на сторону

Соединяя отдельным трубопроводом надрастворное пространство двух соседних корпусов и включая в этот паропровод какой-либо подогреватель, можно использовать часть паров растворителя из какого угодно корпуса для целей нагревания, не имеющих прямого отношения к выпариванию. Многокорпусный аппарат в этом отношении представляет то удобство, что может дать пар различных температур в зависимости от того, из какого корпуса пар отбирается. Пар из ноль и первого корпусов будет иметь температуру более высокую, чем пары из более удаленных корпусов. Поэтому возможно подобрать для целей нагревания тех или иных жидкостей такой пар, который сможет довести данную жидкость до необходимой температуры. Пар, отбираемый из корпусов на сторону, называется экстра-паром. Отбор экстра-пара на сторону уменьшает количество вторичного пара, идущего для целей выпаривания, что вызывает увеличение расхода пара, греющего первый или ноль-корпус.

Как и выше, основной задачей в данном случае является определение расхода пара, греющего ноль-корпус, если известно количество экстра-пара, отбираемого на сторону из каждого корпуса.

Представим себе многокорпусный выпарной аппарат, имеющий ноль-корпус, обогреваемый острым паром, и первый корпус, обогреваемый вторичным паром из ноль-корпуса в смеси с мятым паром из парового двигателя. Отбор экстра-пара из отдельных корпусов на сторону обозначим $\mathcal{E}_0, \mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ и т. д. в килограммах на 1 *кг* начального жидкого раствора. Количества вводимого в первый корпус ретурного пара обозначим R *кг* на 1 *кг* начального жидкого раствора. Остальные обозначения те же, как и выше. Количество воды, выпаренное в ноль-корпусе, будет:

$$w_0 = D_0\alpha_0 + c\beta_0.$$

На обогревание первого корпуса пойдет w_0 *кг* вторичного пара из ноль-корпуса плюс R *кг* ретурного пара минус $\mathcal{E}_0$ *кг* экстра-пара, отбираемого на сторону, т. е. расход пара, греющего первый корпус, будет:

$$D_1 = w_0 + R - \mathcal{E}_0 = w_0 - (\mathcal{E}_0 - R) \text{ кг/кг жидкого раствора.}$$

Количество воды, выпариваемой в первом корпусе, сложится из двух слагаемых: 1) из воды, выпаренной за счет теплоты $[w_0 - (\mathcal{E}_0 - R)]$ *кг* греющего пара, и 2) из самоиспарения за счет теплоты $(1 - w_0)$ *кг* раствора, поступающего из ноль-корпуса. Вводя коэфициенты испарения и самоиспарения, получим по предыдущему:

$$w_1 = [w_0 - (\mathcal{E}_0 - R)]\,\alpha_1 + (c - w_0)\,\beta_1.$$

Заменяя в этом уравнении w_0 его значением, получим после раскрытия скобок и приведения подобных членов:

$$w_1 = D_0(\alpha_0\alpha_1 - \alpha_0\beta_1) + c\,(\beta_1\alpha_1 - \beta_0\beta_1 + \beta_1) - (\mathcal{E}_0 - R)\,\alpha_1.$$

Количество пара, греющего второй корпус, будет равняться количеству воды, выпаренной в первом корпусе, минус количество экстра-пара $\mathcal{E}_1$, отбираемого на сторону, т. е.

$$D_2 = w_1 - \mathcal{E}_1.$$

Количество воды, выпариваемой во втором корпусе, будет:

$$w_2 = (w_1 - \mathcal{E}_1)\,\alpha_2 + (c - w_0 - w_1)\beta_2.$$

Заменяя в этом уравнении w_0 и w_1 выше найденными их значениями, после алгебраических упрощений, получим:

$$\begin{aligned} w_2 = {} & D_0\,[(\alpha_0\alpha_1 - \alpha_0\beta_1)\,\alpha_2 - (\alpha_0 + \alpha_0\alpha_1 - \alpha_0\beta_1)\,\beta_2] + \\ & + c\,[(\beta_0\alpha_1 - \beta_0\beta_1 + \beta_1)\,\alpha_2 - (\beta_0 + \beta_0\alpha_1 - \beta_0\beta_1 + \beta_1)\,\beta_2 + \beta_2] - \\ & - (\mathcal{E}_0 - R)\,(\alpha_1\alpha_2 - \alpha_1\beta_2) - \mathcal{E}_1\alpha_2. \end{aligned}$$

Обозначая, как и прежде, коэфициенты при D_0 через x, коэфициенты при c через y, а коэфициенты $(\mathcal{E}_0 - R)$, $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ и т. д. через z^0, z', z'' и т. д., будем иметь следующий ряд выражений для количеств воды, выпаренной в отдельных корпусах:

$$
\begin{aligned}
w_0 &= D_0x_0 + cy_0\\
w_1 &= D_0x_1 + cy_1 - (\mathcal{E}_0 - R)z_1^0\\
w_2 &= D_0x_2 + cy_2 - (\mathcal{E}_0 - R)z_2^0 - \mathcal{E}_1 z_2'\\
w_3 &= D_0x_3 + cy_3 - (\mathcal{E}_0 - R)z_3^0 - \mathcal{E}_1 z_3' - \mathcal{E}_2 z_3'' \text{ и т. д.}
\end{aligned}
$$

Складывая левые и правые части этих уравнений, получим расчетное уравнение для определения D_0:

$$W_n = D_0X_n + cY_n - (\mathcal{E}_0 - R)Z_n^0 - \mathcal{E}_1 Z_n' - \mathcal{E}_2 Z_n'' \text{ и т. д.}$$

В этом уравнении W_n обозначает общее количество выпаренной воды, определяемое по начальной и конечной концентрации, а коэфициенты X_n, Y_n и Z_n имеют следующие значения:

$$
\begin{aligned}
X_n &= x_0 + x_1 + x_2 + \ldots + x_n\\
Y_n &= y_0 + y_1 + y_2 + \ldots + y_n\\
Z_n^0 &= z_1^0 + z_2^0 + z_3^0 + \ldots + z_n^0\\
Z_n' &= z_1' + z_2' + z_3' + \ldots + z_n'\\
Z_n'' &= z_3'' + z_4'' + z_5'' + \ldots + z_n'' \text{ и т. д.}
\end{aligned}
$$

Для данного случая закон составления коэфициентов x и y остается прежним. Коэфициенты z составляются так же, как и x, при чем первые коэфициенты будут $z_1^0 = \alpha_1$; $z_2' = \alpha_2$; $z_3'' = \alpha_3$ и т. д.

Расход острого пара на ноль-корпус определяется из уравнения:

$$D_0 = \frac{W_n - cY_n + (\mathcal{E}_0 - R)Z_n^0 + \mathcal{E}_1 Z_n' + \mathcal{E}_2 Z_n''}{X_n}.$$

Пример 8. Определить расход греющего пара на 1 *кг* жидкого раствора при сгущении его начальной концентрации от 10% до 30% в двухкорпусном аппарате с добавочным ноль-корпусом. Расход ретурного пара на первый корпус $R = 0{,}2$ *кг* на 1 *кг* жидкого сока. Отбор экстра-пара на сторону составляет $\mathcal{E}_0 = 0{,}15$; $\mathcal{E}_1 = 0{,}15$ *кг* на 1 *кг* жидкого раствора. Распределение температур дано в таблице. Остальные данные, как и в предыдущих примерах: $t = 80°$ и $c = 0{,}9$.

Температура	Ноль-корпус	1-й корпус	2-й корпус
Температура греющего пара	$T_0 = 189$	$T_1 = 150$	$T_2 = 119$
» кипения	$t_0 = 152$	$t_1 = 122$	$t_2 = 104$
» вторичного пара	$\theta_0 = 151$	$\theta_1 = 120$	$\theta_2 = 100$
» конденсата	$\tau_0 = 170$	$\tau_1 = 136$	$\tau_2 = 112$

Решение: 1) по таблицам сухого насыщенного пара находим все величины λ и i:

для ноль-корпуса	по температуре	189	$\lambda_0 = 667{,}01$	*ккал*
		151	$i_0 = 655{,}02$	»
» первого корпуса	» »	150	$\lambda_1 = 654{,}70$	»
		120	$i_1 = 645{,}50$	»
» второго »	» »	119	$\lambda_2 = 645{,}18$	»
		100	$i_2 = 638{,}70$	»

2) определяем все величины α и β:

$$\alpha_0 = \frac{667{,}01 - 170}{665{,}02 - 152} = \frac{497{,}01}{503{,}02} = 0{,}9882$$

$$\beta_0 = \frac{80 - 152}{503{,}02} = -0{,}1392$$

$$\alpha_1 = \frac{654{,}7 - 136}{645{,}5 - 122} = \frac{518{,}7}{523{,}5} = 0{,}9908$$

$$\beta_1 = \frac{152 - 122}{523{,}5} = 0{,}0573$$

$$\alpha_2 = \frac{645{,}18 - 112}{638{,}7 - 104} = \frac{533{,}18}{534{,}7} = 0{,}9972$$

$$\beta_2 = \frac{122 - 104}{534{,}7} = 0{,}0337;$$

3) вычисляем все коэфициенты x, y и z:

$$x_0 = 0{,}9882$$
$$x_1 = 0{,}9882 \cdot 0{,}9908 - 0{,}9882 \cdot 0{,}0573 = 0{,}9225$$
$$x_2 = 0{,}9225 \cdot 0{,}9972 - 1{,}9107 \cdot 0{,}0337 = 0{,}8555$$
$$X = 0{,}9882 + 0{,}9225 + 0{,}8555 = 2{,}7662$$

$$y_0 = -0{,}1392$$
$$y_1 = -0{,}1392 \cdot 0{,}9908 + 0{,}1392 \cdot 0{,}0573 + 0{,}0573 = -0{,}0008$$
$$y_2 = -0{,}0008 \cdot 0{,}9972 + 0{,}14 \cdot 0{,}0337 + 0{,}0337 = 0{,}0801$$
$$Y = -0{,}1392 - 0{,}0008 + 0{,}0801 = -0{,}0599$$

$$z_1^0 = 0{,}9908$$
$$z_2^0 = 9908 \cdot 0{,}9972 - 0{,}9908 \cdot 0{,}0337 = 0{,}9546$$
$$Z^0 = 0{,}9908 + 0{,}9546 = 1{,}9454$$
$$Z' = z_2' = 0{,}9972;$$

4) определяем D_0:

$$D_0 = \frac{0{,}67 + 0{,}9 \cdot 0{,}0599 + (0{,}15 - 0{,}2) \cdot 1{,}9454 + 0{,}15 \cdot 0{,}9972}{2{,}7662}$$

$$D_0 = 0{,}271 \text{ кг},$$

или 27,1% по весу начального раствора.

8. Эквиваленты экстра-пара

Для случая, когда отбирается пар, расход греющего пара определяется по формуле:

$$D_0 = \frac{W_n - cY_n + (\mathscr{E}_0 - R)\,Z_0 + \mathscr{E}_1 Z_1 + \mathscr{E}_2 Z_2 + \mathscr{E}_3 Z_3}{X_n}.$$

Эту формулу можно представить в следующем виде:

$$D_0 = \frac{W_n - cY_n}{X_n} + (\mathscr{E}_0 - R)\frac{Z_0}{X_n} + \mathscr{E}_1 \frac{Z_1}{X_n} + \mathscr{E}_2 \frac{Z_2}{X_n} + \mathscr{E}_3 \frac{Z_3}{X_n}.$$

При $R = 0$; $\mathscr{E}_0 = 0$; $\mathscr{E}_1 = 0$; $\mathscr{E}_2 = 0$, т. е. когда не добавляется ретурного пара и не отбирается экстра-пара, расход греющего пара будет:

$$D_0 = \frac{W_n - cY_n}{X_n}.$$

При $R = 0$ дадим $\mathscr{E}_0$ значение равное единице, т. е. приравняем отбор экстра-пара из ноль-корпуса 1 *кг*, тогда величина D_0 увеличится на $\frac{Z_0}{X_n}$. При $\mathscr{E}_1 = 1$ расход острого пара увеличится на $\frac{Z_1}{X_n}$ и т. д.

Таким образом отбор 1 *кг* экстра-пара из ноль-корпуса обходится в $\frac{Z_0}{X_n}$ *кг* острого пара.

Отбор 1 *кг* экстра-пара из второго корпуса обходится в $\frac{Z_1}{X_n}$ *кг* острого пара.

Величины $\frac{Z_0}{X_n}$; $\frac{Z_1}{X_n}$; $\frac{Z_2}{X_n}$ и т. д. определяют поэтому стоимость 1 *кг* экстра-пара из какого угодно корпуса в килограммах острого пара. Эти величины назовем эквивалентами экстра-пара и назовем соответственно через e_0, e_1, e_2 и т. д.

В примере 8 эти эквиваленты выразятся в следующих цифрах:

$$e_0 = \frac{1,9454}{2,7662} = 0,7033$$

$$e_1 = \frac{0,9972}{2,7662} = 0,3605.$$

Эти цифры показывают, что стоимость экстра-пара из ноль-корпуса нашей выпарки составляет 70,33% стоимости острого пара, а экстра-пар первого корпуса обходится в 36,05% стоимости острого пара. Отсюда ясно, что экстра-пар тем дешевле, чем дальше отбирается он от начала выпарки. Поэтому использование экстра-пара из последних корпусов является более экономным, чем из первых корпусов выпарки.

Добавление 1 *кг* ретурного пара в греющую камеру первого корпуса доставляет экономию в размере $\frac{Z_0}{X_n}$ *кг* острого пара, так как R входит в выражение для D_0 со знаком минус.

9. Упрощенный метод расчета выпарки. Таблицы расчетных коэфициентов

Вышеизложенный точный метод определения расхода пара для многокорпусного выпарного аппарата в значительной мере упрощается, если допустить, что коэфициент испарения α во всех корпусах равен единице, а произведения двух и более коэфициентов самоиспарения β равны нулю. На самом деле коэфициенты испарения всегда отличаются весьма мало от единицы, а значения коэфициентов самоиспарения весьма малы.

Поэтому сделанные допущения не вносят слишком больших погрешностей в окончательные результаты вычислений, но зато в значительной степени упрощают расчет и дают возможность быстро определить расход пара с достаточной для технических целей точностью.

Сделав такие допущения и принимая во внимание вышеприведенную закономерность в составлении коэфициентов при D_1, c и $\mathcal{E}$, получим следующие формулы для упрощенного расчета.

Коэфициенты при D_1:

$$x_1 = \alpha_1 = 1$$

$$x_2 = \alpha_1\alpha_2 - \alpha_1\beta_2 = 1 - \beta_2$$

$$x_3 = (1 - \beta_2)\,\alpha_3 - (1 + 1 - \beta_2)\,\beta_3 = 1 - \beta_2 - 2\beta_3$$

$$x_4 = (1 - \beta_2 - 2\beta_3)\,\alpha_4 - (1 + 1 - \beta_2 + 1 - \beta_2 - 2\beta_3)\,\beta_4 =$$

$$= 1 - \beta_2 - 2\beta_3 - 3\beta_4 \text{ и т. д.}$$

Таким образом для коэфициентов x_1, x_2, x_3, x_4 будем иметь следующий ряд формул:

$$x_1 = 1$$

$$x_2 = 1 - \beta_2$$

$$x_3 = 1 - \beta_2 - 2\beta_3$$

$$x_4 = 1 - \beta_2 - 2\beta_3 - 3\beta_4$$

$$x_5 = 1 - \beta_2 - 2\beta_3 - 3\beta_4 - 4\beta_5 \text{ и т. д.}$$

$$x_n = 1 - \beta_2 - 2\beta_3 - 3\beta_4 - 4\beta_5 - \ldots - (n - 1)\,\beta_n\,.$$

Суммируя все x_1, x_2, x_3 и т. д. и т. д. до x_n, найдем общую формулу для X, т. е. для коэфициента при D_1 в общем расчетном уравнении.

Легко видеть, что X, как сумма всех x_n, будет выражаться формулой:

$$X = n - (n - 1)\,\beta_2 - (n - 2)\,2\beta_3 - (n - 3)\,3\beta_4 -$$

$$- (n - 4)\,4\beta\ \ldots\ (n - 1)\beta_n\,. \qquad (21)$$

По этой формуле составлена таблица I, содержащая в себе формулы для X при общем числе корпусов от 2 до 10.

Коэфициенты при c

Пользуясь закономерностью для составления отдельных коэфициентов y_1, y_2, y_3 и т. д., зная, что $y_1 = \beta_1$, имеем:

$$y_1 = \beta_1$$
$$y_2 = \beta_1\alpha_2 - \beta_1\beta_2 + \beta_2 = \beta_1 + \beta_2$$
$$y_3 = (\beta_1 + \beta_2)\alpha_3 - (\beta_1 + \beta_1 + \beta_2)\beta_3 + \beta_3 = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$$
$$y_4 = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4.$$

Таким образом при сделанных допущениях будем иметь для коэфициентов y следующий ряд формул:

$$y_1 = \beta_1$$
$$y_2 = \beta_1 + \beta_2$$
$$y_3 = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3$$
$$y_4 = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4$$
$$y_5 = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 \text{ и т. д.}$$
$$y_n = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \ldots + \beta_n.$$

Суммируя все y, найдем общее выражение для Y, т. е. коэфициента при c в общем расчетном уравнении, а именно:

$$Y = n\beta_1 + (n-1)\beta_2 + (n-2)\beta_3 + (n-3)\beta_4 + \ldots + 2\beta_{n-1} + \beta_n. \quad (22)$$

По этой формуле составлена таблица II, дающая формулы для Y при общем числе корпусов от 2 до 10.

Коэфициенты при $\mathcal{E}$

Согласно § 7 первый коэфициент при $(\mathcal{E}_1 - R)$ будет α_2. Принимая во внимание закономерность изменения коэфициентов и сделанные нами допущения, будем иметь для $(\mathcal{E}_1 - R)$:

$$z'_1 = 0$$
$$z'_2 = 1$$
$$z'_3 = 1 - \beta_3$$
$$z'_4 = 1 - \beta_3 - 2\beta_4$$
$$z'_5 = 1 - \beta_3 - 2\beta - 3\beta_5 \text{ и т. д.}$$

Суммируя, находим:

$$Z_1 = (n-1) - (n-2)\beta_3 - (n-3)2\beta_4 - \ldots - (n-2)\beta_n. \quad (23)$$

Точно так же находятся коэфициенты Z_2, Z_3 и т. д.

Для этих коэфициентов составлена таблица III, в которой по числу корпусов выпарки можно найти формулы коэфициентов для всех $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$, $\mathcal{E}_4$ и т. д.

Для удобства и ускорения расчета приводим в приложении еще таблицу IV теплосодержания сухого насыщенного пара в пределах температуры от 50 до 169,5° C, с интервалами температуры в 0,5° С. По этой таблице, по заданным температурам T_n и Θ_n, определяем величины λ_n и i_n.

Покажем теперь пример упрощенного расчета выпарки, пользуясь таблицами I, II, III, IV.

Таблица I

Коэфициенты X

Число корпусов	Формулы для X
2	$X = 2 - \beta_2$
3	$X = 3 - 2\beta_2 - 2\beta_3$
4	$X = 4 - 3\beta_2 - 4\beta_3 - 3\beta_4$
5	$X = 5 - 4\beta_2 - 6\beta_3 - 6\beta_4 - 4\beta_5$
6	$X = 6 - 5\beta_2 - 8\beta_3 - 9\beta_4 - 8\beta_5 - 5\beta_6$
7	$X = 7 - 6\beta_2 - 10\beta_3 - 12\beta_4 - 12\beta_5 - 10\beta_6 - 6\beta_7$
8	$X = 8 - 7\beta_2 - 12\beta_3 - 15\beta_4 - 16\beta_5 - 15\beta_6 - 12\beta_7 - 7\beta_8$
9	$X = 9 - 8\beta_2 - 14\beta_3 - 18\beta_4 - 20\beta_5 - 20\beta_6 - 18\beta_7 - 14\beta_8 - 8\beta_9$
10	$X = 10 - 9\beta_2 - 16\beta_3 - 21\beta_4 - 24\beta_5 - 25\beta_6 - 24\beta_7 - 21\beta_8 - - 16\beta_9 - 9\beta_{10}$
n	$X = n - (n-1)\beta_2 - 2(n-2)\beta_3 - 3(n-3) - \ldots - - (n-3)\,3\beta_{n-2} - (n-2)\,2\beta_{n-1} - (n-1)\,\beta_n$

Таблица II

Коэфициенты Y

Число корпусов	Формулы для Y
2	$Y = 2\beta_1 + \beta_2$
3	$Y = 3\beta_1 + 2\beta_2 + \beta_3$
4	$Y = 4\beta_1 + 3\beta_2 + 2\beta_3 + \beta_4$
5	$Y = 5\beta_1 + 4\beta_2 + 3\beta_3 + 2\beta_4 + \beta_5$
6	$Y = 6\beta_1 + 5\beta_2 + 4\beta_3 + 3\beta_4 + 2\beta_5 + \beta_6$
7	$Y = 7\beta_1 + 6\beta_2 + 5\beta_3 + 4\beta_4 + 3\beta_5 + 2\beta_6 + \beta_7$
8	$Y = 8\beta_1 + 7\beta_2 + 6\beta_3 + 5\beta_4 + 4\beta_5 + 3\beta_6 + 2\beta_7 + \beta_8$
9	$Y = 9\beta_1 + 8\beta_2 + 7\beta_3 + 6\beta_4 + 5\beta_5 + 4\beta_6 + 3\beta_7 + 2\beta_8 + \beta_9$
10	$Y = 10\beta_1 + 9\beta_2 + 8\beta_3 + 7\beta_4 + 6\beta_5 + 5\beta_6 + 4\beta_7 + 3\beta_8 + 2\beta_9 + \beta_{10}$
	. . . .
	. . . .
n	$Y = n\beta_1 + (n-1)\beta_2 + (n-2)\beta_3 + (n-3)\beta_4 + \ldots + \beta_n$

Таблица III

Коэфициенты Z

Число корпусов	Формулы для Z, Z_1, Z_2, Z_3 и т. д.
2	$Z_1 = 1$
3	$Z_1 = 2 - \beta_3$ $Z_2 = 1$
4	$Z_1 = 3 - 2\beta_3 - 2\beta_4$ $Z_2 = 2 \quad - \beta_4$ $Z_3 = 1$
5	$Z_1 = 4 - 3\beta_3 - 4\beta_4 - 3\beta_5$ $Z_2 = 3 \quad - 2\beta_4 - 2\beta_5$ $Z_3 = 2 \quad - \beta_5$ $Z_4 = 1$
6	$Z_1 = 5 - 4\beta_3 - 6\beta_4 - 6\beta_5 - 4\beta_6$ $Z_2 = 4 \quad 3\beta_4 - 4\beta_5 - 3\beta_6$ $Z_3 = 3 \quad - 2\beta_5 - 2\beta_6$ $Z_4 = 2 \quad - \beta_6$ $Z_5 = 1$
7	$Z_1 = 6 - 5\beta_3 - 8\beta_4 - 9\beta_5 - 8\beta_6 - 5\beta_7$ $Z_2 = 5 \quad - 4\beta_4 - 6\beta_5 - 6\beta_6 - 4\beta_7$ $Z_3 = 4 \quad - 3\beta_5 - 4\beta_6 - 3\beta_7$ $Z_4 = 3 \quad - 2\beta_6 - 2\beta_7$ $Z_5 = 2 \quad - \beta_7$ $Z_6 = 1$

Пример упрощенного расчета

Определить расход острого пара на ноль-корпусе пятикорпусной выпарки при следующих данных:

1) количество выпариваемой воды 0,8 *кг* на 1 *кг* начального раствора;

2) температура раствора, поступающего в ноль-корпус, 95° С;

3) теплоемкость начального раствора 0,9;

4) количество ретурного пара, добавляемого в первый корпус, $R = 0{,}2$ *кг*;

5) отбор экстра-пара $\mathcal{E}_0 = 0{,}1$ *кг*, $\mathcal{E}_1 = 0{,}15$ *кг*, $\mathcal{E}_2 = 0{,}1$ *кг*, $\mathcal{E}_3 = 0{,}05$ *кг* на 1 *кг* начального раствора.

Температуры по корпусам распределяются согласно следующей таблице.

Температура	Ноль-корпус	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус	4-й корпус
Температура греющего пара T	150	118	105	92	81
Температура кипящего раствора t	120	108	95	85	60
Температура вторичного пара θ	119	106	93	82	56

Решение. 1. Находим коэфициенты самоиспарения β. По таблице величины i для всех корпусов будут следующими:

для 0-го корпуса при температуре 119° C — $i_0 = 645{,}2$
» 1-го » » » 106 — $i_1 = 640{,}8$
» 2-го » » » 93 — $i_2 = 636{,}1$
» 3-го » » » 82 — $i_3 = 631{,}8$
» 4-го » » » 56 — $i_n = 621{,}0$

По формулам для β находим:

$$\beta_0 = \frac{95-120}{645{,}2-120} = \frac{-25}{525{,}2} = -0{,}0475$$

$$\beta_1 = \frac{120-108}{640{,}8-108} = \frac{12}{532{,}8} = 0{,}0224$$

$$\beta_2 = \frac{108-95}{636{,}1-95} = \frac{13}{541{,}1} = 0{,}0241$$

$$\beta_3 = \frac{95-85}{631{,}8-85} = \frac{10}{546{,}8} = 0{,}0183$$

$$\beta_4 = \frac{85-60}{621{,}0-60} = \frac{26}{561{,}0} = 0{,}0448$$

2. По таблице I для пятикорпусной выпарки имеем формулу для X:

$$X = 5 - 4\beta_1 - 6\beta_2 - 6\beta_3 - 4\beta_4.$$

Примечание. Так первый по счету корпус обозначен в нашем примере нулем, то все индексы при β для остальных корпусов уменьшены на единицу.

Подставляя вместо всех β их значения, получаем:

$$X = 5 - 4 \cdot 0{,}0224 - 6 \cdot 0{,}0241 - 6 \cdot 0{,}0183 - 4 \cdot 0{,}0448 = 4{,}4768.$$

3. По таблице II находим для пятикорпусной выпарки формулу для Y:

$$Y = 5\beta_0 + 4\beta_1 + 3\beta_2 + 2\beta_3 + \beta_4.$$

Подставляя вместо всех β их значения, получаем:

$$Y = -5 \cdot 0{,}0475 + 4 \cdot 0{,}0224 + 3 \cdot 0{,}0241 + 2 \cdot 0{,}0183 + 0{,}0448 = 0{,}0058.$$

4. По таблице III находим все коэфициенты Z. Имеем:

$$Z_0 = 4 - 3\beta_2 - 4\beta_3 - 3\beta_4$$

$$Z_0 = 4 - 3 \cdot 0{,}0241 - 4 \cdot 0{,}0183 - 3 \cdot 0{,}0448 = 3{,}7201$$

$$Z_1 = 3 - 2\beta_3 - 2\beta_4 = 3 - 2 \cdot 0{,}0183 - 2 \cdot 0{,}0448 = 2{,}8738$$

$$Z_2 = 2 - \beta_4 = 2 - 0{,}0448 = 1{,}9552$$

$$Z_3 = 1.$$

5. Подставляя все данные величины и полученные значения коэфициентов в общую формулу для D_0, находим:

$$D_0 = \frac{0{,}8 - 0{,}9 \cdot 0{,}0058 + (0{,}1 - 0{,}2) \cdot 3{,}7201 + 0{,}15 \cdot 2{,}8738 + 0{,}1 \cdot 1{,}9552 + 0{,}051}{4{,}4768}$$

$$D_0 = 0{,}231 \text{ кг}.$$

Таким образом для данного примера расход пара определяется в 23,1% по весу начального жидкого раствора.

10. Расчет выпарки по методу Классена

В первом приближении можно принять, что каждому килограмму затраченного греющего пара в каждом корпусе соответствует 1 *кг* выпаренной воды. На этом допущении Классен построил свой, хотя и не вполне точный, но весьма простой метод определения расхода пара на первый корпус и количества воды, выпариваемой в каждом корпусе. Неточность метода зависит оттого, что все коэфициенты испарения принимаются за единицу, а самоиспарение считается равным нулю. Достоинством метода Классена является то, что он дает возможность очень быстро и без сложных вычислений определить приблизительный порядок частных значений искомых величин. По результатам этого расчета можно предварительно определить приблизительную концентрацию раствора в каждом корпусе и найти нормальную депрессию. Метод Классена совсем не принимает в расчет температурного режима выпарки и не дает способа распределения полезной разности температур. Поэтому найденная при предварительных расчетах по Классену нормальная депрессия должна быть затем исправлена по установлении температурного режима и окончательный расчет выпарки должен быть произведен точным методом. Таким образом метод Классена всегда является предварительным и служит большим подспорьем для точных расчетов.

Приводим вывод формул Классена в общем виде для выпарки с пароотбором при числе корпусов n.

Пусть в последнем корпусе выпаривается w_n *кг* воды. Если из предпоследнего $(n-1)$-го корпуса отбирается $\mathcal{E}_{n-1}$ *кг* экстра-пара, то в $(n-1)$-ом корпусе должно выпариваться $w_n + \mathcal{E}_{n-1}$ *кг* воды. При отборе из $(n-2)$-го корпуса $\mathcal{E}_{n-2}$ *кг* экстра-пара в этом корпусе должно выпариваться $w_n + \mathcal{E}_{n-1} + \mathcal{E}_{n-2}$ *кг* воды и т. д. Принимая во внимание эти соотношения, будем иметь следующие выражения для количества воды, выпаренной по корпусам:

$$
\begin{aligned}
w_n &= w_n \\
w_{n-1} &= w_n + \mathcal{E}_{n-1} \\
w_{n-2} &= w_n + \mathcal{E}_{n-1} + \mathcal{E}_{n-2} \\
&\vdots \\
w_2 &= w_n + \mathcal{E}_{n-1} - \mathcal{E}_{n-2} + \mathcal{E}_{n-3} + \ldots + \mathcal{E}_2 \\
w_1 &= w_n + \mathcal{E}_{n-1} + \mathcal{E}_{n-2} + \mathcal{E}_{n-3} + \ldots + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_1 .
\end{aligned}
$$

Складывая левые и правые части этих уравнений, получим общее количество воды, выпаренное во всех корпусах вместе, а именно:

$$
\begin{gathered}
W = nw_n + (n-1)\mathcal{E}_{n-1} + (n-2)\mathcal{E}_{n-2} + \\
+ (n-3)\mathcal{E}_{n-3} + \ldots + 2\mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_1
\end{gathered}
$$

или

$$w_n = \frac{W - \mathcal{E}_1 - 2\mathcal{E}_2 - 3\mathcal{E}_3 - \ldots - (n-1)\mathcal{E}_{n-1}}{n} .$$

Отсюда можем определить w_n, т. е. количество воды, выпаренное в последнем корпусе.

Для расчета должно быть известно W и пароотбор по корпусам. Подставляя в вышеприведенные выражения для w_1, w_2, w_3 и т. д. вместо w_n его значение, найдем количества воды, выпариваемой в каждом корпусе. Расход пара, греющего первый корпус, будет

$$
\begin{gathered}
D_1 = w_1 = \\
= \frac{W - \mathcal{E}_1 - 2\mathcal{E}_2 - 3\mathcal{E}_2 - \ldots - (n-1)\mathcal{E}_{n-1}}{n} + \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \ldots + \mathcal{E}_{n-1}
\end{gathered}
$$

или

$$D_1 = \frac{W + (n-1)\mathcal{E}_1 + (n-2)\mathcal{E}_2 + \ldots + \mathcal{E}_{n-1}}{n}$$

и, наконец,

$$
\begin{gathered}
D_1 = \frac{W}{n} + \frac{n-1}{n}\mathcal{E}_1 + \frac{n-2}{n}\mathcal{E}_2 + \\
+ \frac{n-3}{n}\mathcal{E}_3 + \ldots + \frac{2}{n}\mathcal{E}_{n-2} + \frac{1}{n}\mathcal{E}_{n-1} .
\end{gathered}
$$

Так, например, для трехкорпусной выпарки с пароотбором формула для D будет:

$$D_1 = \frac{W}{3} + \frac{2}{3}\mathcal{E}_1 + \frac{1}{3}\mathcal{E}_2 .$$

Для выпарки без пароотбора $\mathcal{E}_1 = 0$; $\mathcal{E}_1 = 0$ и т. д. и

$$D_1 = \frac{W}{n} .$$

Как видим, структура приближенной формулы Классена та же, что и для выведенной нами точной общей формулы с теми отличиями, что $X = n$; $Y = 0$ и эквиваленты экстра-пара Z_1, Z_2, $Z_3, \ldots$ имеют целые значения.

Для того чтобы иметь представление о степени точности формул Классена, применим эти формулы для трехкорпусной выпарки.

Пусть $W = 80$ на 100 кг раствора

$$\mathcal{E}_1 = 10$$
$$\mathcal{E}_2 = 20$$
$$D_1 = \frac{80}{3} + \frac{2}{3} \cdot 10 + \frac{1}{3} \cdot 20 = 40.$$

$$w_1 = 40 \qquad 100 - w_1 = 60$$
$$w_2 = 40 - 10 = 30 \qquad 100 - w_1 - w_2 = 30$$
$$w_3 = 30 - 20 = 10 \qquad 100 - w_1 - w_2 - w_3 = 20$$

Согласно точному расчету имеем:

$$D_1 = 38{,}95$$
$$w_1 = 38{,}95 \qquad 100 - w_1 = 61{,}05$$
$$w_2 = 30{,}32 \qquad 100 - w_1 - w_2 = 30{,}73$$
$$w_3 = 10{,}73 \qquad 100 - w_1 - w_2 - w_3 = 20$$

Особенно большое отклонение, примерно в 7%, получается для воды, выпариваемой в третьем корпусе. При большем числе корпусов метод Классена дает гораздо более грубые ошибки.

Как видим, для определения нормальной депрессии по концентрациям раствора в каждом корпусе метод Классена дает достаточно точные результаты.

Так, например, при 15% начальной концентрации раствора конечные концентрации по корпусам будут:

	По Классену	По точному расчету
I	$15 \cdot \frac{100}{60} = 25\%$	$15 \cdot \frac{100}{61{,}05} = 24{,}57$
II	$15 \cdot \frac{100}{30} = 50$	$15 \cdot \frac{100}{30{,}73} = 48{,}8$
III	$15 \cdot \frac{100}{20} = 75$	$15 \cdot \frac{100}{20} = 75$

Такие отклонения концентрации вызывают очень малые изменения в депрессии, поэтому можно руководствоваться приближенными значениями концентрации, найденными по методу Классена.

Допущение Классена дает возможность вывести очень важную зависимость между пароотбором на сторону и расходом пара, греющего первый корпус. Обозначая соответственно расход греющего пара по корпусам через D_1, D_2, D_3 и т. д., будем иметь ряд уравнений:

$$D_1 = D_2 + \mathcal{E}_1$$
$$D_2 = D_3 + \mathcal{E}_2$$
$$D_3 = D_3 + \mathcal{E}_3$$
$$D_{n-1} = D_n + \mathcal{E}_{n-1}$$
$$D_n = w_n.$$

Складывая левые и правые части этих уравнений, получаем:

$$D = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \ldots + \mathcal{E}_{n-1} + w_n.$$

Величина w_n, т. е. количество вторичного пара из последнего корпуса, может считаться за паротбор из последнего корпуса, так как весь этот пар не используется в самой выпарке, а уходит в конденсатор или же применяется как экстра-пар (если в последнем корпусе температура кипения достаточно высока). Так, например, в выпарке под давлением в последнем корпусе температура вторичного пара бывает обыкновенно равной 100°, и пар из последнего корпуса направляется не на конденсатор, а на обогрев промежуточных продуктов. Поэтому вообще величину w_n можно считать за паротбор из последнего корпуса и обозначить ее буквой $\mathcal{E}_n$, при чем $\mathcal{E}_n = w_n$. Тогда будем иметь:

$$D_1 = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \ldots + \mathcal{E}_n,$$

что показывает, что расход пара на первый корпус равен полному суммарному паротбору из выпарки.

Таким образом для всякой многокорпусной выпарки, независимо от ее температурного режима, имеем два приближенных уравнения, связывающих общее количество выпаренной воды, расход пара на первый корпус и паротбор по корпусам:

$$W = \mathcal{E}_1 + 2\mathcal{E}_2 + 3\mathcal{E}_3 + \ldots + n\mathcal{E}_n$$

и

$$D = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \ldots + \mathcal{E}_n.$$

Эта система уравнений дает возможность решать простейшим путем ряд весьма важных вопросов, относящихся к расчету многокорпусной выпарки.

В том случае, если выпарка имеет ноль-корпус, а на первый корпус расходуется мятый пар в количестве равном R, уравнения приобретают следующий вид:

$$W = \mathcal{E}_1 - R + 2\mathcal{E}_2 + 3\mathcal{E}_3 + \ldots + n\mathcal{E}_n$$

и

$$D = \mathcal{E}_1 - R + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \ldots + \mathcal{E}_n.$$

При помощи этих уравнений можно решить с достаточной для технических целей точностью вопрос о пределах паротбора для всей выпарки в целом и для каждого корпуса в отдельности, а также найти рациональное распределение паротбора по корпусам.

Глава III

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРООТБОРА ПО КОРПУСАМ

1. Общие уравнения. Однокорпусная и двухкорпусная выпарка

Как мы видели выше, для всякой многокорпусной выпарки можно составить два общих уравнения, связывающих между собой следующие величины: 1) общее количество выпариваемой воды W, 2) расход греющего пара на первый корпус D и 3) пароотбор из всех корпусов $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$ и т. д. В число последних величин входит и количество вторичного пара из последнего корпуса, равное количеству выпариваемой в нем воды. При выпарке под давлением пар из последнего корпуса целиком используется как экстра-пар для нагревания продуктов или на концентратор. При выпарке под разрежением весь вторичный пар из последнего корпуса идет на конденсатор и нагревает барометрическую воду. При выпарке под давлением мы не стремимся ограничивать выпаривание в последнем корпусе слишком узкими пределами, так как пар атмосферного давления находит себе полезное применение. При выпарке под разрежением излишнее количество пара из последнего корпуса, уходя целиком на конденсатор, может явиться источником больших потерь тепла. Поэтому в последнем корпусе выпарки под разрежением необходимо ограничивать выпаривание очень узкими пределами, допуская главным образом только самоиспарение.

Для наших общих уравнений оба случая не представляют принципиальных различий, поэтому, имея в виду только указанные количественные ограничения, будем считать для обоих случаев пар из последнего корпуса за экстра-пар, обозначая его количество буквой $\mathcal{E}_n$ или w_n, где n—номер последнего корпуса.

Общие уравнения для выпарки, состоящей из n-корпусов, имеют вид:

$$W = \mathcal{E}_1 + 2\mathcal{E}_2 + 3\mathcal{E}_3 + \ldots + n\mathcal{E}_n. \quad (1)$$

$$D = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E} + \ldots + \mathcal{E}_n. \quad (2)$$

Эта система из двух уравнений вообще является неопределенной, так как содержит в себе $n+2$ переменных величины. В частности она представляется определенной только для однокорпусной выпарки, когда $D=\mathcal{E}_1$, $W=\mathcal{E}_1$ и $W=D$, при чем одна из этих трех величин задана.

В случае однокорпусной выпарки общие уравнения показывают, что расход греющего пара равен полному количеству выпаренной воды, а весь вторичный пар $\mathcal{E}_1$ может быть использован как экстра-пар. Задаваясь одной из трех величин W, D или $\mathcal{E}_1$, имеем для однокорпусной выпарки два уравнения с двумя переменными, т. е. определенную систему.

Для двухкорпусной выпарки система уравнений будет иметь следующий вид:

$$W=\mathcal{E}_1+2\mathcal{E}_2.$$
$$D=\mathcal{E}_1+\mathcal{E}_2.$$

В эту систему входит четыре переменные величины: W, D, $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$.

Для того чтобы система была определенной, необходимо задаться частными значениями каких-нибудь двух из этих величин, тогда значения остальных двух величин определяются путем решения указанных двух уравнений. Так, например, если дана производительность выпарки и расход греющего пара, то известны значения W и D. Пароотбор в этом случае может иметь только одну комбинацию, соответствующую частным значениям $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$, находимым в результате решения уравнений. А именно:

$$\mathcal{E}_1=2D-W$$

и

$$\mathcal{E}_2=W-D.$$

Так как при этом $\mathcal{E}_1$ может быть только положительным или равным нулю, то

$$2D-W\geqslant 0,$$

т. е. между D и W должно существовать следующее соотношение:

$$D\geqslant\frac{W}{2}.$$

Пусть, например, $W=96$ и $D=50$, тогда

$$\mathcal{E}_1=2\cdot 50-96=4$$

и

$$\mathcal{E}_2=96-50=46,$$

т. е. в данном случае из первого корпуса должно быть отобрано 4 *кг* экстра-пара, а из второго 46 *кг*. Никаких других комбинаций пароотбора при заданных значениях W и D в этом случае не может быть. Всякая другая комбинация изменит производительность выпарки или расход пара или то и другое вместе.

Для трехкорпусной выпарки уравнения (1) и (2) принимают вид:

$$W = \mathcal{E}_1 + 2\mathcal{E}_2 + 3\mathcal{E}_3. \qquad (3)$$

$$D = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3. \qquad (4)$$

Система является неопределенной, так как содержит пять переменных величин. Рассмотрим этот случай более детально.

2. Трехкорпусная выпарка под давлением

Для того чтобы система уравнений (3) и (4) была определенной, нужно задаться частными значениями каких-нибудь трех величин, тогда частные значения двух остальных находятся путем решения уравнений.

Определим прежде всего, в каких пределах могут колебаться значения $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$ при переменных W и D. Для исследования этого вопроса рассмотрим три возможных случая.

Первый случай. Из второго и третьего корпусов экстрапар совсем не отбирается, т. е. $\mathcal{E}_2 = 0$ и $\mathcal{E}_3 = 0$.

Выпарка превращается в однокорпусную. Уравнение (3) дает:

$$W = \mathcal{E}_1.$$

Из уравнения (4) получаем:

$$D = \mathcal{E}_1.$$

Этот уже рассмотренный выше случай показывает, что пароотбор может равняться общему количеству выпаренной воды только при однокорпусной выпарке. В этом случае $\mathcal{E}_1$ и общий пароотбор принимает максимальное вообще возможное значение, т. е.

$$max\ \mathcal{E}_1 = W,$$

при чем все корпуса, кроме первого, не работают, т. е. ничего не выпаривают. Уменьшение пароотбора из первого корпуса на некоторую величину, когда $\mathcal{E}_1 < W$, делает возможной работу остальных корпусов и выпарка делается многокорпусной. Но так как при этом D будет меньше W, то и общий пароотбор от всех корпусов, равный величине D, также будет меньше W.

Второй случай. Из первого и третьего корпусов экстрапар совсем не отбирается, т. е. $\mathcal{E}_1 = 0$ и $\mathcal{E}_3 = w_3 = 0$. Выпарка превращается в двухкорпусную. Уравнение (3) дает:

$$W = 2\mathcal{E}_2,$$

откуда

$$\mathcal{E}_2 = \frac{W}{2},$$

т. е.

$$max\ \mathcal{E}_2 = \frac{W}{2},$$

что показывает, что максимальный возможный пароотбор из второго корпуса равен половине общего количества выпариваемой воды, при чем последующий корпус не работает. Из уравнения (4) получаем:

$$D = \mathcal{E}_2 = \frac{W}{2},$$

т. е. расход греющего пара на первый корпус будет в этом случае также равен половине общего количества выпариваемой воды.

Третий случай. Из первого и второго корпусов экстра-пар не отбирается, т. е.

$$\mathcal{E}_1 = 0 \text{ и } \mathcal{E}_2 = 0.$$

Выпарка остается трехкорпусной, при чем экстра-пар отбирается только из третьего корпуса. Уравнение (3) дает:

$$W = 3\mathcal{E}_3,$$

откуда

$$max\,\mathcal{E}_3 = \frac{W}{3}.$$

Это показывает, что максимальное возможное количество экстра-пара из третьего корпуса равно одной трети общего количества выпариваемой воды. Из уравнения (4) получаем:

$$D = \mathcal{E}_3 = \frac{W}{3},$$

т. е. расход греющего пара в данном случае также будет равен одной трети общего количества выпариваемой воды.

Вывод. Общий пароотбор при трехкорпусной выпарке может колебаться в пределах от $\frac{W}{3}$ (случай 3-й) до W (случай 1-й). Практически действительный пароотбор при трехкорпусной выпарке должен находиться между этими пределами.

3. Комбинирование пароотбора в трехкорпусной выпарке при постоянной производительности и постоянном расходе пара

Общее уравнение $D = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$ показывает, что увеличение или уменьшение пароотбора из какого угодно корпуса на одну и ту же величину, например на 1 *кг*, вызывает соответственно увеличение или уменьшение расхода пара D на ту же величину (1 *кг*). Отсюда иногда делают ошибочный вывод, что в выпарке под давлением экстра-пар из всех корпусов является равноценным. Неправильность этого заключения выясняет другое уравнение:

$$W = \mathcal{E}_1 + 2\mathcal{E}_2 + 3\mathcal{E}_3,$$

из которого следует, что, увеличивая пароотбор из первого корпуса на 1 *кг*, мы повышаем общее количество выпариваемой воды также на 1 *кг*.

Увеличение паротбора из второго или из третьего корпуса на 1 *кг* вызовет увеличение количества выпариваемой воды соответственно на 2 и на 3 *кг*.

Во всех этих трех случаях, взятых порознь, расход греющего пара будет увеличен на одну и ту же величину, т. е. на 1 *кг*, но эффект выпаривания будет тем больше, чем дальше от начала выпарки отбирается экстрапар.

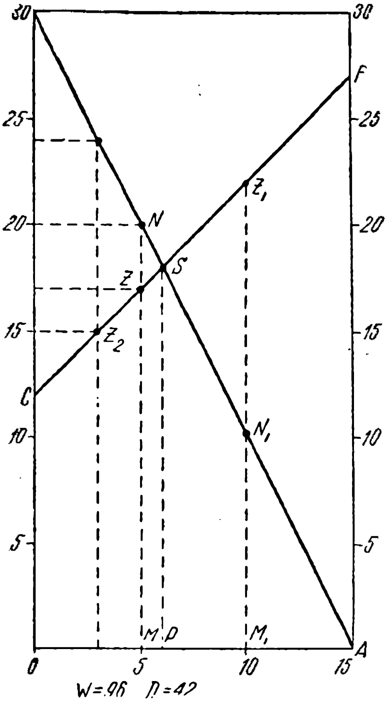

Рис. 13. Номограмма паротбора для трехкорпусной выпарки.

Перейдем теперь к рассмотрению вопроса о том, как может изменяться паротбор по корпусам при постоянном расходе пара на первый корпус и при постоянной производительности выпарки, т. е. при $D = \text{const}$ и $W = \text{const}$.

Система уравнений:

$$W = \mathcal{E}_1 + 2\mathcal{E}_2 + 3\mathcal{E}_3$$

$$D = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3$$

будет содержать три переменных: $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$ и допускает множество комбинаций частных значений переменных величин, связанных данной системой уравнений и частными значениями W и D. Иными словами, в данном случае может иметь место множество вариантов паротбора.

Представляется весьма важным решение вопроса о том, в каких пределах могут колебаться значения $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$.

Выразим величины $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$ в зависимости от $\mathcal{E}_1$ при постоянных W и D.

Имеем:

$$W = \mathcal{E}_1 + 2\mathcal{E}_2 + 3\mathcal{E}_3 \tag{3}$$

и

$$D = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3. \tag{4}$$

Умножим обе части уравнения (4) на 3 и из полученного уравнения вычтем уравнение (3).

Получаем:

$$3D - W = 2\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2,$$

откуда

$$\mathcal{E}_2 = -2\mathcal{E}_1 + 3D - W. \tag{5}$$

Далее находим:

$$\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_1 + W - 2D. \tag{6}$$

Уравнение (5) показывает, что при увеличении $\mathcal{E}_1$ величина $\mathcal{E}_2$ уменьшается и, наоборот, с уменьшением $\mathcal{E}_1$ величина $\mathcal{E}_2$ растет, т. е. максимальному значению $\mathcal{E}_1$ соответствует минимальное значение $\mathcal{E}_2$ и, наоборот, когда $\mathcal{E}_1$ имеет минимум, то $\mathcal{E}_2$ имеет максимум.

Уравнение (6) показывает, что $\mathcal{E}_3$ изменяется одновременно с изменением $\mathcal{E}_1$ в одну и ту же сторону, т. е. $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_3$ имеют одновременно максимум и одновременно минимум.

Для выяснения, в каких пределах может изменяться значение $\mathcal{E}_1$, обратимся к уравнению (5).

Так как $\mathcal{E}_3$ может быть положительным или равным нулю (случай добавления пара со стороны исключаем), то согласно уравнению (5) имеем:

$$-2\mathcal{E}_1 + 3D - W \geqslant 0,$$

откуда

$$\mathcal{E}_1 \leqslant \frac{3D - W}{2},$$

откуда следует, что

$$min\, \mathcal{E}_1 = 0$$

и

$$max\, \mathcal{E}_1 = \frac{3D - W}{2}.$$

Исследуем теперь, в каких пределах могут изменяться величины $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$ в зависимости от изменений $\mathcal{E}_1$ от минимального до максимального его значения. Подставив в уравнения (5) и (6) минимальное значение

$$min\, \mathcal{E}_1 = 0,$$

находим:

$$max\, \mathcal{E}_2 = 3D - W$$

и

$$min\, \mathcal{E}_3 = W - 2D.$$

Подставив в те же уравнения вместо $\mathcal{E}_1$ его максимальное значение

$$max\, \mathcal{E}_1 = \frac{3D - W}{2},$$

находим:

$$min\, \mathcal{E}_2 = 0$$

и

$$max\, \mathcal{E}_2 = \frac{W - D}{2}.$$

Итак, когда $\mathcal{E}_1$ изменяет свое значение, возрастая от 0 до максимума, равного $\frac{3D - W}{2}$, то $\mathcal{E}_2$ меняет свое значение, уменьшаясь от своего максимума, равного $3D - W$, до нуля, а $\mathcal{E}_3$ возрастает от своего минимума, равного $W - 2D$, до максимума $\frac{W-D}{2}$. В этих пределах $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$ могут иметь какие угодно взаимно связанные частные значения, за указанные же пределы при постоянных W и D они переходить не могут. Выход частных значений $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$ за указанные пределы повлечет за собой изменение расхода пара или производительности выпарки или и то и другое вместе.

Выведенные формулы указывают пределы для комбинирования пароотбора из трехкорпусной выпарки. Так, например, если $W = 96$ и $D = 42$, то $\mathcal{E}_1$ может колебаться от нуля до максимума, равного:

$$max\,\mathcal{E}_1 = \frac{3 \cdot 42 - 96}{2} = 15,$$

т. е. от первого корпуса нельзя отбирать более 15 *кг* экстра-пара. Максимум пароотбора из второго корпуса будет:

$$max\,\mathcal{E}_2 = 3 \cdot 42 - 96 = 30 \text{ кг}.$$

Для третьего корпуса найдем:

$$min\,\mathcal{E}_3 = 96 - 2 \cdot 42 = 12 \text{ кг}$$

и

$$max\,\mathcal{E}_3 = \frac{96 - 42}{2} = 27 \text{ кг}.$$

В этих пределах можем, например, от первого корпуса отобрать экстра-пара $\mathcal{E}_1 = 5$ *кг*, тогда согласно уравнениям (5) и (6) получим, что из второго корпуса должно быть отобрано $\mathcal{E}_2 = -2 \cdot 5 + 3 \cdot 42 - 96 = 20$ *кг* и из третьего $\mathcal{E}_3 = 5 \cdot 96 - 2 \cdot 42 = 17$ *кг*.

4. Номограмма пароотбора

Уравнения (5) и (6) показывают, что в прямоугольной системе координат, где значения $\mathcal{E}_1$ будут откладываться по оси абсцисс, значения $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$ будут изменяться по прямым линиям. Прямая, изображающая ход изменений величины $\mathcal{E}_2$, имеет угол наклона к оси абсцисс $\varphi_2 = \operatorname{arctg}(-2) = 116°34'$, при чем начальный отрезок на оси ординат при $\mathcal{E}_1 = 0$ будет равен $3D - W$. Прямая, изображающая ход изменений величины $\mathcal{E}_3$, имеет угол наклона к оси абсцисс $\varphi_3 = \operatorname{arctg} 1 = 45°$, при чем начальный отрезок на оси ординат равен $W - 2D$, а конечная ордината при $\mathcal{E}_1\,max = \frac{3D - W}{2}$ будет $\frac{W - D}{2}$.

По этим данным может быть построена весьма простая номограмма, охватывающая широкий диапазон изменений W и D. Для частного случая при $W = 96$ и $D = 42$ система прямых линий изображена на рис. 13. По оси абсцисс от начала координат O отложен отрезок $OA = 15$, соответствующий максимальной величине $\mathscr{E}_1 = \frac{3D - W}{2} = \frac{3 \cdot 42 - 96}{2} = 15$.

Все возможные частичные значения $\mathscr{E}_1$ (пароотбор из первого корпуса) лежат на этом отрезке от точки O до точки A включительно. По оси ординат от точки O вверх откладываем отрезок OD, равный максимальному значению $\mathscr{E}_2 = 3D - W = 3 \cdot 42 - 96 = 30$. Точку B соединяем с точкой A. Прямая BA изображает ход изменения величины $\mathscr{E}_2$ в зависимости от изменений $\mathscr{E}_1$. По оси ординат от начала вверх откладываем отрезок OC, равный минимальному значению $\mathscr{E}_3 = W - 2D = 96 - 2 \cdot 42 = 12$. По ординате точки A вверх от точки A откладываем отрезок AF, равный максимальному значению $\mathscr{E}_3 = \frac{W - D}{2} = \frac{96-42}{2} = 27$. Точку C соединяем с точкой F. Прямая CF изображает ход изменения $\mathscr{E}_3$ в зависимости от изменения $\mathscr{E}_1$.

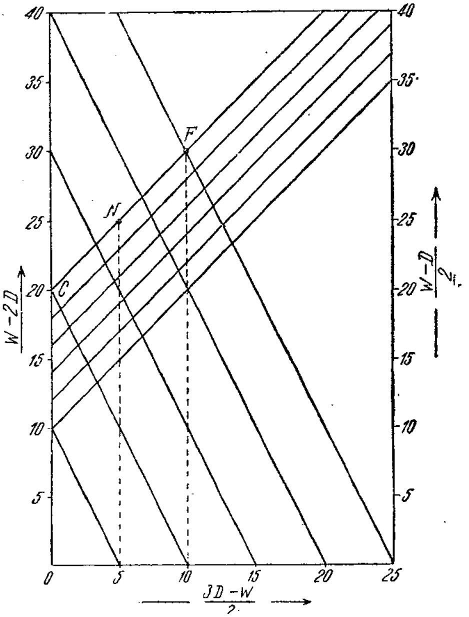

Рис. 14. Номограмма пароотбора.

По этой номограмме можно найти все возможные для данного случая комбинации пароотбора. Так, например, если из первого корпуса будем отбирать экстра-пара 5 *кг*, то $\mathscr{E}_1 = OM = 5$. На пересечении линии ординат точки MC прямыми BA и CF находим точки N и L, для которых ординаты будут соответственно $MN = \mathscr{E}_2 = 20$ *кг* и $ML = \mathscr{E}_3 = 17$ *кг*. Таким образом, если при данных $W = 96$ и $D = 42$ из первого корпуса отбираем 5 *кг* экстра-пара, то из второго должны отбирать 20 *кг* и из третьего 17 *кг*. Соответственно $\mathscr{E}_1 = 10$ *кг* по номограмме тем же путем получаем $\mathscr{E}_2 = 11$ и $\mathscr{E}_3 = 21$ *кг*. Наконец, если из первого корпуса будем отбирать $\mathscr{E}_1 = 6$ *кг*, то из второго и третьего должны отбирать по 18 *кг* и т. д. Номограмма дает возможность по заданному пароотбору из одного какого-нибудь корпуса найти необходимый пароотбор из остальных корпусов. Так, например, задаваясь целью выпаривать в третьем корпусе только 15 *кг* воды, находим, что из первого корпуса для этой цели необходимо отбирать $\mathscr{E}_1 = 3$ *кг* экстра-пара, а из второго $\mathscr{E}_2 = 24$ *кг*. Во всех этих случаях будет выпариваться во всей выпарке 96 *кг* воды и расход пара на первый корпус будет равен 42 *кг*.

На рис. 14 представлена номограмма, охватывающая широкий интервал изменений W и D. В этой монограмме по оси абсцисс отложены отрезки $max\,\mathscr{E}_1 = \frac{3D-W}{2}$ до 25 *кг* включительно. Ряд параллельных прямых, наклоненных к оси абсцисс под углом $\operatorname{arctg}(-2)$, изображают линии для $\mathscr{E}_2$. Другой ряд параллельных прямых, идущих под углом $\operatorname{arctg} 1 = 45^\circ$ к оси абсцисс, изображают линии для $\mathscr{E}_3$. В каждом частном случае, зная W и D, находим необходимую для нас систему прямых линий. Так, например, если $W = 100$ и $D = 40$, то $\mathscr{E}_{1max} = \frac{3 \cdot 40 - 100}{2} = 10$. От точки A на оси абсцисс влево вверх идет прямая AC, характеризующая изменения $\mathscr{E}_2$. Откладывая по оси ординат от начала вверх отрезок $OC = \mathscr{E}_{3min} = W - 2D = 100 - 2 \cdot 40 = 20$, находим прямую CF для $\mathscr{E}_3$, идущую вправо вверх под углом 45° к оси абсцисс. В пределах этих прямых линий находятся все комбинации пароотбора при $W = 100$ и $D = 40$. Так, например, при $\mathscr{E}_1 = 5$ (точка M) находим $\mathscr{E}_2 = 10$ (точка L на прямой AC) и $\mathscr{E}_3 = 25$ (точка N на прямой CF) и т. д.

5. Комбинирование пароотбора при пятикорпусной выпарке

Применяя вышеизложенный метод к пятикорпусной выпарке, найдем, что общий пароотбор может колебаться в пределах от $\frac{W}{5}$ до W. В последнем случае выпарка превращается в однокорпусную. В тех же пределах колеблется расход греющего пара на первый корпус так, что всегда $D \leqslant W$ и $D \geqslant \frac{W}{5}$.

При W и D постоянных общая система уравнений:

$$W = \mathscr{E}_1 + 2\mathscr{E}_2 + 3\mathscr{E}_3 + 4\mathscr{E}_4 + 5w_5$$

$$D = \mathscr{E}_1 + \mathscr{E}_2 + \mathscr{E}_3 + \mathscr{E}_4 + w_5$$

содержит пять переменных величин. Эта система может стать определенной в том случае, если частные значения трех переменных будут заданы.

Практически в условиях температурного режима пятикорпусной выпарки обыкновенно можно задаться частными значениями $\mathscr{E}_4$ и w_5.

Величина w_5 представляет собой количество вторичного пара, получаемого при выпаривании в пятом корпусе. Так как этот пар не используется, а идет целиком в конденсатор, то, во избежание больших потерь тепла на выпарке, количество его ограничивают самыми узкими пределами, используя для выпаривания в пятом корпусе неизбежное самоиспарение раствора.

Поэтому величиной w_5 можно задаться, принимая для ее значение 1—1,5% по весу начального раствора.

Величина $\mathcal{E}_4$ представляет собой пароотбор из четвертого корпуса. Пар из этого корпуса имеет сравнительно низкую температуру, примерно 84—87°, и потребление его на сторону обычно ограничено определенными пределами. Поэтому величиной $\mathcal{E}_4$ также можно задаться, определяя ее значение в 5—6% по весу раствора. Таким образом в нашей системе уравнений число переменных может быть сокращено до трех.

Перенося все постоянные заданные величины из правой части уравнений в левую, придадим нашим уравнениям для пятикорпусной выпарки следующую форму:

$$\begin{gathered} W - 4\mathcal{E}_4 - 5w_5 = \mathcal{E}_1 + 2\mathcal{E}_2 + 3\mathcal{E}_3 \\ D - \mathcal{E}_4 - w = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 . \end{gathered}$$

Так как в левых частях обоих уравнений теперь находятся постоянные величины, то задача пароотбора в пятикорпусной выпарке сводится к решенной выше задаче о трехкорпусной выпарке. Во всех формулах для трехкорпусной выпарки необходимо вместо W подставить выражение:

$$W - 4\mathcal{E}_4 - 5w_5$$

и вместо D выражение

$$D - \mathcal{E}_4 - w_5.$$

Таким образом получаем, что пароотбор из первого корпуса пятикорпусной выпарки должен колебаться в пределах от

$$min\,\mathcal{E}_1 = 0$$

до

$$max\,\mathcal{E}_1 = \frac{3(D - \mathcal{E}_4 - w_5) - (W - 4\mathcal{E}_4 - 5w_5)}{2}$$

или

$$max\,\mathcal{E}_1 = \frac{3D - W + \mathcal{E}_4 + 2w_5}{2} .$$

Пароотбор из второго корпуса может изменяться в пределах от

$$\begin{aligned} max\,\mathcal{E}_2 &= 3(D - \mathcal{E}_4 - w_5) - (W - 4\mathcal{E}_4 - 5w_5) = \\ &= 3D - W + \mathcal{E}_4 + 2w_5 \end{aligned}$$

до

$$min\,\mathcal{E}_2 = 0.$$

Пароотбор из третьего корпуса будет изменяться в пределах от

$$\begin{aligned} min\,\mathcal{E}_3 &= W - 4\mathcal{E}_4 - 5w_5 - 2(D - \mathcal{E}_4 - w_5) = \\ &= W - 2D - 2\mathcal{E}_4 - 3w_5 \end{aligned}$$

до

$$max\,\mathcal{E}_3 = \frac{W - 4\mathcal{E}_4 - 5w_5 - (D - \mathcal{E}_4 - w_5)}{2} = \frac{W - D - 3\mathcal{E}_4 - 4w_5}{2} .$$

Например, в частном случае при $W = 105$, $D = 45$; $\mathcal{E}_4 = 6$ и $w_5 = 1$ имеем следующие пределы пароотбора по корпусам:

$$\mathit{min}\,\mathcal{E}_1 = 0; \quad \mathit{max}\,\mathcal{E}_1 = \frac{3 \cdot 45 - 105 + 6 + 2}{2} = 19;$$

$$\mathit{max}\,\mathcal{E}_2 = 3 \cdot 45 - 105 + 6 + 2 = 38; \quad \mathit{min}\,\mathcal{E}_2 = 0;$$

$$\mathit{min}\,\mathcal{E}_3 = 105 - 45 - 2 \cdot 6 - 3 = 0;$$

$$\mathit{max}\,\mathcal{E}_3 = \frac{105 - 45 - 3 \cdot 6}{2} = 19.$$

Формулы для определения $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$ по данным значениям $\mathcal{E}_1$ принимают вид:

$$\mathcal{E}_2 = -2\mathcal{E}_1 + 3(D - \mathcal{E}_4 - w_5) - (W - 4\mathcal{E}_4 - 5w_5)$$

или

$$\mathcal{E}_2 = -2\mathcal{E}_1 + 3D - W + \mathcal{E}_4 + 2w_5$$

и

$$\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_1 + W - 4\mathcal{E}_4 - 5w_5 - 2(D - \mathcal{E}_4 - w_5)$$

или

$$\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_1 + W - 2D - 2\mathcal{E}_4 - 3w_5.$$

По этим формулам для нашего частного случая можем задаться частным значением $\mathcal{E}_1 = 12$, тогда пароотбор из второго и третьего корпусов соответственно должен быть:

$$\mathcal{E}_2 = -2 \cdot 12 + 3 \cdot 45 - 105 + 6 + 2 = 14$$

и

$$\mathcal{E}_3 = 12 + 105 - 2 \cdot 45 - 2 \cdot 6 - 3 = 12 \text{ кг.}$$

При таких условиях, очевидно, номограммой (рис. 14) можно пользоваться для решения вопросов пароотбора не только в трехкорпусной, но и в пятикорпусной выпарке. Приемы пользования номограммой остаются такими же, как и при трехкорпусной выпарке при соответствующем предварительном вычислении величин:

$$W - 4\mathcal{E}_4 - 5w_5 \quad \text{и} \quad D - \mathcal{E}_4 - w_5.$$

Глава IV

РАЦИОНАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА ОТДЕЛЬНЫХ КОРПУСОВ

1. Введение

При проектировании новой выпарки для заданной производительности можно поставить следующие требования:

1) поверхности нагрева всех корпусов должны быть равны между собою;

2) суммарная поверхность нагрева всей выпарки должна быть минимальной.

Соблюдение первого требования имеет тот смысл, что все корпуса будут выполнены по одному стандарту, вследствие чего упрощается их конструирование и производство. Кроме того при одинаковых корпусах все их детали будут однотипными и взаимозаменяемыми. Второе требование имеет в виду возможную экономию металла.

Иногда к выпарке предъявляется требование отбора экстра-пара в надлежащем количестве и определенной для каждого корпуса температуры. Этим предусматривается обеспечение паром посторонних потребителей тепла, связанных с выпаркой в одну тепловую схему, что ведет к общей экономии топлива.

Это требование вообще несовместимо с двумя вышеуказанными, так как выпарка с заданными условиями пароотбора, вообще говоря, не будет иметь ни равенства поверхностей нагрева, ни минимальной суммарной поверхности. Если же выпарка не связана ни количествами экстра-паров, ни их параметрами, заранее заданными, то два первых требования могут быть одновременно совмещены в одной и той же выпарке, которая при известном распределении пароотбора может иметь равные корпуса при минимальной общей их поверхности нагрева.

При расчетах выпарки, находящейся в эксплоатации, ставится требование повышения ее производительности, что связано с изменением пароотбора и температурного режима.

Для выпаривания веществ, разлагающихся при повышенной температуре, все вышеприведенные требования осложняются необходимостью фиксировать максимальную температуру кипения раствора в первом корпусе, что при заданной температуре пара, греющего этот корпус, полностью определяет для него минимальную полезную разность температур.

Для выпарки с ноль-корпусом имеется еще одно ограничительное условие, а именно: давление пара, выделяющегося в ноль-корпусе, должно быть равно давлению мятого пара, так как эти пары смешиваются перед поступлением в греющую камеру первого корпуса. При повышении давления вторичного пара ноль-корпуса повысится противодавление в паровом двигателе, что понизит его мощность.

По всем этим соображениям, приступая к расчету выпарки, заранее задаются совершенно определенно одним или несколькими из вышеуказанных требований и всеми ограничительными условиями.

Во всех случаях исходными данными для расчета являются:

1) число корпусов,

2) температура пара, греющего первый корпус или ноль-корпус и первый корпус,

3) температура вторичного пара из последнего корпуса,

4) потери разности температур от депрессии и при переходе из корпуса в корпус,

5) количество воды, выпариваемое во всей выпарке в единицу времени,

6) теплоемкость начального раствора,

7) коэфициенты теплопередачи для всех корпусов.

Для действующей выпарки кроме того известными являются поверхности нагрева всех корпусов.

В итоге расчета для проектируемой выпарки на основании предъявленных к ней требований и по частным значениям перечисленных данных должны быть найдены числовые значения размеров поверхностей нагрева для каждого корпуса.

Для действующей выпарки итогом расчета является определение оптимального паротбора, оптимальная последовательность в расположении корпусов и возможное повышение производительности.

Расчет для всех случаев сводится к предварительному определению оптимального температурного режима, т. е. распределению полезной разности температур.

Найдя оптимальный режим, производят расчет выпарки по общему методу.

Каждое из предъявленных выше требований имеет свою закономерность в распределении полезной разности температур по корпусам. Перейдем к выяснению этих закономерностей, для чего рассмотрим отдельно два случая: 1) расчет выпарки без пароотбора, 2) выпарку с пароотбором. Кроме того рассмотрим случай интенсификации действующей выпарки.

Все расчеты будем относить к 100 *кг* начального раствора, поступающего на выпарку в 1 мин.

Необходимые числовые значения данных величин приводятся ниже в каждом отдельном примере расчета.

2. Выпарка без пароотбора с одинаковыми поверхностями нагрева всех корпусов

Количество тепла, передаваемое в каждом корпусе в одну минуту, выражается общеизвестной формулой Ньютона:

$$Q = fk\partial, \tag{1}$$

где f—поверхность нагрева в $м^2$, k—минутный коэфициент теплопередачи и ∂—полезная разность температуры. Величину Q назовем тепловой нагрузкой корпуса.

Согласно этой формуле отношение тепловой нагрузки произвольного n-ого корпуса к тепловой нагрузке первого корпуса будет:

$$\frac{Q_n}{Q_1} = q_n = \frac{f_n k_n \partial_n}{f_1 k_1 \partial_1}. \tag{2}$$

Отсюда следует, что отношение полезных разностей температур может быть выражено общей формулой:

$$\frac{\partial_n}{\partial_1} = q_n \frac{f_1 k_1}{f_n k_n}. \tag{3}$$

Величину q_n назовем коэфициентом тепловой нагрузки или относительной тепловой нагрузкой n-ого корпуса (при тепловой нагрузке первого корпуса, принятой за единицу).

Если к выпарке предъявляется требование равенства поверхностей нагрева, то

$$f_n = f_1$$

и

$$\frac{\partial_n}{\partial_1} = q_n \frac{k_1}{k_n}. \tag{4}$$

Итак, при равенстве поверхностей нагрева отношение полезных разностей температур прямо пропорционально отношению тепловых нагрузок и обратно пропорционально коэфициентам теплопередачи корпусов.

В формуле (4) при заданных коэфициентах теплопередачи отношение $\frac{k_1}{k_n}$ известно. Поэтому для распределения полезной разности температур необходимо знать только q_n, т. е. относительную тепловую нагрузку каждого корпуса. Выведем общее выражение для q_n. Обозначая количество греющего пара для n-ого и первого корпусов соответственно через D_n и D_1, будем иметь следующие общие выражения для тепловых нагрузок:

$$Q_n = D_n (\lambda_n - \tau_n)$$

и

$$Q_1 = D_1 (\lambda_1 - \tau_1),$$

где λ—соответственное полное теплосодержание пара и τ—температура конденсата. Принимая для простоты, что температура конденсата равна температуре пара, будем иметь:

$$Q_n = D_n r_n$$

и

$$Q_1 = D_1 r_1,$$

где r_n и r_1 соответственно обозначают скрытую теплоту греющего пара для n-ого и для первого корпусов.

Далее имеем:

$$q_n = \frac{Q_n}{Q_1} = \frac{D_n r_n}{D_1 r_1}. \tag{5}$$

Величины D_1, D_n, r_1 и r_n, а также q_n могут быть найдены методом последовательных приближений.

Метод приближений состоит в следующем: для выпарки без пароотбора в первом приближении можно допустить, что тепловые нагрузки всех корпусов одинаковы. Поэтому в первом приближении можем принять, что $q_n = 1$. На этом основании согласно формуле (4) находим:

$$\frac{\partial_n}{\partial_1} = \frac{k_1}{k_n}. \tag{8}$$

Вычислив по данным значениям k_n и k_1 все отношения $\frac{\partial_n}{\partial_1}$, получим ряд пропорций:

$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 \ldots \partial_n = 1 : \frac{k_1}{k_2} : \frac{k_1}{k_3} : \ldots : \frac{k_1}{k_n}.$$

Далее, все значения полезных разностей температур находятся при помощи пропорционального деления полной полезной разности Δ, а именно:

$$\partial_1 = \frac{\Delta}{1 + \frac{k_1}{k_2} + \frac{k_1}{k_3} + \ldots + \frac{k_1}{k_n}}$$

$$\partial_2 = \partial_1 \cdot \frac{k_1}{k_3}$$

$$\partial_3 = \partial_1 \frac{k_1}{k_2}$$

и т. д.

По всем этим данным составляем температурный режим выпарки и находим величины r_1, r_n и все коэфициенты самоиспарения β в первом приближении.

Зная r_1, r_n и все коэфициенты β, находим D_1, D_n и значения q_n по формуле (5) во втором приближении. Далее, пользуясь новыми приближенными значениями q_n, находим отношения $\frac{\partial_n}{\partial_1}$ во втором приближении по формуле (4) и составляем температурный режим во втором приближении и снова проделываем тот же путь. Обычно второе и в редких случаях третье приближение дают уже достаточно точные результаты.

Пример расчета выпарки с одинаковыми поверхностями нагрева корпусов

Данные:

1) число корпусов $n = 3$,
2) температура пара, греющего первый корпус, 130°,
3) температура вторичного пара из третьего корпуса 100°,
4) потери разности температур от депрессии:

1-й корпус—0,5°; 2-й корпус—1,5°; 3-й корпус—3°
при переходе из 1-го во 2-й корпус—0,5°
» » » 2-го » 3-й » —0,5°

5) количество воды, выпариваемой во всей выпарке в минуту, 80 *кг* на 100 *кг* начального раствора,
6) теплоемкость начального раствора $c = 0,9$,
7) коэфициенты теплопередачи:

в 1-м корпусе — 40 *ккал/min*
» 2-м » — 25
» 3-м » — 15

Решение. 1. Общая разность температур = 138 — 100 = 38°. Потеря разности температур = 0,5 + 1,5 + 3 + 0,5 + 0,5 = 6°. Общая полезная разность температур:

$$\Delta = 38 - 6 = 32°.$$

2. Определяем температурный режим первого приближения. По приближенной формуле (8) при $q_n = 1$ имеем:

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = \frac{40}{25} = 1,6; \quad \frac{\partial_3}{\partial_1} = \frac{40}{15} = 2,67;$$

$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 = 1 : 1,6 : 2,67.$$

$$\partial_1 = \frac{32}{1 + 1,6 + 2,67} = \frac{32}{5,27} = 6,07$$

$$\partial_2 = 6,07 \cdot 1,6 = 9,71; \quad \partial_3 = 6,07 \cdot 2,67 = 16,21.$$

Проверяем:

$$\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = 6,07 + 9,71 + 16,21 = 31,99 \backsim 32 = \Delta.$$

Принимаем округленные значения:

$$\partial_1 = 6,1; \quad \partial_2 = 9,7 \quad \text{и} \quad \partial_3 = 16,2.$$

Зная полезные разности температур и прочие данные, составляем температурный режим в первом приближении (см. таблицу 1).

Таблица 1

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Греющего пара T	138	130,9	119,2
Кипения раствора t	131,9	121,2	103
Вторичного пара θ	131,4	119,7	100
Конденсата τ	138	130,9	119,2

3. По этим данным находим значения коэфициентов самоиспарения β в первом приближении по паровым таблицам:

$$r_1 = 513; \quad r_2 = 518,07; \quad r_3 = 526,04$$

$$t_1 - t_2 = 10,7; \quad t_2 - t_3 = 18,2$$

$$i_2 - t_2 = 524,2; \quad i_3 - t_3 = 535,7$$

$$\beta_1 = 0; \quad \beta_2 = \frac{10,7}{525,2} = 0,0204; \; \beta_3 = \frac{18,2}{535,7} = 0,034.$$

4. Далее в первом приближении находим x, y, X и Y:

$$x_1 = 1$$

$$x_2 = 1 - \beta_2 = 1 - 0,0204 = 0,9796$$

$$x_3 = 1 - \beta_2 - 2\beta_3 = 0,9796 - 0,068 = 0,9116$$

$$X = 1 + 0,9796 + 0,9116 = 2,8912$$

$$y_1 = 0$$

$$y_2 = 0,0204$$

$$y_3 = 0,0204 + 0,034 = 0,0544$$

$$Y = 0,0204 + 0,0544 = 0,0748.$$

5. Вычисляем D_1, D_2 и D_3 на 100 *кг* начального раствора:

$$D_1 = \frac{W - ScY}{X} = \frac{80 - 100 \cdot 0,9 \cdot 0,0748}{2,8912} = 25,34$$

$$D_2 = w_1 = D_1 = 25,34$$

$$D_3 = w_2 = D_1 x_2 + Scy_2 = 25,34 \cdot 0,9796 + 100 \cdot 0,9 \cdot 0,0204 = 26,66.$$

6. Находим по формуле (5) q_2 и q_3 во втором приближении:

$$q_2 = \frac{D_2 \cdot r_2}{D_1 \cdot r_1} = \frac{518,07}{513} = 1,02$$

$$q_3 = \frac{D_3 \cdot r_3}{D_1 \cdot r_1} = \frac{26,66 \cdot 526,04}{25,34 \cdot 513} = 1,0787.$$

7. Теперь, пользуясь вычисленными значениями q_2 и q_3, определяем температурный режим во втором приближении.

Согласно точной формуле (4) находим:

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = 1{,}6 \cdot 1{,}01 = 1{,}618 \text{ и } \frac{\partial_3}{\partial_1} = 2{,}67 \cdot 1{,}0787 = 2{,}88$$

$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 = 1 : 1{,}62 : 2{,}88$$

$$\partial_1 = \frac{32}{1 + 1{,}62 + 2{,}88} = \frac{32}{5{,}5} = 5{,}82$$

$$\partial_2 = 5{,}82 \cdot 1{,}62 = 9{,}43$$

$$\partial_3 = 5{,}82 \cdot 2{,}88 = 16{,}76$$

Проверяем сумму $\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = 5{,}82 + 9{,}43 + 16{,}76 = 32{,}04\,\Delta$.

Округляя, принимаем следующие значения:

$$\partial_1 = 5{,}8; \quad \partial_2 = 9{,}4; \quad \partial_3 = 16{,}8.$$

Температурный режим будет (см. табл. 2):

Таблица 2

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Греющего пара T	138	131,2	119,8
Кипящего раствора t	132,2	121,8	103
Вторичного пара θ	132,7	120,3	100
Конденсата τ	138	131,2	119,8

8. Вычисляем значения коэфициентов самоиспарения во втором приближении:

$$r_1 = 513; \qquad r_2 = 517{,}86; \qquad r_3 = 525{,}63$$

$$t_1 - t_2 = 10{,}4; \quad t_2 - t_3 = 18{,}8$$

$$i_2 - t_2 = 523{,}79; \; i_3 - t_3 = 535{,}7$$

$$\beta_1 = 0; \quad \beta_2 = \frac{10{,}4}{523{,}79} = 0{,}0199 \;\; \beta_3 = \frac{18{,}8}{535{,}7} = 0{,}0351.$$

9. Находим во втором приближении значения x, y, X и Y

$$x_1 = 1 \qquad y_1 = 0$$

$$x_2 = 0{,}9801 \qquad y_2 = 0{,}0199$$

$$x_3 = 0{,}91 \qquad y_3 = 0{,}055$$

$$X = 2{,}89 \qquad Y = 0{,}0749$$

10. Вычисляем D_1, D_2, D_3:

$$D_1 = \frac{80 - 90 \cdot 0{,}0759}{2 \cdot 89} = 25{,}35$$

$$D_2 = w_1 = D_1 = 25{,}35$$

$$D_3 = 25{,}35 \cdot 0{,}9801 + 100 \cdot 0{,}09 \cdot 0{,}0199 = 26{,}64.$$

11. По формуле (5) находим q_2 и q_3 в третьем приближении:

$$q_2 = \frac{517,86}{513} = 1,0094$$

$$q_3 = \frac{26,64 \cdot 525,63}{25,35 \cdot 513} = 1,0766.$$

12. По этим новым значениям q_2 и q_3 уточняем температурный режим (третье приближение):

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = 1,6 \cdot 1,0094 = 1,615$$

$$\frac{\partial_3}{\partial_1} = 2,67 \cdot 1,0766 = 2,875$$

$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 = 1 : 1,615 : 2,875$$

$$\partial_1 = \frac{32}{5,49} = 5,83; \quad \partial_2 = 5,83 \cdot 1,615 = 9,42$$

$$\partial_3 = 5,83 \cdot 2,875 = 16,76.$$

Проверяем сумму:

$$\Delta = 5,83 + 9,42 + 16,76 = 32,01.$$

Полезные разности температур в третьем и втором приближениях почти совпадают, поэтому принимаем температурный режим второго приближения (табл. 2).

13. Согласно данным табл. 2 производим расчет выпарки.

Расход пара, греющего первый корпус, будет:

$$D_1 = \frac{W - 100cY}{X} = \frac{80 - 90 \cdot 0,0749}{2,89}$$

$$D_1 = 25,349\%.$$

Воды выпаривается:

в 1-м корпусе $w_1 = 25,349$

» 2-м » $w_2 = 25,349 \cdot 0,9801 + 90 \cdot 0,0199 = 26,636$

» 3-м » $w_3 = 25,349 \cdot 0,91 + 90 \cdot 0,055 = 28,018$

Сумма $W = 25,349 + 26,636 + 28,018 = 80,003.$

Поверхности нагрева:

$$f_1 = \frac{25,349 \cdot 513}{40 \cdot 5,8} = 56,05$$

$$f_2 = \frac{25,349 \cdot 517,86}{25 \cdot 9,4} = 55,33$$

$$f_3 = \frac{26,636 \cdot 525,63}{15 \cdot 16,8} = 55,56$$

В итоге поверхности нагрева всех трех корпусов оказываются действительно практически одинаковыми. Отклонения объясняются округлением разностей температур.

3. Выпарка без паротбора с минимальной общей поверхностью нагрева

Для произвольно выбранной пары корпусов имеем:

$$Q_n = f_n k_n \partial_n$$

и

$$Q_m = f_m k_m d_m,$$

откуда

$$f_n = \frac{Q_n}{k_n \partial_n} \text{ и } f_m = \frac{Q_m}{k_m \partial_m}.$$

Обозначим полезную разность температур, приходящуюся на оба корпуса, через Δ.

Тогда будем иметь:

$$\Delta = \partial_n + \partial_m$$

и

$$\partial_m = \Delta - \partial_n.$$

Пусть

$$f_n + f_m = F = \frac{Q_n}{k_n \partial_n} + \frac{Q_m}{k_m (\Delta - \partial_n)}.$$

Необходимо найти, при каком значении ∂_n величина суммарной поверхности F будет минимальной. Для этого достаточно взять первую производную $\frac{dF}{d\partial_n}$ и приравнять ее значение нулю. Полученное равенство определит условия минимума для F.

Диференцируем:

$$\frac{dF}{d\partial_n} = -\frac{Q_n}{k_n \partial_n^2} + \frac{Q_m}{k_m \partial_m^2} = F'.$$

Условия для минимума F будет:

$$\frac{Q_n}{k_n \partial_n^2} = \frac{Q_m}{k_m \partial_m^2}. \qquad (9)$$

Для доказательства, что при данном равенстве будет минимум, а не максимум, необходимо найти вторую производную $\frac{dF'}{d\partial_n}$ и подставить в найденное для нее выражение то значение ∂_n, которое получится из формулы для первой производной.

$$\frac{dF'}{d\partial_n} = 2\left(\frac{Q_n}{k_n \partial_n^3} + \frac{Q_m}{k_m (\Delta - \partial_n)}\right).$$

При всяком значении вторая производная будет иметь знак плюс. Поэтому выведенное выше соотношение соответствует минимуму поверхности нагрева.

Из формулы (9) находим:

$$\frac{\partial_m}{\partial_n} = \sqrt{\frac{Q_m}{Q_n} \cdot \frac{k_n}{k_m}}.$$

Если взять отношение полезной разности n-го корпуса к полезной разности температур первого корпуса, то та же формула дает следующую общую зависимость:

$$\frac{\partial_n}{\partial_1} = \sqrt{q_n \frac{k_1}{k_n}}, \qquad (10)$$

где q_n—уже известная нам относительная тепловая нагрузка произвольного n-го корпуса.

Из формулы (10) следует, что поверхность нагрева всей выпарки будет иметь минимальное значение в том случае, если отношение полезной разности температур будет пропорционально корню квадратному из относительной тепловой нагрузки и обратно пропорционально корню квадратному из отношения коэфициентов теплопередачи.

Эта закономерность дает возможность определить температурный режим выпарки, необходимый для получения минимальной поверхности нагрева. В данном случае, как и в предыдущем, необходимо предварительно определить q_n, для чего применяется формула (5), выведенная выше. Для вычисления q_n применяют тот же метод последовательных приближений, очень быстро ведущий к цели. Исходный вариант температурного режима получают, принимая q_n за единицу. Тогда из формулы (10) находим:

$$\frac{\partial_n}{\partial_1} = \sqrt{\frac{k_1}{k_n}}. \qquad (11)$$

По этой формуле вычисляют в первом приближении все полезные разности температур, коэфициенты самоиспарения и находят величины q_n. Затем, умножая все отношения $\frac{\partial_n}{\partial_1}$ на $\sqrt{q_n}$, получают новые значения разностей температур во втором приближении и т. д. Обычно точные значения q_n получаются уже во втором приближении.

Далее производят полный расчет по общему методу и вычисляют поверхности нагрева.

Пример расчета выпарки с минимальной поверхностью нагрева

Все данные берем из предыдущего примера.

1. Распределяем полезную разность температур в первом приближении, принимая $q_n = 1$. Тогда согласно приближенной формуле (11) имеем:

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = \sqrt{\frac{40}{25}} = \sqrt{1,6} = 1,265$$

$$\frac{\partial_3}{\partial_1} = \sqrt{\frac{40}{15}} = \sqrt{2,67} = 1,634$$

$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 = 1 : 1,265 : 1,634 \text{ при } \Delta = 32$$

$$\partial_1 = \frac{32}{1 + 1,265 + 1,634} = \frac{32}{3,899} = 8,21$$

$$\partial_2 = 8,21 \cdot 1,265 = 10,39$$

$$\partial_3 = 8,21 \cdot 1,634 = 13,42$$

$$\Delta = 8,21 + 10,39 + 13,42 = 32,02.$$

Округляя значения разностей температур, принимаем:

$$\partial_1 = 8{,}2; \quad \partial_2 = 10{,}4; \quad \partial_3 = 13{,}4.$$

2. Составляем температурный режим в первом приближении (см. табл. 3).

Таблица 3

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Греющего пара T	138	128,8	116,4
Кипящего раствора t	129,8	118,4	103
Вторичного пара θ	129,3	116,9	100
Конденсата τ	138	128,8	116,4

3. Вычисляем коэфициенты самоиспарения в первом приближении:

$$r_1 = 513; \qquad r_2 = 519{,}5; \qquad r_3 = 527{,}9$$

$$t_1 - t_2 = 11{,}4; \qquad t_2 - t_3 = 15{,}4$$

$$i_2 - t_2 = 526{,}1; \qquad i_3 - t_3 = 535{,}7$$

$$\beta_1 = 0; \quad \beta_2 = \frac{11{,}4}{526{,}1} = 0{,}0217; \quad \beta_3 = \frac{15{,}4}{535{,}7} = 0{,}0287.$$

4. Находим в первом приближении коэфициенты x, y, X и Y:

$$x_1 = 1$$

$$x_2 = 1 - 0{,}0217 = 0{,}9783$$

$$x_3 = 0{,}9783 - 2 \cdot 0{,}0297 = 0{,}9209$$

$$X = 1 + 0{,}9783 + 0{,}9209 = 2{,}8992$$

$$y_1 = 0; \quad y_2 = 0{,}0217; \quad y_3 = 0{,}0217 + 0{,}0287 = 0{,}0504$$

$$Y = 0{,}0217 + 0{,}0504 = 0{,}0721.$$

5. Вычисляем D_1, D_2 и D_3:

$$D_1 = \frac{W - ScY}{X} = \frac{80 - 100 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}0721}{2{,}8992} = 25{,}36$$

$$D_2 = w_1 = D_1 = 25{,}36$$

$$D_3 = w_2 = D_1 x_2 + Scy_2 = 25{,}36 \cdot 0{,}9783 + 100 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}0217 = 26{,}76.$$

6. Вычисляя во втором приближении значения q_n по формуле (5), имеем:

$$q_2 = \frac{r_2}{r_1} = \frac{519{,}5}{513} = 1{,}0127$$

$$q_3 = \frac{26{,}76 \cdot 527{,}9}{25{,}36 \cdot 513} = 1{,}0856.$$

7. По вычисленным значениям q_2 и q_3 определяем температурный режим во втором приближении. Для этого умножаем

найденные в первом приближении отношения $\frac{\partial_2}{\partial_1}$ и $\frac{\partial_3}{\partial_1}$ соответственно на $\sqrt{q_2}$ и $\sqrt{q_3}$.

Получаем во втором приближении:

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = 1{,}265\sqrt{1{,}0127} = 1{,}27; \quad \frac{\partial_3}{\partial_1} = 1{,}634\sqrt{1{,}0856} = 1{,}70$$

$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 = 1 : 1{,}27 : 1{,}70; \quad \partial_1 = \frac{32}{3{,}97} = 8{,}06$$

$$\partial_2 = 8{,}06 \cdot 1{,}27 = 10{,}24; \quad \partial_3 8{,}06 \cdot 1{,}7 = 13{,}7.$$

Проверяем:

$$\partial_1 + \partial_2 + \partial_2 = 8{,}06 + 10{,}24 + 13{,}7 = 32.$$

Принимаем округленные значения ∂:

$$\partial_1 = 8{,}1; \qquad \partial_2 = 10{,}2; \qquad \partial_3 = 13{,}7.$$

8. Составляем температурный режим во втором приближении (см. табл. 4).

Таблица 4

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Греющего пара T	138	128,8	116,7
Кипящего раствора t	129,9	118,7	103
Вторичного пара θ	129,4	117,2	100
Конденсата τ	138	128,9	116,7

9. По этим данным находим коэфициенты самоиспарения во втором приближении:

$$r_1 = 513; \qquad r_2 = 519{,}42; \quad r_3 = 527{,}74$$

$$t_1 - t_2 = 11{,}2; \qquad t_2 - t_3 = 15{,}7$$

$$i_2 - t_2 = 525{,}9; \qquad i_3 - t_3 = 535{,}7$$

$$\beta_1 = 0; \quad \beta_2 = \frac{11{,}2}{525{,}9} = 0{,}0213; \quad \beta_3 = \frac{15{,}7}{535{,}7} = 0{,}0293.$$

10. Вычисляем во втором приближении коэфициенты x, y, X и Y:

$$x_1 = 1$$

$$x_2 = 1 - 0{,}0213 = 0{,}9787$$

$$x_3 = 0{,}9787 - 2 \cdot 0{,}0293 = 0{,}9201$$

$$X = 1 + 0{,}9787 + 0{,}9201 = 2{,}8988$$

$$y_1 = 0$$

$$y_2 = 0{,}0213$$

$$y_3 = 0{,}0500$$

$$Y = 0{,}0719$$

11. Вычисляем снова D_1, D_2 и L_3:

$$D_1 = \frac{80 - 100 \cdot 0,9 \cdot 0,0719}{2,8988} = 25,37$$

$$D_2 = w_1 = D_1 = 25,37$$

$$D_3 = w_2 = D_1 x_2 + Scy_2 = 25,37 \cdot 0,9787 + 100 \cdot 0,9 \cdot 0,0213 = 26,75.$$

12. Наконец, вычисляем коэфициенты q_n в третьем приближении:

$$q_3 = \frac{519,42}{513} = 1,0125$$

$$q_3 = \frac{26,75 \cdot 527,74}{25,37 \cdot 513} = 1,0846.$$

13. Составляем температурный режим в третьем приближении:

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = 1,265 \sqrt{1,0125} = 1,273$$

$$\frac{\partial_3}{\partial_1} = 1,634 \sqrt{1,0846} = 1,702$$

$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 = 1 : 1,273 : 1,702$$

$$\partial_1 = \frac{32}{3,975} = 8,05$$

$$\partial_2 = 8,05 \cdot 1,273 = 10,25$$

$$\partial_3 = 0,05 \cdot 1,702 = 13,70$$

$$\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = 8,05 + 10,25 + 13,7 = 32 = \Delta.$$

Округленные значения ∂, полученные при третьем приближении, ничем не отличаются от значений, найденных при втором приближении. Поэтому можно принять температурный режим, данный в таблице 4.

14. Определяем поверхность нагрева отдельных корпусов.

Расход пара, греющего первый корпус, по общей формуле будет:

$$D_1 = \frac{80 - 90 \cdot 0,0719}{2,8988} = 25,365 \text{ кг.}$$

Выпаривается вода по корпусам:

$$w_1 = 25,365$$

$$w_2 = 25,365 \cdot 0,9787 + 90 \cdot 0,0213 = 26,742$$

$$w_3 = 25,365 \cdot 0,9201 + 90 \cdot 0,0506 = 27,892$$

Проверяем:

$$25,365 + 26,742 + 27,892 = 79,999.$$

Поверхности нагрева будут:

$$f_1 = \frac{25{,}365 \cdot 513}{40 \cdot 8{,}1} = \frac{13012{,}25}{324} = 40{,}16 \text{ м}^2$$

$$f_2 = \frac{25{,}365 \cdot 519{,}42}{25 \cdot 10{,}2} = 51{,}67 \text{ м}^2$$

$$f_3 = \frac{26{,}742 \cdot 527{,}74}{15 \cdot 13{,}7} = 68{,}68 \text{ м}^2$$

4. Сравнение результатов расчета

Результаты расчета по двум приведенным примерам, т. е. для выпарки с одинаковыми поверхностями нагрева и для выпарки с минимальной поверхностью нагрева при одной и той же производительности сведем в общую таблицу 5.

Таблица 5

	Выпарка с одинаковыми размерами поверхности нагрева					Выпарка с минимальной общей поверхностью нагрева				
Корпус	*д*	*q*	*f*	*F*	D_1	*д*	*q*	*f*	*F*	D_1
1-й . . .	5,8	1	56,05	—	25,35	8,1	1	40,16	—	25,37
2-й . . .	9,4	1,0094	55,33	167	—	10,2	1,025	51,67	160	—
3-й . . .	16,8	1,076	55,56	—	—	13,7	1,0846	68,68	—	—

Сравнивая значения различных величин этой таблицы для обоих случаев, можем сделать следующие выводы:

1. В первом варианте по сравнению со вторым для первых двух корпусов имеем меньшие полезные разности температур. Поэтому первый вариант характеризуется более высокими температурами кипения в первых двух корпусах. Это явление необходимо учитывать при выпаривании растворов органических и вообще нестойких веществ.

2. Суммарная поверхность нагрева в первом случае больше, чем во втором, на 7 $м^2$, т. е. приблизительно на 5%. В нашем примере эта разница не велика, поэтому в смысле экономии металла второй случай не представляет больших преимуществ перед первым. Частные случаи с другими размерами данных величин могут дать гораздо большую экономию в поверхности нагрева, которой нельзя будет пренебрегать.

3. Расход пара на первый корпус в обоих случаях почти одинаков.

По всем этим соображениям нетрудно в специфических условиях каждого отдельного случая выбрать тот или иной из рассмотренных вариантов.

5. Пример расчета пятикорпусной вакуум-выпарки без пароотбора по двум вариантам

Для наглядного сопоставления итогов расчета пятикорпусной выпарки, работающей под разрежением, приведем полученные вышеуказанным методом цифры для тех же двух вариантов, т. е. с одинаковыми поверхностями и с минимальной общей поверхностью нагрева.

В основу расчета положены следующие данные:

1) число корпусов—5,

2) температура пара, греющего первый корпус,—150°,

3) температура вторичного пара из пятого корпуса—60°,

4) потери разности температур от депрессии:

в 1-м корпусе—0,5°
» 2-м » —1,0
» 3-м » —1,5
» 4-м » —2,0
» 5-м » —3,0

При переходах пара из корпуса в корпус по 0,5°.

5) количество воды, выпариваемой во всей выпарке в 1 минуту,—80 *кг* на 100 *кг* начального раствора,

6) теплоемкость начального раствора 0,9,

7) коэфициенты теплопередачи:

1-й корпус—45 *ккал/мин*
2-й » —35 »
3-й » —25 »
4-й » —15 »
5-й » —10 »

8) общая разность температур будет 150—60 = 90°,

9) полная потеря разности температур:

$$0{,}5 + 1{,}0 + 1{,}5 + 2 + 3 + 4{,}05 = 10°,$$

10) полная полезная разность температур:

$$\Delta = 90 - 10 = 80°.$$

При расчете на одинаковые поверхности нагрева полезная разность температур, найденная по вышеуказанному методу в третьем приближении, будет:

$$\partial_1 = 5{,}4; \quad \partial_2 = 7{,}1; \quad \partial_3 = 10{,}9; \quad \partial_4 = 20{,}5 \quad \text{и} \quad \partial_5 = 36{,}1.$$

После вычисления поверхностей нагрева получаем:

$$f_1 = 26{,}36\ м^2; \quad f_2 = 26{,}0\ м^2; \quad f_3 = 26{,}3\ м^2;$$
$$f_4 = 26{,}31\ м^2 \quad \text{и} \quad f_5 = 26{,}32.$$

Таким образом в третьем приближении получаем для пятикорпусной выпарки требуемый температурный режим.

Для варианта с минимальной общей поверхностью нагрева получаем следующие полезные разности температур:

$$\partial_1 = 9{,}5; \quad \partial_2 = 11{,}0; \quad \partial_3 = 14; \quad \partial_4 = 19{,}5 \quad \text{и} \quad \partial_5 = 26^\circ.$$

Поверхности нагрева будут:

$$f_1 = 14{,}32; \ f_2 = 14{,}8; \ f_3 = 20{,}73; \ f_4 = 29{,}84 \ \text{и} \ f_5 = 37{,}72.$$

Суммарная поверхность нагрева составляет всего 117,3, между тем как при одинаковых корпусах она составляет всего около 131 $м^2$. Таким образом минимальный вариант дает экономию в поверхности нагрева в 14 $м^2$, или более 10%.

Прочие итоги расчета пятикорпусной выпарки по обоим вариантам сопоставлены в таблице 6.

Таблица 6

	Пятикорпусная выпарка с одинаковыми поверхностями нагрева корпусов					Пятикорпусная выпарка с минимальной общей поверхностью нагрева				
Корпус	∂	q	f	F	D	∂	q	f	F	D
1-й . . .	5,4	1,00	26,36	—	12,69	9,5	1,00	14,32	—	12,13
2-й . . .	7,1	1,008	26,00	—	12,69	11,0	1,0073	14,80	—	12,13
3-й . . .	10,9	1,116	26,30	131,29	13,91	14,0	1,090	20,73	117,31	13,93
4-й . . .	20,5	1,259	26,31	—	15,44	19,5	1,18	29,84	—	15,86
5-й . . .	36,1	1,479	26,32	—	17,62	26,0	1,264	37,72	—	17,98

Оптимальный температурный режим для 1-го варианта (одинаковые корпуса).

Таблица 7

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус	4-й корпус	5-й корпус
Греющего пара T	150	143,6	135,6	122,1	99,1
Кипения раствора t . . .	144,6	136,5	124,1	101,6	63,0
Вторичного пара θ	144,1	135,5	122,6	99,6	60,0
Конденсата τ	150,1	143,6	135,0	122,1	99,1
Количество выпаренной воды W	12,69	13,91	15,44	17,62	20,33

Оптимальный температурный режим для 2-го варианта (минимальная общая поверхность).

Таблица 8

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус	4-й корпус	5-й корпус
Греющего пара T	150,0	139,5	127,0	111,0	89,0
Кипения раствора t . . .	140,5	128,5	113,0	91,5	63,0
Вторичного пара θ	140,0	127,5	111,5	89,5	60,0
Конденсата τ	150,0	139,5	127,0	111,0	89,0
Количество выпаренной воды W	12,13	13,92	15,86	17,98	20,09

Сопоставление цифр, приведенных в этих таблицах, дает возможность сделать следующие выводы:

1. В первом варианте кипение идет при более высоких температурах, чем во втором. Это следует учитывать при выборе варианта для растворов веществ, разлагающихся при повышенной температуре. Для этих случаев вообще второй вариант представляется более надежным.

2. Расход пара, греющего первый корпус, для второго варианта получился меньше, чем для первого, примерно на 4%. Фактически этот расход будет для второго варианта еще меньше, так как начальный раствор придется перед поступлением в первый корпус подогревать только до 140,5°, в то время как для первого варианта подогрев требуется до 144,6°.

3. Количество воды, выпариваемой по корпусам в обоих вариантах, почти одинаково, поэтому в обоих случаях повышение концентрации раствора от корпуса к корпусу будет почти одно и то же.

4. Минимальный вариант дает сокращение поверхности нагрева по сравнению с первым вариантом на 131,3—117,3 = 14 $м^2$, или более чем на 10%.

5. Тепловые нагрузки корпусов в первом варианте возрастают более ровно, чем во втором.

Эти выводы и другие сопоставления, какие можно сделать по итогам сравнительного расчета, приведенными в таблицах, в каждом отдельном случае будут служить основанием для выбора того или иного варианта.

6. Выпарка с паротбором. Пример расчета по двум вариантам

Как было указано выше, при выпарке с паротбором обыкновенно в известных узких пределах задается количество и температура экстра-пара, отбираемого из каждого корпуса. В этом случае температурный режим выпарки является заданным и подчиненным не каким-либо закономерностям в распределении полезной разности температур, а требованиям, предъявляемым потребителями к выпарке, как тепловому генератору. По заданному таким образом температурному режиму производится общим методом расчет выпарки и определяются необходимые размеры поверхностей нагрева. Общая формула расхода греющего пара на первый корпус:

$$D_1 = \frac{W - cy}{X} + \mathcal{E}_1 \frac{Z_1}{X} + \mathcal{E}_2 \frac{Z_2}{X} + \mathcal{E}_3 \frac{Z_3}{X} + \cdots$$

показывает, что расход пара D_1 в различной степени зависит от того, из какого корпуса отбирается экстра-пар. Увеличивая $\mathcal{E}_1$, т. е. паротбор первого корпуса на 1 *кг*, мы тем самым увеличиваем D_1 на величину $\frac{Z_1}{X}$, называемую эквивалентом экстра-пара из первого корпуса. Этот эквивалент для первого корпуса больше, чем для последующих корпусов. Поэтому, перенося пароотбор к первому корпусу, мы в большей степени повышаем расход пара на выпарку, чем в том случае, если бы пароотбор производился из последующих корпусов при той же производительности.

Стремясь к экономии расхода пара на выпарку, мы должны для каждого потребителя обосновать необходимость в паре определенной температуры. Потребители, требующие сравнительно высокой температуры нагрева, должны получать дорогой экстра-пар из первых корпусов. Потребителей, не требующих сравнительно высокой температуры пара, можно удовлетворить более дешевым экстра-паром из последующих корпусов. При вакуум-выпарке пар из последнего корпуса, имеющий слишком низкую температуру (56—60°), идет обыкновенно на конденсатор, т. е. используется для нагрева охлаждающей воды.

Но можно представить себе случай, когда пароотбор выражается только количеством экстра-пара из каждого корпуса без назначения его температуры. В этом случае оптимальный температурный режим не задан. Он может быть найден по одной из вышеуказанных закономерностей в зависимости от того, какой из вариантов поверхности нагрева мы хотим получить.

Как и в предыдущих случаях, необходимо предварительно вычислить относительные тепловые нагрузки q_n.

Для определения q_n в общем виде пользуемся теми же формулами, что и раньше, но вводим в них значения $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$, $\mathcal{E}_3$ и т. д. Согласно формуле (5) имеем:

$$q_n = \frac{D_n}{D_1} \cdot \frac{r_n}{r_1}.$$

Так как величины D_1 и D_n неизвестны, то непосредственно значение величины q_n не может быть вычислено, поэтому и здесь применяется метод последовательных приближений. Для первого приближения величина q_n не может быть в данном случае принята за единицу, так как она сильно зависит от пароотбора, заданного заранее, и может колебаться в более широких пределах, чем в выпарке без пароотбора. Приблизительное значение q_n может быть взято в зависимости от расхода греющего пара, вычисленного по приближенному методу Классена.

Зная величину q_n в первом приближении, пользуются ею совершенно так же, как и в предыдущих примерах расчета выпарки без пароотбора.

Пример расчета выпарки с пароотбором

Рассчитаем трехкорпусную выпарку с пароотбором из первого и второго корпусов по двум вариантам. Первый вариант будем рассчитывать на равенство поверхностей нагрева всех корпусов, второй на минимальную общую поверхность нагрева при одинаковой производительности в обоих случаях. Зададимся теми же значениями всех данных величин, что и в предыдущих примерах, но кроме того примем, что в обоих случаях отбирается экстра-пара:

из 1-го корпуса $\mathcal{E}_1 = 10$ *кг* на 100 *кг* нач. раствора
» 2-го » $\mathcal{E}_2 = 20$ *кг* » 100 *кг* » »

Тепловые нагрузки q_n в первом приближении для обоих вариантов вычисляем, пользуясь методом Классена, а именно:

$$q_2 = \frac{D_2}{D_1} = \frac{w_1 - \mathcal{E}_1}{D_1} = \frac{D_1 - \mathcal{E}_1}{D_1}$$

или

$$q_2 = 1 - \frac{\mathcal{E}_1}{D_1} = 1 - \frac{10}{D_1}$$

$$D_1 = \frac{80 + 20 + 20}{3} = 40$$

$$q_2 = 1 - \frac{10}{40} = \frac{30}{40} = 0{,}75$$

$$q_3 = \frac{D_3}{D_1} = \frac{w_2 - \mathcal{E}_2}{D_1} = \frac{D_2 - \mathcal{E}_2}{D_1} = \frac{D_1 - \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{D_1}$$

или

$$q_3 = 1 - \frac{\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2}{D} = 1 - \frac{30}{40} = \frac{10}{40} = 0{,}25.$$

Первый вариант (равные поверхности).

1. Распределяем разность температур по формуле (4). В первом приближении имеем:

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = 1{,}6 \cdot q_2 = 1{,}6 \cdot 0{,}75 = 1{,}2$$

$$\frac{\partial_3}{\partial_1} = 2{,}67 \cdot q_3 = 2{,}67 \cdot 0{,}25 = 0{,}67$$

$$\partial_1 = \frac{32}{1 + 1{,}2 + 0{,}67} = \frac{32}{2{,}87} = 11{,}15$$

$$\partial_2 = 11{,}15 \cdot 1{,}2 = 13{,}38$$

$$\partial_3 = 11{,}15 \cdot 0{,}67 = 7{,}47$$

$$\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = \Delta = 11{,}15 + 13{,}38 + 7{,}47 = 32^\circ.$$

Округленно:

$$\partial_1 = 11{,}1; \quad \partial_2 = 13{,}4; \quad \partial_3 = 7{,}5.$$

2. По данным и по полученным значениям полезной разности температур составляем температурный режим в первом приближении (табл. 9).

Таблица 9

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Греющего пара T	138	125,9	110,5
Кипения раствора t	126,9	112,5	103,0
Вторичного пара θ	126,4	111,0	100,0
Конденсата τ	138	125,9	110,5
Скрытая теплота греющего пара r	513	521,4	531,9

3. Определяем коэфициенты самоиспарения:

$$t_1 - t_2 = 14,4; \qquad t_2 - t_3 = 9,5;$$
$$i_2 - t_2 = 530; \qquad i_3 - t_3 = 535,7.$$
$$\beta_1 = 0; \quad \beta_2 = \frac{14,4}{530} = 0,0272; \qquad \beta_3 = \frac{9,5}{535,7} = 0,0177.$$

4. По известным формулам вычисляем коэфициенты x, y, X, Y и Z:

$$x_1 = 1$$
$$x_2 = 1 - \beta_2 = 1 - 0,0272 = 0,9728$$
$$x_3 = 1 - \beta_2 - 2\beta_3 = 0,9728 - 2 \cdot 0,0177 = 0,9374$$
$$X = x_1 + x_2 + x_3 = 2,9102$$
$$y_1 = 0$$
$$y_2 = \beta_2 = 0,0272$$
$$y_3 = \beta_2 + \beta_3 = 0,0272 + 0,0177 = 0,0449$$
$$Y = y_1 + y_2 + y_3 = 0,0272 = 0,0449 = 0,0721$$
$$z_1 = 1$$
$$z_2 = 1 - \beta_3 = 1 - 0,0177 = 0,9823$$
$$Z_1 = k_1 + k_2 = 1 + 0,9823 = 1,9823$$
$$Z_2 = 1.$$

5. По этим данным находим расход пара, греющего первый корпус:

$$D_1 = \frac{W - cy + Z_1\mathscr{E}_1 + Z_2\mathscr{E}_2}{X}.$$

$$D = \frac{80 - 90 \cdot 0.0721 + 10 \cdot 1,9823 + 20}{2,9102} = 38,95 \text{ кг на } 100 \text{ кг нач. раств.}$$

6. Вычисляем количество воды, выпариваемое в отдельных корпусах:

$$w_1 = D_1 = 38,95$$
$$w_2 = D_1x_2 + 100cy_2 - \mathscr{E}_1 = 38,95 \cdot 0,9728 + 90 \cdot 0,0272 - 10 = 30,34$$
$$w_3 = D_1x_3 + 100cy_3 - \mathscr{E}_1Z_2 - \mathscr{E}_2 = - 38,95 \cdot 0,9374 + 90 \cdot 0,0449 - $$
$$- 10 \cdot 1,9823 - 20 = 10,73.$$

Проверяем:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 38{,}95 + 30{,}34 + 10{,}73 = 80{,}02.$$

7. Определяем расход греющего пара по корпусам, принимая во внимание пароотбор на сторону:

$$D_1 = 38{,}95$$
$$D_2 = w_1 - 10 = 38{,}95 - 10 = 28{,}95$$
$$D_3 = w_2 - 20 = 30{,}34 - 20 = 10{,}34.$$

8. По формуле (5) вычисляем относительные тепловые нагрузки q_2 и q_3 во втором приближении:

$$q_2 = \frac{D_2 r_2}{D_1 r_1} = \frac{28{,}95 \cdot 521{,}4}{38{,}95 \cdot 513} = 0{,}755$$
$$q_3 = \frac{D_3 r_3}{D_1 r_1} = \frac{10{,}34 \cdot 531{,}9}{38{,}95 \cdot 513} = 0{,}28.$$

Распределяем полезную разность температур во втором приближении по формуле (4):

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = 1{,}6 = 1{,}6 \cdot 0{,}755 = 1{,}208$$
$$\frac{\partial_3}{\partial_1} = 2{,}67 = 2{,}67 \cdot 0{,}28 = 0{,}737$$
$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 = 1 : 1{,}208 : 0{,}737$$
$$\partial_1 = \frac{32}{1 + 1{,}208 + 0{,}737} = \frac{32}{2{,}945} = 10{,}9$$
$$\partial_2 = 10{,}9 \cdot 1{,}208 = 13{,}2; \quad \partial_3 = 10{,}9 \cdot 0{,}737 = 8{,}0$$
$$\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = \Delta = 10{,}9 + 13{,}2 + 8 = 32{,}1.$$

10. Составляем температурный режим во втором приближении (табл. 10).

Таблица 10

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Греющего пара T	138	126,1	110,9
Кипения раствора t	127,1	112,9	102,9
Вторичного пара θ	126,6	111,4	100,0
Конденсата τ	138	126,1	110,9
Скрытая теплота греющего пара r	513	521,3	531,6

11. Определяем коэфициенты самоиспарения:

$$t_1 - t_2 = 14{,}2 \qquad t_2 - t_3 = 10{,}0$$
$$i_2 - t_2 = 529{,}8 \qquad i_3 - t_3 = 535{,}7$$

$$\beta_1 = 0; \quad \beta_2 = \frac{14{,}2}{529{,}8} = 0{,}0268; \quad \beta_3 = \frac{10}{535{,}7} = 0{,}0187.$$

12. По коэфициентам самоиспарения вычисляем x, y, X, Y, Z_1 и Z_2.

$$x_1 = 1$$
$$x_2 = 1 - \beta = 1 - 0{,}0268 = 0{,}9732$$
$$x_3 = 1 - \beta_2 - 2\beta_3 = 0{,}9732 - 2 \cdot 0{,}0187 = 0{,}9358$$
$$X = x_1 + x_2 + x_3 = 1 + 0{,}9732 + 0{,}9358 = 2{,}909$$
$$y_1 = 0$$
$$y_2 = \beta_2 = 0{,}0268$$
$$y_3 = \beta_2 + \beta_3 = 0{,}0268 + 0{,}0187 = 0{,}0455$$
$$Y = y_1 + y_2 + y_3 = 0{,}0268 + 0{,}0455 = 0{,}0723$$
$$z_1 = 1$$
$$z_2 = 1 - \beta_3 = 1 - 0{,}0187 = 9813$$
$$Z_1 = z_1 + z_2 = 1{,}9813$$
$$Z_2 = 1{,}0.$$

13. По этим данным вычисляем расход пара, греющего первый корпус:

$$D_1 = \frac{80 - 90 \cdot 0{,}0723 + 10 \cdot 1{,}9813 + 20}{2{,}909} = 38{,}95.$$

14. Вычисляем количество воды, выпариваемой в отдельных корпусах:

$$w_1 = 38{,}95$$
$$w_2 = 38{,}95 \cdot 0{,}9732 + 90 \cdot 0{,}0268 - 10 = 30{,}32$$
$$w_3 = 38{,}95 \cdot 0{,}9358 + 90 \cdot 0{,}0455 - 10 \cdot 0{,}9813 - 20 = 10{,}73.$$

Проверяем:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 38{,}95 + 30{,}32 + 10{,}73 = W = 80.$$

15. Определяем расход пара, греющего каждый корпус, учитывая пароотбор:

$$D_1 = 38{,}95$$
$$D_2 = 38{,}95 - 10 = 28{,}95$$
$$D_3 = 30{,}32 - 20 = 10{,}32.$$

16. По формуле (5) вычисляем относительные тепловые нагрузки в третьем приближении:

$$q_2 = \frac{28{,}95 \cdot 531{,}3}{38{,}95 \cdot 513} = 0{,}755$$
$$q_3 = \frac{10{,}32 \cdot 531{,}6}{38{,}95 \cdot 513} = 0{,}28.$$

Тепловые нагрузки в третьем приближении получились такими же, как и во втором приближении. Поэтому на результатах второго приближении расчет может быть закончен и температурный режим будет определяться таблицей 10.

17. По полученным результатам вычисляем поверхность нагрева:

$$f_1 = \frac{38,95 \cdot 513}{40 \cdot 10,9} = 45,8\ м^2$$

$$f_2 = \frac{28,95 \cdot 521,3}{13,2 \cdot 25} = 45,73\ м^2$$

$$f_3 = \frac{10,32 \,.\, 531,6}{8,15} = 45,72\ м^2.$$

Таким образом в результате расчета мы получаем одинаковые поверхности нагрева для всех трех корпусов, что и требовалось по первому варианту. Суммарная поверхность нагрева выпарки будет:

$$F = 45,8 + 45,73 + 45,72 = 137,25\ м^2.$$

Второй вариант (минимальная общая поверхность нагрева).

1. Распределяем общую полезную разность температур по корпусам по формуле (10):

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = \sqrt{1,6\, q_2} = 1,265 \cdot 0,866 = 1,095$$

$$\frac{\partial_3}{\partial_1} = \sqrt{2,67\, q_3} = 1,634 \cdot 0,5 = 0,817$$

$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 = 1 : 1,095 : 0,817.$$

$$\partial_1 = \frac{32}{1 + 1,095 + 0,817} = \frac{32}{2,912} = 11,0$$

$$\partial_2 = 11 \cdot 1,095 = 12,03;$$

$$\partial_3 = 11 \cdot 0,817 = 8,97.$$

Округляем:

$$\partial_1 = 11;\ \partial_2 = 12;\ \partial_3 = 9$$

$$\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = 11 + 12 + 9 = \Delta = 32.$$

2. Составляем температурный режим в первом приближении (табл. 11).

Таблица 11

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Горючего пара T	138	126	112
Кипения раствора t	127	114	103
Вторичного пара θ	126,5	112,5	100
Кондесата τ	138	126	112
Скрытая теплота греющего пара r	513	521,3	530,9

3. Определяем коэфициенты самоиспарения:

$$t_1 - t_2 = 13;\ t_2 - t_3 = 11$$

$$i_2 - t_2 = 529,1;\ i_3 - t_3 = 535,7.$$

$$\beta_1 = 0;\ \beta_2 = \frac{13}{529,1} = 0,0246;\ \beta_3 = \frac{11}{535,7} = 0,0205.$$

4. Вычисляем значения коэфициентов x, y, X, Y, Z_1 и Z_2:

$$x_1 = 1$$
$$x_2 = 1 - 0{,}0246 = 0{,}9754$$
$$x_3 = 0{,}9754 - 2 \cdot 0{,}0205 = 0{,}9344$$
$$X = 1 + 0{,}9754 + 0{,}9344 = 2{,}9098$$
$$y_1 = 0;\ y_2 = 0{,}0246;\ y_3 = 0{,}0246 + 0{,}0205 = 0{,}0451;$$
$$Y = 0{,}0246 + 0{,}0451 = 0{,}0697$$
$$z_1' = 1;\ z_2' = 1 - 0{,}0205 = 0{,}9795;\ Z_1 = 1{,}9795;\ Z_2 = 1.$$

5. Вычисляем расход пара, греющего первый корпус:

$$D_1 = \frac{80 - 90 \cdot 0{,}0687 + 10 \cdot 1{,}9795 + 20}{2{,}9098} = 39{,}1.$$

6. Вычисляем количество воды, выпариваемой по корпусам:

$$w_1 = 39{,}1$$
$$w_2 = 39{,}1 \cdot 0{,}9754 + 90 \cdot 0{,}0246 - 10 = 30{,}35$$
$$w_3 = 39{,}1 \cdot 0{,}9344 + 90 \cdot 0{,}0451 - 10 \cdot 0{,}9795 - 20 = 10{,}80.$$

Проверяем:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 39{,}1 + 30{,}35 + 10{,}8 = 80{,}25 \cong W.$$

7. Определяем расход греющего пара по корпусам с учетом пароотбора:

$$D_1 = 39{,}1$$
$$D_2 = 39{,}1 - 10 = 29{,}1$$
$$D_3 = 30{,}35 - 20 = 10{,}35.$$

8. По формуле (5) вычисляем относительные тепловые нагрузки во втором приближении:

$$q_2 = \frac{D_2 r_2}{D_1 r_1} = \frac{29{,}2 \cdot 521{,}3}{39{,}1 \cdot 513} = 0{,}7562$$
$$q_3 = \frac{D_3 r_3}{D_1 r_1} = \frac{10{,}35 \cdot 530{,}9}{39{,}1 \cdot 513} = 0{,}2739.$$

9. Распределяем полезную разность температур во втором приближении по формуле (10):

$$\frac{\partial_2}{\partial_1} = \sqrt{1{,}6 \cdot 0{,}7562} = 1{,}1$$
$$\frac{\partial_3}{d_1} = \sqrt{2{,}67 \cdot 0{,}2739} = 0{,}855$$
$$\partial_1 : \partial_2 : \partial_3 = 1 : 1{,}1 : 0{,}855$$
$$\partial_1 = \frac{32}{1 + 1{,}1 + 0{,}855} = \frac{32}{2{,}955} = 10{,}83$$
$$\partial_2 = 10{,}83 \cdot 1{,}1 = 11{,}9$$
$$\partial_3 = 10{,}83 \cdot 0{,}855 = 9{,}26.$$
$$\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = 10{,}83 + 11{,}9 + 9{,}26 = 31{,}99 \sim 32.$$

Округленно принимаем:

$$\partial_1 = 10{,}8;\ \partial_2 = 11{,}9;\ \partial_3 = 9{,}3.$$

10. Составляем температурный режим во втором приближении (табл. 12).

Таблица 12

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Греющего пара T	138	126	112
Кипения раствора t	127,2	114,3	103
Вторичного пара θ	126,7	112,8	100
Конденсата τ	138	126,2	112,3
Скрытая теплота греющего пара r	613	521,2	530,7

11. Определяем коэфициенты самоиспарения:

$$t_1 - t_2 = 12{,}9 \qquad t_2 - t_3 = 11{,}3$$

$$i_2 - t_2 = 528{,}9 \qquad i_3 - t_3 = 535{,}7$$

$$\beta_1 = 0;\ \beta_2 = \frac{12{,}9}{528{,}9} = 0{,}0244;\ \beta_3 = \frac{11{,}3}{535{,}7} = 0{,}0211.$$

12. Вычисляем коэфициенты x, y, X, Y, Z_1 и Z_2:

$x_1 = 1$

$x_2 = 1 - 0{,}0244 = 0{,}9756$

$x_3 = 0{,}9756 - 2 \cdot 0{,}0211 = 0{,}9334$

$X = 1 + 0{,}9756 + 0{,}9334 = 2{,}909$

$y_1 = 0;\ y_2 = 0{,}0244;\ y_3 = 0{,}0244 + 0{,}0211 = 0{,}0455$

$Y = 0{,}0244 + 0{,}0455 = 0{,}0699$

$z'_1 = 1;\ z'_2 = 1 - 0{,}0211 = 0{,}9789;\ Z_1 = 1{,}9789;\ Z_2 = 1.$

13. Вычисляем расход пара, греющего первый корпус:

$$D = \frac{80 - 90 \cdot 0{,}0699 + 10 \cdot 1{,}9789 + 20}{2{,}909} = 39{,}0.$$

14. Вычисляем количество воды, выпариваемое по корпусам:

$w_1 = 39$

$w_2 = 39 \cdot 0{,}9756 + 90 \cdot 0{,}0244 - 10 = 30{,}25$

$w_3 = 39 \cdot 0{,}9334 + 90 \cdot 0{,}0455 - 10 : 0{,}9789 - 20 = 10{,}71.$

Проверяем:

$$w_1 + w_2 + w_3 = W = 39 + 30{,}25 + 10{,}71 = 79{,}96 \sim 80.$$

15. Определяем расход греющего пара по корпусам с учетом пароотбора:

$D_1 = 39$

$D_2 = 39 - 10 = 29$

$D_3 = 30{,}25 - 20 = 10{,}25.$

16. По формуле (5) вычисляем относительные тепловые нагрузки в третьем приближении:

$$q_2 = \frac{D_2 r_2}{D_1 r_1} = \frac{29 \cdot 521,2}{39 \cdot 513} = 0,7555$$

$$q_3 = \frac{D_3 r_3}{D_1 r_1} = \frac{10,25 \cdot 530,7}{39 \cdot 513} = 0,2719$$

$$\sqrt{q_2} = \sqrt{0,7555} = 0,87$$

$$\sqrt{q_3} = \sqrt{0,2719} = 0,5214.$$

Тепловые нагрузки в третьем приближении и в особенности корни квадратные из них почти не отличаются от соответственных значений второго приближения. Поэтому можем закончить расчет на результатах второго приближения.

17. Вычисляем поверхности нагрева:

$$f_1 = \frac{39,513}{40 \cdot 10,8} = 46,3$$

$$f_2 = \frac{29 \cdot 521,2}{25 \cdot 11,9} = 50,8$$

$$f_3 = \frac{10,25 \cdot 530,7}{15 \cdot 9,3} = 39,0.$$

Суммарная поверхность нагрева по второму варианту получается:

$F = 46,3 + 50,8 + 39 = 136,1$ *м*^{2} на 100 *кг* начального раствора.

Результаты расчета по обоим вариантам сопоставим в табл. 13.

Таблица 13

Корпуса	1-й вариант					2-й вариант				
	d	q	f	F	D	d	q	f	F	D
1-й	10,9	—	45,8	—	38,95	10,8	1	46,3	—	39
2-й	13,2	0,755	45,73	137,25	28,95	11,9	0,756	50,8	136,1	29
3-й	8,0	0,276	45,72	—	20,32	9,2	0,272	39,0	—	10,25

Как видно из сопоставления цифр этой таблицы, при заданном паротборе $\mathcal{E}_1 = 10$ и $\mathcal{E}_2 = 20$ между обоими вариантами нет существенной разницы. Минимальный вариант хотя и дает несколько меньшую суммарную поверхность нагрева, но требует выполнения слишком отличающихся друг от друга корпусов. Между тем первый вариант, дающий почти тот же температурный режим, позволяет выполнить выпарку в виде совершенно одинаковых корпусов. В данном случае совершенно ясно преимущество первого варианта.

7. Выпарка с минимальной поверхностью нагрева при одинаковых корпусах

Исследуем теперь вопрос о том, может ли существовать выпарка, удовлетворяющая одновременно обоим вышеуказанным условиям, т. е. обладающая равными поверхностями нагрева корпусов при минимуме их суммарной поверхности.

Для того чтобы корпуса были одинаковы, необходимо соблюдение следующего равенства:

$$\frac{\partial_n}{\partial_1} = q_n \frac{k_1}{k_n}. \tag{1}$$

А для того чтобы сумма поверхностей нагрева имела минимум, необходимо соблюдение равенства:

$$\frac{\partial_n}{\partial_1} = \sqrt{q_n \frac{k_1}{k_n}}. \tag{2}$$

Подставляя в уравнение (2) вместо q_n величину

$$\frac{Q_n}{Q_1} = \frac{f_n k_n \partial_n}{f_1 k_1 \partial_1},$$

находим:

$$\frac{\partial_n}{\partial_1} = \sqrt{\frac{f_n k_n \partial_n}{f_1 k_1 \partial_1} \cdot \frac{k_1}{k_n}} = \sqrt{\frac{f_n \partial_n}{f_1 \partial_1}}$$

или

$$\frac{f_n}{f_1} = \frac{\partial_n}{\partial_1}. \tag{3}$$

Наконец, для того чтобы выпарка удовлетворяла тому и другому требованию, необходимо, чтобы соблюдались все эти три формулы одновременно.

Из уравнения (3), при $f_n = f_1$, находим, что в этом случае и $\partial_n = \partial_1$. Поэтому равенство и минимум могут соблюдаться при условии, что полезные разности температур по корпусам будут равны.

Но в таком случае формулы (1) и (2) приводят к следующей зависимости:

$$q_n \frac{k_1}{k_n} = 1,$$

откуда

$$q_n = \frac{k_n}{k_1}. \tag{4}$$

А это показывает, что тепловая нагрузка должна быть прямо пропорциональна отношению коэфициентов теплопередачи.

Итак, совмещение обоих требований в одной выпарке обусловливается следующими двумя положениями:

1. Полезная разность температур для всех корпусов должна быть одна и та же. Она может

быть найдена путем деления общей полезной разности температур на число корпусов.

2. Тепловые нагрузки всех корпусов должны быть прямо пропорциональны коэфициентам теплопередачи. При заданных коэфициентах теплопередачи тепловые нагрузки могут быть вычислены по формуле (4).

Исследуем ближе формулу (4). По мере сгущения раствора на выпарке, переходя от корпуса к корпусу, мы всегда наблюдаем понижение величины коэфициентов теплопередачи.

Поэтому всегда

$$k_n < k_1$$

и

$$q_n < 1.$$

Равенство коэфициентов теплопередачи может соблюдаться при выпаривании только абсолютно чистого растворителя, что практически никогда не имеет места, так как выпариванию подвергаются только растворы. Поэтому в нашем случае тепловые нагрузки по мере понижения коэфициентов теплопередачи должны уменьшаться по направлению от первого корпуса к последнему и величины q_n всегда будут меньше единицы.

А это в свою очередь показывает, что каждый последующий корпус не будет в состоянии потреблять весь пар из предыдущего корпуса, а должен конденсировать только часть этого пара. Иными словами, одновременное соблюдение равенства поверхностей нагрева корпусов и минимума общей их поверхности возможно только при условии пароотбора на сторону.

Для выпарки без пароотбора, в которой весь пар, выделяющийся в предыдущем корпусе, полностью конденсируется в греющей камере последующего корпуса, величина q_n обычно равна или больше единицы, поэтому всегда

$$q_n > \frac{k_n}{k_1}.$$

Далее, формула (4) дает возможность вычислить в первом приближении с достаточной точностью все количества пара, которые необходимо отобрать из каждого корпуса на сторону для того чтобы соблюдались одновременно требования минимума и равенства поверхностей нагрева.

Если допустить, что 1 *кг* греющего пара выпаривает в каждом корпусе 1 *кг* воды, а самоиспарение отсутствует, то тепловые нагрузки по корпусам можно считать пропорциональными количествам выпаренной в них воды, т. е.

$$q_n = \frac{k_n}{k_1} = \frac{w_n}{w_1}, \tag{5}$$

откуда

$$w_n = w_1 \frac{k_n}{k_1},$$

что дает нам возможность по данным значениям коэфициентов теплопередачи вычислить, сколько воды должно выпариваться в каждом корпусе, принимая за единицу количество воды, выпаренное в первом корпусе.

В самом деле, если коэфициенты теплопередачи в трехкорпусной выпарке будут, например,

$$k_1 = 45;\ k_2 = 30 \text{ и } k_3 = 15,$$

то

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{30}{45} = 0{,}67 : \frac{w_3}{w_1} = 0{,}33.$$

Вся выпаренная вода распределится по корпусам в отношении:

$$w_1 : w_2 : w_3 = 1 : 0{,}67 : 0{,}33.$$

Если при этом во всей выпарке выпаривается в единицу времени 100 *кг* воды, то выпаривание по корпусам будет:

$$w_1 = \frac{100}{1 + 0{,}67 - 0{,}33} = \frac{100}{2} = 50 \text{ кг}$$

$$w_2 = 50 \cdot 0{,}67 = 33{,}5 \text{ кг}$$

и

$$w_3 = 50 \cdot 0{,}33 = 16{,}5 \text{ кг},$$

откуда следует, что из первого корпуса необходимо отобрать экстра-пара:

$$\mathcal{E}_1 = 50 - 33{,}5 = 16{,}5 \text{ кг}$$

и из второго:

$$\mathcal{E}_2 = 33{,}5 - 16{,}5 = 17 \text{ кг},$$

а всего нужно отобрать экстра-пара:

$$\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 = 16{,}5 + 17 = 33{,}5 \text{ кг},$$

Если вся полезная разность температур определяется величиной в 33°, то на каждый корпус приходится $\frac{33}{3} = 11^\circ$, в соответствии с чем и определяется необходимый температурный режим.

При соблюдении этих условий выпарка будет иметь и равные поверхности нагрева всех трех корпусов и минимум их суммы.

Пример приближенного расчета выпарки с паротбором на минимальную общую поверхность с одинаковыми поверхностями корпусов.

Рассчитаем трехкорпусную выпарку, при чем зададимся теми же частными значениями данных величин, что и в предыдущих примерах. Расчет ведем в следующем порядке:

1. Полезную разность температур $\Delta = 33^\circ$ распределяем равномерно между тремя корпусами:

$$\partial_1 = \partial_2 = \partial_3 = \frac{33}{3} = 11^\circ.$$

На этом основании составляем температурный режим.

Таблица 14

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Греющего пара T	139,0	127,0	114,0
Кипения раствора t	128,0	116,0	103,0
Вторичного пара θ	127,5	114,5	100,0
Конденсата τ	139,0	127,0	114,0

Примем $k_1 = 40$; $k_2 = 26$ и $k_3 = 15$

Согласно формулам (4) и (5) вычисляем тепловые нагрузки и паротбор по корпусам:

$$q_2 = \frac{26}{40} = 0,625; \quad q_3 = \frac{15}{40} = 0,375.$$

Поэтому:

$$\frac{w_2}{w_1} = 0,625 \text{ и } \frac{w_3}{w_1} = 0,375$$

$$w_1 : w_2 : w_3 = 1 : 0,625 : 0,375$$

$$w_1 = \frac{80}{1 + 0,625 + 0,375} = \frac{80}{2} = 40$$

$$w_2 = 40 \cdot 0,625 = 25$$

$$w_3 = 40 \cdot 0,375 = 15.$$

Отбор экстра-пара по корпусам в первом приближении будет:

$$\mathcal{E}_1 = w_1 - w_2 = 40 - 25 = 15$$

$$\mathcal{E}_2 = w_2 - w_3 = 25 - 15 = 10.$$

3. Вычисляем расход греющего пара на первый корпус.

После вычисления коэфициентов самоиспарения и величин x, y, Z_1 и Z_2 находим в первом приближении:

$$D_1 = 38,89$$

$$w_1 = 38,80$$

$$w_2 = 24,81$$

$$w_3 = 16,05$$

При $\mathcal{E}_1 = 15$ и $\mathcal{E}_2 = 10$ и прочих данных, поверхности нагрева в первом приближении получаются:

$$f_1 = 45{,}28 \text{ м}^2$$
$$f_2 = 45{,}23 \text{ м}^2$$
$$f_3 = 47{,}53 \text{ м}^2$$

Таким образом уже в первом приближении поверхности нагрева оказываются по расчету почти равными.

8. Точный метод расчета выпарки с минимальной поверхностью нагрева при одинаковых корпусах

Исходя из нашего общего метода и выведенных выше формул, Клюев Г. М. дал точное решение поставленной задачи, которое приведем здесь в переработанном нами виде.

Пользуясь формулой

$$q_n = \frac{D_n}{D_1} \cdot \frac{r_n}{r_1} = \frac{k_n}{k_1},$$

находим:

$$D_n = D_1 \frac{k_n}{k_1} \cdot \frac{r_1}{r_n}.$$

Эта формула дает возможность определить расход пара D_n, греющего произвольный корпус, если известен расход греющего пара на первый корпус D_1. Коэфициент $\frac{k_n}{k_1} \cdot \frac{r_1}{r_n}$ обозначим буквой γ, тогда вообще $D_n = \gamma_n D_1$.

Так как для рассматриваемого нами случая, когда $\partial_1 = \partial_2 = \partial_3 = \ldots = \partial_n$, температурный режим известен, а коэфициенты теплопередачи даны, то для определения коэфициента γ_n по формуле:

$$\gamma_n = \frac{k_n}{k_1} \cdot \frac{r_1}{r_n}.$$

все необходимые величины k_1, k_n, r_1 и r_n известны для всех корпусов.

Формула $D_n = \gamma_n D_1$ при помощи коэфициента γ_n связывает D_n и D_1 условиями равенства и минимума поверхности нагрева. Учитывая эту связь между D_n и D_1, составляем по вышеприведенному нашему методу расчетное уравнение для определения D_1. Для этого выразим отдельными уравнениями количества воды, выпариваемой в отдельных корпусах:

$$w_1 = D_1\alpha_1 + Sc\beta_1$$
$$w_2 = D_2\alpha_2 + (Sc - w_1)\beta_1.$$

После подстановки вместо D_2 и w_1 их значения и после перегруппировки, находим:

$$w_2 = D_1(\gamma_2\alpha_2 - \alpha_1\beta_2) + Sc\,\beta_2(1 - \beta_1).$$

Таким же путем находим:

$$w_3 = D_1[\gamma_3\gamma_3 - (\alpha_1 + \gamma_2\alpha_2 - \alpha_1\beta_2)\beta_3] + \\ + Sc\,\beta_3[1 - (\beta - \beta_2 - \beta_1\beta_2)].$$

Продолжая так далее, находим, что коэфициенты X_m и Y_m при D_1 и Sc составляются по одному и тому же правилу, выраженному соответственно уравнениями:

$$x_m = \gamma_m\alpha_m - \beta_m\sum_1^{m-1} x_m \text{ при } x_1 = \alpha_1$$

и

$$y_m = \beta_m\left(1 - \sum_1^{m-1} y_m\right) \text{ при } y_1 = \beta_1.$$

Зная закон составления коэфициентов x_m и y_m, можем написать в сокращенном виде:

$$\begin{aligned} w_1 &= D_1 X_1 + Scy_1; \\ w_2 &= D_1\,x_2 + Scy_2; \\ w_3 &= D_1\,x_3 + Scy_3; \\ w_m &= D_1\,x_m + Scy_m. \end{aligned}$$

Суммируя все эти равенства почленно, находим:

$$W = D_1 X + ScY,$$

где

$$X = x_1 + x_2 + x_3 + \ldots + x_m$$

и

$$Y = y_1 + y_2 + y_3 + \ldots + y_m.$$

Далее находим:

$$D_1 = \frac{W - ScY}{X}.$$

Полученная формула, имея уже известную нам общую структуру, отличается законом составления коэфициентов X и Y, при чем годится для расчета выпарки с пароотбором и учитывает заданное условие равенства и минимума поверхности нагрева. Найдя по этой формуле D_1, вычисляем количества D_2, D_3 и т. д. и w_1 w_2, w_3 и т. д.

Необходимый отбор экстра-пара определится как разность между w_n и D_{n-1}, а именно:

$$\mathscr{E}_n = w_n - D_{n-1},$$

при чем все w_n и D_{n-1} уже точно известны из предшествующего расчета.

Пример точного расчета трехкорпусной выпарки с пароотбором при одинаковых корпусах с минимальной общей поверхностью

(Для сахарного завода)

Примем следующие данные:

1) производительность завода 12000 *ц* свеклы в сутки,

2) температура пара, греющего первый корпус,—139°,

3) температура сокового пара из третьего корпуса—100°,

4) потери разности температур от депрессии в первом корпусе—0,5; во втором корпусе—1,5; в третьем корпусе—3°,

5) потери температуры при переходе греющего пара из корпуса в корпус по 0,5°,

6) количество сока, идущего на выпарку, 130% по весу свеклы,

7) начальная концентрация сока—13%,

8) конечная » сиропа—65%,

9) теплоемкость начального сока—0,9,

10) коэфициенты теплопередачи $k_1 = 40$; $k_2 = 25$; $k_3 = 10$ в мин.

Расчет.

1. Определение полного количества выпаренной воды:

$$W = 100\left(1 - \frac{13}{65}\right) = 80\% \text{ по весу начального сока.}$$

2. Определение общей потери разности температур:

$$0{,}5 + 1{,}5 + 3 + 0{,}5 + 0{,}5 = 6°.$$

3. Определение общей разности температур:

$$\Delta_{общ} = 139 - 100 = 39°.$$

4. Определение полезной разности температур:

$$\Delta = 39 - 6 = 33°.$$

5. Полезные разности температур для всех трех корпусов будут одинаковы, а именно:

$$\partial_1 = \partial_2 = \partial_3 = \frac{33}{3} = 11°.$$

6. Составляем температурный режим:

Таблица 15

Температура	1-й корпус	2-й корпус	3-й корпус
Греющего пара T	139	127	114
Кипения раствора t	128	116	103
Вторичного пара θ	127,5	114,5	100
Конденсата τ	139	127	114
Скрытая теплота греющего пара r	512,3	520,7	529,6

7. По этим данным вычисляем коэфициенты испарения α и самоиспарения β:

$$i_1 - t_1 = 519{,}9 \qquad t_1 - t_2 = 12$$
$$i_2 - t_2 = 527{,}7 \qquad t_2 - t_3 = 13$$
$$i_3 - t_3 = 535{,}7$$

$$\alpha_1 = \frac{512{,}3}{519{,}9} = 0{,}9854 \qquad \beta_1 = 0$$
$$\alpha_2 = \frac{520{,}7}{527{,}7} = 0{,}9867 \qquad \beta_2 = \frac{12}{527{,}7} = 0{,}02274$$
$$\alpha_3 = \frac{529{,}6}{535{,}7} = 0{,}9886 \qquad \beta_3 = \frac{13}{535{,}7} = 0{,}02427$$

8. Определяем относительные тепловые нагрузки:

$$q_2 = \frac{k_2}{k_1} = \frac{25}{40} = 0{,}625$$
$$q_3 = \frac{k_3}{k_1} = \frac{10}{40} = 0{,}25.$$

9. Определяем коэфициенты $\gamma_m = \frac{D_m}{D_1}$:

$$\gamma_2 = \frac{r_1}{r_2} q_2 = \frac{512{,}3}{520{,}7} \cdot 0{,}625 = 0{,}615$$
$$\gamma_3 = \frac{r_1}{r_3} q_2 = \frac{512{,}3}{529{,}7} \cdot 0{,}25 = 0{,}242.$$

10. Определяем коэфициенты x и y:

$$x_1 = \alpha_1 = 0{,}9854$$
$$x_2 = \alpha_2\gamma_2 - \alpha_1 \cdot \beta_2 = 0{,}9867 \cdot 0{,}615 - 0{,}9854 \cdot 0{,}02274 = 0{,}5844$$
$$x_3 = \alpha_3\gamma_3 - (x_1 + x_2)\beta_3 = 0{,}9886 \cdot 0{,}242 - (0{,}9854 + 0{,}5844) \cdot \cdot 0{,}02427 = 0{,}2011$$
$$X = 0{,}9854 + 0{,}5844 + 0{,}2011 = 1{,}7709$$
$$y_1 = 0$$
$$y_2 = \beta_2 = 0{,}02274$$
$$y_3 = (1 - \beta_2)\beta_3 = (1 - 0{,}02274)\ 0{,}02427 = 0{,}9773 \cdot 0{,}02427 = 0{,}02372$$
$$Y = 0{,}02274 + 0{,}02372 = 0{,}04646.$$

11. По общей формуле вычисляем D_1:

$$D_1 = \frac{W - ScY}{X} = \frac{80 - 100 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}04646}{1{,}7709}$$

$$D_1 = 42{,}81 \text{ кг на } 100 \text{ кг начального сока}$$

или

$$D_1 = 42{,}82 \cdot 1{,}3 = 55{,}65\% \text{ по весу свеклы.}$$

12. Расход греющего сокового пара на второй и третий корпусы будет:

$$D_2 = D_1\gamma_2 = 42{,}81 \cdot 0{,}615 = 26{,}33 \text{ кг}$$
$$D_3 = D_1\gamma_3 = 42{,}81 \cdot 0{,}242 = 10{,}36 \text{ кг.}$$

13. Количество воды, выпариваемой по корпусам. будет:

$$w_1 = D_1x_1 + Sc\,\beta_1 = 42{,}81 \cdot 0{,}9854 = 42{,}18 \text{ кг}$$
$$w_2 = D_2\alpha_2 + (Sc - w_1)\,\beta_2 = 27{,}07 \text{ кг}$$
$$w_3 = D_3\alpha_3 + (Sc - w_1 - w_2)\,\beta_3 = 10{,}74 \text{ кг}$$
$$W = w_1 + w_2 + w_3 = 42{,}18 + 27{,}07 + 10{,}74 = 79{,}99 \sim 80 \text{ кг.}$$

14. Определяем пароотбор по корпусам:

$$\mathcal{E}_1 = w_1 - D_2 = 42{,}18 - 26{,}33 = 15{,}85 \text{ кг}$$
$$\mathcal{E}_2 = w_2 - D_3 = 27{,}07 - 10{,}36 = 16{,}71 \text{ кг.}$$

Кроме того используется сокового пара из третьего корпуса $w_3 = 10{,}75$.

По весу свеклы пароотбор будет:

$$\mathcal{E}_1 = 15{,}85 \cdot 1{,}3 = 20{,}6\%$$
$$\mathcal{E}_2 = 16{,}71 \cdot 1{,}3 = 21{,}7\%$$
$$w_3 = 10{,}74 \cdot 1{,}3 = 14{,}0\%$$

15. Поверхности нагрева будут иметь размеры:

$$f_1 = \frac{42{,}81 \cdot 512{,}3}{40{,}11} = 49{,}84$$
$$f_2 = \frac{26{,}33 \cdot 520{,}7}{25{,}11} = 49{,}85$$
$$f_3 = \frac{10{,}36 \cdot 529{,}6}{10{,}11} = 49{,}88,$$

кругло по 50 $м^2$ на 100 *кг* сока в минуту.

16. Для завода в 12000 *ц* поверхности нагрева будут:

$$F_1 = F_2 = F_3 = 50 \cdot 1{,}3\,\frac{12000}{24 \cdot 60} = 541{,}5 \text{ м}^2.$$

Всего $541{,}5 \cdot 3 = 1624{,}5$ $м^2$ или $\frac{1624{,}5}{12} = 135{,}4$ $м^2$ на 1000 *ц* суточной переработки.

9. Повышение производительности действующей выпарки

Если действующая выпарка рассчитана правильно, а при эксплоатации ее точно соблюдаются все условия, обеспечивающие те числовые значения отдельных факторов, которые являлись заданными при расчете, то повышение производительности без конструктивных изменений возможно только за счет использования резервов, принятых при расчете, т. е. за счет допущенного запаса поверхности нагрева. Поэтому уход за выпаркой во время ее эксплоатации должен обеспечивать поддержание на заданном уровне коэфициентов теплопередачи полезной разности температур и пароотбора на сторону. Колебания в числовых значениях этих факторов будут расстраивать режим работы выпарки и могут понизить ее производительность.

Всякие конструктивные изменения, ведущие к повышению коэфициентов теплопередачи (например, усиленная циркуляция раствора в корпусах), повышению полезной разности температур (например, питание первого корпуса греющим паром более высокой температуры, понижение давления над раствором в последнем корпусе, усиление изоляции и пр.) могут повести к более или менее значительному повышению производительности выпарки.

Сокращение кратности использования пара и тепла может значительно повысить производительность выпарки при условии перераспределения пароотбора и повышения затраты греющего пара на первый корпус.

С точки зрения использования вышеуказанных закономерностей при неправильно рассчитанной выпарке представляет интерес перестановка корпусов в ином порядке. В отдельных случаях эта не слишком сложная операция может повести к очень большому повышению производительности выпарки без увеличения ее поверхности нагрева, без изменения кратности и при той же общей полезной разности температур. Перестановка корпусов связана с изменением распределения разности температур, изменением пароотбора и с увеличением расхода пара на первый корпус.

При такой перестановке корпусов, связанной с изменением пароотбора и температурного режима, абсолютный максимум производительности, которого можно будет достигнуть, может оказаться связанным с такими условиями, которые не удовлетворяют потребителей экстра-пара. При абсолютном максимуме производительности выпарка может потребовать отбора таких больших количеств экстра-пара, для которых в предприятии не найдется потребителей. Экстра-пар может оказаться неподходящим по своей низкой температуре. Эти обстоятельства могут вызвать необходимость в другом варианте температурного режима и пароотбора, который хотя и не будет давать абсолютного максимума, но зато наряду с некоторым повышением производительности в большей мере или полностью будут удовлетворять потребностям в экстра-паре.

Все эти возможные и подходящие варианты легко будут найдены, если предварительно будут найдены условия, необходимые для получения абсолютного максимума производительности.

Абсолютный максимум производительности выпарки возможен тогда, когда каждый корпус стоит на таком месте и работает в таких условиях, когда его тепловая нагрузка является наибольшей из возможных.

Так как тепловая нагрузка Q_n определяется общей формулой:

$$Q_n = f_n \partial_n \kappa_n,$$

т. е. как произведение трех величин, то величина Q_n будет иметь максимальное значение тогда, когда одновременно все три сомножителя, т. е. поверхность нагрева, коэфициент теплопередачи и полезная разность температур будут иметь максимум, возможный в данных условиях.

Выведенная выше закономерность в распределении температур при минимуме общей поверхности:

$$\frac{\partial_n}{\partial_1} = \frac{f_n}{f_1},$$

для действующей выпарки показывает, что максимум производительности приданной поверхности нагрева может быть достигнут тогда, когда наибольшей поверхности нагрева соответствует наибольшая полезная разность температур.

Поэтому общая полезная разность температур должна быть распределена пропорционально поверхностям нагрева действующей выпарки.

На каком бы месте данный корпус не стоял, он должен иметь свою, пропорциональную его поверхности нагрева разность температур. Найдя для каждого корпуса свойственную ему разность температур, мы далее поставим его на такое место, где он будет обладать наибольшим коэфициентом теплопередачи.

Отсюда следует общее, совершенно ясное правило, что из всех корпусов выпарки для достижения абсолютного максимума производительности нужно на первое место ставить тот корпус, который обладает наибольшей поверхностью нагрева. Тогда при наибольшем коэфициенте теплопередачи и при наибольшей разности температур он будет развивать максимальную возможную тепловую нагрузку.

Второй корпус по тем же соображениям должен быть ближайшим по величине к первому и т. д. Иными словами, корпуса должны быть расставлены в убывающем порядке их поверхностей нагрева.

Сказанное не относится к ноль-корпусу, для которого условия работы фиксированы.

Произведя такую расстановку корпусов и имея температурный режим, производим расчет пароотбора. Таким образом получаем вариант выпарки, соответствующий абсолютному максимуму производительности. Исходя из этого варианта, производим те изменения в температурном режиме, которые в большей мере отвечают использованию экстра-пара, и окончательно определяем пароотбор. Или же намечаем изменения в пароотборе и определяем температурный режим.

Полученные таким образом варианты наряду с удовлетворительным разрешением вопроса о пароотборе дадут возможное в этих условиях повышение производительности в зависимости от перестановки корпусов.

Таблица IV

Теплосодержание сухого насыщенного пара для температур от 50 до 170°C

Температура °C	Теплосодерж. *i* или *λ ккал*	Температура °C	Теплосодерж. *i* или *λ ккал*	Температура °C	Теплосодерж. *i* или *λ ккал*	Температура °C	Теплосодерж. *i* или *λ ккал*	Температура °C	Теплосодерж. *i* или *λ ккал*
50,0	618,40	74,0	628,60	98,0	637,98	122,0	646,10	146,0	653,50
50,5	618,62	74,5	628,80	98,5	638,16	122,5	646,25	146,5	653,65
51,0	618,84	75,0	629,00	99,0	638,34	123,0	646,40	147,0	653,80
51,5	619,06	75,5	629,20	99,5	638,52	123,5	646,55	147,5	653,95
52,0	619,28	76,0	629,40	100,0	638,70	124,0	646,70	148,0	654,10
52,5	619,50	76,5	629,60	100,5	638,87	124,5	646,85	148,5	654,25
53,0	619,72	77,0	629,80	101,0	639,04	125,0	647,00	149,0	654,40
53,5	619,94	77,5	630,00	101,5	639,21	125,5	647,17	149,5	654,55
54,0	620,16	78,0	630,20	102,0	639,38	126,0	647,34	150,0	654,70
54,5	620,38	78,5	630,40	102,5	639,55	126,5	647,51	150,5	654,86
55,0	620,60	79,0	630,60	103,0	639,72	127,0	647,68	151,0	655,02
55,5	620,82	79,5	630,80	103,5	639,89	127,5	647,85	151,5	655,18
56,0	621,04	80,0	631,00	104,0	640,06	128,0	648,02	152,0	655,34
56,5	621,26	80,5	631,19	104,5	640,23	128,5	648,19	152,5	655,50
57,0	621,48	81,0	631,38	105,0	640,40	129,0	648,86	153,0	655,66
57,5	621,70	81,5	631,57	105,5	640,58	129,5	648,53	153,5	655,82
58,0	621,92	82,0	631,76	106,0	640,76	130,0	648,70	154,0	655,98
58,5	622,14	82,5	631,95	106,5	640,94	130,5	648,85	154,5	656,14
59,0	622,36	83,0	632,14	107,0	641,12	131,0	649,00	155,0	656,30
59,5	622,58	83,5	632,33	107,5	641,30	131,5	649,15	155,5	656,45
60,0	622,80	84,0	632,52	108,0	641,48	132,0	649,30	156,0	656,60
60,5	623,01	84,5	632,71	108,5	641,66	132,5	649,45	156,5	656,75
61,0	623,22	85,0	632,90	109,0	641,84	133,0	649,60	157,0	656,90
61,5	623,43	85,5	633,10	109,5	642,02	133,5	649,75	157,5	657,05
62,0	623,64	86,0	633,30	110,0	642,20	134,0	649,90	158,0	657,20
62,5	623,85	86,5	633,50	110,5	642,37	134,5	650,05	158,5	657,35
63,0	624,06	87,0	633,70	111,0	642,54	135,0	650,20	159,0	657,50
63,5	624,27	87,5	633,90	111,5	642,61	135,5	650,34	159,5	657,65
64,0	624,48	88,0	634,10	112,0	642,88	136,0	650,48	160,0	657,80
64,5	624,69	88,5	634,30	112,5	643,05	136,5	650,62	160,5	657,96
65,0	624,90	89,0	634,50	113,0	643,22	137,0	650,76	161,0	658,12
65,5	625,11	89,5	634,70	113,5	643,39	137,5	650,90	161,5	658,28
66,0	625,32	90,0	634,90	114,0	643,56	138,0	651,04	162,0	658,44
66,5	625,53	90,5	635,10	114,5	643,73	138,5	651,18	162,5	658,60
67,0	625,74	91,0	635,30	115,0	643,90	139,0	651,32	163,0	658,76
67,5	625,95	91,5	635,50	115,5	644,06	139,5	651,46	163,5	658,92
68,0	626,16	92,0	635,70	116,0	644,22	140,0	651,60	164,0	659,08
68,5	626,37	92,5	635,90	116,5	644,38	140,5	651,76	164,5	659,24
69,0	626,58	93,0	636,10	117,0	644,54	141,0	651,92	165,0	659,40
69,5	626,79	93,5	636,30	117,5	644,70	141,5	652,08	165,5	659,56
70,0	627,00	94,0	636,50	118,0	644,86	142,0	652,24	166,0	659,72
70,5	627,20	94,5	636,70	118,5	645,02	142,5	652,40	166,5	659,88
71,0	627,40	95,0	636,90	119,0	645,18	143,0	652,56	167,0	660,04
71,5	627,60	95,5	637,08	119,5	645,34	143,5	652,72	167,5	660,20
72,0	627,80	96,0	637,26	120,0	645,50	144,0	652,88	168,0	660,36
72,5	628,00	96,5	637,44	120,5	645,65	144,5	653,04	168,5	660,52
73,0	628,20	97,0	637,62	121,0	645,80	145,0	653,20	169,0	660,68
73,5	628,40	97,5	637,80	121,5	645,95	145,5	653,35	169,5	660,84

ЭБУЛИОСКОПИЧЕСКИЕ ТАБЛИЦЫ

Значение повышения точки кипения растворов (Δt) для различных концентраций (c)

$(NH_4)_2SO_4$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
8	0,55	19	1,51	30	2,9	41	4,9
9	0,62	20	1,62	31	3,05	42	5,2
10	0,7	21	1,75	32	3,2	43	5,4
11	0,78	22	1,85	33	3,35	44	5,7
12	0,85	23	2,0	34	3,55	45	5,9
13	0,95	24	2,1	35	3,7	46	6,25
14	1,05	25	2,2	36	3,9	47	6,6
15	1,12	26	2,35	37	4,05	48	6,9
16	1,21	27	2,45	38	4,3	49	7,3
17	1,31	28	2,6	39	4,45	50	7,65
18	1,4	29	2,75	40	4,7	51	8,1

H_3PO_4

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
3	0,195	4,5	0,275	6	0,415	7,5	0,605
3,5	0,215	5	0,315	6,5	0,47	8	0,69
4	0,243	5,5	0,365	7	0,54	8,5	0,775

NH_4NO_3

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
33	4,7	49	8,7	65	15,7	81	29,5
34	4,9	50	9,1	66	16,5	82	30,7
35	5,1	51	9,5	67	17,0	83	32,0
36	5,3	52	9,9	68	17,7	84	34,0
37	5,5	53	10,25	69	18,5	85	35,5
38	5,7	54	10,7	70	19	86	37,5
39	5,9	55	11,0	71	19,9	87	40,0
40	6,25	56	11,5	72	20,6	88	42,2
41	6,5	57	12,0	73	21,5	89	45
42	6,7	58	12,5	74	22,1	90	47,5
43	7,0	59	12,75	75	23,0	91	51,5
44	7,25	60	13,2	76	24,0	92	56
45	7,5	61	13,7	77	25,0	93	61
46	7,75	62	14,2	78	26,0	94	67,5
47	8,0	63	14,7	79	27,0	95	72,5
48	8,2	64	15,2	80	28,0		

NH_4Cl

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
3	0,5	14	2,9	25	5,8	36	10
4	0,7	15	3,15	26	6,1	37	10,4
5	0,9	16	3,4	27	6,46	38	10,8
6	1,1	17	3,6	28	6,8	39	11,2
7	1,3	18	3,84	29	7,2	40	11,6
8	1,5	19	4,14	30	7,6	41	12,0
9	1,8	20	4,3	31	8,0	42	12,5
10	2,0	21	4,6	32	8,4	43	13,0
11	2,2	22	4,86	33	8,8	44	13,45
12	2,45	23	5,13	34	9,2	45	14,0
13	2,7	24	5,46	35	9,6	46	14,5

KOH

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
25	10,0	39	22,0	53	53,8	67	110,0
26	10,3	40	23,6	54	57,0	68	115,0
27	10,7	41	25,2	55	60,4	69	120,5
28	11,2	42	27,0	56	63,9	70	126,5
29	11,8	43	29,0	57	67,6	71	131,5
30	12,2	44	31,0	58	71,3	72	137,5
31	13,0	45	33,0	59	75,0	73	143,5
32	13,9	46	35,3	60	78,8	74	150
33	14,8	47	37,6	61	82,8	75	155,5
34	15,9	48	39,9	62	87,0	76	163,0
35	17,0	49	42,4	63	91,4	77	169,6
36	18,1	50	45,0	64	96,0	78	176,5
37	19,2	51	47,8	65	100,5	79	183,5
38	20,6	52	50,8	66	105,0	80	190,5

$K_2Cr_2O_7$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
6	0,25	16	0,92	26	1,95	36	3,05	46	4,17
7	0,3	17	1,02	27	2,05	37	3,17	47	4,3
8	0,35	18	1,1	28	2,17	38	3,3	48	4,4
9	0,4	19	1,25	29	2,3	39	3,4	49	4,5
10	0,47	20	1,3	30	2,4	40	3,5	50	4,6
11	0,55	21	1,4	31	2,5	41	3,6	51	4,7
12	0,6	22	1,5	32	2,65	42	3,73		
13	0,67	23	1,6	33	2,73	43	3,84		
14	0,75	24	1,75	34	2,85	44	3,95		
15	0,85	25	1,85	35	2,95	45	4,07		

K_2CO_3

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
6	0,4	22	2,6	38	7,1	54	18,0
7	0,5	23	2,8	39	7,5	55	19,0
8	0,6	24	3,0	40	8,0	56	20
9	0,7	25	3,2	41	8,5	57	21
10	0,8	26	3,4	42	9,0	58	22
11	0,9	27	3,6	43	9,6	59	23
12	1,0	28	3,9	44	10,2	60	24,2
13	1,08	29	4,2	45	10,9	61	25,6
14	1,35	30	4,4	46	11,6	62	27,0
15	1,5	31	4,7	47	12,3	63	28,5
16	1,6	32	5,0	48	13,0	64	30,0
17	1,8	33	5,3	49	13,8	65	31,4
18	2,0	34	5,6	50	14,6	66	33,0
19	2,1	35	6,0	51	15,4	67	35,0
20	2,2	36	6,3	52	16,2		
21	2,4	37	6,7	53	17,1		

K_2CrO_4

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
6	0,4	17	1,2	28	2,4	39	4,27
7	0,45	18	1,27	29	2,55	40	4,45
8	0,5	19	1,35	30	2,7	41	4,65
9	0,55	20	1,45	31	2,8	42	4,85
10	0,62	21	1,55	32	3,05	43	5,05
11	0,7	22	1,65	33	3,2	44	5,25
12	0,79	23	1,75	34	3,4	45	5,4
13	0,85	24	1,87	35	3,55	46	5,65
14	0,95	25	2,00	36	3,7	47	5,85
15	1,05	26	2,12	37	3,9		
16	1,1	27	2,25	38	4,1		

K_2SO_4

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
4	0,27	7,5	0,5	11	0,75	14,5	0,99	18	1,26
4,5	0,3	8	0,53	11,5	0,79	15,0	1,02	18,5	1,30
5	0,34	8,5	0,57	12	0,82	15,5	1,06	19	1,32
5,5	0,37	9	0,6	12,5	0,86	16	1,1	19,5	1,38
6	0,4	9,5	0,64	13	0,89	16,5	1,14		
6,5	0,44	10	0,68	13,5	0,92	17	1,18		
7	0,47	10,5	0,72	14	0,96	17,5	1,22		

KNO_3

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
5	0,45	20	2,0	35	3,85	50	6,12	65	10,0
6	0,52	21	2,1	36	4,0	51	6,25	66	10,3
7	0,6	22	2,2	37	4,15	52	6,5	67	10,55
8	0,7	23	2,3	38	4,3	53	6,75	68	10,87
9	0,8	24	2,4	39	4,4	54	7,0	69	11,25
10	0,9	25	2,52	40	4,52	55	7,25	70	11,55
11	1,0	26	2,65	41	4,65	56	7,5	71	11,90
12	1,1	27	2,8	42	4,8	57	7,75	72	12,3
13	1,2	28	2,92	43	4,95	58	8,0	73	12,7
14	1,3	29	3,05	44	5,1	59	8,25	74	13,2
15	1,4	30	3,2	45	5,25	60	8,5	75	13,7
16	1,5	31	3,32	46	5,4	61	8,77	76	14,2
17	1,65	32	3,45	47	5,58	62	9,08	77	14,75
18	1,75	33	3,57	48	5,75	63	9,3	78	15,25
19	1,87	34	3,7	49	5,90	64	9,62		

$NaNO_3$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
1	0,1	18	2,3	35	5,55	52	10,7
2	0,2	19	2,45	36	5,80	53	11,1
3	0,32	20	2,6	37	6,05	54	11,55
4	0,4	21	2,77	38	6,3	55	12,0
5	0,52	22	2,94	39	6,55	56	12,5
6	0,67	23	3,1	40	6,80	57	13,0
7	0,78	24	3,25	41	7,10	58	13,5
8	0,9	25	3,45	42	7,40	59	14,0
9	1,00	26	3,6	43	7,70	60	14,5
10	1,15	27	3,8	44	8,0	61	15,2
11	1,30	28	4,0	45	8,35	62	15,8
12	1,4	29	4,25	46	8,7	63	16,4
13	1,56	30	4,45	47	8,95	64	17,1
14	1,7	31	4,65	48	9,2	65	17,9
15	1,85	32	4,90	49	9,6	66	18,8
16	2,0	33	5,20	50	9,98	67	19,8
17	2,15	34	5,35	51	10,3		

Na_2SO_4

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
1		7	0,52	13	1,12	19	1,74	25	2,37
2	0,14	8	0,62	14	1,22	20	1,84	26	2,48
3	0,2	9	0,72	15	1,32	21	1,96	27	2,58
4	0,28	10	0,82	16	1,42	22	2,06	28	2,60
5	0,36	11	0,92	17	1,53	23	2,16	29	2,72
6	0,44	12	1,02	18	1,64	24	2,26		

$AgNO_3$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
3	0,16	14	0,78	25	1,46	36	2,26	47	3,2
4	0,22	15	0,84	26	1,54	37	2,34	48	3,3
5	0,27	16	0,9	27	1,60	38	2,42	49	3,4
6	0,32	17	0,96	28	1,68	39	2,50	50	3,5
7	0,38	18	1,02	29	1,74	40	2,58	51	3,6
8	0,43	19	1,08	30	1,805	41	2,66	52	3,7
9	0,5	20	1,14	31	1,88	42	2,74	53	3,82
10	0,54	21	1,2	32	1,96	43	2,84	54	3,96
11	0,6	22	1,28	33	2,01	44	2,92	55	4,06
12	0,66	23	1,34	34	2,12	45	3,0	56	4,2
13	0,72	24	1,4	35	2,18	46	3,1	57	4,32

$HgCl_2$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
12	0,225	18	0,34	24	0,455	30	0,57
13	0,242	19	0,36	25	0,475	31	0,59
14	0,26	20	0,38	26	0,495	32	0,605
15	0,28	21	0,398	27	0,51	33	0,62
16	0,3	22	0,415	28	0,53	34	0,64
17	0,32	23	0,435	29	0,55		

$CuSO_4$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
8	0,2	17	0,50	26	0,98	35	2,06
9	0,225	18	0,54	27	1,06	36	2,24
10	0,26	19	0,58	28	1,16	37	2,42
11	0,28	20	0,63	29	1,16	38	2,62
12	0,32	21	0,68	30	1,36	39	2,86
13	0,36	22	0,73	31	1,49	40	3,1
14	0,39	23	0,79	32	1,62	41	3,35
15	0,42	24	0,84	33	1,76		
16	0,46	25	0,91	34	1,9		

$BaCl_2$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
10	0,63	15	1,12	20	1,68	25	2,34	30	3,2
11	0,72	16	1,2	21	1,80	26	2,48	31	3,41
12	0,81	17	1,32	22	1,92	27	2,64	32	3,62
13	0,92	18	1,44	23	2,06	28	2,82	33	3,82
14	1,01	19	1,56	24	2,2	29	3,14	34	4,06

$NaCl$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
3	0,5	8	1,48	13	2,65	18	4,25	23	6,05
4	0,7	9	1,7	14	2,9	19	4,5	24	6,5
5	0,9	10	1,9	15	3,25	20	4,85	25	7,0
6	1,06	11	2,15	16	3,5	21	5,2	26	7,5
7	1,25	12	2,4	17	3,85	22	5,6	27	8,0
								28	8,5

$CaCl_2$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
10	1,5	26	7,75	42	21,0	58	40,5
11	1,6	27	8,5	43	22,0	59	42
12	1,75	28	9,0	44	23,25	60	43
13	2,0	29	9,75	45	24,25	61	44,5
14	2,5	30	10,5	46	25,5	62	46
15	2,75	31	11,25	47	26,5	63	47,5
16	3,0	32	12,0	48	28,0	64	49,25
17	3,5	33	12,75	49	29,0	65	50,7
18	3,75	34	13,5	50	30,0	66	52,5
19	4,0	35	14,25	51	31,25	67	54,5
20	4,5	36	15,25	52	32,5	68	56,0
21	5,0	37	16,25	53	34	69	58,0
22	5,5	38	17,25	54	35,25	70	60,0
23	6,0	39	18,0	55	36,5	71	62,0
24	6,5	40	19,0	56	37,75	72	64,0
25	7,0	41	20,0	57	39,0	73	65,75

$ZnSO_4$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
8	0,18	18	0,60	28	1,35	38	2,96
9	0,2	19	0,65	29	1,45	39	3,15
10	0,25	20	0,70	30	1,55	40	3,4
11	0,275	21	0,75	31	1,7	41	3,6
12	0,32	22	0,85	32	1,85	42	3,85
13	0,35	23	0,90	33	2,0	43	4,1
14	0,40	24	1,0	34	2,15	44	4,4
15	0,45	25	1,075	35	2,35	45	4,65
16	0,50	26	1,15	36	2,55		
17	0,55	27	1,25	37	2,75		

$FeSO_4$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
7	0,22	12	0,365	17	0,53	22	0,79
8	0,245	13	0,395	18	0,575	23	0,85
9	0,275	14	0,425	19	0,62	24	0,925
10	0,305	15	0,46	20	0,67	25	1,1
11	0,335	16	0,495	21	0,725		

$MgCl_2$

c	Δt	c	Δt	c	Δt	c	Δt
1	0,2	10	2,0	19	6,0	28	13,4
2	0,22	11	2,4	20	6,6	29	14,4
3	0,5	12	2,7	21	7,4	30	15,4
4	0,57	13	3,0	22	8,1	31	16,6
5	0,65	14	3,5	23	8,9	32	18,0
6	0,9	15	3,9	24	9,7	33	19,4
7	1,2	16	4,35	25	10,6	34	21
8	1,4	17	4,8	26	11,4	35	22
9	1,7	18	5,4	27	12,4	36	24,8

NaOH

c	Δt	c	Δt
3	0,8	50	42,2
5	1,0	55	50,6
10	2,8	60	59,5
15	5,0	65	69,0
20	8,2	70	79,6
25	12,2	75	92,0
30	17,0	80	106,6
35	22,0	85	124,0
40	28,0	90	145,5
45	35,0	95	174,5

ОГЛАВЛЕНИЕ

Цена 4 руб.