

**В. Г. Казаков
П. В. Луканин
Е. Н. Громова**

**ВЫПАРНЫЕ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
УСТАНОВКИ**

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»
Высшая школа технологии и энергетики**

**В. Г. Казаков
П. В. Луканин
Е. Н. Громова**

**ВЫПАРНЫЕ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
УСТАНОВКИ**

Учебное пособие

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД

Санкт-Петербург
2024

УДК 66.048.5

ББК 24.53

К 14

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор кафедры «Инженерная экология и безопасность труда»
Казанского государственного энергетического университета

Э. Р. Зверева;

доктор технических наук, зам. директора по научной работе Высшей школы технологии и
энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных
технологий и дизайна

В. С. Куров

Казаков, В. Г.

К 14 Выпарные теплотехнологические установки: учеб. пособие / В. Г. Казаков,
П. В. Луканин, Е. Н. Громова. — СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. — 92 с.
ISBN 978-5-91646-417-7

Учебное пособие соответствует программе и учебному плану дисциплины «Выпарные теплотехнологические установки» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». В учебном пособии приводится описание основных процессов технологии производства сульфатной целлюлозы, конструкций наиболее распространенных выпарных аппаратов, методики тепловых и эксергетических расчетов выпарных установок, методы оптимизации параметров выпарных батарей по приведенным затратам.

Учебное пособие предназначено для подготовки студентов очной формы обучения. Отдельные разделы пособия могут быть полезны магистрам и аспирантам.

УДК 66.048.5

ББК 24.53

ISBN 978-5-91646-417-7

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2024

© Казаков В. Г., Луканин П. В.,
Громова Е. Н., 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ	5
2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА	10
3. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПАРИВАНИЯ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА.....	16
3.1. Общие сведения о процессе выпаривания.....	16
3.2. Классификация и аппаратурно-технологические схемы выпаривания.....	19
3.3. Одноступенчатое выпаривание.....	20
3.4. Многоступенчатые выпарные установки	22
3.5. Особенности работы многоступенчатых выпарных установок	23
3.6. Тепловые схемы первой стадии концентрирования.....	25
3.7. Тепловые схемы второй стадии концентрирования	31
4. АППАРАТЫ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЧЕРНЫХ ЩЕЛОКОВ.....	33
4.1. Выпарные аппараты первой стадии концентрирования	33
4.2. Выпарные аппараты второй стадии концентрирования (концентраторы)	44
4.3. Чистота вторичного пара в выпарных аппаратах	48
5. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС И ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ВЫПАРНЫХ УСТАНОВОК	50
5.1. Температурные потери и режим работы выпарных установок.....	50
5.2. Материальный баланс выпаривания	53
5.3. Температурный режим работы МВУ	54
5.4. Определение поверхности теплообмена кипятильников выпарных аппаратов.....	55
5.5. Тепловые расчеты многоступенчатых выпарных батарей	57
5.6. Расчеты коэффициентов теплопередачи.....	63
6. ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ВЫПАРНЫХ БАТАРЕЙ	69
6.1. Поверочный тепловой расчет.....	72
6.2. Определение невязки между расходами выпаренной воды по концентрациям и по тепловому балансу	75
6.3. Проектный тепловой расчет.....	80
6.4. Оптимизация параметров выпарных батарей	87
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	92

ВВЕДЕНИЕ

Выпаривание щелоков – сложный физико-химический, химико-технологический и теплотехнический процесс. Он характеризуется экологической опасностью, высокими энергетическими и капитальными затратами.

Цель выпаривания – удаление избыточной воды из раствора и подготовка щелока для дальнейшего сжигания в топках содорегенерационных котлоагрегатов.

Для нагревания выпариваемых растворов до кипения используют топочные газы, электрообогрев и высокотемпературные теплоносители, но наибольшее применение находит водяной пар, характеризующийся высокой удельной теплотой конденсации и высоким коэффициентом теплоотдачи.

По теплотехническим признакам выпарные станции ЦБП относятся к рекуперативным многостадийным вакуум-выпарным установкам с элементами адиабатного и контактного концентрирования и, как правило, работают по 5-6-ступенчатой противоточной или смешанной схеме питания корпусов раствором с использованием одного или нескольких источников подвода теплоты.

В настоящем учебном пособии приводится описание основных процессов технологии производства сульфатной целлюлозы, конструкций наиболее распространенных выпарных аппаратов, методики тепловых и эксергетических расчетов выпарных установок, методы оптимизации параметров выпарных батарей по приведенным затратам.

1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Основным способом получения целлюлозы в настоящее время является сульфатный способ.

Древесная технологическая щепка (рис. 1.1), предварительно пропитанная паром, поступает в варочный котел для делигнификации. Туда же направляют варочный (белый) щелок, представляющий раствор оборотной каустической и сульфидной серы. После варки древесной технологической щепки остаточная целлюлозная масса подвергается фильтрации с получением черного щелока и целлюлозного волокна. На фильтрах также осуществляется промывка целлюлозы. Целлюлоза после классификации по классу плюс минус 25 мм (по длине и ширине) подвергается очистке и является конечным продуктом целлюлозного производства.

Переработка щелока включает решение двух задач:

- регенерацию содопродуктов и серы и их возможно более полное возвращение в варочный цех в виде белого щелока;
- использование органических веществ, содержащихся в древесной технологической щепке, как топлива в виде концентрированного черного щелока.

Блок технологических процессов переработки щелока включает следующие операции:

- сжигание черного щелока;
- растворение образовавшегося содового плава с получением зеленого щелока;
- каустизацию карбоната натрия оксидом кальция;
- регенерацию оксида кальция из известкового шлама.

Выпаривание черного щелока проводится с целью удалить избыточную воду и сделать щелок пригодным для сжигания. Концентрация сухих веществ в черном щелоке, поступающем на регенерацию из варочного цеха, обычно не превышает 18 %. Для успешного сжигания его необходимо выпарить до концентрации 65 % и выше.

Сжигание упаренного щелока осуществляется в топке содорегенерационного котлоагрегата (СРК).

СРК – это паровой котел, отличающийся от обычных энергетических котлоагрегатов конструкцией топки, приспособленной для сжигания высокозольного и очень влажного жидкого топлива, каким является черный щелок. Основные химические процессы протекают в топке СРК, куда впрыскивается через форсунки щелок, а также подается воздух, необходимый для горения. Попавший в горячую топку щелок быстро теряет влагу, органическая часть сгорает. Продуктами полного сгорания являются вода и диоксид углерода. Часть органических веществ первой стадии сжигания

пиролизуется с образованием углерода. Основная часть содопродуктов и серы на этой стадии превращаются в карбонат и сульфат натрия.

Общая схема реакций, протекающих в процессе горения, может быть представлена упрощенной схемой:

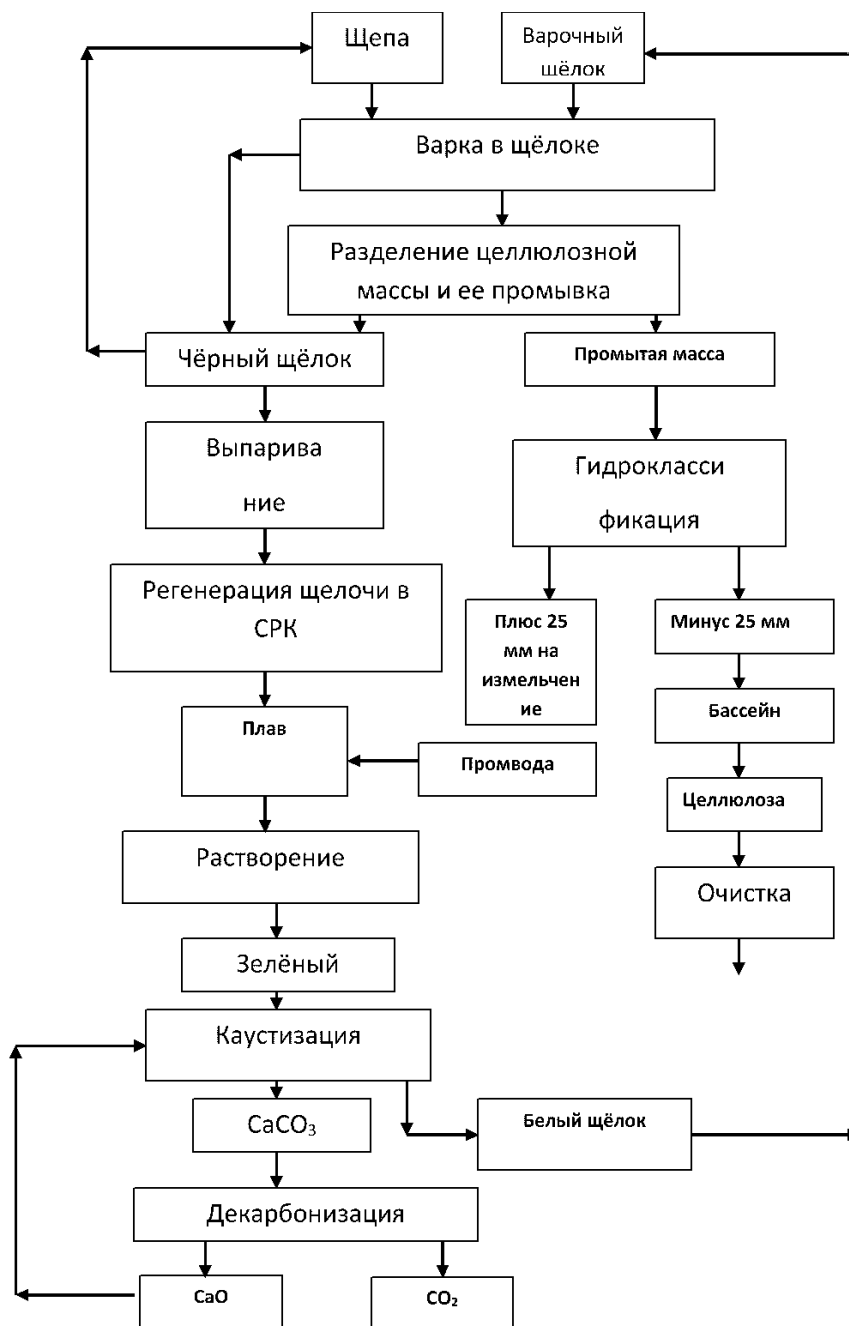
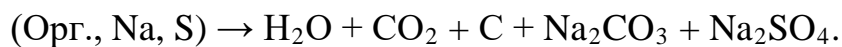


Рисунок 1.1 – Принципиальная технологическая схема производства сульфатной целлюлозы

Во второй фазе реакций образовавшийся сульфат восстанавливается углеродом до сульфида натрия: $\text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{C} = \text{Na}_2\text{S} + \text{CO}_2$.

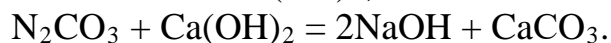
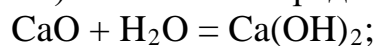
Остальная часть углерода, образовавшегося при пиролизе, сгорает, окисляясь до CO_2 . В результате этих процессов в топке котлоагрегата образуется горячая парогазовая смесь (дымовые газы) и зольный остаток (минеральный или содовый плав).

Основными компонентами дымовых газов являются: пары воды, поступившие как с черным щелоком, так и образовавшиеся в результате реакции по приведенной схеме; диоксид углерода, образовавшийся как при горении органических веществ щелока, так и при восстановлении сульфата; азот и остатки кислорода, поступившие в топку с воздухом. Дымовые газы уносят из топки основное количество теплоты. Эта теплота используется для выработки водяного пара высоких параметров в фестонной и кипятильной части котлоагрегата, для нагревания воды и воздуха в экономайзерах. Водяной пар направляется к турбинам для конверсии теплоты в электроэнергию, а дымовые газы после тщательной очистки выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу.

Зольный остаток в топке представляет собой смесь главным образом карбоната и сульфида натрия (Na_2CO_3 и Na_2S). Температура плавления этой смеси около $800\text{ }^\circ\text{C}$, то есть ниже температуры в топке СРК. Поэтому зольный остаток собирается на поду топки в виде смеси расплавленных солей (так называемый содовый плав).

Растворение содового плава происходит в растворителе плава. Расплавленные содопродукты стекают из топки СРК в растворитель плава (бак с интенсивной мешалкой) и растворяются в воде или, как это чаще делается в производственных условиях, в слабом белом щелоке. Образовавшийся раствор имеет зеленоватую окраску, которую ему придают соли железа, поэтому получил название «зеленый щелок». Из двух основных компонентов зеленого щелока один – сульфид натрия является активным компонентом варочного раствора. Другой компонент – карбонат натрия (техническое название «кальцинированная сода») должен быть превращен в гидроксид натрия (технические названия «каустическая сода», «каустик»). Процесс превращения называется каустизацией, он осуществляется в цехе каустизации.

Процесс каустизации оксидом кальция (техническое название «жженная известь») может быть представлен двумя реакциями:



Сульфид натрия в цехе каустизации не претерпевает никаких изменений. Продуктом каустизации является белый щелок – раствор гидроксида и сульфида натрия. Карбонат кальция выпадает в осадок и отделяется от белого щелока в виде известкового шлама, после чего белый щелок направляется в варочный цех. Этим замыкается цикл регенерации содопродуктов и серы.

Известковый шлам не относится к числу дорогостоящих сырьевых

ресурсов, однако практиковавшееся раньше удаление его в отвал считается сейчас совершенно неприемлемым из-за загрязнения больших территорий. Все современные предприятия регенерируют известь из известкового шлама путем обжига. При температуре выше 1000 °С карбонат кальция разлагается по эндотермической реакции: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$, и образовавшийся оксид кальция может быть возвращен в цех каустизации, замыкая еще один технологический цикл. Операцию обжига производят в печах декарбонизации или известерегенерационных печах. На технологической схеме показана туннельная вращающаяся печь. Источником тепловой энергии служит вводимое в печь топливо.

Черный щелок обычно концентрируют на двухстадийной (по пару) выпарной станции от 9 – 10 % до 50 – 80 % а. с. в. Выпарная станция первой стадии представлена современными 6-7-ступенчатыми выпарными батареями, работающими по противоточной или смешанной схеме выпаривания. На этой стадии раствор концентрируется до 50 % абсолютно сухих веществ (а. с. в.)

На второй стадии раствор концентрируют до 70 – 80 % в одно- и двухступенчатых выпарных установках.

В настоящее время более 90 % целлюлозы выпускают по сульфатному методу. При этом одним из значительных потребителей теплоты в форме пара низкого давления является процесс выпаривания. В настоящее время суть выпаривания состоит в концентрировании черного щелока с целью подготовки его для сжигания в СРК. Исследования в области повышения энергоэффективности и энергосбережения получения целлюлозы диктуют необходимость развития выпарных процессов и выпарной техники. Это связано с тем, что из энергетической функции выпаривания черных щелоков, связанной лишь с концентрированием раствора, на нее ложится основная технологическая функция по регенерации химикатов из черного щелока.

Выпарные установки в производстве целлюлозы укомплектованы выпарными аппаратами большой единичной мощностью (поверхность теплообмена до 3500 м²).

Исторически сложилось так, что процесс выпаривания и установки для его осуществления в ЦБП являются отражением опыта лучших зарубежных фирм Финляндии, Канады, США.

Между тем выпаривание черных щелоков – не только сложный теплотехнический, но и физико-химический и технологический процесс. В процессе выпаривания выделяются фенолы, карбонаты и сульфаты кальция, а также летучие продукты не полного окисления серы. В результате не только снижается производительность выпарных установок, но и наносится значимый ущерб окружающей среде. По этим причинам производительность существующих выпарных установок на 30 – 50 % ниже чем в проектном режиме. Агрессивная среда, особенно при выпаривании растворов сульфитной целлюлозы, приводит к коррозии кипящих труб. В качестве материала для таких аппаратов применяют высококачественные легированные стали, что обуславливает высокую стоимость выпарных установок и их текущий и капитальный ремонт.

Учитывая возрастающую функцию выпаривания черного щелока, персонал, проектирующий и обслуживающий выпарную установку, должен хорошо знать оборудование и технологическую схему. Иметь необходимые знания о составе и физико-химических свойствах черного щелока, способах его подготовки для упаривания, о требованиях, предъявляемых к чистоте щелока и содержанию в нем сухих веществ.

Принципиальная аппаратурно-технологическая схема сульфатного производства представлена на рисунке 1.2.

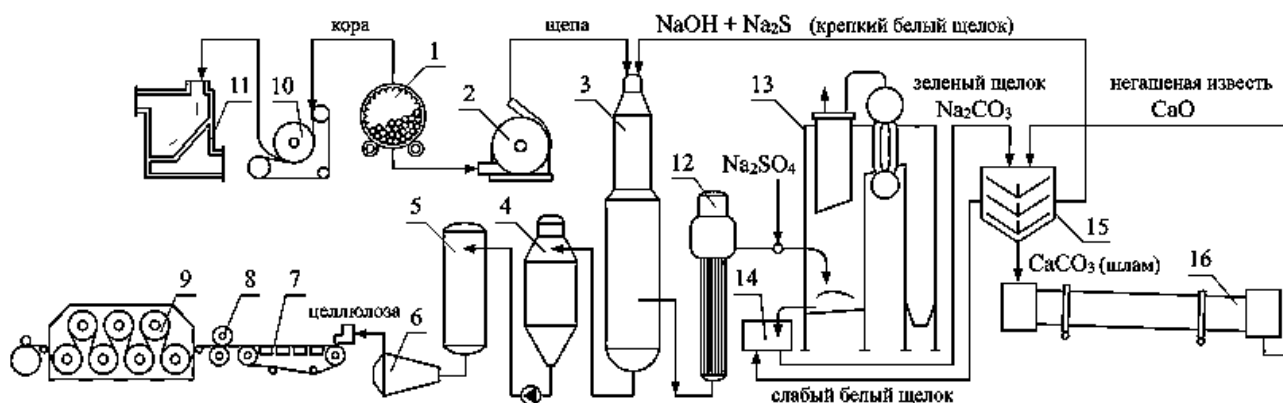


Рисунок 1.2 – Принципиальная аппаратурно-технологическая схема сульфатцеллюлозного производства:

- 1 – корообдирочный барабан; 2 – рубительная машина; 3 – варочный котел; 4 – выдувной резервуар; 5 – отбелка целлюлозы; 6 – сортировка; 7 – формование; 8 – прессование; 9 – сушка на пресспате; 10 – цепной пресс; 11 – топка для сжигания корьевых отходов; 12 – выпарная станция; 13 – содорегенерационный котел; 14 – бак-растворитель плава; 15 – цех каустизации; 16 – регенерационная печь извести

Процесс производства сульфатной целлюлозы является большим потребителем энергии (24 ГДж / т). Из этой величины затраченной теплоты 20 ГДж/т расходуется на регенерацию органической части черного щелока, а 4 ГДж/т – в виде природного газа на декарбонизацию известняка.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие процессы включает в себя переработка черного щелока?
2. Какое начальное содержание абсолютно сухих веществ в растворе черного щелока на входе в выпарную батарею?
3. До какой концентрации необходимо выпарить черный щелок для успешного сжигания в топке СРК?
4. Чем СРК отличается от энергетических котлов?

5. Какие химические реакции протекают в топке СРК?
6. Что входит в состав зольного остатка после СРК?
7. Из каких компонентов состоит зеленый щелок?
8. Что такое белый щелок?
9. Какими реакциями может быть представлен процесс каустизации?
10. Какой процесс осуществляют в известерегенерационных печах?

2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА

Сульфатный и моносulfатный черный щелок – вещества с анионоактивными свойствами, пенообразующая способность которых зависит от присутствующих солей.

В черном щелоке содержится сложный комплекс минеральных веществ и веществ, переходящих в раствор при разрушении древесины под воздействием варочного щелока. В черном щелоке в преобладающем количестве содержится глюкоизосахариновая кислота, наряду с ней образуется большое количество других кислот, таких как уксусная, муравьиная, молочная, гликолевая, ксилоизосахариновая и пр.

Черный щелок представляет продукт химического взаимодействия щелочей в белом щелоке с технологической щепой. В нем содержится (на сухую массу) 30 – 35 % минеральных и 65 – 70 % органических веществ. Минеральная часть черного щелока (18 – 25 %) химически связана с органической частью растворенных компонентов древесины. Она представлена 3 – 5 % сульфата натрия, 1 – 4 % сульфида натрия, 4 – 10 % карбоната натрия, 1 – 2 % остаточной не прореагировавшей части каустической щелочи.

Органическая часть черного щелока представлена лигнином (30 – 35 %) и продуктами разрушения углеводов (30 – 35 %). Элементный состав состоит из 35 – 45 % углерода, 3 – 5 % водорода, 15 – 20 % кислорода, 1 – 4 % органической серы.

Снижение себестоимости целлюлозы и решение задач по экологической безопасности технологического процесса состоит в переработке черного щелока на продукты, имеющие потребительский спрос и цену.

Физические и химические свойства черного щелока во многом определяются составом черного щелока. Они определяются следующими основными показателями: плотность, вязкость, теплоемкость, теплопроводность, физико-химическая температурная депрессия, поверхностное натяжение, теплота сгорания.

Плотность раствора зависит от концентрации сухих веществ и температуры. Это один из важнейших показателей, используемых при эксплуатации выпарных станций и технических расчетах.

Состав черного щелока в значительной степени определяется его плотностью. Чем выше плотность щелока, тем больше содержится в нем сухих

веществ. Поэтому при промывке целлюлозной массы расход свежей воды должен быть минимальным. Практически содержание сухого остатка в черном щелоке, поступающем в выпарной цех, не превышает 12 – 15 %.

В зависимости от вида растительного сырья, степени делигнификации целлюлозы и расхода активной щелочи на варку, черный щелок содержит после его уплотнения и выделения из него сульфатного мыла примерно 30 – 35 % минеральных и 65 – 70 % органических веществ. На процентное соотношение в черном щелоке минеральных и органических веществ, вид вырабатываемой целлюлозы заметного влияния не оказывает, но количество сухих веществ в щелоке значительно зависит от вида полуфабриката (при выработке жесткой целлюлозы оно примерно в 2 раза выше, чем при выработке мягкой).

На содержание сухого остатка в черном щелоке большое влияние оказывают: влагосодержание щепы, загружаемой в варочный котел, способ нагрева варочного котла – прямой или не прямой (в подогревателях), режим промывки массы, а также степень делигнификации сваренной целлюлозы.

Содержание в сухом остатке смолистых веществ, экстрагируемых эфиром, составляет 2,5 – 3 % и существенно зависит от породы древесины и ее местопрорастания. Так, в древесине сосны обыкновенной содержание смолистых веществ составляет 4,12 – 4,98 % от абсолютно сухой древесины, ели 1,47 – 2,37 % (у сахалинской ели оно повышается до 3,1 %). В древесине сибирской пихты смолы содержится 4,35 %, а в древесине сахалинской сосны 3,7 %. В древесине березы смолы содержится 2,28 – 2,76 %, а в древесине осины 1,5 – 2,66 % [3, 5].

Между абсолютной влажностью W_a и относительным содержанием сухой массы в жидком щелоке b существует зависимость:

$$W_a = \frac{100-b}{b} \cdot 100, \% \quad (2.1)$$

Абсолютная влажность, выраженная в долях называют влагосодержанием:

$$u = \frac{W_a}{100}, \text{ кг/кг} \quad (2.2)$$

Относительное содержание сухих веществ в жидком щелоке:

$$b = (1 + u)^{-1}, \text{ кг/кг} \quad (2.3)$$

Количество испаренной влаги в процессе концентрирования щелока от b_1 до b_2 отнесенное к 1 кг сухой массы:

$$M = u_1 - u_2, \text{ кг/кг} \quad (2.4)$$

Плотность жидкого щелока рекомендуется определять из соотношения:

$$\rho_{\text{жщ}} = \frac{(1 + \rho_0 \cdot u)}{\left(\frac{u}{\rho_{\text{в}}} + \frac{1}{\rho_{\text{с}}}\right)}, \text{ кг/м}^3 \quad (2.5)$$

где ρ_w, ρ_c – плотность воды при данной температуре и сухой массы щелока, соответственно, или по приближенной формуле:

$$\rho_{\text{жщ}} = \frac{1+u}{0.5+u}, \text{ кг/м}^3. \quad (2.6)$$

Вязкость определяется составом черного щелока, его концентрацией и температурой. С увеличением вязкости раствора черного щелока, связанном с повышением концентрации сухих веществ, повышается эффективность его сжигания с СРК. Эффективность выражается в снижении расхода топлива, повышении производительности СРК и уменьшении потерь ценных компонентов при отводе дымовых газов в окружающую среду. Повышение вязкости черного щелока приводит к повышению гидравлического сопротивления при транспортировке раствора, а, следовательно, к перерасходу электроэнергии. Повышение вязкости раствора также определяет низкую эффективность теплопередачи. Для снижения негативного влияния повышения вязкости с увеличением концентрации сухих веществ в растворе предлагается перед выпариванием черного щелока его выдержать в течение 30 минут при температуре 180 °С. Наблюдаемый эффект снижения вязкости объясняется разрушением органических молекул.

Вязкость щелока, как и плотность, оказывает существенное влияние на процесс его упаривания. Она зависит от содержания в щелоке сухих веществ, их химического состава, температуры и давления, под которым находится щелок. По мере повышения температуры вязкость щелока уменьшается. Степень уменьшения вязкости щелока при различных содержаниях сухих веществ и температуре изменяется (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Вязкость щелока при различных температурах и содержаниях абсолютно сухих веществ

Содержание абс. сухих веществ в щелоке, %	Вязкость щелока, $\text{с}_{\text{ст}}$, при температуре $t, ^\circ\text{C}$						
	20	40	60	80	100	120	140
30	6	3	2	1,5	1,1	0,9	0,75
40	19	9	6	3,4	2,4	1,8	1,5
45	80	27	13	6,5	4,0	2,8	2,0
50	450	100	36	16,0	8,0	5,5	3,0
55	-	550	140	40,0	17,0	8,0	5,0

Как видно из приведенных данных, с повышением содержания сухих веществ при одной и той же температуре щелока вязкость возрастает в значительной степени. При одном и том же содержании сухих веществ вязкость щелока с повышением температуры уменьшается.

Увеличение вязкости щелока при понижении температуры протекает значительно быстрее в условиях повышенного содержания в нем сухого остатка.

Особенно резко это наблюдается, когда содержание сухого остатка в щелоке превышает 40 %. Вязкость щелока, содержащего от 15,5 до 35,5 % сухих веществ, при снижении его температуры с 80 до 20 °С, возрастает в 6 раз. Поэтому необходимо строго контролировать температуру упаренного щелока, чтобы его можно было перекачать в содорегенерационный котлоагрегат центробежным насосом.

Влияние давления на вязкость щелока обычно не учитывают, так как оно заметно проявляется только при давлении свыше 1,0 МПа (10 кгс/см²).

Вязкость щелока, как показал ряд исследований, не зависит от породы древесины. Количество лигнина и других органических соединений, переходящих в процессе варки целлюлозы в раствор и определяющих степень вязкости и коллоидные свойства щелока, находятся в зависимости только от степени делигнификации целлюлозы.

Теплопроводность. Теплопроводность черного щелока используется при определении коэффициента теплоотдачи к раствору при вычислении чисел Нуссельта и Прандтля. На рисунке 2.1 приведены экспериментальные данные по значениям коэффициента теплопроводности в функции концентрации сухих веществ и температуры.

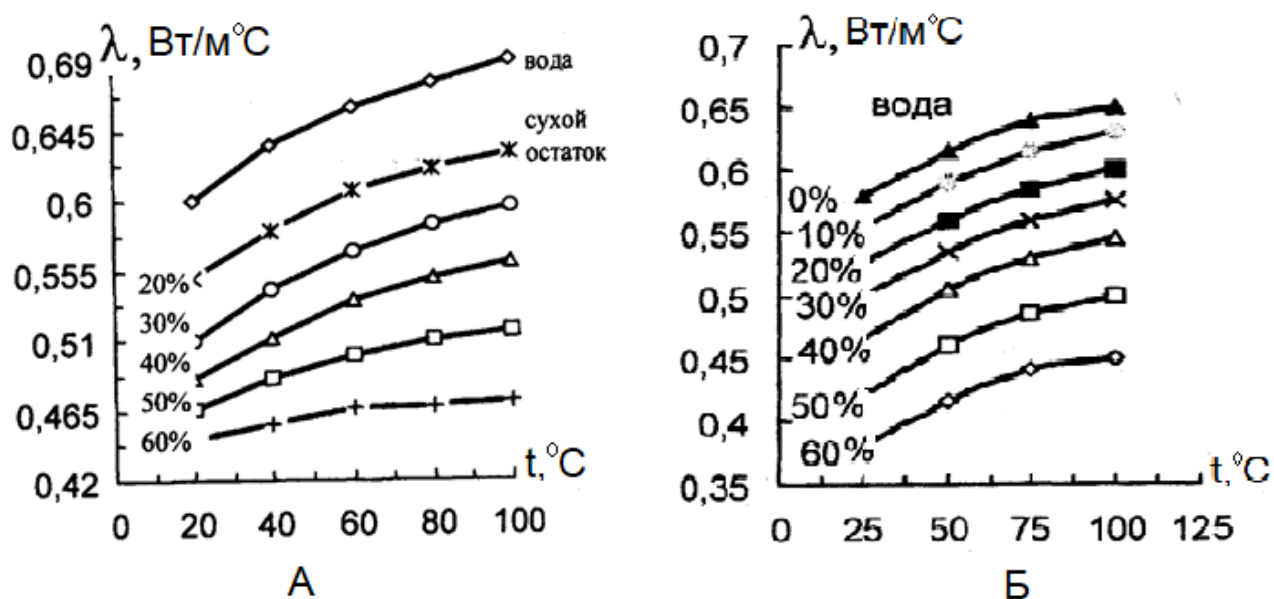


Рисунок 2.1 – Теплопроводность сульфатных (А) и сульфитных (Б) щелоков

Теплоемкость. Теплоемкостью тела или системы называется отношение количества теплоты, передаваемой телу или системе в каком-либо процессе, к соответствующему изменению температуры. Поэтому каждое значение теплоемкости относят к определенной температуре. Теплоемкость тела не зависит от способа его нагрева.

Для характеристики работы выпарной установки при определении процесса теплообмена необходимо располагать данными о теплоемкости щелока. Теплоемкость черного сульфатного щелока зависит от плотности, с увеличением которой, т. е. с повышением содержания в нем сухих веществ, теплоемкость его уменьшается.

Расход теплоты зависит не только от свойств вещества, из которого состоит тело, но и от массы этого тела. Так, чтобы нагреть две емкости разного объема с содержимым разной массы до одинаковой температуры, нужно подвести различное количество теплоты. Поэтому для различных тел или систем можно сравнивать только удельные теплоемкости.

Теплоемкость черного щелока может быть рассчитана по формуле:

$$c_{\text{жщ}} = \frac{c_{\text{сщ}} + c_{\text{в}} \cdot u}{1 + u}, \text{ кДж/кг} \cdot \text{°C}, \quad (2.7)$$

где $c_{\text{сщ}}$, $c_{\text{в}}$ – теплоемкость сухого вещества и воды при данных температуре и давлении.

При отсутствии исходных данных в тепловых расчетах рекомендуется принимать $c_{\text{сщ}}$ в пределах 1,8 – 2,0 кДж/кг·°C.

Температура кипения и физико-химическая температурная депрессия.

При одинаковых температурах упругость пара над чистым растворителем больше, чем над раствором. Поэтому при принятом давлении температура кипения раствора выше температуры растворителя.

Температура жидкости при нагревании повышается до момента, когда внутри ее начинают интенсивно образовываться пузырьки пара, которые, дойдя до поверхности жидкости, лопаются, и на поверхности происходит бурное и беспорядочное их движение, называемое кипением. Во время кипения помимо образования пара на поверхности жидкости происходит превращение ее в парообразное состояние и внутри паровых пузырьков. Образованию паровых пузырьков способствует содержание в жидкости газов.

Процесс испарения влаги из черного щелока с целью повышения содержания в нем сухих веществ путем кипения щелока является основной задачей выпарного цеха.

Температуру, при которой происходит кипение жидкости, называют температурой кипения. Она зависит в основном от давления, состава жидкости, наличия в ней растворенных веществ или газов. Так, при атмосферном давлении точка кипения воды будет равна 100 °C, при давлении 1 МПа (10 кгс/см²) вода будет кипеть при 183,2 °C, и наоборот, при разрежении, т. е. при вакууме, точка кипения будет ниже 100 °C.

При одном и том же давлении различные жидкости имеют разные точки кипения. Температура кипения жидкости изменяется также в зависимости от вида растворенных в ней веществ. При этом она возрастает с увеличением их концентрации. Так, черный щелок плотностью 1,09 г/см³ кипит при 104 °C, при увеличении плотности до 1,18 г/см³ он будет кипеть при 106 °C, а при плотности

1,38 г/см³ при 110 °С. Если в щелоке содержатся газы, то при нагревании его точка кипения будет достигнута быстрее, чем при отсутствии в нем газов.

Поверхностное натяжение. Величина поверхностного натяжения черного щелока зависит от концентрации сухих веществ в интервале температур 40 – 80 °С. Заметное изменение поверхностного натяжения отмечается при повышении концентрации сухих веществ выше 25 %. Так как практические условия выпаривания соответствуют выше названной концентрации, то для теплотехнических расчетов эту величину можно принять постоянной и равной 31 – 32 Н/м.

Теплота сгорания является важнейшей характеристикой черного щелока. Она показывает величину выделяемой (поглощаемой) теплоты при окислении компонентов черного щелока. Величины выделяемой (поглощаемой) теплоты важнейших компонентов черного щелока показаны в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Теплота сгорания сухих веществ

Вещество	МДж/кг
Хвойный лигнин	26,90
Лиственный лигнин	25,11
Углеводы	13,56
Смоляные и жирные кислоты	37,71
Сульфид натрия	12,90
Тиосульфат натрия	5,79

Вопросы для самоконтроля

1. Из чего состоит минеральная и органическая часть черного щелока?
2. От чего зависит плотность раствора?
3. Какие факторы оказывают влияние на содержание сухого остатка в черном щелоке?
4. Как определяется плотность жидкого щелока?
5. К каким последствиям приводит повышение вязкости черного щелока?
6. Каким образом можно снизить вязкость черного щелока перед выпариванием?
7. Что такое теплоемкость? Как определяется теплоемкость черного щелока?
8. От чего зависит величина температуры кипения раствора?
9. От чего зависит величина поверхностного натяжения черного щелока?
10. Что такое теплота сгорания?

3. ТЕХНОЛОГИЯ ВЫПАРИВАНИЯ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА

3.1. Общие сведения о процессе выпаривания

Выпаривание – сложный технологический процесс частичного, либо полного удаления жидкого растворителя в виде пара в процессе кипения из водных растворов твердых веществ. Выпаривание применяется для повышения концентрации растворов нелетучих веществ путем выделения из растворов чистого растворителя (дистилляция) и кристаллизации растворенных веществ.

Для нагревания выпариваемых растворов до кипения применяются топочные газы, подвод электроэнергии, высокоорганические теплоносители. Наибольшее применение находит водяной пар, характеризующийся высокой удельной теплотой конденсации и высоким коэффициентом теплоотдачи.

Выпаривание используется в целлюлозно-бумажной промышленности при производстве целлюлозы по сульфатному или сульфитному способу.

Грамотное конструирование процесса выпаривания и его аппаратного оформления – важнейший этап по рациональному использованию энергии в технологии тепловой переработки черного щелока.

Сущность выпаривания состоит в том, что раствор, нагретый до или выше температуры насыщения, при заданном давлении и концентрации, начинает кипеть. При этом вода частично или полностью удаляется в виде пара. Приобретенная ионами растворенных солей энергия в этих условиях недостаточна для преодоления сил межмолекулярного притяжения. Поэтому эти соли остаются в растворе. Образующийся пар называют вторичным паром или экстрапаром. Выпаривание слабого черного щелока ведут от концентрации 5 – 15 % до 70 – 80 % абсолютно сухих веществ (а. с. в.). Технологией упаривания предусмотрено укрепление слабого черного щелока упаренным. Таким образом, собственно выпаривание ведут от концентрации 20 – 25 % а. с. в. Такое технологическое решение позволило осуществить отделение сульфатного мыла от раствора.

Испарение воды в головном корпусе происходит за счет теплового потока, подводимого к выпариваемому раствору от внешнего источника. Самым распространенным теплоносителем является пар отбора турбин ТЭЦ давлением 0,3 – 0,7 МПа или от заводской котельной. Подвод теплового потока в общем случае может быть осуществлен путем подвода электроэнергии или от других технологических потребителей, например, дымовых газов сушильных установок. Стремление к рациональному использованию энергии пара с ТЭЦ в процессе выпаривания привело к созданию многоступенчатых выпарных установок (МВУ). В этих установках удается значительно сократить подвод энергии от внешнего источника на выпарку.

Определяющую роль в работе выпарных батарей играет подготовка черного щелока к выпариванию, что обеспечивает стабильность работы выпарных установок, производительности и энергетических затрат.

Щелок, поступающий в выпарной цех после промывки целлюлозной массы, содержит натриевые соли смоляных и жирных кислот (сульфатное мыло), а также некоторое количество мелкого волокна.

Содержание сульфатного мыла. Концентрация сульфатного мыла в черном щелоке при варке сосновой древесины достигает 10 – 15 г/л. В процессе упаривания щелока сульфатное мыло вызывает сильное вспенивание, что приводит к перебросу пены с соковым паром из одного выпарного аппарата в другой, потерям щелочи и в значительной мере затрудняет визуальное наблюдение за ходом процесса. От содержания сульфатного мыла в черном щелоке зависит эффективность процесса упаривания щелока.

Перед упариванием щелок должен быть соответствующим образом подготовлен и в максимальной степени освобожден от вышеуказанных примесей. Для этого щелок фильтруют, выделяют из него мыло и подвергают окислению.

Отфильтрованный на фильтре щелок поступает в расходный бак, откуда центробежным насосом подается в смеситель. В этот же смеситель для укрепления щелока, поступающего из промывного отдела, закачивается концентрированный упаренный черный щелок. После смесителя укрепленный щелок поступает в бак, в котором происходит процесс отсаливания и выделения сульфатного мыла. Баки для сбора мыла могут устанавливаться последовательно или параллельно, в этом случае, как правило, в одном баке происходит отстаивание мыла, во второй бак закачивается укрепленный щелок, а из третьего – освобожденный от мыла щелок направляется на окислительную установку. Затем последовательно операции в баках меняются. Отобранное из бака сульфатное мыло поступает в бак-сборник. Окисленный щелок поступает в бак, из которого также отбирается мыло, а освобожденный от мыла щелок направляется на выпарную установку.

Упаренный до соответствующей концентрации крепкий щелок, пройдя через мылоотделитель, поступает на сжигание. Часть этого щелока используется для укрепления слабого щелока в смесителе. При выработке сульфатной целлюлозы из лиственной древесины или тростника операции отделения сульфатного мыла от щелока не требуется.

Содержание смоляных и жирных кислот в черном щелоке оказывает особенно сильное влияние на производительность выпарной установки при повышении его плотности до 1,3 г/см³ и выше. При этом сроки беспромывочного периода работы установки значительно сокращаются. Таким образом, чем больше сульфатного мыла будет удалено из щелока до его поступления на выпарную установку, тем эффективнее будет процесс упаривания щелока.

Специалисту для правильного ведения процесса упаривания щелока необходимо интересоваться степенью смолистости растительного сырья, поступающего на варку, режимом варки, степенью удаления из черного щелока мыла и мелкого волокна и составом щелока.

Кислый характер этих газов при наличии в щелоке летучих органических соединений приводит к коррозии находящихся в парогазовом пространстве

металлических поверхностей, кипяtilьных труб, трубных решеток, конденсатных насосов, сепараторов и другого оборудования.

Пенообразование. Черный щелок направляется в систему регенерации химикатов. В процессе операции регенерации от щелока отделяется сульфатное мыло. Черный щелок, полученный после варки древесины хвойных пород, обладает свойством пениться. Пенообразование вызывается присутствием в черном щелоке смолистых веществ. Черный щелок является сложным раствором в воде органических и минеральных веществ. Необходимость тщательного отбора мыла обуславливается ценностью этого продукта, а также тем, что при повышении плотности щелока до 1200 – 1300 кг/м³ оно оказывает особенно сильное влияние на производительность выпарной установки, при этом срок беспромывочной работы выпарной установки снижается. В связи с этим подготовка черного щелока к упариванию является необходимой и важной операцией в процессе регенерации щелочных химикатов. Она включает в себя сбор сульфатного мыла и окисление отработанных черных щелоков. Перед сбором мыла щелок уплотняется за счет смешивания с частью крепкого черного щелока, что оптимизирует условия отстаивания и выделения мыла. Укрепление слабого черного щелока уменьшает вспенивание при выпаривании. Необходимое количество крепкого раствора рассчитывают по формуле:

$$G_1 = \frac{G(b-b_H)}{(b_K-b)},$$

где b, b_H, b_K – концентрация щелока после смешения слабого и крепкого черного щелока, соответственно;

G_1, G – массовый расход щелока после смешения и слабого раствора черного щелока, соответственно.

Черный щелок, поступающий в отстойный отдел после промывки целлюлозы, содержит натриевые соли смоляных и жирных кислот (сульфатное мыло), а также некоторое количество мелкого волокна.

Содержание мыла в плотном черном щелоке, поступающем на сжигание в содорегенерационный котел, должно быть не более 1 % а. с. в. в остатке.

Влияние мелкого волокна в черном растворе. Мелкое волокно при упаривании щелока образует на поверхностях нагрева выпарных аппаратов накипь, снижающую эффективность их работы, а иногда полностью закупоривает кипяtilьные трубы. Процесс образования осадка на стенках кипяtilьных труб значительно ускоряется при наличии в щелоке сульфатного мыла. Мелкое волокно забивает также сетки в сепараторе, затрудняя отделение щелока от сокового пара. Количество мелкого волокна в щелоке, поступающим на упаривание, зависит от способа промывки целлюлозы, применяемого для этой цели оборудования, и состояния сеток промывных аппаратов. Для нормальной работы выпарной установки содержание мелкого волокна в упариваемом щелоке не должно превышать 10 – 15 мг/л. Соковый пар и загрязняет конденсат, образующийся в межтрубном пространстве выпарного аппарата.

Неконденсирующиеся газы. Содержащийся в черном щелоке сульфид натрия в результате гидролиза образует сероводород. Вместе с другими дурнопахнущими газами – диметилсульфидом и метилмеркаптаном – он переходит при упаривании щелока в соковый пар и загрязняет конденсат, образующийся в межтрубном пространстве выпарного аппарата. Кислый характер образующихся газов при наличии в щелоке летучих органических соединений приводит к коррозии находящихся в парогазовом пространстве металлических поверхностей, кипяточных труб, трубных решеток, конденсатных насосов, сепараторов и другого оборудования.

Окисление щелока. Для уменьшения образования летучих соединений черный щелок подвергают окислению. При окислении щелока кислородом воздуха превращение сульфида натрия в тиосульфат происходит по следующей реакции: $2\text{Na}_2\text{S} + 2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$.

При более глубоком окислении тиосульфат ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) способен переходить в более стойкое химическое соединение – сульфат натрия.

Одновременно с окислением сульфида натрия происходит окисление находящихся в черном щелоке несконденсировавшихся дурнопахнущих веществ. Метилмеркаптан превращается при окислении в менее летучий диметилсульфид натрия.

Существует целый ряд аппаратурно-технологических решений, которые рекомендуются в качестве окислителей черного щелока. К таким решениям можно отнести обработку зеленого щелока кислородом воздуха, пенные установки. К наиболее интересным способам следует отнести окислительные установки на основе флотации. В отличие от других окислительных установок флотационно-окислительная установка позволяет, наряду с окислением нестойких серосодержащих соединений черного сульфатного щелока, осуществлять также его очистку от механических примесей (мелкого волокна, шлама) и дополнительно извлекать из щелока сульфатное мыло методом флотации. Конструкция флотационно-окислительной установки позволяет не только использовать черный щелок с повышенным содержанием мелкого волокна и шлама, но и в значительной степени удалить их из щелока.

3.2. Классификация и аппаратурно-технологические схемы выпаривания

Классификация схем выпаривания предложена проф. В. А. Суловым. По теплотехническим признакам выпарные установки непрерывного действия можно классифицировать по следующим признакам:

1. По принципу действия:

- а) рекуперативные выпарные установки, в которых теплоноситель и выпариваемый раствор разделены твердой стенкой;

- б) контактные выпарные установки, в которых теплота передается при непосредственном соприкосновении теплоносителя и раствора без разделяющей стенки;
- в) адиабатные выпарные установки, в которых концентрирование происходит вследствие испарения предварительно перегретого раствора в камерах мгновенного испарения.

2. По числу ступеней выпаривания:

- а) одноступенчатые;
- б) многоступенчатые.

3. По давлению вторичного пара в продукционном корпусе:

- а) вакуум-выпарные установки.
- б) атмосферные;
- в) противодавленческие.

4. По подводу первичной теплоты:

- а) выпарные установки с одним источником первичной теплоты;
- б) выпарные установки с несколькими источниками теплоты;
- в) выпарные установки с тепловыми насосами.

5. По технологии обработки раствора:

- а) одностадийные выпарные установки, в которых раствор до необходимой концентрации выпаривается в одну стадию;
- б) многостадийные выпарные установки, в которых раствор до необходимой концентрации выпаривается в две и более стадий.

6. По относительному движению теплоносителя и выпариваемого раствора:

- а) прямоточные, в которых греющий пар и выпариваемый раствор движутся в одном направлении;
- б) противоточные, в которых греющий пар и выпариваемый раствор движутся в противоположных направлениях;
- в) выпарные установки со смешанным питанием корпусов, имеющие элементы прямо- и противотока;
- г) выпарные установки с параллельным питанием корпусов раствором.

3.3. Одноступенчатое выпаривание

Выпаривание жидкости в изотермическом процессе путем подвода теплоносителя от внешнего источника реализуется в одноступенчатых выпарных установках.

Расход теплоносителя (водяного пара) на выпаривание вычисляется из баланса массы и энергии взаимодействующих в теплопроцессе материальных потоков:

- а) нагрев раствора до температуры кипения;
- б) изотермический подвод теплоты для перевода воды из жидкого в парообразное состояние;
- в) отвод теплоты в окружающую среду.

Общий подвод энергии в форме тепла составит:

$$Q_p = G \cdot c_H \cdot (T_K - T_H) + W \cdot [i'' - c_b \cdot (T_K - 273)] + q_n, \quad (3.1)$$

где q_n – отвод теплоты в окружающую среду, кДж/с; G – расход исходного раствора, кг/с; W – расход вторичного пара, кг/с; i'' – энтальпия вторичного пара, кДж/кг; T_H, T_K – температура исходного раствора и в процессе выпаривания.

Расход пара в процессе выпаривания вычисляется из баланса энергии в форме тепла при ее подводе и отводе, т. е.:

$$Q_p = D \cdot (i'' - i_K), \quad (3.2)$$

$$D = \frac{G \cdot c_H \cdot (T_K - T_H) + W \cdot [i'' - c_b \cdot (T_K - 273)] + q_n}{i_2 - i_K}, \quad (3.3)$$

где D – расход греющего пара, кг/с; i_2, i_K – энтальпия греющего пара и конденсата, кДж/кг; c_H, c_b – теплоемкость исходного раствора и воды, кДж/кг.С.

Из формулы (3.3) можно определить удельный расход греющего пара.

Пусть $q_n = 0$ и $T_H = T_K$, тогда:

$$D = \frac{W \cdot [i'' - c_b \cdot (T_K - 273)]}{i_2 - i_K}, \quad (3.4)$$

$$d = \frac{D}{W} = \frac{i'' - c_b \cdot (T_K - 273)}{i_2 - i_K}. \quad (3.5)$$

Пусть требуется выпарить при атмосферном давлении 1 кг воды из раствора, кипящего при 393 К. На выпаривание используется пар от внешнего источника давлением 3 бар через теплообменную поверхность при температуре 405,5 К. Энтальпия вторичного пара равна 2678 кДж/кг, а греющего – 2727 кДж/кг; энтальпия конденсата греющего пара 559 кДж/кг. Тогда:

$$\frac{D}{W} = \frac{2678 - (4,19 \cdot (393 - 273))}{2727 - 559} = 1, \text{ кг пара /кг H}_2\text{O}.$$

Таким образом, удельный расход греющего пара при одноступенчатом выпаривании равен 1, т. е. для выпаривания 1 кг воды потребуется подвести 1 кг греющего пара. С учетом отвода теплоты в окружающую среду и дополнительного подвода пара на нагрев раствора до температуры кипения этот расход повышается приблизительно до 1,1 кг/кг.

Выпаривание раствора осуществляется либо в одном, либо в нескольких аппаратах, включенных последовательно по раствору и параллельно – по греющему пару. Смысл установки нескольких аппаратов заключается в повышении среднего коэффициента теплопередачи в установке, а также в меньшей забивке аппаратов с большим выделением солей.

Концентрирование раствора однократным выпариванием можно осуществить либо при атмосферном давлении, либо под вакуумом, либо с противодавлением. Первый и последний приемы встречаются крайне редко. Это объясняется тем, что в таком процессе получают большое количество пара (равное заданной выпаренной воде), направляемое за пределы выпарки для

последующего его использования. Потребителя такого пара найти довольно трудно. Кроме того, сложно обеспечить необходимую чистоту пара.

Выпаривание под вакуумом встречается чаще. Так как температура кипения в вакууме ниже, можно в качестве греющего пара использовать пар низкого давления (например, из крайнего отбора турбин ТЭЦ или отбора технологических установок). С применением вакуумных аппаратов снижаются потери теплоты в окружающую среду.

Поверхность теплообмена для одноступенчатой выпарной установки определяется на основе баланса теплоты и уравнения теплопередачи:

$$Q = Dп (iп - iк); \quad (3.6)$$

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t; \quad (3.7)$$

$$F = Q / k \cdot \Delta t, \quad (3.8)$$

где $Dп$, $iп$, $iк$ – расход греющего пара, энтальпия пара и конденсата; k – коэффициент теплопередачи. Определяется по расчетным формулам или по опытным данным; Δt – полезный температурный напор; F – поверхность теплообмена.

3.4. Многоступенчатые выпарные установки

Выпаривание в МВУ осуществляется в ряде последовательно соединенных выпарных аппаратах, называемых корпусами. Принцип многоступенчатого выпаривания определяет степень регенерации теплоты греющего пара, потребляемого МВУ от внешнего источника.

При совместной работе двух аппаратов удельный расход пара должен сократиться до 0,5 кг/кг выпаренной воды, т. е. почти вдвое, при работе трех аппаратов – в 3 раза и т. д., т. е. удельный расход пара должен уменьшаться пропорционально числу аппаратов в МВУ. Из-за температурных потерь на практике этот эффект снижается.

В зависимости от подключения выпарных аппаратов по пару и раствору различают следующие схемы работы МВУ:

1. *Схема (рис. 3.1А) прямого или параллельного тока раствора*, когда исходный раствор поступает в первый корпус батареи, туда же подается свежий пар. Из первого корпуса раствор самотеком последовательно проходит все корпуса батареи, причем концентрация его повышается от первого к последнему корпусу.

2. *Схема противотока*. Исходный раствор подается в последний вакуумный корпус батареи, а из него насосами последовательно перекачивается через все корпуса в первый, куда поступает греющий пар с ТЭЦ. Раствор первого корпуса поступает в один или несколько самоиспарителей. Полученный от самоиспарения пар отводится в соответствующий по давлению корпус МВУ, а раствор направляется по назначению (рис. 3.1Б).

3. *Схема смешанного тока*. В этой схеме (рис. 3.1В) раствор поступает в корпус, где в качестве теплоносителя используется вторичный пар предыдущего корпуса. Далее раствор движется параллельно движению пара. Из последующего корпуса он принудительно перекачивается в корпус, стоящий перед тем, куда

поступает свежий раствор. Оттуда частично сконцентрированный раствор перекачивается последовательно через ряд выпарных аппаратов в первый корпус обратно движению пара. Могут быть и другие комбинации противоточной и прямоточной схем.

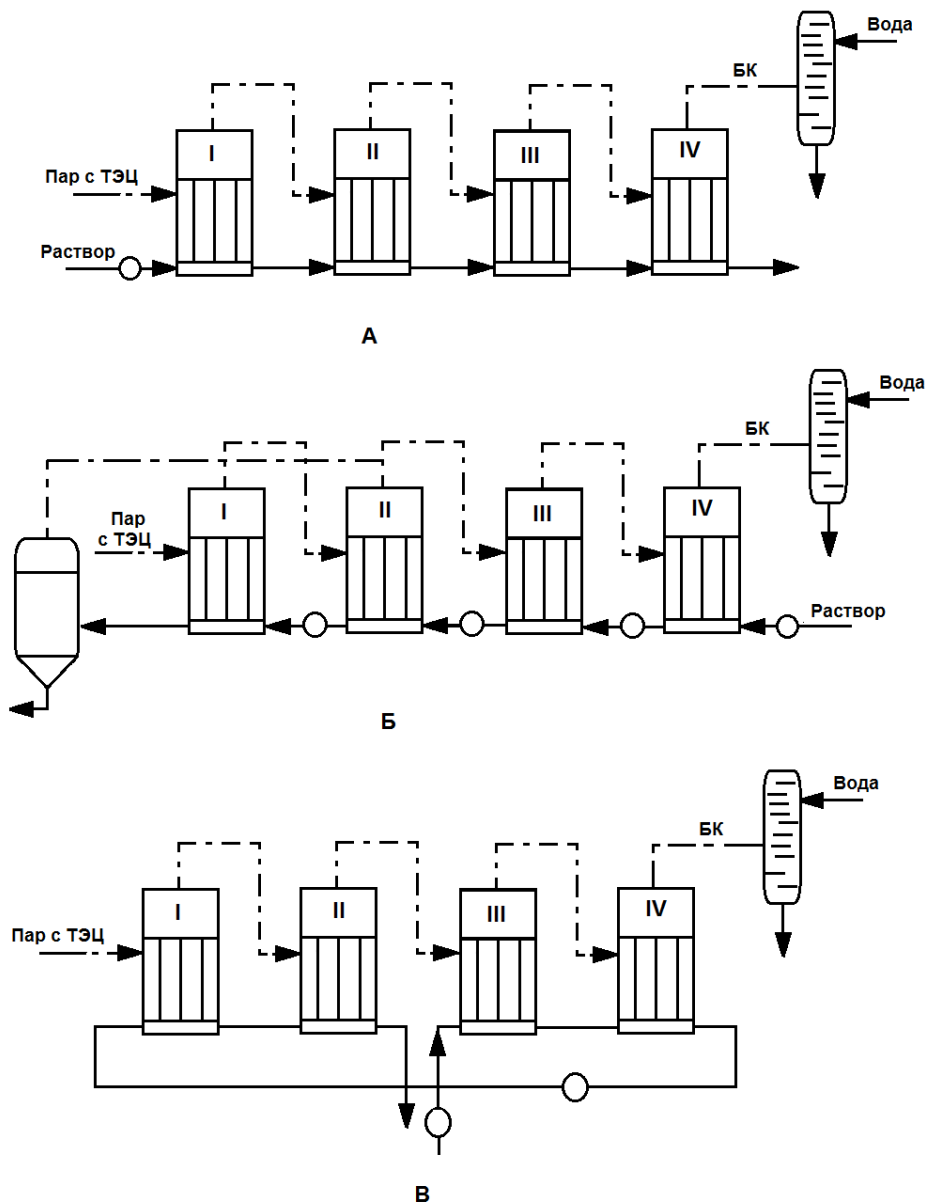


Рисунок 3.1 – Схемы многоступенчатой выпарной установки (МВУ):
A – прямоточная; *Б* – противоточная; *В* – смешанная; *БК* – бароконденсатор

3.5. Особенности работы многоступенчатых выпарных установок

Прямоточная схема выпаривания имеет перед другими схемами следующие преимущества:

- самоиспарение перегретого раствора осуществляется в корпусе выпарного аппарата, что приводит к интенсификации теплообмена при кипении и затрачивается на 5 – 10 % меньше греющего пара, чем при противотоке;

– отсутствие насосов, перекачивающих раствор из корпуса в корпус, а, следовательно, и трудностей, связанных с их эксплуатацией в условиях высоких температур и концентраций щелоков.

К недостаткам прямоточной схемы выпаривания следует отнести:

– выделение в условиях низких температур и высоких концентраций органических соединений типа метанола, затрудняющих работу вакуумного корпуса и поверхностных конденсаторов;

– низкая эффективность теплопередачи в вакуумном корпусе из-за повышения вязкости выпариваемых растворов;

– низкая эффективность теплопередачи в головном (по пару) корпусе вследствие интенсивного выделения на теплообменной поверхности накипи с низкой теплопроводностью: сульфатов и карбонатов кальция, гидроалюмосиликатов натрия.

Противоточная схема выпаривания лишена большинства недостатков прямоточной схемы. В этой схеме по мере повышения концентрации раствора повышается его температура, что обеспечивает более высокую интенсивность теплового процесса. В этом случае повышение вязкости раствора с повышением концентрации компенсируется ее снижением с повышением температуры, что благоприятно влияет на интенсивность теплообмена. Однако сложная зависимость растворимости органических и неорганических соединений от температуры и концентрации сульфитных и сульфатных растворов приводит к выделению накипи на теплообменных поверхностях сложного минералогического и фазового состава в головных корпусах выпарных аппаратов. К недостаткам схемы противоточного выпаривания следует отнести установку большого количества насосов. Раствор по мере концентрирования нагнетается по корпусам насосами с постепенно повышающейся температурой и давлением, что приводит к эксплуатационным осложнениям при их эксплуатации. Кроме того, суммарный расход электроэнергии на привод этих насосов (в сравнении с прямоточной схемой) существенно выше. Поскольку концентрация упариваемого раствора повышается параллельно температуре, усиливается коррозионное действие раствора на металл кипячительных труб. Особенно заметно это проявляется при выпаривании растворов сульфитного производства.

Смешанная схема выпаривания растворов сочетает элементы противотока и прямотока. Она возникла в результате поиска решений по уменьшению недостатков прямоточного и противоточного движения пара и раствора. В смешанной схеме сохраняются преимущества противотока, а число необходимых насосов и расход электроэнергии уменьшаются. Применение смешанного тока находит широкое распространение в процессе выпарки растворов агрессивных сред с накипеобразующими компонентами на отечественных целлюлозных заводах.

Работа подогревателей раствора в выпарных установках целлюлозного производства характеризуется низкой эффективностью теплового процесса и является «узким» местом в процессе их эксплуатации. К причинам этого следует отнести:

- образование накипи на теплообменных поверхностях органического и неорганического происхождения;
- забивка части теплообменных труб механическими примесями типа целлюлозного волокна и др.;
- высокая вязкость раствора, при которой осуществляется процесс нагрева в подогревателях раствора.

Все эти факторы приводят к увеличению гидравлических сопротивлений в теплообменниках, низкой интенсивности процесса теплопередачи и к эксплуатационным трудностям. По этим причинам подогреватели часто выводят из работы, и выпарные батареи работают без подогревателей. Эксплуатация выпарных установок без подогревателей приводит к снижению производительности процесса выпаривания и перерасходу пара с ТЭЦ.

3.6. Тепловые схемы первой стадии концентрирования

Выпаривание растворов черных сульфатных щелоков осуществляют в выпарных установках с противоточной или смешанной схемами питания раствором корпусов выпарных аппаратов.

В противоточной выпарной установке (станции фирм «Свенсон» и «Виттемор») греющий пар и раствор переходят из корпуса в корпус в противоположных направлениях. При такой схеме движения потоков по мере сгущения раствора повышается и его температура, поэтому вязкость раствора остается в пределах, обеспечивающих достаточно высокие коэффициенты теплопередачи. За счет этого производительность противоточных батарей наивысшая, по сравнению с любой другой схемой.

К недостаткам противоточной схемы относятся необходимость установки дополнительных перекачивающих насосов и тяжелые условия работы первого корпуса, в котором одновременное сочетание максимальной концентрации и высокой температуры приводит к образованию накипи.

В смешанной схеме питания раствор подается в один из промежуточных корпусов установки, откуда, сочетая элементы прямотока или противотока, проходит до продукционного корпуса. В связи с этим используются преимущества прямотока (отсутствие перекачивающих насосов и самоиспарение части раствора) и противотока – в части обеспечения относительно высоких значений коэффициентов теплопередачи в вакуумных и продукционных корпусах. Выпарные установки, укомплектованные аппаратами с восходящей пленкой раствора, распространены в России и на зарубежных предприятиях: «Розенблад», «Рамен», «Энсо-Гутцейт», «Мицубиси» и т. д. Однако типичной и наиболее распространенной в России выпарной батареей со смешанной схемой питания корпусов является установка фирмы «Розенблад», приведенная на рисунке 3.2. Эти станции обеспечивают высокую производительность и экономичность работы.

Установка производительностью 200 т/ч по выпариваемой воде укомплектована 7 выпарными аппаратами фирмы «Розенблад» и корпусом-подогревателем, не имеющим сепаратора. Трубные системы кипятильников

выпарных аппаратов и части, соприкасающиеся со щелоком, в корпусах *IA*, *IB* и *II* выполнены из нержавеющей стали. Части остальных корпусов изготовлены полностью из углеродистой стали. Поверхность теплообмена кипятильника корпуса *IA* составляет 1260 м², корпусов *IB* и *II* – по 2260 м², остальных корпусов – 2200 м². Корпуса *IB* и *II* – двухходовые. Для подогрева щелока установлено 10 спиральных теплообменников, 3 – с поверхностью нагрева 75 м² каждый. В схему выпарной станции входит конденсационная установка, состоящая из поверхностного (4) и барометрического (5) конденсаторов, а также баки слабого щелока (1), средних щелоков (полуупаренного) (2) и крепкого (8) щелока.

Слабый щелок, укрепленный до концентрации сухого вещества 22 %, из бака (1) насосом подается параллельно в корпуса *IV*, *V* и *VI* в количествах соответственно 50; 25 и 25 % от общего расхода. Из корпуса *IV* щелок самотеком последовательно переходит в корпуса *V* и *VIA*, далее соединяется с потоком щелока, выходящим из корпуса *VIB*, и насосом подается в бак среднего щелока (2), где производится сьем мыла. Из бака (2) насосом по двум параллельным трубопроводам щелок прокачивается через теплообменники (3), установленные в две линии по четыре теплообменника в каждой, и противоточно подается в корпус *III*. Из корпуса *III* насосом через два параллельно установленных теплообменника (3) щелок подается в двухходовой корпус – подогреватель *IA*. (Схема 4 – 5 – 6 – 3 – 1 – 2.)

В корпусе *IA* щелок доводится до кипения и вместе с образующимся паром переходит в корпус *IB*, сепаратор которого является общим для корпусов *IA* и *IB*. Из корпуса *IB* щелок самотеком поступает в корпус *II*, а из него насосом подается в бак крепкого щелока (8), откуда откачивается на сжигание в содорегенерационный котлоагрегат. Концентрация крепкого щелока составляет 55 – 60 % содержания сухого вещества. Часть крепкого щелока из бака (8) отбирается в бак (1) на укрепление слабого щелока до 22 % для устранения вероятности вспенивания в первых по ходу щелока корпусах батареи.

Корпуса *IA* и *IB* обогреваются острым паром при давлении 3,43 бар (3,5 кгс/см²) и температурой 138 °С. Корпуса *II*, *III*, *IV* и *V* обогреваются, соответственно, вторичным паром корпусов *IB*, *II*, *III* и *IV*. Корпуса *VIA* и *VIB* работают по пару параллельно и обогреваются паром корпуса *V*.

Вторичный пар из корпусов *VIA* и *VIB* поступает на конденсационную установку, где до 90 % пара конденсируется в поверхностном конденсаторе (4), а остальные 10 % и несконденсировавшиеся газы поступают в барометрический конденсатор смешения (5).

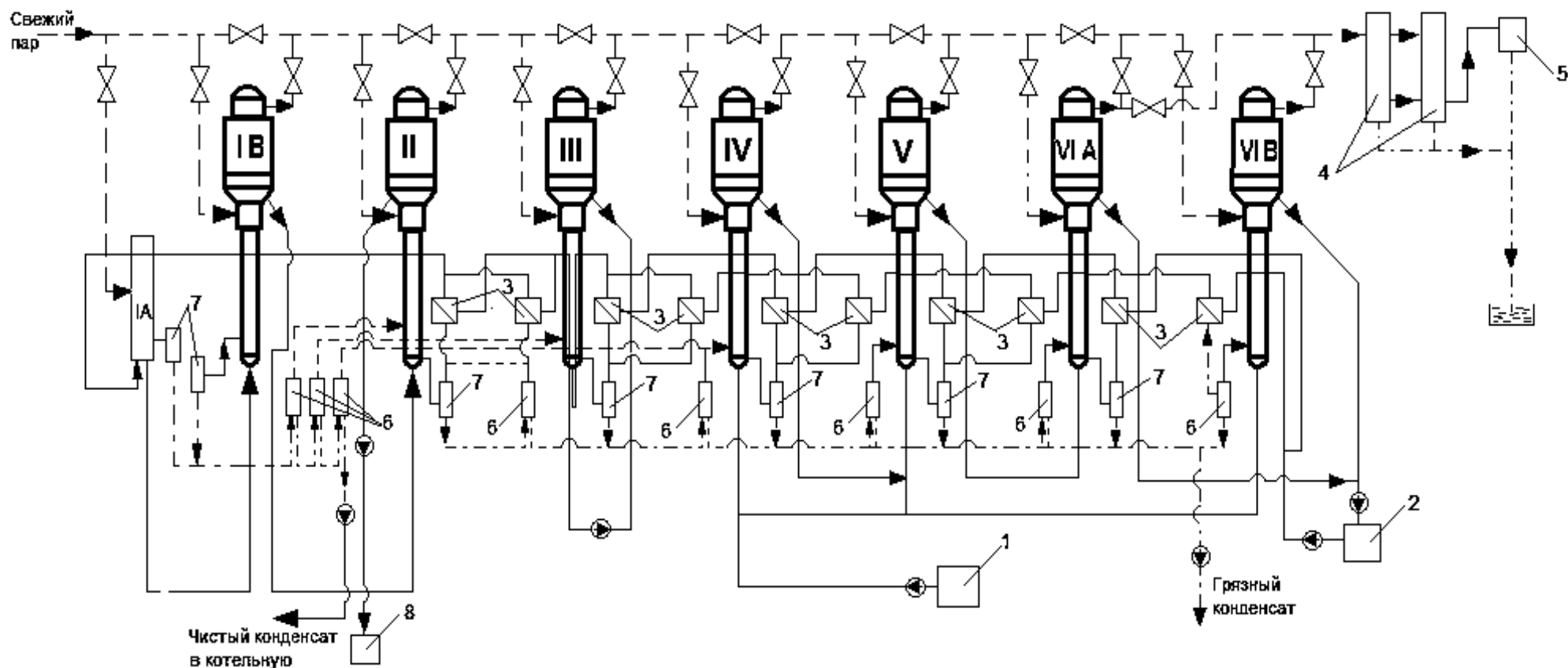


Рисунок 3.2 – Схема выпарной станции фирмы «Розенблад»:

--- пар, ----- щелок, - - - - конденсат; IA, IB, II, III, IV, V, VIA, VIB – порядковые номера корпусов;

1 – бак слабого щелока; 2 – бак средних щелоков; 3 – подогреватели щелока; 4 – поверхностный конденсатор;
5 – барометрический конденсатор; 6 – расширители конденсата; 7 – конденсатоотводчики; 8 – бак крепкого щелока

Чистый конденсат из корпусов *IA* и *IB* последовательно проходит через три расширителя конденсата (6) и насосом откачиваются на ТЭЦ в котельную. Пары вскипания чистого конденсата из расширителей направляются последовательно в корпуса *II*, *III* и *IV*, восполняя в них дефицит греющего пара. Неконденсирующиеся газы из корпусов *IA* и *IB* отводятся через конденсатоотводчики (7) в атмосферу. Неконденсирующиеся газы из подогревателей (3) через дроссельные шайбы направляют по общему трубопроводу в барометрический конденсатор, а конденсат подогревателей (3) возвращается в конденсатоотводчик соответствующего корпуса и с конденсатом этого корпуса направляется в расширитель конденсата следующего по ходу пара корпуса. При такой схеме достигается максимальное использование теплоты сдувочных газов.

Удельный расход греющего пара на батарею ($D_{уд} = D/W$, где D – расход греющего пара; W – общее количество выпаренной батареей воды) составляет 0,192 кг/кг.

Для выпаривания черных щелоков сульфатного производства в приведенной схеме выпарной батареи применяются длиннотрубные вертикальные аппараты с восходящим движением потока упариваемого раствора, длиной кипяtilьных труб 8 – 9 м, поверхностью теплообмена до 5500 м².

Выпарные установки, укомплектованные аппаратами с гравитационным течением упариваемого раствора, применяются на предприятиях Японии, США («Корпорейшен», «Бакай», «Краун Целлербах»), ФРГ («Лурги»), Финляндии и др. Основным достоинством данных батарей является способность работы аппаратов при низких температурных напорах, что позволяет комплектовать станции с большим, по сравнению с аппаратами с восходящей пленкой, числом ступеней выпаривания.

Одной из первых выпарных станций, работающих на падающей пленке, является пятикорпусная батарея фирмы «Лурги», производительностью 50 т/ч по испаряемой влаге. Батарея представлена на рисунке 3.3 и работает по противоточной схеме питания. Щелок концентрацией 18 % сухого вещества поступает через уравнильный резервуар в пятый корпус. Противоточно прокачивается через батарею и выходит из первого корпуса с концентрацией 43 %. Выпарные корпуса оборудованы циркуляционными насосами, одновременно служащими для перекачки щелока между корпусами. Насосы откачивают щелок из нижних щелоковых камер и подают его в верхние щелоковые камеры кипяtilьников через подогреватели (2), обогреваемые вторичным паром впередистоящего корпуса. Из верхних щелоковых камер раствор через распределительные устройства подается к кипяtilьным трубам и стекает в нижние щелоковые камеры. Таким образом осуществляется многократная циркуляция раствора в аппарате. Выпаренный раствор отбирается после циркуляционного насоса и противотоком через теплообменники щелока (3), обогреваемые свежим паром, подается в сепаратор впередистоящего корпуса.

Окончательное упаривание до концентрации 63 – 65 % а. с. в. осуществляется в двух последовательно работающих концентраторах. Концентраторы, также работающие по принципу падающей пленки, снабжены циркуляционными насосами, расположенными внутри нижних щелоковых камер кипятильников, и внутренними циркуляционными трубами, поднимающими раствор в сепараторы, установленные над кипятильниками. Выпаренный раствор из концентраторов направляется через расширители щелока (4) в баки крепкого щелока (5) и затем на сжигание в СРК.

Греющий пар на батарею подается в концентраторы. Вторичный пар из концентраторов направляется для обогрева кипятильника I корпуса. Вторичный пар из сепаратора I корпуса подается в кипятильник II корпуса, куда подводятся также пары самоиспарения от расширителя крепкого щелока (4).

Вторичные пары из сепаратора корпуса V направляют в поверхностный конденсатор (6), где конденсируется до 90 % паров. Неконденсированные в конденсаторе (6) пары и газы направляют в барометрический конденсатор смешения (7). Остатки неконденсирующихся газов из барометрического конденсатора (7) удаляются вакуум-насосом (8), который служит также для создания вакуума при пуске батареи.

Чистый конденсат отбирается из кипятильников концентраторов через расширители чистого конденсата (9) и откачивается в котельную. Грязные конденсаты из первого и последующих корпусов через конденсатоотводчики (10) направляются в бак-сборник грязного конденсата (11), куда поступает и конденсат из поверхностного и барометрического конденсаторов. Из бака (11) грязный конденсат направляется на очистку.

Удельный расход свежего пара на батарею составляет 0,164 кг на кг испаренной воды.

Недостатком применяемых для выпаривания сульфатных щелоков аппаратов с восходящим движением раствора является невозможность создания дисперсно-кольцевой структуры двухфазного потока, при которой теплообмен максимален по всей высоте труб. Кроме того, возможность срыва и высыхания пленки раствора на верхних участках концов труб приводит к зарастанию последних накипью, образующейся при испарении отдельных брызг раствора, попадающих на оголенную поверхность. Аппарат с гравитационным течением раствора практически лишен этих недостатков. Выпариваемый раствор в нем подается на распределительное устройство, откуда стекает по кипятильным каналам вниз, упариваясь при этом до заданной концентрации. Исключение высыхания пленки в нижней части труб достигается введением циркуляционного контура с насосом в каждом выпарном аппарате.

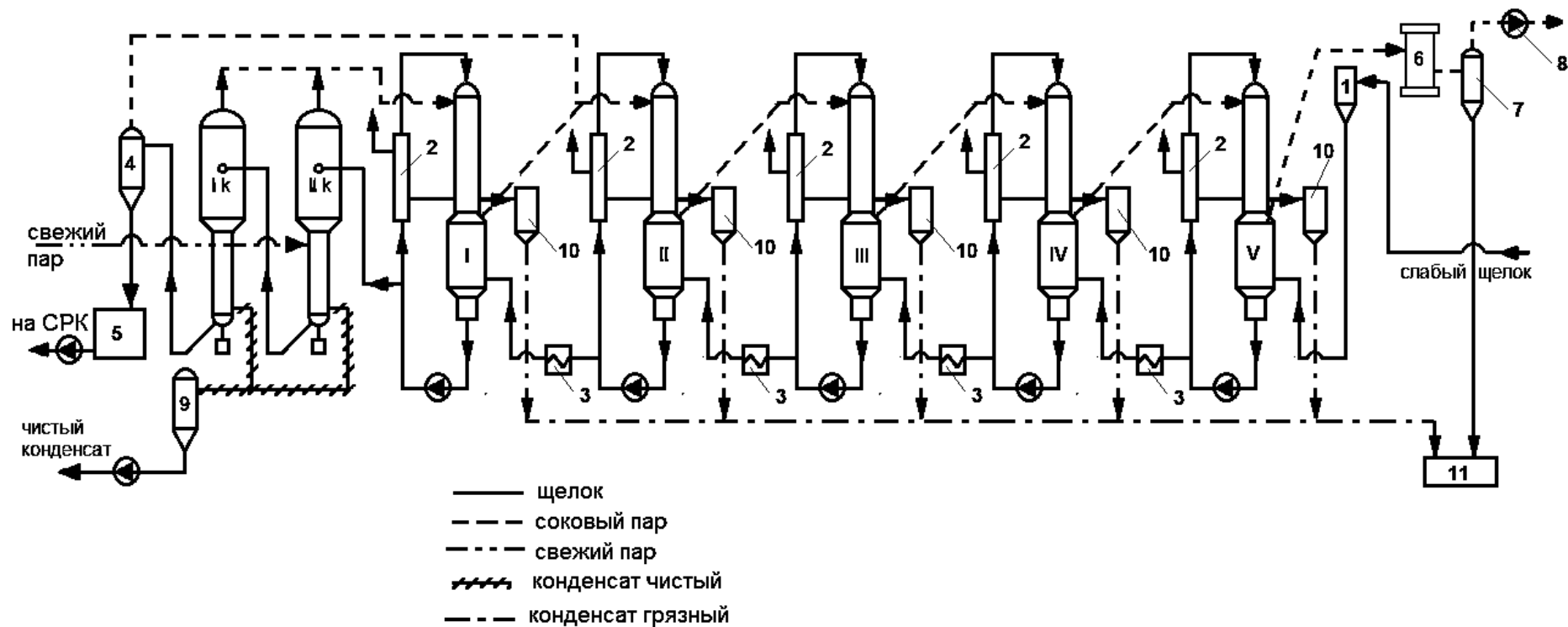


Рисунок 3.3 – Схема выпарной установки для выпаривания щелоков в аппаратах с падающей пленкой фирмы «Лурги»: I, II, III, IV, V – корпуса установки; 1 – уравнильный резервуар; 2 – подогреватели; 3 – теплообменники щелока; 4 – расширитель крепкого щелока; 5 – бак крепкого щелока; 6 – поверхностный конденсатор; 7 – барометрический конденсатор; 8 – вакуум-насос; 9 – расширитель чистого конденсата; 10 – конденсатоотводчики; 11 – бак-сборник грязного конденсата

3.7. Тепловые схемы второй стадии концентрирования

Вторую стадию концентрирования черного щелока ведут в концентраторах. Целевой задачей второй стадии концентрирования является повышение теплоты сгорания черного щелока перед подачей его в СРК и экологическая безопасность процесса в СРК.

Современная вторая стадия концентрирования создана на основе разработок специалистов фирм «Розенлев-Инжиниринг» и «Тампелла». Концентрацию черного щелока в разработанной конструкции суперконцентратора удалось повысить до 80 %. Этот суперконцентратор (рис. 3.4) работает на паре с температурой 180 °С и представляет конструкцию выпарного аппарата с падающей пленкой. Производительность первого в мире суперконцентратора составила 350 т/сут сухих веществ черного щелока. Установка второй стадии выпаривания, состоящая из трех аппаратов по 1800 м² теплообменной поверхности, упаривала 110 т/ч черного щелока, с 55 до 77 %.

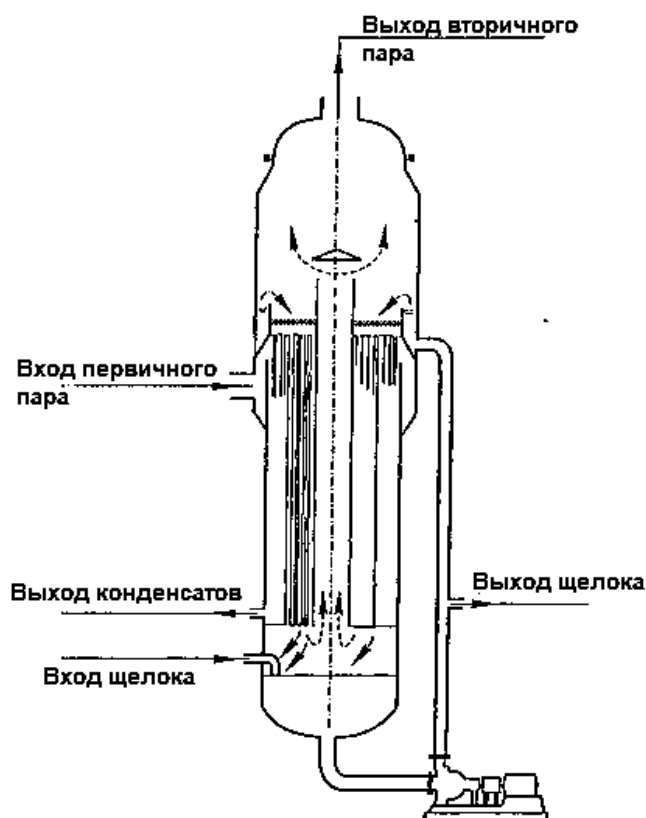


Рисунок 3.4 – Принципиальная схема устройства трубчатого суперконцентратора фирм «Розенлев-Инжиниринг» и «Тампелла»

Оптимальная работа выпарной станции определяется слаженностью взаимодействия многих цехов и отделов целлюлозного завода. Причины, определяющие стабильную работу выпарки, так разнообразны, что перечислять их не представляется возможным. Вследствие инерционности процесса каждое

изменение параметра процесса должно выдерживаться во времени для подтверждения изменения результатов в нужном направлении. Оптимальный процесс выпаривания может быть достигнут при устойчивой работе корпусов, что достигается равномерной подачей раствора в трубки кипятильного пучка.

Кипения раствора с малым образованием пены можно достигнуть:

- применением выпарных аппаратов с падающей пленкой;
- созданием условий, при которых паровая и жидкая фаза будут находиться в равновесии;
- пульсацией при кипении;
- разбрызгиванием в сепараторе масла.

Интенсификация кипения достигается также при подаче воздуха, газов или пара в кипятильные трубы и установке кипятильных труб с изменяющейся по длине площадью поперечного сечения.

Одно из определяющих направлений по интенсификации теплопередачи в выпарных аппаратах является снижение или предотвращение инкрустирования теплообменных поверхностей. Снижение интенсивности накипеобразования достигается при добавлении к упариваемому раствору определенного количества масла; покрытии внутренней поверхности труб фтороуглеводородными полимерами; создании пульсации; обеспечении предельного содержания волокна менее 10 мг/л. Снижение сульфатной накипи обеспечивается поддержанием содержания в черном щелоке не более 6 % Na_2SO_4 от веса растворенного вещества. Устраняется сульфатная накипь кипячением воды. Уменьшение известковой накипи достигается при исключении подачи в варочный котел мутного, плохо осветленного щелока. Устраняют накипь кипячением разбавленной соляной кислотой. Для борьбы с силикатной накипью в каустизационном отделе применяют высококачественную известь. Образовавшуюся накипь устраняют 3-часовой промывкой раствором NaHSO_4 концентрацией 20 % с последующей механической очисткой. Образование органической накипи уменьшается при хорошей организации отделения мыла. Устраняется кипячением воды. Для снижения сульфидной накипи рекомендуется интенсивный отвод неконденсирующихся газов из парового пространства кипятильника. Сульфидная накипь устраняется суточным кипячением белого щелока, затем кипячением воды, с последующим заполнением парового пространства фосфорной кислотой, концентрацией 3,5 % и смывкой накипи водой. Таким образом, снижение накипеобразования в трубах определяется качеством работы всех отделов целлюлозного завода. Хорошее восстановление сульфата, каустизация и осветление белого щелока, правильный подбор обмуровочных материалов, исправность сеток в диффузорах, полное выделение сырого сульфатного мыла из черного щелока, фильтрация щелока от волокна, правильный гидродинамический режим выпарного аппарата – это основные мероприятия по снижению интенсивности образования инкрустаций на теплообменной поверхности подогревателей и кипятильников выпарных аппаратов.

Вопросы для самоконтроля

1. От чего зависит величина концентрации сульфатного мыла в черном щелоке?
2. Какие факторы оказывают влияние на процесс пенообразования в черном щелоке?
3. С какой целью черный щелок подвергают окислению?
4. По каким признакам классифицируются выпарные установки?
5. Какие схемы многокорпусных выпарных установок используются в промышленности?
6. Преимущества и недостатки прямоточных схем выпаривания?
7. Какие направления интенсификации теплопередачи в выпарных аппаратах вы знаете?
8. Какие сложности возникают при эксплуатации подогревателей раствора в выпарных установках?
9. Почему в целлюлозно-бумажной промышленности применяют многокорпусные выпарные установки?
10. Преимущества и недостатки выпарных аппаратов с восходящим и нисходящим движением раствора?

4. АППАРАТЫ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ЧЕРНЫХ ЩЕЛОКОВ

4.1. Выпарные аппараты первой стадии концентрирования

Существует множество конструкций выпарных аппаратов. В производстве чаще всего используют выпарные установки с трубчатой теплообменной поверхностью. На рисунке 4.1 представлен выпарной аппарат вертикального типа с естественной циркуляцией и соосной греющей камерой.

Для ведения процесса в области «снарядного» и «стержневого» режима кажущийся уровень раствора рекомендуется поддерживать на 1/4 высоты кипятильных трубок. Поддержание уровня раствора ниже этой высоты может привести к режиму работы аппарата в условиях «сухой стенки». При уровне выше оптимального кипение будет происходить в области пузырькового кипения, что снизит эффективность работы аппарата. Греющий пар поступает через патрубок (1) в межтрубное пространство. При соприкосновении с поверхностью труб греющий пар конденсируется. Конденсат удаляется из аппарата через патрубок (15). Аппараты применяются с поверхностью теплообмена 700 – 900 м² и длиной кипятильных труб 7 – 9 м; высота аппарата 10 – 15 м.

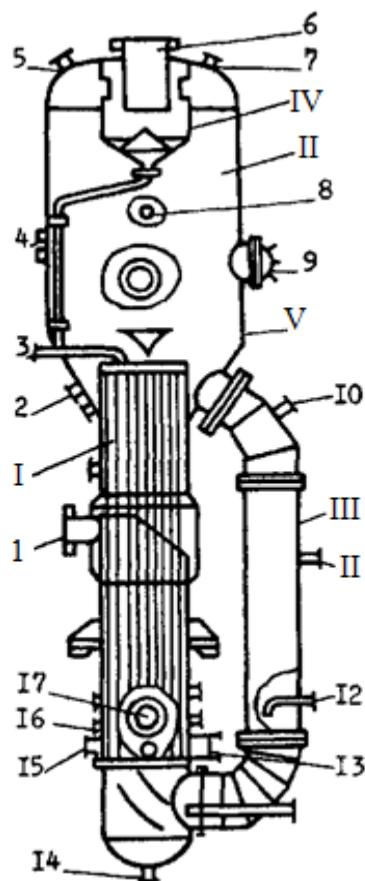


Рисунок 4.1 – Выпарной аппарат с естественной циркуляцией и соосной греющей камерой: I – греющая камера; II – сепаратор; III – циркуляционная труба; IV – брызгоуловитель; V – отбойный щиток; 1 – патрубок для подвода греющего пара; 2 – патрубок для отвода крепкого раствора; 3 – патрубок для отвода неконденсирующихся газов; 4 – патрубок для установки манометра; 5 – патрубок для удаления воздуха из парового пространства аппарата; 6 – патрубок для выхода вторичного пара; 7 – патрубок для промывки трубного пространства; 8 – смотровое окно; 9 – люк для осмотра сепаратора; 10 – патрубок для установки термометра; 11 – патрубок для отбора пробы; 12 – патрубок для подвода раствора; 13 – указатель уровня конденсата; 14 – патрубок для слива раствора; 15 – патрубок для выхода конденсата; 16 – патрубок для промывки межтрубного пространства; 17 – люк на греющей камере

Наиболее распространенной конструкцией выпарного аппарата (рис. 4.2) являются пленочные выпарные аппараты с восходящей пленкой и соосной греющей камерой. Аппарат предназначен для выпаривания пенящихся растворов, не образующих осадок на поверхности теплообмена.

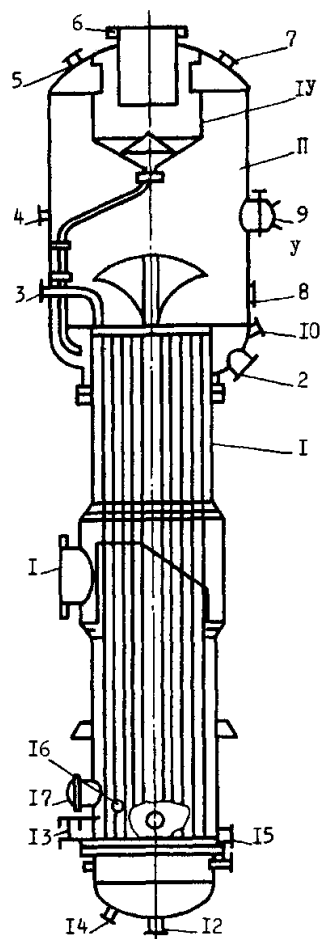


Рисунок 4.2 – Пленочный выпарной аппарат с восходящей пленкой
(обозначения см. рис. 4.1)

Из перспективных аппаратов, которые могут работать в условиях инкрустирующих растворов, следует отметить различные разновидности аппаратов с вынесенной зоной кипения. На рисунке 4.3 представлен выпарной аппарат с естественной циркуляцией с соосной греющей камерой и вынесенной зоной кипения раствора. В аппарате данной конструкции процесс кипения раствора происходит не в кипятильных трубах, а в трубе вскипания VII, установленной над греющей камерой. За счет гидростатического столба жидкости кипения в трубах не происходит. Высота трубы вскипания зависит от давления и концентрации раствора. Циркуляция раствора в аппарате осуществляется из сепаратора через циркуляционную трубу, греющую камеру в сепараторе.

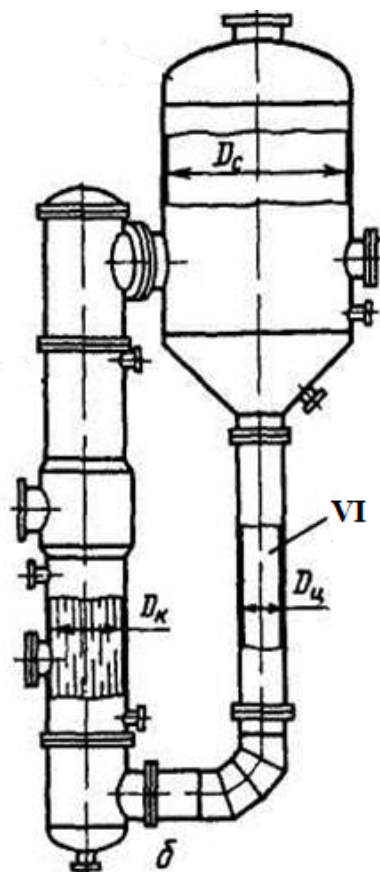


Рисунок 4.3 – Выпарной аппарат с естественной циркуляцией и вынесенной зоной кипения: VI – труба вскипания (остальные обозначения см. рис. 4.1.)

Раствор поступает через патрубок (12). Вторичный пар, пройдя сепаратор и брызгоуловитель, освобождается от капель увлеченного раствора. Пар выходит из аппарата через патрубок (6). Крепкий раствор удаляется через патрубок (14). Греющий пар поступает через патрубок (1) в межтрубное пространство аппарата, где конденсируется. Конденсат удаляется через патрубок (15). Аппарат имеет поверхность теплообмена до 1000 м^2 , диаметр греющей камеры до 2 м, высота аппарата до 14 м. Внутренние стенки кипяtilьных труб выпарных аппаратов с вынесенной зоной кипения менее подвержены зарастанию накипью.

При этом в таких аппаратах удалось достигнуть среднеэксплуатационный коэффициент теплопередачи $1160 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$. Он предназначен для упаривания растворов с выделением накипи, удаляемой при промывке.

Выпарные аппараты с вынесенной зоной кипения менее подвержены зарастанию накипью внутренних стенок кипяtilьных труб.

Разновидностью аппаратов с естественной циркуляцией и кипением раствора в трубах (рис. 4.4, а) является выпарной аппарат с вынесенной греющей камерой.

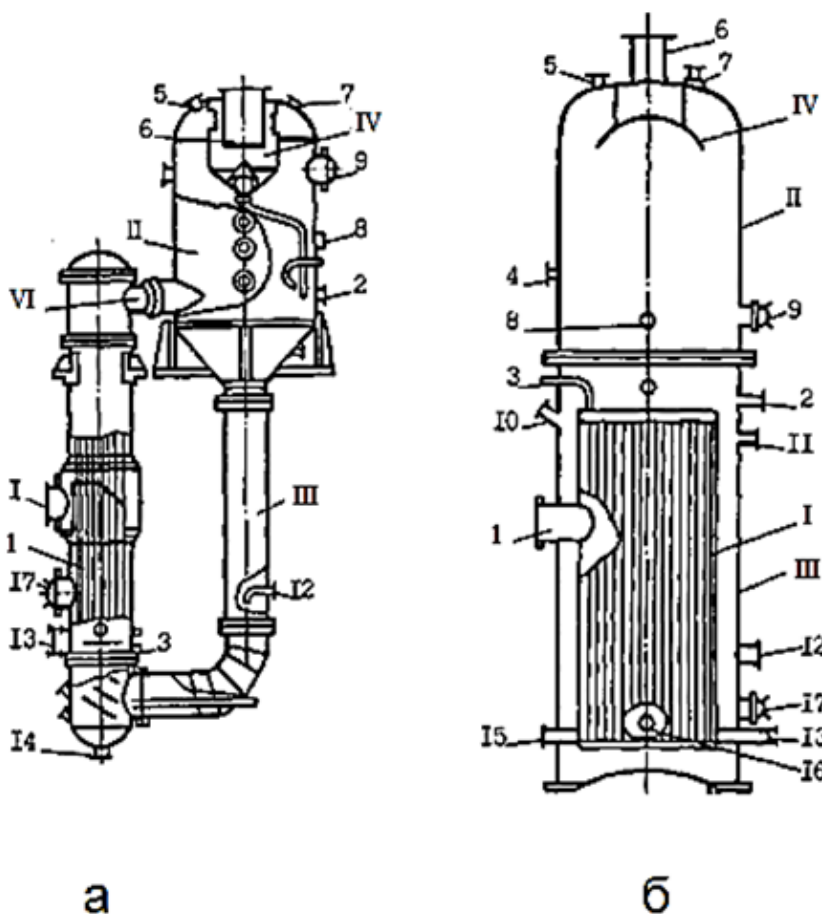


Рисунок 4.4, *а* – выпарной аппарат с вынесенной греющей камерой:
 VI – переходная камера (остальные обозначения см. рис. 4.1);
б – выпарной аппарат с естественной циркуляцией
 (обозначения см. рис. 4.1.)

Аппарат состоит из выносной греющей камеры *I*, сепаратора *II* и циркуляционной трубы *III*. Греющая камера состоит из труб, $d = 57 \times 3,5$. Она соединена с сепаратором коробом *VI*. В сепараторе *II* производится отделение твердой и жидкой фаз. Далее через брызгоуловитель *IV*, освободившись от капелек раствора, вторичный пар удаляется через патрубок (6), а раствор из сепаратора по циркуляционной трубе поступает в греющую камеру. Циркуляция осуществляется за счет разности плотностей жидкости и парожидкостной эмульсии по замкнутому контуру через циркуляционную трубу в греющую камеру. В камере раствор вскипает за счет подведенного к нему теплового потока в теплопроцессе между конденсирующимся паром и раствором. Греющий пар поступает через патрубок (1) в межтрубное пространство аппарата, конденсируется и удаляется через патрубок (12). Аппарат предназначен для растворов с незначительным образованием нерастворимых отложений на теплообменных поверхностях, удаляемых механическим способом. С этой целью камера вынесена и доступна для очистки.

Из аппаратов с естественной циркуляцией применяются аппараты (рис. 4.4, *б*) вертикального типа с внешней циркуляционной трубой.

Раствор через патрубок (12) поступает в кольцевой зазор, образованный обечайкой греющей камеры и обечайкой корпуса выпарного аппарата III, используемой в качестве циркуляционной трубы. Раствор, опускаясь вниз, попадает в кипяtilьные трубки. Путем подвода теплового потока в межтрубную часть греющей камеры раствор в трубках начинает кипеть и подниматься в верхнюю часть аппарата, где в сепараторе II происходит отделение вторичного пара от раствора. Вторичный пар отводится через патрубок (6), а крепкий раствор – через патрубок (2). Оставшаяся часть раствора в аппарате опускается вниз по циркуляционной трубе. Циркуляция осуществляется за счет разности удельных весов раствора после сепарации пара и парожидкостной эмульсии в трубках. Аппараты могут успешно использоваться на растворах с небольшим выделением твердой фазы из раствора.

Этот аппарат по конструктивному оформлению подобен аппарату с естественной циркуляцией и вынесенной зоной кипения (рис. 4.5).

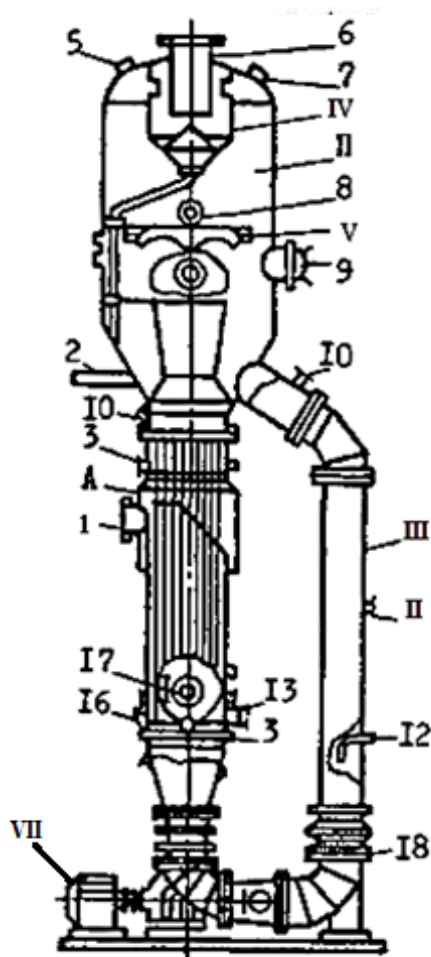


Рисунок 4.5 – Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией, соосной греющей камерой и вынесенной зоной кипения: VII – циркуляционный насос с электродвигателем; 18 – компенсатор (остальные обозначения см. рис. 4.1.)

Отличие состоит в том, что он дополнен циркуляционным насосом, устанавливаемом между греющей камерой и циркуляционной трубой. Циркуляция раствора осуществляется по замкнутому контуру: сепаратор,

циркуляционная труба, греющая камера, сепаратор. Насос обеспечивает скорость раствора в трубках 2 – 2,5 м/сек; потребляемая мощность двигателя 250 кВт, поверхность теплообмена до 2000 м² и выше. Такого типа аппараты нашли широкое распространение при выпаривании щелоков целлюлозного производства.

В особую группу выпарных аппаратов следует выделить аппараты, работающие по принципу падающей пленки. Отличием этих аппаратов от других типов является иной механизм теплопроцесса в них. В аппаратах с падающей пленкой теплообмен к раствору практически не зависит от поверхностной плотности теплового потока. Вследствие наличия устойчивой пленки при входе в трубы теплопроцесс здесь интенсивен даже в режиме нагрева раствора и поверхностного кипения. В аппаратах практически отсутствует гидростатическая депрессия. Перечисленные особенности сделали его незаменимым для работы в условиях вакуумного корпуса, где достигаются коэффициенты теплопередачи 1300 – 1400 Вт/м²·°С против 600 – 1000 Вт/(м²·°С) в аппаратах других типов без принудительной циркуляции.

На рисунке 4.6 представлен выпарной аппарат с падающей пленкой. Отличие этого аппарата от аппарата с восходящей пленкой по конструктивному оформлению состоит в том, что раствор здесь подается сверху, а пар отводится снизу. Раствор поступает в верхнюю растворную камеру I. Для создания пленочного движения раствора по трубам применяются различные оросительные устройства. Наибольшее применение нашли различного типа насадки, устанавливаемые в каждую кипятельную трубку. Поступая в такие насадки (рис. 4.6), поток закручивается и стекает по периметру трубы. Образующийся вторичный пар в теплопроцессе между конденсирующимся греющим паром и раствором движется практически по всему сечению трубы параллельно с пленкой раствора, затем пар и раствор попадают в сепаратор II, откуда вторичный пар отводится из аппарата через штуцер (б), а раствор через патрубков (2). Греющий пар поступает через патрубков (1), а конденсат удаляется через патрубков (2). Основным конструктивным недостатком этого типа аппаратов является пленкообразующие устройства. Тангенциальные насадки надежны, обеспечивают идеальное распределение потока по трубам, но ремонт аппаратов с заменой таких насадок встречает определенные трудности.

Основная причина, по которой пленочные аппараты не рекомендуются для концентрирования растворов с накипеобразующими компонентами, – кристаллизация солей в непосредственной близости стенок труб. Для полной замены насадок, например, одного кипяльника с поверхностью теплообмена 700 м² необходимо изготовить 643 насадки. В настоящее время ведется активный поиск простых и надежных оросительных устройств. Особенности процесса в выпарных аппаратах с падающей пленкой делают их интересными для концентрирования растворов с обильным выделением твердой фазы. При этом не наблюдается «запечатывания» труб, как это имеет место в аппаратах других типов. В настоящее время выпаривание растворов на основе падающей пленки является приоритетным как в отечественной практике, так и за рубежом.

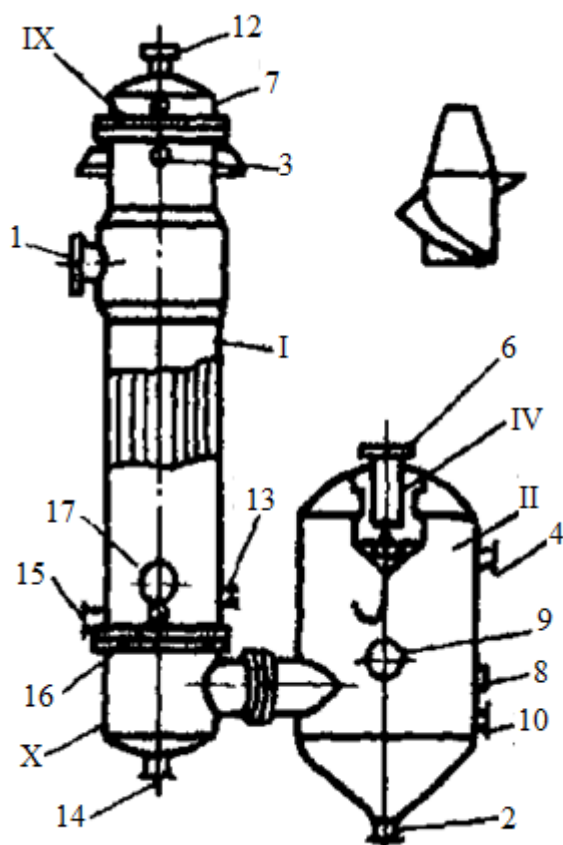


Рисунок 4.6 – Выпарной аппарат с падающей пленкой: I – верхняя растворная камера; X – нижняя растворная камера (остальные обозначения см. рис. 4.1.)

Выпарные станции целлюлозных заводов, как правило, укомплектованы выпарными аппаратами с принудительной циркуляцией и многоходовым движением раствора по кипяtilьным трубкам выпарного аппарата. В последнее время находят развитие выпарные аппараты с падающей пленкой с кипяtilьниками, выполненными из профильных или гладких пластин.

На рисунке 4.7 приведена конструкция двухходового выпарного аппарата фирмы «Розенблад», как наиболее распространенная на отечественных целлюлозных предприятиях. Двухходовыми аппаратами на станциях этой фирмы выполняются один или два последних по ходу щелока аппарата, так как на последних ступенях выпаривания объем раствора становится недостаточным для устойчивого гидродинамического режима течения в кипяtilьных трубах.

Применение двухходовых аппаратов позволяет комплектовать выпарную станцию унифицированными по поверхности теплообмена корпусами при уменьшающемся расходе щелока на последних ступенях выпаривания. Кипяtilьная камера *A* и сепаратор *B* расположены соосно. Аппарат полностью сварной с кольцами жесткости (8), равномерно расположенными по высоте кипяtilьника.

Достаточная сепарация в аппарате достигается за счет большого объема сепаратора. Для надежности сепарации предусмотрен также зонт *Д*.

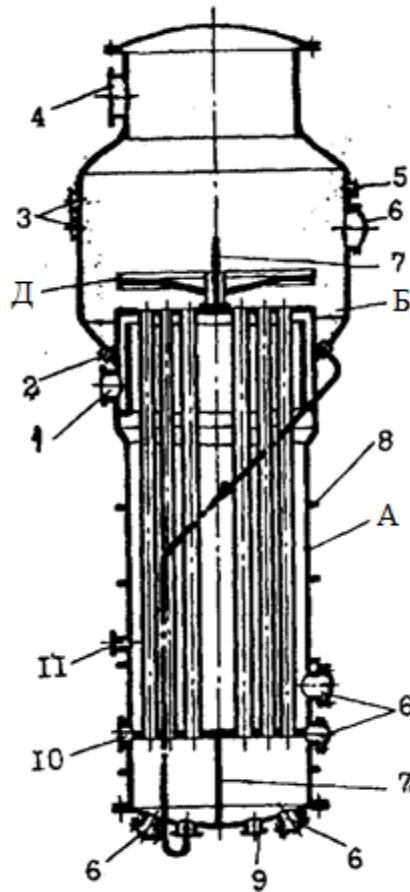


Рисунок 4.7 – Двухходовой выпарной аппарат фирмы «Розенблад»: А – кипяtilьник; Б – сепаратор; Д – отражательный зонд; 1 – вход греющего пара; 2 – выход щелока; 3 – смотровое окно; 4 – выход вторичного пара; 5 – штуцер щелокоотводчика; 6 – люк; 7 – разделяющая перегородка; 8 – кольцо жесткости; 9 – вход щелока; 10 – выход пароконденсатной смеси; 11 – подвод пара от расширителя конденсата

Из кипяtilьника удаляется до 10 % греющего пара с несконденсировавшимися газами и конденсатом. Благодаря этому обеспечивается непрерывная вентиляция кипяtilьника, а нижние концы труб, не затопленные конденсатом, омываются паром и активно участвуют в теплообмене. Отводимая парогазовая смесь направляется в теплообменники для подогрева щелока. Нижняя щелочная камера корпуса и нижняя часть сепаратора разделены перегородкой (7) на две части. Щелок входит в первую половину щелочной камеры через патрубок (9), проходит вверх по половине пучка труб, возвращается из сепаратора по опускной трубе во вторую половину щелочной камеры и проходит оставшуюся часть трубного пучка. Выпаренный раствор удаляется из сепаратора через патрубок (2). Его расход контролируется поплавковым щелокоотводчиком.

К конструктивным особенностям аппаратов различных систем можно отнести устройство сепараторов, подвод к кипяtilьнику греющего пара

(радиальный и тангенциальный) и отвод конденсата. Во многих аппаратах и сепараторах отражательный зонт является единственным сепарирующим устройством («Розенблад» и др.). Достаточная сепарация пара при этом достигается за счет большого объема сепаратора. Аппараты с такими сепараторами обладают наименьшими гидродинамическими депрессиями. Сепараторы аппаратов ряда фирм снабжены, кроме отражательного зонта, сепарирующими устройствами, увеличивающими гидродинамические депрессии, но повышающими качество сепарации пара. К таким устройствам следует отнести: центробежные брызгоотделители, проволочные многорядные сетки и т. д.

У ряда конструкций аппаратов в кипятыльниках поддерживается некоторый уровень конденсата. Благодаря этому нижние концы кипятыльных труб, затопленные конденсатом, не участвуют в активном теплообмене. По нашему мнению, перспективной будет организация работы аппарата, при которой конденсат из кипятыльника будет отводиться полностью, и кипятыльные трубы омываться паром по всей высоте.

На рисунке 4.8 представлена схема устройства выпарного аппарата фирмы «Лурги» с гравитационным течением выпариваемого раствора. Питательный раствор поступает в верхнюю щелоковую камеру (1) кипятыльника (2) и стекает вниз по стенкам кипятыльных труб в виде пленки. В сепараторе (4) вторичный пар отделяется от раствора при помощи решетки (7). Концентрированный щелок собирается в нижней щелоковой камере (5) и отводится из аппарата через патрубок (6). Вторичный пар отводится из сепаратора через патрубок (3). Греющий пар поступает в кипятыльник через патрубок (9), конденсат удаляется из патрубка (8).

В последнее время все более широкое распространение получают выпарные аппараты с пластинчатой поверхностью теплообмена. Станция из таких аппаратов установлена на одном из заводов американской фирмы «Бакай». Установка состоит из семи корпусов, работающих по противоточной пятиступенчатой схеме. Три корпуса с одинаковой поверхностью теплообмена, $F = 2500 \text{ м}^2$, установлены на первой ступени выпаривания. По одному такому же корпусу на остальных ступенях выпаривания. Щелок подается в щелоковую камеру, расположенную сверху аппарата, распределяется с помощью распределительного устройства по каналам между кипятыльными пластинами и свободно стекает в нижнюю щелоковую камеру. Из нижней щелоковой камеры часть раствора возвращается на рециркуляцию, часть направляется в следующий корпус. Удельный расход греющего пара на батарею составляет 0,22 кг/кг.

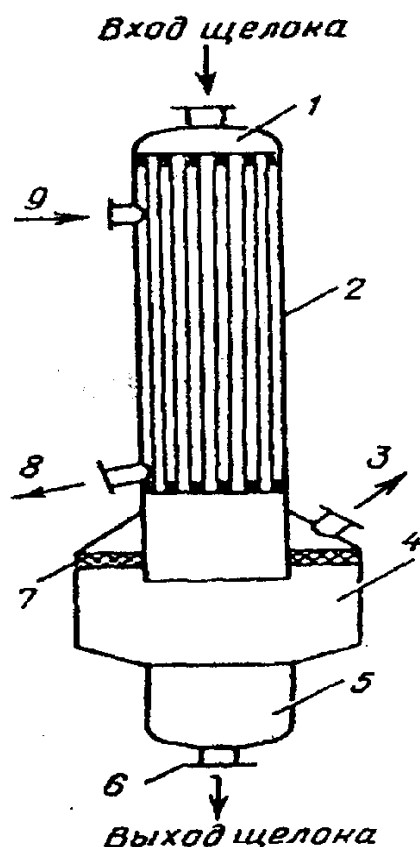


Рисунок 4.8 – Выпарной аппарат с гравитационным течением фирмы «Лурги»:
 1 – верхняя щелочная камера; 2 – кипятыльник; 3 – патрубок для отвода вторичного пара; 4 – сепаратор; 5 – нижняя щелочная камера; 6 – патрубок для отвода щелока; 7 – решетка; 8 – патрубок для отвода конденсата; 9 – подача греющего пара

Выпарной аппарат фирмы «Альстрем» с применением гравитационного течения раствора представлен на рисунке 4.9. Поверхность теплообмена аппарата состоит из профилированных пластинчатых элементов размером 7300 мм, расположенных параллельно с шагом 40 мм. Щелок с помощью циркуляционного насоса *H* подается в распределитель щелока (6), равномерно распределяется на верхней части элементов и стекает тонким слоем, полностью покрывая наружную поверхность пластины. Поскольку кипятыльные элементы свободно подвешены внутри корпуса аппарата, образовавшийся вторичный пар имеет возможность неограниченного выхода из щелей, образованных кипятыльными элементами. Такая организация отвода вторичного пара незначительно сказывается на пленочном течении упариваемого щелока. Вторичный пар проходит через каплеотделитель *B* и отводится из сепаратора через патрубок (7). Укрепленный щелок собирается на дне корпуса аппарата и через циркуляционные трубы *B* и *Г* циркуляционным насосом подается в аппарат. Отвод щелока конечной концентрации осуществляется через патрубок (8). Греющий пар подается через патрубок (5) и конденсируется внутри кипятыльных элементов, образованных из попарно сваренных по кромкам

профильных листов. Конденсат отводится из сборника конденсата (3) через патрубков (1).

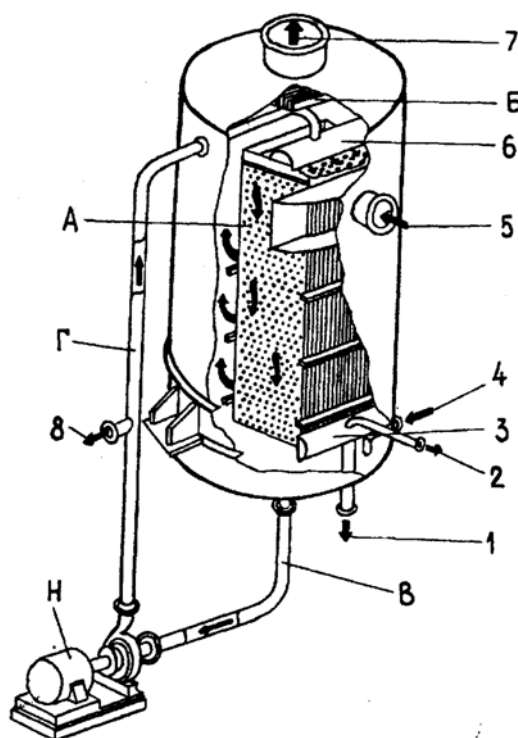


Рисунок 4.9 – Выпарной аппарат фирмы «Альстрем»: А – кипяtilьник; Б – каплеотделитель; В и Г – циркуляционные трубы; Н – циркуляционный насос; 1 – патрубков выхода конденсата; 2 – штуцер для отвода неконденсирующихся газов; 3 – сборник конденсата; 4 – патрубков для подвода щелока; 5 – патрубков входа греющего пара; 6 – распределитель щелока; 7 – патрубков для отвода вторичного пара; 8 – патрубков для отвода щелока

4.2. Выпарные аппараты второй стадии концентрирования (концентраторы)

В 80-х годах прошлого столетия финская фирма «Розенлев» и фирма «Альстрем» (рис. 4.9) начали производство суперконцентраторов с применением гравитационного течения раствора.

Поверхность теплообмена образована здесь не кипяtilьными трубками, а плоскими элементами – ламелями размером 1,2 x 7 м, расположенными параллельно с шагом 40 мм к оболочке. Пар конденсируется на внутренней стороне ламелей. Черный щелок циркулирует при помощи насоса в верхнюю растворную камеру, где при помощи распределительного устройства равномерно распределяется по наружной поверхности ламель и равномерно стекает в нижнюю растворную камеру. Образовавшийся вторичный пар выходит из промежутков между ламелей равномерно по всей высоте ламелей в паровое пространство. Позже на основе ламель стали проектироваться и выпарные аппараты первой стадии концентрирования.

Концентраторы могут являться последними по ходу щелока корпусами выпарной батареи или в составе второй стадии выпаривания в одно или много ступенчатой выпарной батарее. Во всех случаях конструирование концентраторов основывается на следующих принципах:

- использование принудительной циркуляции;
- создание вынесенной зоны кипения;
- применение гравитационного течения раствора.

Первые два принципа использованы при создании аппаратов для выпаривания сульфитных щелоков. Поэтому они могут быть применены в качестве концентраторов с соответствующей заменой циркуляционного оборудования.

На рисунке 4.10 показан концентратор «Гортон», разработанный компанией «Сивек» (Франция).

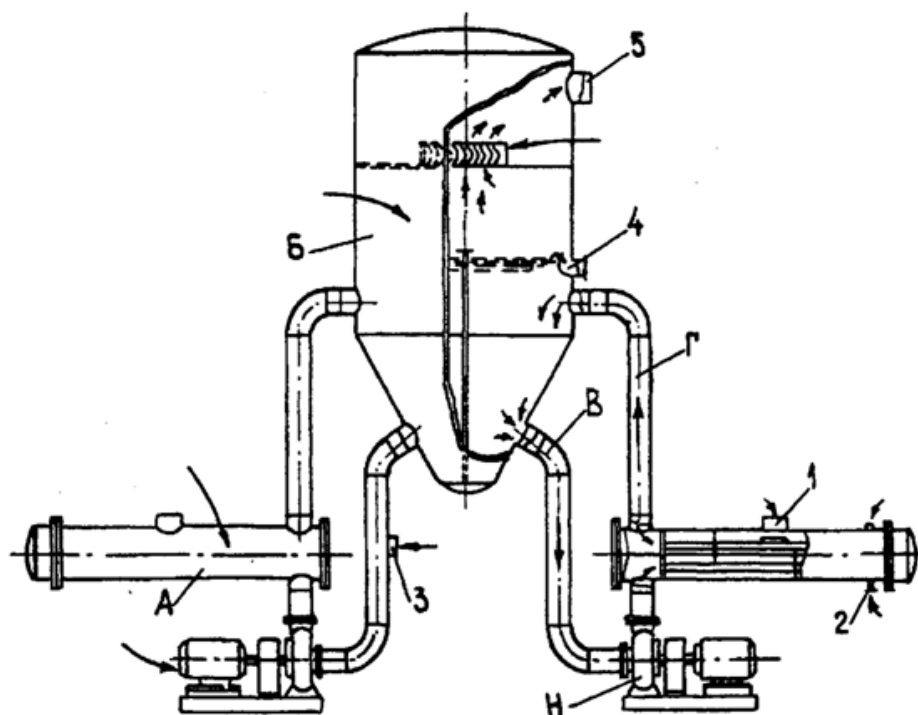


Рисунок 4.10 – Концентратор фирмы «Гортон»: А – греющая камера; Б – сепаратор; В – циркуляционная труба; Г – гидростатическая труба; Н – циркуляционный насос; 1 – штуцер для входа греющего пара; 2 – патрубок для отвода конденсата; 3 – патрубок для подвода щелока; 4 – патрубок для отвода щелока; 5 – патрубок для отвода вторичного пара

Греющая камера концентратора представляет собой горизонтальный трубчатый парожидкостный теплообменник. В трубках греющей камеры кипение не происходит за счет давления столба щелока в гидростатической трубе Г, что уменьшает загрязнение трубок по сравнению с конструкциями, в которых трубки работают в режиме кипения. Щелок вскипает в сепараторе с достаточно большим объемом, обеспечивающим сепарацию парорастворной смеси. Концентратор состоит из двух горизонтальных теплообменников, общего

сепаратора, разделенного на два отсека вертикальной перегородкой в жидкостной зоне, двух контуров циркуляции с насосами, каждый из которых подает щелок с одной стороны сепаратора на свой теплообменник, и соответствующих трубопроводов. Для очистки аппарата возможна перемена ходов, предусматривающая подачу более слабого щелока на сторону более крепкого.

Конструкция двухходового концентратора фирмы «Розенлев-Свенсон» представлена на рисунке 4.11.

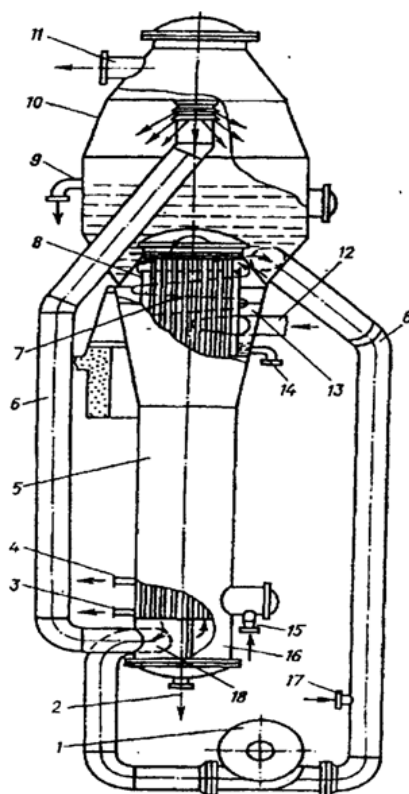


Рисунок 4.11 – Двухходовой концентратор фирмы «Розенлев-Свенсон»:

- 1 – циркуляционный насос; 2 – штуцер для промывки концентратора;
 3 – штуцер для отвода конденсата; 4 – штуцер для отвода несконденсировавшихся газов; 5 – кипятильник; 6 – циркуляционные трубы;
 7 – кипятильные трубы; 8 – отражательная стенка; 9 – патрубок отвода крепкого щелока; 10 – сепаратор; 11 – патрубок отвода вторичного пара;
 12 – патрубок подвода греющего пара; 13 – отстойник; 14 – отвод щелока из отстойника; 15 – патрубок для подвода конденсата из предыдущего аппарата;
 16 – первая половина нижней щелочной камеры; 17 – патрубок подачи щелока во всасывающую циркуляционную трубу; 18 – нижняя щелочная камера

Аппарат работает с использованием принудительной циркуляции и применением гравитационного течения раствора. Циркуляция осуществляется центробежным циркуляционным насосом (1), который забирает щелок из нижней части сепаратора (10) и подает его в первую половину нижней

щелоковой камеры (16) кипяtilьника (5). Оттуда по пучку кипяtilьных труб (7) щелок поднимается вверх и подогревается.

В поворотной камере раствор делает поворот, попадает в оставшиеся трубы кипяtilьного пучка и, опускаясь по ним вниз, вскипает. Смесь пара и щелока выбрасывается в сепаратор (10) по напорной циркуляционной трубе (6), присоединенной ко второй половине щелоковой камеры (18). Плотный щелок отбирается из центральной части сепаратора (10).

Суперконцентраторы (рис. 4.12) рассчитаны на упаривание черного щелока или смеси черного щелока с сульфатом до 75 – 80 % абсолютно сухого вещества. Щелок с концентрацией 60 – 65 % после выпарной станции поступает в нижнюю щелоковую камеру (2). Принудительная циркуляция щелока обеспечивается центробежным насосом (1), перекачивающим щелок из нижней щелоковой камеры в верхнюю, расположенную в сепараторе. Из верхней щелоковой камеры щелок поступает в кипяtilьные трубы и стекает вниз по их внутренним поверхностям, при этом выпариваясь. Образовавшийся вторичный пар вместе с частью щелока поднимается вверх по центральной циркуляционной трубе большого сечения (11) в сепаратор (8). Из сепаратора пар отводится через патрубок (9). Выпаренный раствор с концентрацией 78 – 80 % отбирается из напорного участка циркуляционной трубы циркуляционного насоса (1) через патрубок (12). Греющий пар давлением 1 МПа подается в кипяtilьник (5) суперконцентратора через патрубок (7). С целью обеспечения возможности перекачки щелока циркуляционным насосом и достижения при этом приемлемых коэффициентов теплопередачи, температура кипения щелока доводится до 170 °С. Вследствие этого работа суперконцентратора с низкими температурными напорами возможна только при применении принципа гравитационного течения раствора.

Фирмы «Альстрем» и другие производят суперконцентраторы с гравитационным течением раствора и пластинчатыми кипяtilьными элементами.

Суперконцентраторы не имеют принципиальных отличий от конструкции пластинчатого выпарного аппарата фирмы «Альстрем», представленного на рисунке 4.9.

Основное их отличие заключается в том, что пакет кипяtilьных пластин суперконцентратора разделен на три равные части, каждая из которых выпаривает щелок последовательно. Каждая из трех секций имеет собственную систему принудительной циркуляции. По мере загрязнения кипяtilьной поверхности последовательность прохождения щелоком секций автоматически меняется. Таким способом поддерживается относительная чистота и работоспособность поверхности теплообмена.

В случае необходимости чистка поверхности пластин от накипи может производиться химическим способом; для механической очистки и проведения ремонтных работ предусмотрены площадки обслуживания внутри корпуса, снабженные лазами. Для получения концентрации щелока выше 70 % (при этом резко снижаются выбросы серосодержащих соединений с дымовыми газами в

атмосферу из СРК) предусматривается работа концентратора на смеси щелока с сульфатом.

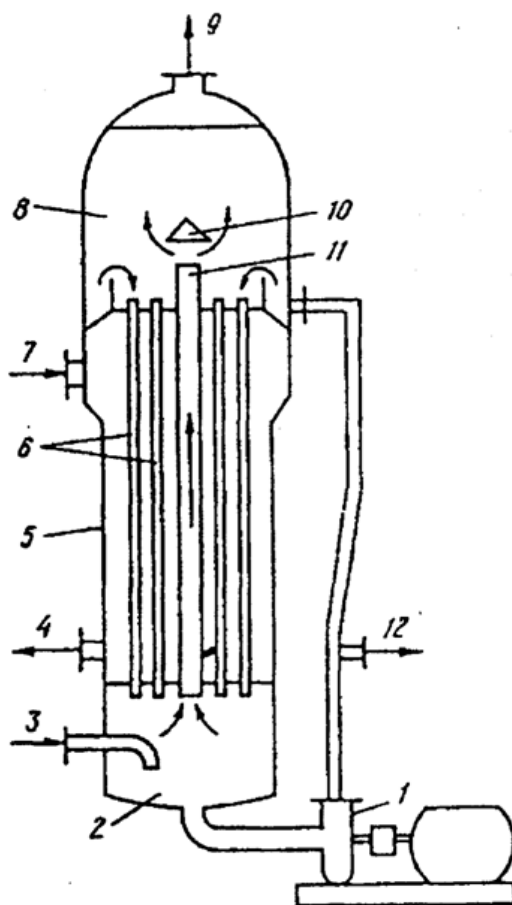


Рисунок 4.12 – Суперконцентратор фирмы «Розенлев» с гравитационным течением выпариваемого раствора:

1 – циркуляционный насос; 2 – нижняя щелочная камера; 3 – патрубок входа щелока; 4 – патрубок для отвода конденсата; 5 – кипятивник; 6 – кипятивильные трубы; 7 – патрубок для подвода греющего пара; 8 – сепаратор; 9 – патрубок для отвода вторичного пара; 10 – отбойный зонт; 11 – центральная циркуляционная труба; 12 – патрубок для отбора выпаренного раствора

4.3. Чистота вторичного пара в выпарных аппаратах

Сепаратор выпарного аппарата является одним из ответственных его элементов. Объем парового пространства в выпарных аппаратах определяет чистоту образующегося пара. Унос капель раствора загрязняет конденсат и приводит к снижению коэффициента теплопередачи из-за загрязнений в последующих корпусах выпарных батарей. Величина уноса характеризуется объемным напряжением парового пространства R'_V . Объемное напряжение парового пространства определяется отношением количества образующегося пара W , м³/ч, к объему парового пространства в аппарате V , м³.

$$R'_V = W/V \quad (4.1)$$

Наибольшее значение R'_V , при котором пар остается сухим, называют предельным напряжением парового пространства. При давлении пара 0,1 МПа $R'_V = 1600-1700 \text{ м}^3/(\text{м}^3\text{ч})$. При давлении пара много выше 0,1 МПа можно пользоваться формулами:

$$R = 435 \cdot p^{-0,631}, \text{ м}^3/\text{м}^3; \quad (4.2)$$

$$\omega = 0,437 \cdot p^{-0,638}, \text{ м/с}, \quad (4.3)$$

где R – относительный (к общему объему) объем парового пространства; p – давление пара, ата; ω – максимальная скорость пара, м/с.

Для уменьшения габаритов парового пространства и обеспечения сухости пара и предотвращения брызгоуноса используют различные конструкции брызгоуловителей. Они могут быть смонтированы как внутри сепараторов выпарных аппаратов, так и вынесены за их пределы. Принцип работы брызгоуловителей основан на использовании центробежного эффекта, силы тяжести и способности капель смачивать поверхность. В эксперименте установлена возможность осушения влажного пара до остаточной влажности по массе 0,5 – 0,3 %. С этой целью на пути влажного пара, движущегося со скоростью 15 – 20 м/с, необходимо обеспечить несколько крутых поворотов при меняющемся проходном сечении канала.

Вопросы для самоконтроля

1. Почему в промышленности чаще всего используют выпарные установки с трубчатой теплообменной поверхностью?
2. Почему кажущийся уровень раствора в аппарате рекомендуется поддерживать на 1/4 высоты кипяtilных трубок?
3. Преимущества выпарных аппаратов с вынесенной зоной кипения?
4. Почему пленочные аппараты не рекомендуются для концентрирования растворов с накипеобразующими компонентами?
5. Конструктивные особенности выпарных аппаратов с пластинчатой поверхностью теплообмена?
6. На каких принципах основывается конструирование концентраторов?
7. Конструктивные особенности греющей камеры концентраторов?
8. Что такое суперконцентраторы?
9. Для чего в выпарных аппаратах предусматривают брызгоуловители?
10. Как определяется объемное напряжение парового пространства выпарного аппарата?

5. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС И ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ВЫПАРНЫХ УСТАНОВОК

5.1. Температурные потери и режим работы выпарных установок

Расчет температурных потерь, возникающих при выпаривании растворов и транспортировке пара в многоступенчатых выпарных установках, является важным этапом при анализе работы выпарных установок и их проектировании. Различают три вида температурных потерь: физико-химическую, гидравлическую и гидростатическую.

Физико-химическую температурную депрессию определяют как разность между температурой кипения раствора и чистого растворителя при постоянном давлении:

$$\Theta = T_p - T, \quad (5.1)$$

где T_p – температура кипения раствора, К; T – температура образующихся паров воды, К.

Физико-химическая температурная депрессия увеличивается с повышением концентрации вещества в водном растворе. Величину Θ можно определить по справочнику или специальным графикам. На рисунке 5.1 показана зависимость нормальной физико-химической температурной депрессии щелоков целлюлозного производства от концентрации сухих веществ. На рисунке 5.2 – зависимость поправки на величину внешнего давления от температуры насыщенного пара.

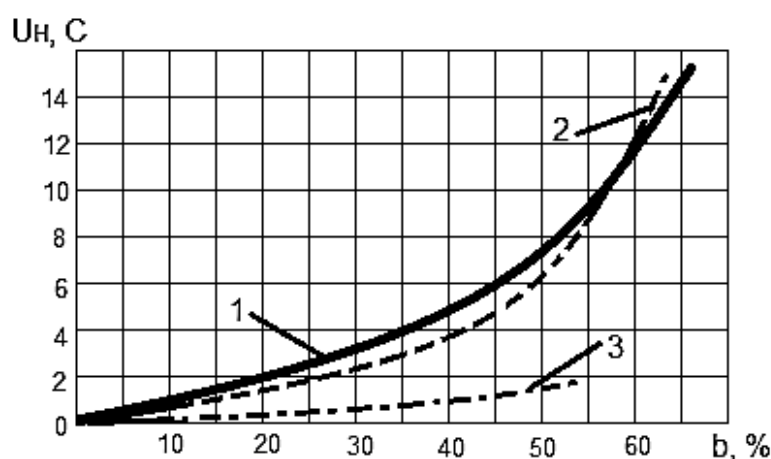


Рисунок 5.1 – Зависимость нормальной физико-химической температурной депрессии щелоков целлюлозного производства от концентрации сухих веществ:

- 1 – черный сульфатный щелок; 2 – нейтральные сульфитные щелока;
3 – сульфатный щелок на кальциевом основании

Справочные данные обычно относятся к условиям кипения жидкости при атмосферном давлении. На практике выпаривание ведут как под давлением, так и под вакуумом.

Поправка на температуру при определении физико-химической температурной депрессии Θ может быть вычислена по приближенной формуле Тищенко:

$$\Theta_1 = 0,016224 \cdot \Theta \cdot \frac{T^2}{r}, \quad (5.2)$$

где Θ – физико-химическая температурная депрессия, взятая из таблиц при давлении 760 мм рт. ст., С; T – абсолютная температура кипения раствора, К; r – теплота фазового перехода при давлении выпаривания, кДж/кг.

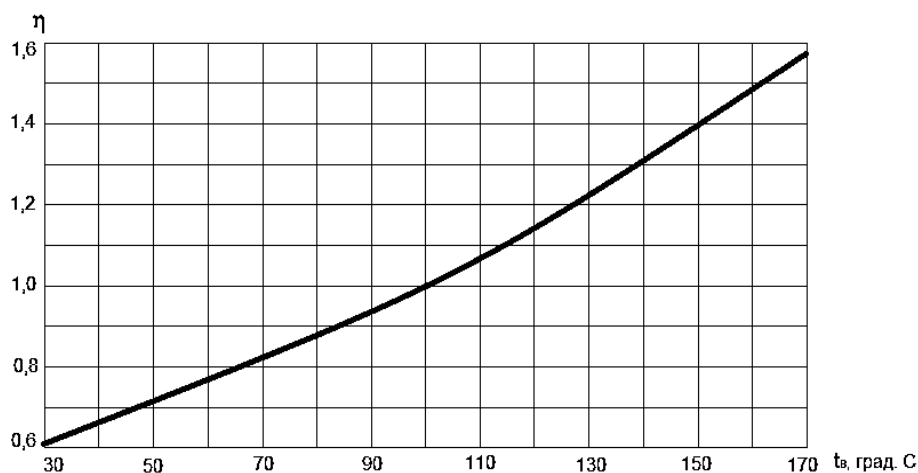


Рисунок 5.2 – Зависимость поправки на величину внешнего давления от температуры насыщенного пара

Гидростатическая температурная депрессия Δi определяется столбом раствора, находящимся в выпарном аппарате. Так как давление раствора в нижней части выпарного аппарата больше, чем в верхней части, то температура кипения в ней будет выше, чем в верхней. При высоте труб 10 м и выше эта разность может быть весьма существенной. Эта разность имеет место в выпарных аппаратах с заполненным раствором кипяtilьных труб.

В инженерных расчетах учет повышения температуры кипения раствора от добавочного столба жидкости принимают температуру кипения среднего слоя раствора в кипяtilьных трубках. Гидростатическое давление для средних слоев раствора, кгс/см², может быть определено из выражения:

$$\Delta P = \rho_{ж} \cdot h / 2, \quad (5.3)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность парожидкостной смеси в выпарном аппарате, кг/м³; h – высота столба раствора, м.

Истинное значение гидростатической депрессии меньше, чем определенное по формуле. Эта формула верна для неподвижного раствора и при отсутствии кипения. Ею можно пользоваться для расчетов выпарных аппаратов с вползающей пленкой, где раствор на 0,1 – 0,2 высоты кипяtilьных труб движется с незначительной скоростью. Для аппаратов с многократной циркуляцией раствора рекомендуется принимать потерю разности температур от гидростатической депрессии в пределах 0,6 – 2,0 °С или пренебречь ею. Заметное

влияние гидростатическая депрессия оказывает на температурные потери в аппаратах, работающих под вакуумом.

Для определения температурной потери от гидростатического давления следует просуммировать давление в паровом пространстве с гидростатическим давлением и по таблицам насыщенного водяного пара определить температуру кипения воды при общем давлении. Разность между этой температурой и температурой кипения воды при давлении в паровом пространстве отвечает искомой температурной потере. Для чисто пленочных аппаратов, как, например, аппаратов с падающей пленкой, гидростатическая депрессия не учитывается.

Гидродинамическая депрессия δt определяется как снижение давления, а, следовательно, температуры вторичного пара за счет гидравлических сопротивлений. Эти сопротивления возникают при прохождении пара через сепарационные устройства, а также при его переходе из корпуса в корпус выпарной установки. В среднем падение температуры от гидравлических сопротивлений составляет 1,0 – 1,5 °С на каждый корпус многокорпусной установки.

Общий температурный напор определяется разностью температур между температурой греющего пара на входе в кипятильник первого корпуса T_1 и температурой T_{NB} вторичного пара в кипятильнике последнего по ходу пара корпусе, т. е.:

$$\Delta T_{\text{общ}} = T_1 - T_{NB}, \text{ К.} \quad (5.4)$$

Полезный температурный напор, определяющий производительность выпарной батареи, вычисляется как разность температур греющего пара на входе в кипятильник первого корпуса T_1 и температурой T_{NP} кипения раствора в кипятильнике последнего по ходу пара корпусе, т. е.:

$$\Delta T = T_1 - T_{NP} = T_1 - (T_{NB} + \Theta + \Delta i). \quad (5.5)$$

Для многоступенчатой выпарной установки с N ступенями выпаривания:

$$\Delta T = T_1 - T_{NB} = T_1 - \left(\sum_1^N \Theta + \sum_1^N \Delta i + \sum_1^N \delta t_i \right). \quad (5.6)$$

Одним из определяющих факторов работы выпарной установки является производительность по выпаренной воде. Количество выпаренной воды можно вычислить по формуле:

$$W = S_0 - S_n = S_0 \cdot ((1 - b_0)/b_k), \quad (5.7)$$

где W – выпаренная вода в выпарной установке, кг/с; S_0 и S_n – массовый расход упариваемого раствора в начале и конце процесса, кг/с; b_0 и b_k – массовые концентрации раствора на входе и выходе из выпарной установки, %.

Концентрация раствора в n -ой ступени выпаривания можно получить из выражения:

$$b_n = \frac{b_0 \cdot S_0}{S_0 - \sum_1^n \omega_i}, \quad (5.8)$$

где $\sum_1^n \omega_i$ – выпаренная вода в выпарной установке.

5.2. Материальный баланс выпаривания

Пусть из исходного раствора A (расход A) испаряется часть растворителя (C). Оставшаяся часть (B) – это концентрат (продукт). Тогда расход исходного раствора можно выразить:

$$A = B + C. \quad (5.9)$$

Количество выпаренной воды, соответственно, выразится:

$$C = A - B, \quad (5.10)$$

где C – расход вторичного пара, кг/с; B – расход упаренного раствора, кг/с; A – расход исходного раствора, кг/с.

Введем понятие коэффициента концентрирования e .

Под коэффициентом концентрирования понимают степень концентрирования исходного раствора.

$$e = \frac{A}{B} = \frac{C_B}{C_A}. \quad (5.11)$$

Коэффициент концентрирования можно также определить как отношение концентраций упаренного и исходного растворов (масс. % сухого вещества). При испарении растворителя (рис. 5.3) из исходного раствора концентрация сухих веществ в начале процесса растет медленно с постоянной скоростью, а затем скорость роста концентрации резко возрастает, стремясь к предельному значению. После этого удаление растворителя становится невозможным.

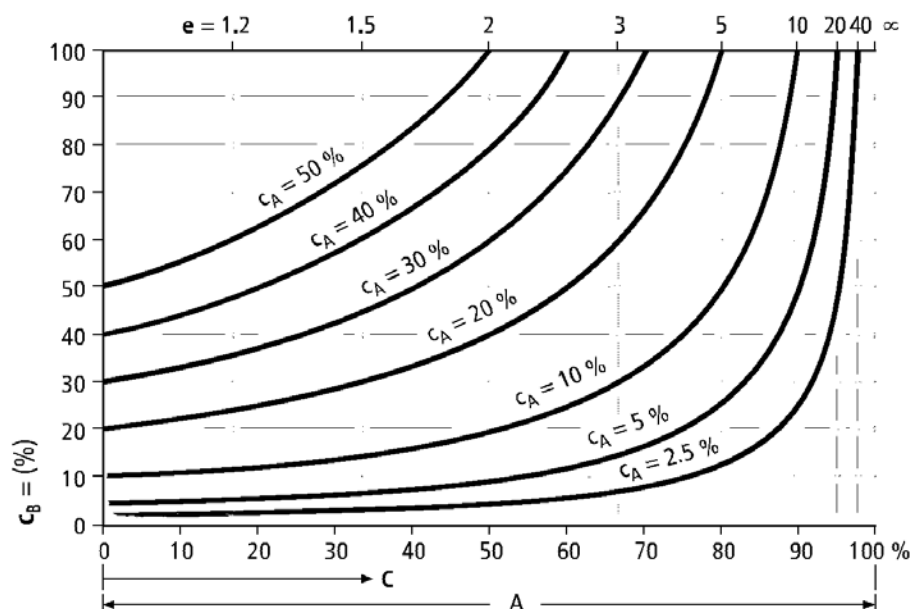


Рисунок 5.3 – Кривые роста конечной концентрации раствора в процессе выпаривания при различных значениях начальной концентрации

Чем ниже начальная концентрация C_A , тем круче поднимается кривая концентрации. Эта зависимость имеет большое значение для управления процессом выпаривания. Особенно значимым она становится при высоких

коэффициентах концентрирования, когда принимается решение об организации многостадийного процесса выпаривания.

Если известны концентрации или коэффициент концентрирования, количество концентрата и образовавшегося пара можно рассчитать:

$$B = A \cdot \frac{1}{e}. \quad (5.12)$$

$$C = A \cdot \frac{e-1}{e}. \quad (5.13)$$

5.3. Температурный режим работы МВУ

При постоянных параметрах греющего пара и вакууме в последнем корпусе удельный расход греющего пара (на тонну выпаренной воды) уменьшается с добавлением числа ступеней выпаривания. Это связано с температурными потерями в установке. Чем больше ступеней выпаривания в МВУ, тем выше потери. Если обозначить в i -ом корпусе выпарного аппарата температуру греющего пара через t , а температуру кипения раствора t' , то полезный температурный напор в нем составит:

$$\Delta t_i = t - t'.$$

Общая разность температур во всей установке соответствует разности между температурой греющего пара первого корпуса t_1 и температурой вторичного пара в последнем корпусе t_N :

$$\Delta t_{\text{общ}} = t_1 - t_N.$$

Сумму всех полезных температурных напоров по корпусам выпарной установки можно получить из уравнения:

$$\sum \Delta t_i = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_N.$$

Общая разность температур $\Delta t_{\text{общ}}$ всегда больше суммы всех полезных температурных напоров, т. е.:

$$\Delta t_{\text{общ}} > \sum \Delta t_i.$$

Это неравенство – следствие температурных потерь в каждом корпусе выпарной установки.

Зная температурные потери по корпусам выпарных аппаратов и общую разность температур в выпарной установке, можно определить полезный температурный напор:

$$\sum \Delta t_i = (t_1 - t_N) - \sum \Theta_i - \sum \Delta i - \sum \delta t_i,$$

где Θ_i , Δi , δt_i – физико-химическая, гидростатическая и гидродинамическая депрессии в i -ом выпарном аппарате, соответственно.

При проектировании и распределении полезных температурных напоров по корпусам выпарных аппаратов МВУ могут предъявляться различные требования:

- 1 – равная поверхность теплообмена кипятильников всех корпусов МВУ;
- 2 – минимальная общая поверхность теплообмена;

3 – минимальная общая поверхность теплообмена и равная для кипятильников каждого корпуса.

Для выполнения первого требования необходимо выполнение условия:

$$\Delta t_n / \Delta t_1 = (Q_n / Q_1) \cdot (K_1 / K_n), \quad (5.14)$$

где Δt_n , Δt_1 , Q_n , Q_1 , K_1 , K_n – полезные температурные напоры, тепловые потоки, коэффициенты теплопередачи в n -ом и первом корпусе, соответственно.

Выполнение второго требования определяется условием:

$$\Delta t_n / \Delta t_1 = \sqrt{(Q_n / Q_1) \cdot (K_1 / K_n)}. \quad (5.15)$$

Выполнение третьего требования не трудно вывести из сравнения условий (4.14) и (4.15).

$\Delta t_n / \Delta t_1 = \sqrt{\Delta t_n / \Delta t_1}$ возможно лишь при $\Delta t_n / \Delta t_1 = 1$.

Но тогда $\Delta t_n = \Delta t_1$.

Кроме того, тепловые потоки должны быть пропорциональны коэффициентам теплопередачи. На практике наибольшее значение имеет первое требование с целью унификации выпарных аппаратов.

Выполнение третьего требования встречает определенные трудности, так как оно может быть реализовано лишь при определенном законе распределения тепловых потоков по корпусам выпарных аппаратов. Это распределение становится возможным при наличии потребителей пара низких параметров.

Определение тепловых потоков по корпусам выпарных аппаратов можно вычислить, имея распределение выпаренной воды.

$$Q_n = W_n \cdot [i_n - c \cdot t_n], \quad (5.16)$$

где Q_n , W_n , i_n , t_n – тепловой поток, выпаренная вода, энтальпия вторичного пара, температура раствора на входе в аппарат, соответственно; c – теплоемкость воды.

5.4. Определение поверхности теплообмена кипятильников выпарных аппаратов

Для практических расчетов, как отмечалось, представляет интерес расчет выпарной установки с равными теплообменными поверхностями каждого кипятильника выпарного аппарата. Для выполнения этого условия требуется знать распределение полезных температурных напоров по определенному закону:

$$F_1 = F_2 = F_n = \text{idem}, \quad (5.17)$$

$$\Delta t_n / \Delta t_1 = (Q_n / Q_1) \cdot (k_1 / k_n). \quad (5.18)$$

Действительно, из (5.15) и (5.16) и уравнений теплопередачи, составленных для каждого корпуса, имеем:

$$F_n = Q_1 / (K_1 \cdot \Delta t_1) = Q_2 / (K_2 \cdot \Delta t_2) = Q_3 / (K_3 \cdot \Delta t_3) = Q_n / (K_n \cdot \Delta t_n). \quad (5.19)$$

Из (5.19):

$$\Delta t_2 / \Delta t_1 = (Q_2 / Q_1) \cdot (K_1 / K_2) = x_2$$

$$\Delta t_3 / \Delta t_1 = (Q_3 / Q_1) \cdot (K_1 / K_3) = x_3$$

$$\Delta t_n / \Delta t_1 = (Q_n / Q_1) \cdot (K_1 / K_n) = x_n,$$

тогда

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 \cdot x_2,$$

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 \cdot x_3,$$

$$\Delta t_n = \Delta t_1 \cdot x_n,$$

$$\Delta t_N = \Delta t_1 \cdot x_N.$$

$$\sum \Delta t_n = \Delta t_1 \cdot (1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n + \dots x_N), \quad (5.20)$$

$$\Delta t_1 = \sum \Delta t_n / (1 + x_2 + x_3 + \dots x_n + \dots x_N). \quad (5.21)$$

Из (5.21) с учетом (5.20) имеем:

$$\Delta t_1 = \sum \Delta t_n / (1 + (Q_2 / Q_1) \cdot$$

$$\cdot (K_1 / K_2) + (Q_3 / Q_1) \cdot (K_1 / K_3) + \dots + (Q_n / Q_1) \cdot (K_1 / K_n) + \dots + (Q_N / Q_1) \cdot (K_1 / K_N) =$$

$$= \sum \Delta t_n \cdot (Q_1 / K_1) / Q_1 / K_1 \cdot [1 + K_1 / Q_1 \cdot (Q_2 / K_2 + Q_3 / K_3 + \dots + Q_n / K_n + \dots + Q_N / K_N)] =$$

$$= \sum \Delta t_n \cdot (Q_1 / K_1) / Q_1 / K_1 + Q_2 / K_2 + Q_3 / K_3 + \dots + Q_n / K_n + \dots + Q_N / K_N,$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_1 \cdot x_2 =$$

$$= \left[\sum \Delta t_n \cdot Q_2 / Q_1 \cdot K_1 / K_2 \cdot Q_1 / K_1 \right] / Q_1 / K_1 + Q_2 / K_2 + Q_3 / K_3 + \dots + Q_n / K_n + \dots + Q_N / K_N =,$$

$$\Delta t_3 = \Delta t_1 \cdot x_3 =$$

$$= \left[\sum \Delta t_n \cdot Q_3 / K_3 \right] / Q_1 / K_1 + Q_2 / K_2 + Q_3 / K_3 + \dots + Q_n / K_n + \dots + Q_N / K_N,$$

$$\Delta t_n = \Delta t_1 \cdot x_n =$$

$$= \left[\sum \Delta t_n \cdot Q_n / K_n \right] / Q_1 / K_1 + Q_2 / K_2 + Q_3 / K_3 + \dots + Q_n / K_n + \dots + Q_N / K_N.$$

Поверхность теплообмена из формулы (5.20) с учетом (5.21) выразится:

$$F_n = \left(1 / \sum \Delta t_n \right) \cdot (Q_1 / K_1 + Q_2 / K_2 + Q_3 / K_3 + \dots + Q_n / K_n + \dots + Q_N / K_N). \quad (5.22)$$

Распределение температур при наименьшей величине теплообменной поверхности удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\Delta t_1 = \left(\sqrt{Q_1 / K_1} \right) / \left(\sum \sqrt{Q_n / K_n} \right) \cdot \sum \Delta t_n,$$

$$\Delta t_2 = \left(\sqrt{Q_2 / K_2} \right) / \left(\sum \sqrt{Q_n / K_n} \right) \cdot \sum \Delta t_n,$$

$$\Delta t_n = \left(\sqrt{Q_n / K_n} \right) / \left(\sum \sqrt{Q_n / K_n} \right) \cdot \sum \Delta t_n.$$

Распределение полезных температурных напоров при наименьшей общей теплообменной поверхности и одинаковых поверхностях всех корпусов.

Выполнение этого условия возможно при равенстве полезных температурных напоров по всем корпусам, т. е.

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 \dots Q_n = \left(\sum \Delta t \right) / n,$$

где n – число ступеней выпаривания.

Из выполнения этого условия следует:

$$Q_1 / K_1 = Q_2 / K_2 = \dots = Q_n / K_n$$

или

$$Q_1 / Q_2 \dots / Q_n = K_1 / K_2 / \dots / K_n.$$

Не трудно увидеть, что для рассматриваемого случая тепловые нагрузки корпусов должны быть обратно пропорциональны коэффициентам теплопередачи в них. Это условие может быть выполнено при определенном количестве отбираемого на сторону вторичного пара. При возможности использования такого пара данный способ распределения полезной разности температур может оказаться наиболее целесообразным.

5.5. Тепловые расчеты многоступенчатых выпарных батарей

Тепловые расчеты выпарных батарей разделяют на проектные и поверочные. Проектный расчет выполняют при проектировании с целью определения теплообменных поверхностей кипятильников выпарных аппаратов и теплообменников. Поверочный расчет выполняют при анализе работы действующих выпарных батарей.

Поверочный расчет выпарных батарей

Поверочный расчет позволяет получить информацию о распределении выпаренной воды, определить коэффициенты теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов, подогревателей и, таким образом, проанализировать работу всей батареи и отдельных теплоиспользующих элементов.

Для решения систем линейных алгебраических уравнений требуется предварительно записать систему в матричной форме.

Приведение системы уравнений полного теплового баланса (СУПТБ) к матричной форме

Рассмотрим получение СУПТБ на конкретном примере концентрирования раствора в четырехкорпусной выпарной батарее смешанного тока (рис. 5.4).

4 корпус:

$$W_3 \cdot (i_3 - \tau_4 \cdot c_B) \cdot \varphi = W_4 \cdot i_4 + (S_0 \cdot c_0 - W_3 \cdot c_B - W_4 \cdot c_B) \cdot t_4 - (S_0 \cdot c_0 - W_3 \cdot c_B) \cdot t_3.$$

Здесь пять неизвестных величин: $W_1 - W_4$ и φ , а уравнений – 4. Пятое уравнение получим из соображений, что суммарный расход выпаренной воды, $\sum_{i=1}^4 W_i$, должен быть постоянным и равным:

$$W_{об}^* = S_0 \cdot \left(1 - \frac{C_{и}}{C_{к}}\right),$$

где $C_{и}$, $C_{к}$ – массовые концентрации исходного и укрепленного раствора, соответственно.

Отсюда получим уравнение:

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = W_{об}^*.$$

В дальнейшем понадобится еще соотношение, полученное умножением на φ :

$$W_1 \cdot \varphi + W_2 \cdot \varphi + W_3 \cdot \varphi + W_4 \cdot \varphi = W_{об}^* \cdot \varphi.$$

В матричной форме СУПТБ запишется как:

$$[A(\varphi)] \cdot [W] = [B(\varphi)]. \quad (5.23)$$

Отметим, что система (5.23) при $\varphi = const$ линейна. Подбором параметра φ можно обеспечить выполнение уравнения (5.23). Математическая задача формулируется таким образом: одномерный поиск минимума формы $|\sum_{j=1}^4 W_j - W_{об}^*| \rightarrow min$ по φ , причем $\{W_j\}$ получают из системы, которая на каждом шаге поиска решается при фиксированном φ .

Методы решения линейных систем алгебраических уравнений (система (5.23) известны, наиболее просты как для ручного счета, так и для программирования на ЭВМ, например, методом Гаусса-Жордана.

Пример

Выполнить поверочный расчет двухступенчатой прямоточной выпарной батареи при следующих исходных данных:

- расход греющего пара, кг/с: $D_1 = 0,22$,
- энтальпия греющего пара, кДж/кг: $i_1 = 2669$,
- расход раствора на батарею, кг/с: $S_0 = 1,11$,
- концентрация слабого раствора, %: $B_1 = 20$,
- концентрация крепкого раствора, %: $B_2 = 27$,
- температура исходного раствора, К: $T_0 = 340$,
- теплоемкость раствора, кДж/кг·С.: $c_0 = 3,94$,
- теплоемкость воды, кДж/кг·С.: $c_B = 4,19$,
- расчетный коэффициент идентификации: $\varphi = 0,95$,
- поверхность теплообмена кипятильника теплообменного аппарата, м²: $F_1 = F_2 = 25$.

Температурный режим батареи:

№ корпуса	Энтальпия вторичного пара, кДж/кг	Температура конденсата из кипятильника, τ_n , К	Температура кипения раствора, t_n , К	Температура раствора на выходе из подогревателя, T_{Ti} , К
1	2640	378	368	353
2	2623	358	343	-

Балансовые уравнения массы и энергии для теплообменника и каждого корпуса выпарной батареи:

Теплообменник:

$$S_0 \cdot c_0 \cdot (T_{T1} - t_0) = G_{T1} \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta T_{T1}) \cdot \varphi, \text{ где } \Delta T_{T1} = T_{T1} - 273.$$

1 корпус:

$$D_1 \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta \tau_1) \cdot \varphi = W_1 \cdot i_1 + [S_0 \cdot c_0 + (G_{T1} - W_1) \cdot c_B] \cdot \Delta t_1 - [S_0 \cdot c_0 + G_{T1} \cdot c_B] \cdot \Delta T_{T1}, \text{ где } \Delta \tau_1 = \tau_1 - 273, \Delta t_1 = t_1 - 273.$$

2 корпус:

$$(W_1 - G_{T1}) \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta \tau_2) \cdot \varphi = W_2 \cdot i_2 + [S_0 \cdot c_0 + (G_{T1} - W_1 - W_2) \cdot c_B] \cdot \Delta t_2 - [S_0 \cdot c_0 + (G_{T1} - W_1) \cdot c_B] \cdot \Delta t_1, \text{ где } \Delta \tau_2 = \tau_2 - 273, \Delta t_2 = t_2 - 273.$$

Полученные уравнения преобразуются к удобному виду для составления матрицы:

$$0 \cdot W_1 + 0 \cdot W_2 + G_{T1} \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta T_{T1}) \cdot \varphi = S_0 \cdot c_0 \cdot (t_{T1} - t_0);$$

$$-(i_1 - c_B \cdot \Delta t_1) \cdot W_1 + 0 \cdot W_2 - c_B \cdot (t_1 - T_{T1}) \cdot G_{T1} = -[S_0 \cdot c_0 \cdot (T_{T1} - t_1) + D_1 \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta \tau_1) \cdot \varphi];$$

$$[-c_B(t_1 - t_2) + \varphi \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta \tau_2)] \cdot W_1 - (i_2 - c_B \cdot \Delta \tau_2) \cdot W_2 + [-\varphi \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta t_2) - c_B \cdot (t_2 - t_1)] \cdot G_{T1} = -S_0 \cdot c_0(t_1 - t_2).$$

Составляется матрица в буквенных и численных выражениях:

W_1	W_2	G_{T1}	A
0	0	$(i_1 - c_B \cdot \Delta T_{T1}) \cdot \varphi$	$S_0 \cdot c_0(t_{T1} - t_0)$
$-(i_1 - c_B \cdot \Delta t_1)$	0	$c_B \cdot (t_1 - T_{T1})$	$-[S_0 \cdot c_0 \cdot (T_{T1} - t_1) + D_1 \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta \tau_1) \cdot \varphi]$
$c_B(t_1 - t_2) - \varphi \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta \tau_2)$	$-(i_2 - c_B \cdot \Delta t_2)$	$\varphi \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta \tau_2) + c_B \cdot (t_2 - t_1)$	$S_0 \cdot c_0(t_1 - t_2)$
W_1	W_2	G_{T1}	A
0	0	$0,95 \cdot (2640 - 4,19 \cdot 80)$	$1,11 \cdot 3,94 \cdot (353 - 340)$

$-(2640-4,19 \cdot 95)$	0	$-4,19 \cdot (368-353)$	$-(1,11 \cdot 3,94 \cdot (353-368)+0,22 \cdot (2669-4,19 \cdot 105) \cdot 0,95)$
$4,19 \cdot (368-343)-0,95 \cdot (2640-4,19 \cdot 85)$	$-(2623-4,19 \cdot 70)$	$0,95 \cdot (2540-4,19 \cdot 85)-4,19 \cdot (368-343)$	$1,11 \cdot 3,94 \cdot (368-343)$
W_1	W_2	G_{T1}	A
0	0	2189	56,9
-2242	0	-63	-400
2065	-2330	2179	109

Полученная матрица решается по алгоритму Гаусса-Жордана:

$$\begin{aligned}
 & \begin{matrix} +68 \\ -2179 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2189 : 56,9 \\ -2242 & 0 & -63 : -400 \\ 2065 & -2330 & 2179 : 109 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 : 0,03 \\ -2242 & 0 & 0 : -398 \\ 2065 & -2330 & 0 : 44 \end{bmatrix} \\
 & \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 : 0,03 \\ 1 & 0 & 0 : 0,18 \\ 0 & -2330 & 0 : -328 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 : 0,03 \\ 1 & 0 & 0 : 0,18 \\ 0 & 1 & 0 : 0,14 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Таким образом, расход пара на подогреватель составит 0,03 кг/с, из первого корпуса выпарного аппарата 0,18 кг/с, из второго – 0,14 кг/с.

Общее количество выпаренной воды:

$$W_{\text{общ}} = 0,18 + 0,14 - 0,03 = 0,29, \text{ кг/с.}$$

Удельный расход пара на батарею:

$$d = \frac{D}{W_{\text{общ}}} = \frac{0,22}{0,29} = 0,76, \text{ кг/кг.}$$

Тепловые потоки по корпусам выпарных аппаратов:

1 корпус:

$$Q_1 = D \cdot (i_1 - c_B \cdot \Delta\tau_1) \cdot \varphi = 0,22 \cdot (2669 - 4,19 \cdot 105) \cdot 0,95 = 465,9, \text{ кВт;}$$

2 корпус:

$$Q_2 = (W_1 - G_{T1}) \cdot (i_2 - c_B \cdot \Delta\tau_2) \cdot \varphi = (0,18 - 0,03) \cdot (2640 - 4,19 \cdot 85) \cdot 0,95 = 325,4, \text{ кВт.}$$

Коэффициенты теплопередачи по корпусам:

1 корпус:

$$k_1 = \frac{Q_1}{F \cdot \Delta t_1} = \frac{Q_1}{F \cdot (\tau_1 - t_1)} = \frac{465,9}{25 \cdot (378 - 368)} = 1,864, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С.}};$$

2 корпус:

$$k_2 = \frac{Q_2}{F \cdot \Delta t_2} = \frac{Q_2}{F \cdot (\tau_2 - t_2)} = \frac{325,4}{25 \cdot (358 - 343)} = 0,868, \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2 \cdot \text{С.}};$$

Проверка

Количество выпаренной воды по изменению концентрации раствора в процессе выпаривания:

$$W_{\text{общ}} = S_0 \cdot \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right) = 1,11 \cdot \left(1 - \frac{20}{27}\right) = 0,29, \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Проектный тепловой расчет

Проектный расчет производится, когда известны параметры теплоносителей на входе и выходе из установки и их расходы, число ступеней и схема выпаривания. Целью расчета является установление поверхности теплообмена и температурного режима работы МВУ.

Существует много вариантов расчета, отличающихся главным образом степенью точности определения параметров.

Для целей математической оптимизации и ориентировочных тепловых расчетов рекомендуется следующий метод, в котором приняты допущения:

- при подводе единицы массы греющего пара в кипятильник выпарного аппарата производится эквивалентное количество вторичного пара; процесс выпаривания протекает в адиабатических условиях ($\varphi = 1$);
- теплота конденсата на выходе из кипятильников в схеме не используется и компенсирует не учтенные потери теплового потока при его отводе через термическую изоляцию и не изолированные участки оборудования.

Расчет начинают с составления таблицы исходных величин:

$$t_n, r_n, \Delta t_n, T_n, \Theta_n, \Delta h_n, F_n, i_n, \Delta i_n, C_n,$$

где n – номер корпуса выпарного аппарата; t_n, r_n – температура и энергия фазового перехода пара на входе в n кипятильник; Δt_n – полезный температурный напор (задается), T_n – температура кипения раствора; Θ_n – физико-химическая температурная депрессия, Δh_n – гидростатическая депрессия, $t_n, i_n, \Delta i_n$ – температура и энтальпия вторичного пара, гидравлическая депрессия, C_n – концентрация раствора по корпусам (задается путем равномерного распределения повышения концентрации по корпусам).

Гидростатическая депрессия определяется по формуле:

$$\Delta P = x \cdot h / 2 \cdot 10^4,$$

где $x \cdot h$ – кажущийся уровень в аппарате, $x \cdot h = 0,1$; h – высота кипятильной трубы.

Для аппарата с падающей пленкой и принудительной циркуляцией $\Delta P = 0$. Потери на гидравлическую депрессию (i) принимаются равными одному $S_{\text{усу}}$ на каждый корпус.

Физико-химическую температурную депрессию определяют из таблиц, графиков или по специальным уравнениям; плотность раствора – по таблицам экспериментальных данных или уравнений в функции концентрации и температуры раствора. Расчет исходных данных величин начинаем с последнего корпуса.

На основе исходных данных определяем тепловые потоки по корпусам выпарных аппаратов по методике, рассмотренной в поверочном расчете. При этом уточняются выбранные концентрации по корпусам и соответствующие их

параметры (физико-химическая температурная депрессия, температура вторичного пара и др.).

Далее вычисляются аналитически (или принимаются из экспериментальных данных) коэффициенты теплопередачи по корпусам. Следующим этапом расчета является выбор закона распределения полезного температурного напора по корпусам и их определение. При отклонении вычисленных и принятых полезных температурных напоров расчет повторяем до совпадения этих величин с погрешностью не более 0,5 %.

Последним этапом расчета является определение поверхности теплообмена кипятильников выпарных аппаратов.

Составление таблицы (табл. 5.1) исходных данных рассмотрим на примере трехступенчатой прямоточной выпарной установки.

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета трехступенчатой прямоточной выпарной установки

Обозначение	Размерность	I корпус	II корпус	III корпус
t_n/r_n	К/(кДж/кг)	t_1/r_1	t_2/r_2	t_3/r_3
Δt_n	С	Δt_1	Δt_2	Δt_3
T_n	К	T_1	T_2	T_3
Θ_n	С	Θ_1	Θ_2	Θ_3
Δh_n	С	Δh_1	Δh_2	Δh_3
\bar{t}_n/\bar{i}_n	К/кДж/кг	\bar{t}_1/\bar{i}_1	\bar{t}_2/\bar{i}_2	\bar{t}_3/\bar{i}_3
Δi	С	I	I	-
C_n	%	C_1	C_2	C_3

5.6. Расчеты коэффициентов теплопередачи

Для расчета коэффициентов теплопередачи в кипятильниках выпарных аппаратов и поверхностных подогревателей существует множество разнообразных формул для определения коэффициентов теплоотдачи.

Рассмотрим возможность получения однородных уравнений для шести основных случаев теплообмена. Эти уравнения строго не применимы к определению коэффициентов теплоотдачи к кипящим жидкостям. В настоящее время для условий выпаривания нет достаточно надежных данных и общих расчетных уравнений. Результаты расчетов по приведенным ниже формулам показывают достаточно хорошее соответствие с практическими данными, полученными при обследовании выпарных батарей. В некоторых случаях полученные результаты для величин коэффициентов теплоотдачи по предлагаемым формулам даже более точно соответствуют практическим данным. Это связано с влиянием на величину коэффициента теплоотдачи

дополнительно ряда трудно учитываемых факторов: наличие газовой среды, отложения на теплообменной поверхности и др. В связи с этим предложенные зависимости могут быть положены в основу для инженерных расчетов, в том числе для случаев выпаривания.

Предлагаемые основные уравнения можно представить в обобщенном виде:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l_1}{\lambda} \cdot A \cdot Pr^B,$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l_1}{\lambda} = c \cdot \pi \cdot \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^c,$$

где l_1 – поперечный размер; l_2 – продольный размер.

1. Вынужденный поток по полному сечению, турбулентный:

$$\pi = Re; l_1 = d; l_2 = L; c = 0.$$

2. Вынужденный поток по полному сечению, ламинарный:

$$\pi = Re; l_1 = d; l_2 = L.$$

3. Свободное стекание жидкости по стенке, турбулентное:

$$\pi = Re_{\vartheta}; l_1 = v_{\vartheta}; l_2 = h; c = 0.$$

4. Свободное стекание жидкости по стенке, ламинарное:

$$\pi = Re_{\vartheta}; l_1 = v_{\vartheta}; l_2 = h.$$

5. Свободное стекание конденсата по стенке (конденсация):

$$\pi = K; l_1 = v_{\vartheta}; l_2 = h.$$

6. Свободный поток (естественная конвекция):

$$\pi = V; l_1 = v_{\vartheta}; l_2 = h.$$

В этих формулах:

$$Re = \frac{G \cdot l_1}{\eta}; Re_{\vartheta} = \frac{4}{\eta} \cdot \Gamma; Pr = \frac{c \cdot \eta}{\lambda}; K = \frac{r}{c \cdot \Delta t};$$

$$V = \beta \cdot \Delta T; v_{\vartheta} = \left(\frac{\eta^2}{\gamma^2 \cdot g} \right)^{1/3}$$

при обозначениях: $G = \omega \cdot \gamma \cdot 3600$ – массовая скорость, кг/м²·ч; η – вязкость кг/м·ч; λ – коэффициент теплопроводности, ккал/м·ч·С; c – теплоемкость, ккал/кг·С; Γ – интенсивность орошения:

$$\Gamma = \frac{G_{ж}}{O}, O = \pi \cdot d,$$

$G_{ж}$ – расход жидкости, кг/час; O – периметр; d – внутренний диаметр трубы, м.

Интенсивностью орошения на единицу периметра слива, кг/м·час, называют массу стекающей жидкости в течение часа на единицу орошаемого периметра. Орошаемым периметром для трубы является ее внутренняя окружность.

Таким образом, шесть самых важных случаев теплоотдачи описываются при помощи шести критериев подобия и одной размерной группы v_{ϑ} . Система этих уравнений настолько однородна, что ее можно охватить одним

универсальным уравнением с одной заменяемой безразмерной группой π , которая в зависимости от конкретного случая приобретает значения Re , Re_s , K , V . Критерий Нуссельта во всех этих уравнениях содержит характерный поперечный размер потока, который в случае вынужденного движения соответствует диаметру ($l_1 = d$), а во всех остальных случаях $l_1 = v_s$. Продольный размер l_2 всюду входит в симплексы геометрического подобия. Для вынужденного потока этот размер приобретает значение длины трубы ($l_2 = L$), а во всех остальных случаях $l_2 = h$.

Систематизация классических случаев теплоотдачи по характеру движения теплоносителя приведена на схеме (рис. 5.5). Значения постоянных и показателей важнейших уравнений теплоотдачи – в таблице 5.2.

К другим зависимостям для коэффициента теплоотдачи, имеющие значение для выпаривания растворов, следует отнести коэффициент теплоотдачи при выпаривании воды в аппаратах с естественной циркуляцией.

$$Nu = 4,41 \cdot 10^{-3} \left(\frac{V_{II}}{K} \right)^{1,5} \cdot \left(\frac{\delta P}{\sigma} \right)^{1,75},$$

где σ – поверхностное натяжение, кг/м (по таблицам);

$$\delta = \sqrt{\sigma/\gamma};$$

$$P = \frac{\gamma'}{\gamma''}; \quad K = \frac{r}{c \cdot \Delta t}.$$

Для этого случая предлагается упрощенная формула для расчета коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = 22 \cdot p^{0,58} \cdot \Delta t^{2,33}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{С},$$

где p – давление выпаривания, кг/см²; Δt – разность температур между стенкой и кипящим раствором.

Для определения коэффициента теплоотдачи от насыщенной парогазовой смеси используется уравнение:

$$\alpha_{см}^H = \alpha_{см}^{KC} \cdot \left(1 + \frac{\Delta d \cdot r}{1000 \cdot \delta t \cdot c_{рсм}} \right), \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{С},$$

где $\alpha_{см}^{KC}$ – конвективный коэффициент теплоотдачи со стороны газопаровой смеси в сухой зоне, Вт/м²·С; $\Delta d = d_{см}^{ex} - d_{см}^k$ – количество сконденсировавшихся паров в насыщенной зоне, г/кг; r – теплота фазового перехода при данном парциальном давлении водяных паров, кДж/кг·С; $\delta t = t_{см}^H - t_{см}^k$ – изменение температуры газопаровой смеси в насыщенной зоне, С; $c_{рсм}$ – теплоемкость смеси при ее средней температуре, кДж/кг·С.

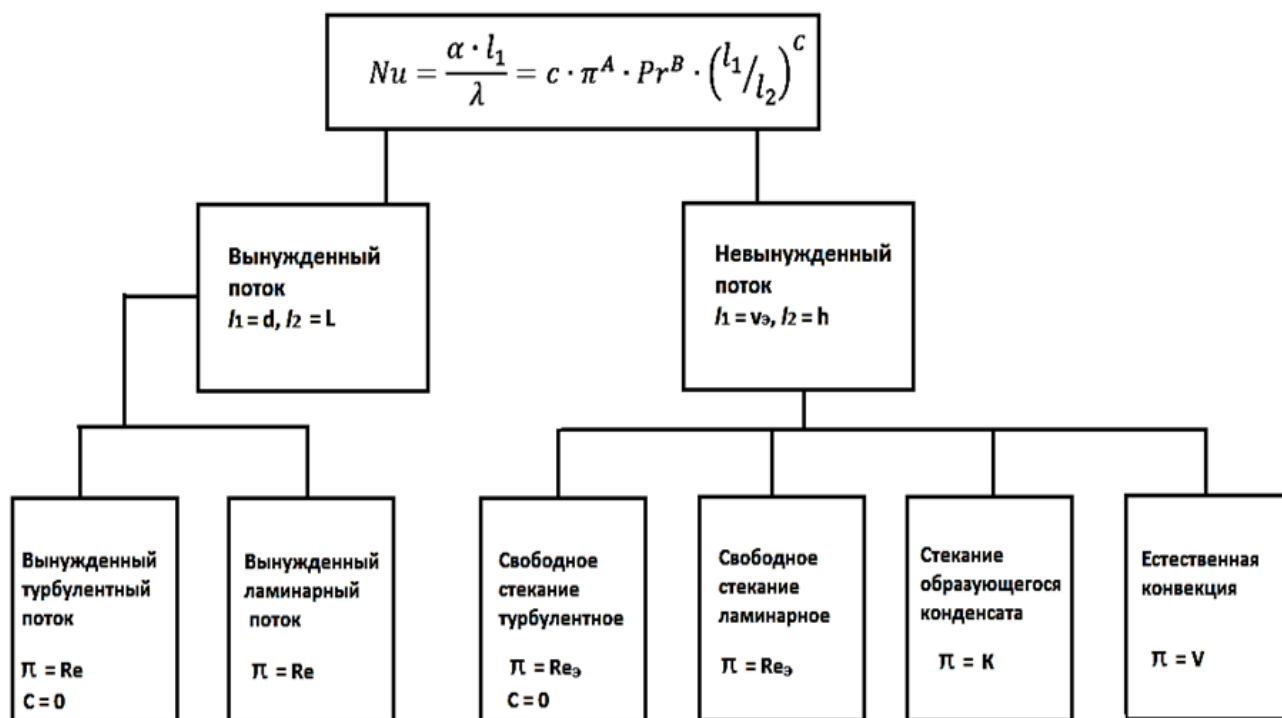


Рисунок 5.5 – Систематизация классических случаев теплоотдачи по характеру движения теплоносителя

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое физико-химическая температурная депрессия?
2. Каким образом определяется величина гидростатической температурной депрессии?
3. Как определить гидростатическое давление для средних слоев раствора?
4. Как определяется гидродинамическая температурная депрессия?
5. Что такое коэффициент концентрирования?
6. Какие требования предъявляются при проектировании и распределении полезных температурных напоров по корпусам выпарных аппаратов?
7. Цель поверочного расчета выпарных батарей?
8. Какие допущения принимаются в проектном тепловом расчете МВУ?
9. Основные уравнения для определения коэффициентов теплоотдачи в кипятильниках выпарных аппаратов?
10. Что такое интенсивность орошения на единицу периметра слива?

Таблица 5.2 – Значение постоянных и показателей важнейших уравнений теплоотдачи

Общее уравнение $Nu = \frac{\alpha \cdot l_1}{\lambda} = c \cdot \pi^A \cdot Pr^B \cdot (l_1 / l_2)^C$	c	A	B	C	Примечания
Вынужденный поток турбулентный $\pi = Re, l_1 = d$					
параллельно стенке (труба) η мало	0,023	0,8	0,4	0	–
параллельно стенке (труба) $\eta > 2\eta_B$	$0,027 \cdot (\eta/\eta_{ст})^{0,14}$	0,8	0,33	0	–
поперечно к проволоке	0,86	0,43	0,3	0	параметры пограничного слоя
поперечно к отдельной трубе	0,26	0,6	0,3	0	параметры пограничного слоя
поперечно к коридорному пучку трубок	0,26	0,6	0,33	0	параметры пограничного слоя
поперечно к шахматному пучку трубок	0,33	0,6	0,33	0	считать на максимальную скорость
через трубу с насадкой (теплоноситель↔стенка), нагревание	$0,813e^{-6(d_{нас}/d_{тр})}$	0,9	–	0^{3*}	–
через трубу с насадкой (теплоноситель↔стенка), охлаждение	$3,5e^{-4,6(d_{нас}/d_{тр})}$	0,7	–	0^{4*}	–
через слой насадки (теплоноситель↔насадка)	1,064	0,59	0,33	–	–
Вынужденный поток ламинарный $\pi = Re, l_1 = d, l_2 = L$					
для жидкостей $Re \cdot Pr \cdot (l_1/l_2) > 13$	$1,86 \cdot (\eta/\eta_{ст})^{0,14}$	1/3	1/3	1/3	–
для жидкостей $Re \cdot Pr \cdot (l_1/l_2) < 13$	0,5	1	1	1	–

Общее уравнение $Nu = \frac{\alpha \cdot l_1}{\lambda} = c \cdot \pi^A \cdot Pr^B \cdot (l_1 / l_2)^C$	с	А	В	С	Примечания
Свободное стекание по стенке, турбулентное $\pi=Re_3$, $l_1=v_3$, $l_2=h$					
вертикальная стенка, вертикальная, горизонтальная труба	0,01	1/3	1/3	0	параметры пограничного слоя
Свободное стекание по стенке, ламинарное $\pi=Re_3$, $l_1=v_3$, $l_2=h$					
вертикальная стенка	0,67	1/3	1/3	1/3	параметры пограничного слоя
горизонтальная труба (плохая сходимос $\alpha = 187 \cdot (\Gamma / d)^{1/8}$)	–	–	–	–	–
Свободное стекание образующегося конденсата (конденсация чистого пара) $\pi=K_3$, $l_1=v_3$, $l_2=h$					
вертикальная труба	1,13	1/4	1/4	1/4	параметры пограничного слоя
горизонтальная труба (снаружи)	$0,725 \cdot N^{-1/4}$	1/4	1/4	1/4	N – число рядов трубок
Свободный поток (естественная конвекция) $\pi=V_3$, $l_1=v_3$, $l_2=h$					
вертикальная стенка $10^3 < Pr \cdot V \cdot (l_1/l_2)^{-3} < 10^9$	0,59	1/4	1/4	1/4	параметры пограничного слоя
вертикальная стенка $Pr \cdot V \cdot (l_1/l_2)^{-3} > 10^9$	0,13	1/3	1/3	0	параметры пограничного слоя
горизонтальная труба, провод $10^3 < Pr \cdot V \cdot (l_1/l_2)^{-3} < 10^9$	0,53	1/4	1/4	1/4	параметры пограничного слоя

6. ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ВЫПАРНЫХ БАТАРЕЙ

Тепловые расчеты лежат в основе анализа работы выпарных батарей, оптимизации параметров и проектирования. Поэтому такие расчеты являются ноу-хау фирм-изготовителей, являются их собственностью и, как правило, не раскрываются покупателю.

В тепловых расчетах выпарных батарей можно выделить три типа различного целевого назначения:

– *поверочный тепловой расчет*, целью которого является определение распределения выпаренной воды по корпусам выпарных аппаратов, тепловых потоков, коэффициентов теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов и подогревателей, удельного расхода пара на выпарную батарею, тепловых потерь через коэффициент идентификации. Коэффициент идентификации включает отвод теплоты из выпарной установки через ограждения в окружающую среду, экзо- и эндотермические реакции, а также с материальными потоками на выходе из выпарной установки. Поверочный расчет целесообразно дополнять определением эксергетических функций, что позволяет найти эксергетический КПД по элементам выпарной установки, рассчитать эксергетический КПД схемы в целом, а также найти связь между эксергетическим КПД элементов выпарной установки с эксергетическим КПД схемы. Полученные данные позволяют проанализировать работу действующей выпарной установки и наметить пути ее совершенствования;

– *проектный тепловой расчет*. Целью проектного расчета является вычисление поверхностей теплообмена выпарных аппаратов и подогревателей, температурного и концентрационного режимов, температурных потерь по корпусам выпарных аппаратов;

– *оптимизация параметров выпарных аппаратов*. На этом этапе тепловых расчетов формируется критерий оптимальности. Как правило, в качестве критерия оптимальности выбираются приведенные затраты на выпаривание единицы массы воды и находится их минимум. В качестве варьируемых переменных выбирают общий температурный напор по выпарной установке, количество ступеней выпаривания, скорость циркуляции раствора (при выборе выпарных аппаратов с принудительной циркуляцией). Полученные результаты обрабатываются математической моделью в виде полинома второй или более степени. Далее проводится исследование на математической модели влияния изменения варьируемых параметров на приведенные затраты. Полученная информация используется как при проектировании новых установок, так и при эксплуатации действующих выпарных батарей.

Обычно в тепловых расчетах используется метод И. А. Тищенко – решение уравнений полного теплового баланса (УПТБ) МВУ. Уравнение баланса массы и энергии составляются для каждого теплоиспользующего элемента МВУ.

Традиционный метод решения этих уравнений (метод исключения зависимых переменных) содержит различные коэффициенты и допущения, введение которых лишает решение наглядности и делает его громоздким. К тому

же каждая конкретная задача начинается с вывода уравнений и обработки по ним экспериментальных данных.

Между тем можно свести систему уравнений полного теплового баланса (СУПТБ) к системам линейных алгебраических уравнений, методы, решения которых общеизвестны и реализованы на ЭВМ. Для решения систем линейных алгебраических уравнений на ЭВМ требуется предварительно записать систему в матричной форме (рис. 6.1).

На этом уровне автоматизации от пользователя требуется провести вручную вывод системы УПТБ и записать систему в матричной форме, затем с помощью стандартной программы найти решение системы на ЭВМ. Так как система УПТБ по природе нелинейная, решение на этом не заканчивается, а обычно требуется проверить выполнение условия I2, ввести новое значение параметра, перечислить (вручную) все коэффициенты исходной матрицы, вновь решить СУПТБ на ЭВМ и т. д.

При решении уравнений большое значение имеет точное определение коэффициента идентификации математической модели физической (φ). Этот коэффициент в известных методах поверочных расчетов выпарных батарей вводится как коэффициент тепловых потерь и оценивается обычно постоянной величиной – 0,90 – 0,95. Обследование большого количества выпарных батарей показывает, что этот коэффициент должен учитывать не только отвод теплоты в окружающую среду через поверхность оборудования, но и ряд других процессов (экзо- и эндотермические реакции при выпаривании, отвод теплового потока с проскоками конденсата, стабильность тепловых и гидродинамических режимов и др.). Коэффициент (φ) может изменяться в значительных пределах и является весьма чувствительным к отклонению параметров работы выпарной батареи от рационального режима при ее эксплуатации.

Следующей ступенью автоматизации поверочного расчета является перебор значений коэффициента идентификации (или его получение аналитически с заданной точностью) на ЭВМ, при этом снижаются требования к квалификации пользователя: от него уже не требуется априорная оценка параметра, но по-прежнему пользователь выводит СУПТБ и преобразует их к матричному виду.

Последней, наиболее сложной ступенью автоматизации будет формальное получение СУПТБ с помощью ЭВМ в матричной форме (на схеме – автоматическое выполнение блоков В1-С1). На этом уровне автоматизации пользователь-технолог мог бы работать с программой как с «черным ящиком», задавая исходные данные результаты в привычной для себя форме.

На основе рассмотренных принципов разработан алгоритм поверочного и проектного тепловых расчетов выпарных батарей, реализованный на ПК.

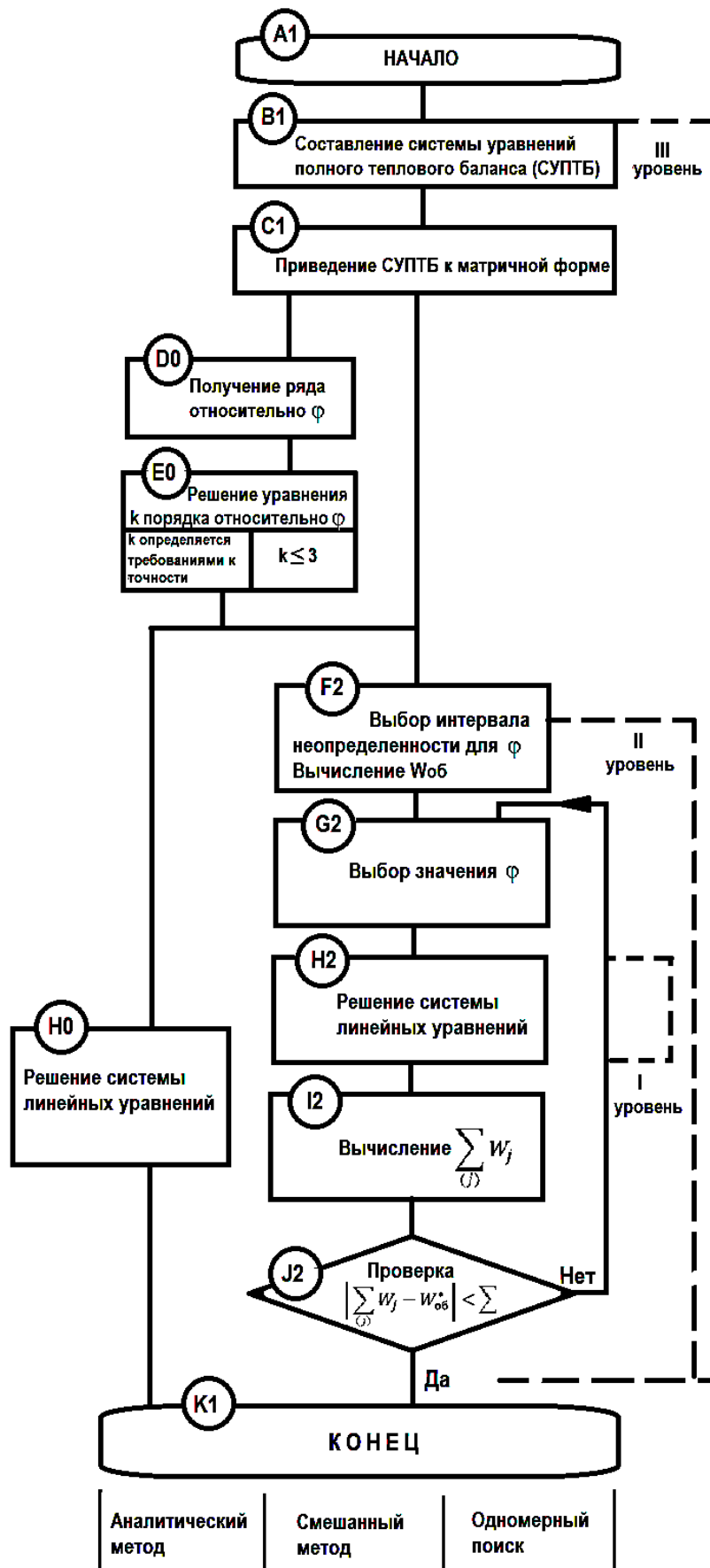


Рисунок 6.1 – Блок-схема

6.1. Поверочный тепловой расчет

Методика поверочного теплового расчета

Расчет ведется с помощью автоматизированной программы, составленной на основе материальных и тепловых потоков элементов выпарной установки (тест-блок). Для расчета по этой программе необходимо ввести исходные данные. К исходным данным для проведения поверочного расчета относятся:

Конфигурация связей по ходу раствора и пара в выпарные аппараты и подогреватели (рекомендуется составить схему потоков в выпарной установке). Конфигурация связей по ходу раствора в выпарные аппараты и подогреватели. Например, 4к – 5к – 6к – 4п – 3п – 3к – 2п – 2к – 1п – 1к – с/и.

Схема состоит из двух ветвей: низкотемпературной (4 – 6 ступени выпаривания) и высокотемпературной (1 – 3 ступени выпаривания). Низкотемпературная ветвь соответствует прямоточной схеме выпаривания, высокотемпературная – противоточной схеме выпаривания.

Аббревиатура соответствует ходу раствора по корпусам и подогревателям выпарной батареи. Другими словами, раствор поступает в 4 корпус (в программе извне), затем 5 и 6 корпуса. Далее раствор проходит через 4 подогреватель, 3 подогреватель и поступает в 3 корпус выпарного аппарата. Из 3 ступени выпаривания раствор проходит 2 подогреватель, 2 корпус, 1 подогреватель, 1 корпус и через самоиспаритель отводится из выпарной батареи.

Пар по корпусам выпарных аппаратов всегда движется последовательно от первого корпуса выпарного аппарата до последнего (в рассматриваемом примере 6) корпуса выпарного аппарата.

Пар по подогревателям. Вторичный пар из 4 корпуса поступает в 5 корпус и частично в 4 подогреватель. Пар из 3 корпуса поступает в 4 корпус и частично в 3 подогреватель. Пар из 2 корпуса поступает в 3 корпус и частично во 2 подогреватель. Пар из 1 корпуса поступает во 2 корпус и частично в 1 подогреватель. В 1 корпус выпарного аппарата поступает греющий пар с ТЭЦ (в программе извне). Недогрев раствора до температуры пара в подогревателях принять 5 °С.

Для поверочного расчета должны быть известны:

- температуры греющего пара по корпусам выпарных аппаратов и вторичного пара в последнем (вакуумном) корпусе выпарного аппарата;
- поверхности теплообмена по корпусам выпарных аппаратов и подогревателей (в случае использования рекуперативных подогревателей раствора);
- концентрации раствора по корпусам выпарной батареи;
- температурные депрессии. *Гидравлическая* температурная депрессия. Принимается по 1 Сусу на корпус выпарного аппарата. *Физико-химическая* температурная депрессия. Вычисляется по программе из файла «депрессия сульфат». Определяется на основе концентрации раствора при нормальных условиях с учетом температурной поправки или по специальным таблицам.

Гидростатическая депрессия. Вычисляется для выпарных аппаратов с естественной циркуляцией и аппаратов с восходящей пленкой. Находим по

программе из файла «расчет гидростатической депрессии», по практическим данным или принимается в диапазоне 2 – 5 °С.

Составление таблицы основных режимных параметров

Таблица основных режимных параметров работы выпарной батареи (температурных и концентрационных режимов) составляется для внесения их численных значений в исходные данные теплового расчета (файл тест-блок).

За основу примем файл «Таблица» (табл. 6.1). Пример составлен для выпарной батареи смешанного тока 4 – 5 – 6 – 3 – 1 – 2. Подогреватели отсутствуют.

Расчет таблицы начинается с «хвоста», т. е. с последнего корпуса выпарной установки. Температура вторичного пара в условиях примера для шестого корпуса составляет 60 °С.

Прибавив к этой температуре гидростатическую (6,50 °С) и физико-химическую температурные депрессии (1,35 °С), получаем температуру кипения раствора в шестом корпусе (67,85 °С). Из температуры греющего пара на шестой корпус (74,8 °С) вычитаем температуру кипения раствора (67,85 °С).

Получаем полезный температурный напор (6,95 °С). Переходим к параметрам пятого корпуса. К температуре греющего пара на шестой корпус (74,80 °С) прибавляем гидравлическую температурную депрессию (1 °С). Получаем температуру вторичного пара корпус (75,8 °С).

Прибавив к этой температуре гидростатическую (3,80 °С) и физико-химическую температурные депрессии (1,14 °С), получаем температуру кипения раствора в пятом корпусе (80,74 °С). Из температуры греющего пара на пятый корпус (94,00 °С) вычитаем температуру кипения раствора (80,74 °С). Получаем полезный температурный напор (13,26 °С.). Аналогично повторяем процедуру до первого корпуса включительно.

Параметры раствора и пара по корпусам выпарных аппаратов и подогревателей вносим в программу «тепловой расчет» на основе данных конфигурации выпарной установки, общих данных и данных из составленной таблицы. При подстановке параметров для подогревателей выбираем тип подогревателя (смещения или поверхностный).

Таблица 6.1 – Параметры температурных и концентрационных режимов работы выпарной батареи

Обозначение	Размерность	1 корпус		2 корпус		3 корпус		4 корпус		5 корпус		6 корпус	
t_n / r_n – температура греющего пара / скрытая теплота парообразования	К / кДж/кг	145,1		132,9		112,7		101,0		94,0		74,80	
		$2740,3$	2129,3	2724,6	2165,	2695,8	2223,1	2677,8	2254,6	2666,7	2273	2634,9	2321,8
Δt_n – полезный температурный напор в корпусе	С	4,75		10,72		4,98		3,06		13,26		6,95	
T_n – температура кипения в корпусе	К	140,35		122,18		107,72		97,94		80,74		67,85	
Θ_n – температурная депрессия	С	5,65		7,11		3,04		0,90		1,14		1,35	
Δh_n – гидростатическая депрессия	С	0,8		1,37		2,68		2,04		3,8		6,5	
$\Delta t_n / i_n / r_n$ – температура вторичного пара / энтальпия / скр. теплота парообразования	К / кДж/кг	133,9		113,7		102,0		95,0		75,8		60,0	
		2726	2160,7	2697,4	2216,6	2679,5	2244,8	2668,4	2265,0	2636,6	2310,0	2609,4	2342,4
Δi – гидравлическая депрессия	С	1		1		1		1		1		0	
c_i – концентрация на выходе	%	40,00		47,30		33,00		19,60		23,00		26,00	

6.2. Определение невязки между расходами выпаренной воды по концентрациям и по тепловому балансу

Путем изменения текущего значения коэффициента идентификации при его вариации в программе «Тепловой расчет» приложения добиваемся значения невязки между общим расходом выпаренной воды по концентрациям и по тепловым балансам равной нулю. При включении в схему рекуперативных подогревателей или без них, при выполнении условия невязки, равной нулю, расчет считается законченным.

При включении в схему подогревателей смешения невязку рассчитываем по программе «Расчет невязки» папки приложения. Для этого, как и в предыдущем случае, добиваемся получения невязки равной нулю.

Затем в программу «Расчет невязки» приложения подставляем данные по сумме расходов пара на подогреватели и общий расход выпаренной воды по концентрациям. Полученную невязку обеспечиваем подбором коэффициента идентификации при расчете выпарной установки. С достижением расчетной невязки расчет закончен. При включении в схему подогревателей смешения невязка расчетов по тепловому балансу и по концентрациям объясняется тем, что при включении в тепловую схему теплообменников смешения необходимо выпарить больше воды до достижения одной и той же концентрации раствора в сравнении с включением в схему подогревателей рекуперативного типа из-за дополнительного разбавления раствора конденсатом пара.

Пример внесения исходных данных в программу теплового расчета (тест-блок) и результаты расчета. Пример приведен на рисунках 6.2, а и 6.2, б для выпарной шестиступенчатой выпарной батареи ОАО «Архангельский ЦБК». Выпарная батарея представляет смешанную схему выпаривания: 4 – 5 – 6 – 3 – 1 – 2.

Расчет эксергетических функций. Используя данные, полученные в результате теплового поверочного расчета выпарной батареи ОАО «Архангельский ЦБК», производится эксергетический анализ каждого корпуса, определяется его удельный вклад в общий КПД выпарной батареи.

Эксергетический КПД.

Для 1-го корпуса:

$$\eta_e = \frac{\Delta E_B}{\Delta E_3} \cdot \varphi = \frac{Q_1 \cdot \left(1 - \frac{T_x}{T_{\text{вт.п.}}^1}\right)}{Q_1 \cdot \left(1 - \frac{T_x}{T_{\text{гр.п.}}^1}\right)} \cdot \varphi = \frac{32376 \cdot \left(1 - \frac{280}{406,9}\right)}{32376 \cdot \left(1 - \frac{280}{418,1}\right)} \cdot 0,96 = 0,90;$$

Q_1 – тепловой поток, кВт; $T_x = 280$ К – температура холодильника (окружающей среды); $T_{\text{вт.п.}}^1$ – температура вторичного пара, К; $T_{\text{гр.п.}}^1$ – температура греющего пара, К; $\varphi = 0,96$ – коэффициент идентификации.

ПАРАМЕТРЫ РАСЧЕТА	
Общие	
Расход раствора на батарею S0, кг/с	94,444
Расход греющего пара D0, кг/с	15,806
Температура исходного раствора T0, С	93
Теплоемкость воды Св, кДж/кг.град	4,19
Теплоемкость раствора С0, кДж/кг.град	3,94
Энтальпия греющего пара L0, кДж/кг	2740,3
- Конфигурация	
Число выпаривателей	6
Число нагревателей	0
+Самоиспаритель	<input type="checkbox"/>
- Дополнительно	
Концентрация слабого раствора В1, %	19,6
Концентрация крепкого раствора В2, %	47,3
- Единицы измерения	
Температура в градусах	Цельсия (С)
Тепло в	килоджоулях (кДж)
Расход в килограмм за	секунду (кг/с)
- Коэффициент идентификации	
+Вариация	<input type="checkbox"/>
Текущее значение	0,96

Выпариватель №1	
Поверхность теплообмена, м2	2700
Температура кипения раствора t, К	140,35
Температура конденсата (тау), К	145,1
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2726
Источник раствора	Выпариватель №3
Источник пара	Из вне

Выпариватель №2	
Поверхность теплообмена, м2	2730
Температура кипения раствора t, К	122,18
Температура конденсата (тау), К	132,9
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2697,4
Источник раствора	Выпариватель №1
Источник пара	Выпариватель №1

Рисунок 6.2, а – Пример внесения исходных данных в программу теплового расчета (тест-блок) и результаты расчета

Выпариватель №3	
Поверхность теплообмена, м2	2900
Температура кипения раствора t, К	107,72
Температура конденсата (тау), К	112,7
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2679,5
Источник раствора	Выпариватель №6
Источник пара	Выпариватель №2

Выпариватель №4	
Поверхность теплообмена, м2	2600
Температура кипения раствора t, К	97,94
Температура конденсата (тау), К	101
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2668,4
Источник раствора	Из вне
Источник пара	Выпариватель №3

Выпариватель №5	
Поверхность теплообмена, м2	2900
Температура кипения раствора t, К	80,74
Температура конденсата (тау), К	94
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2636,6
Источник раствора	Выпариватель №4
Источник пара	Выпариватель №4

Выпариватель №6	
Поверхность теплообмена, м2	2900
Температура кипения раствора t, К	67,85
Температура конденсата (тау), К	74,8
Энтальпия вторичного пара i, кДж/кг	2609,4
Источник раствора	Выпариватель №5
Источник пара	Выпариватель №5

Рисунок 6.2, б – Пример внесения исходных данных в программу теплового расчета (тест-блок) и результаты расчета

Приложения

1. Таблица.
2. Депрессия сульфат.
3. Таблица термодинамических свойств.
4. Расчет гидростатической депрессии.
5. Плотность сульфат.
6. Расчет невязки.
7. Тепловой расчет.
Эксергетический КПД.

Для 2-го корпуса: $\eta_{\text{экз}}^{\text{факт}} = 0,84$;

3-го корпуса: $\eta_{\text{экз}}^{\text{факт}} = 0,86$;

4-го корпуса: $\eta_{\text{экз}}^{\text{факт}} = 0,88$;

5-го корпуса: $\eta_{\text{экз}}^{\text{факт}} = 0,75$;

6-го корпуса: $\eta_{\text{экз}}^{\text{факт}} = 0,71$.

Доля затраченной эксергии в n -ом корпусе выпарной установки к общей затраченной эксергии в выпарной батарее:

Для 1-го корпуса:

$$\gamma = \frac{\Delta E_3}{\sum \Delta E_3} \cdot 100 \% = \frac{10,512}{35816} \cdot 100 \% = 29,4 \%$$

2-го корпуса: $\gamma = 20,4 \%$;

3-го корпуса: $\gamma = 20,3 \%$;

4-го корпуса: $\gamma = 10,9 \%$;

5-го корпуса: $\gamma = 8,8 \%$;

6-го корпуса: $\gamma = 10,3 \%$.

Произведение эксергетического КПД каждого корпуса на долю затраченной эксергии к общей затраченной эксергии в выпарной батарее:

Для 1-го корпуса: $\gamma \cdot \eta = 0,90 \cdot 29,4 = 26,3$;

2-го корпуса: 17,1;

3-го корпуса: 17,5;

4-го корпуса: 9,5;

5-го корпуса: 6,6;

6-го корпуса: 7,3.

Анализ работы выпарной батареи на примере ОАО «АрхЦБК»

Результаты приведенных расчетов позволяют установить:

– процессы теплообмена во втором, пятом и шестом корпусах выпарных аппаратов характеризуются более низкими КТП (0,8, 0,34 и 0,92) кВт/ (м²·С), чем в первом, третьем и четвертом корпусах (2,5; 1,85; 1,95) кВт/ (м²·С), и неравномерно распределены по корпусам выпарных аппаратов. Максимальное отношение между первым корпусом и пятым корпусом составляет 7,3 раза.

– тепловые потоки распределены также по корпусам выпарных аппаратов не равномерно. Так, в четвертом, пятом и шестом корпусе их значения

соответствуют 15517, 13228 и 18623 кВт, а в первом, втором и третьем корпусе 32376, 23888, 26764 кВт, соответственно. Таким образом, максимальное отношение тепловых потоков достигает 2,45 раза (в первом и пятом корпусах);

– расходы вторичного пара по корпусам выпарных аппаратов распределяются также неравномерно. В третьем, четвертом, пятом и шестом корпусах выпарных аппаратов значения расходов пара соответствуют 7,16, 6,06, 8,35 и 9,73 кг/с, а в первом и втором корпусе против 11,47, 12,53, соответственно. Отношение расхода пара во втором корпусе к расходу пара в четвертом корпусе составляет 2,07 раза.

Результаты расчета эксергетических функций показывают, что общий эксергетический КПД выпарной установки достаточно высок и в целом удовлетворяет современным требованиям к энерготехнологическим установкам (84,3 %). Общие эксергетические потери, пропорциональные перерасходу топлива в выпарную установку, составляют 5623 кВт. Заметим, что в первом, втором и третьем корпусах затрачивается 60,9 % от всей затрачиваемой эксергии в выпарной установке при эксергетических КПД 90 %, 84 %, 86 %, соответственно. Таким образом, первые три корпуса выпарных аппаратов работают с высокой энергетической эффективностью и определяют эксергетический КПД выпарной установки в целом.

В четвертом, пятом и шестом корпусе затрачивается 39 % от подведенной эксергии в выпарную установку с соответствующими значениями 10,9 %; 8,8 %; 10,3 % с эксергетическими КПД 88 %; 75 %; 70 % по корпусам, соответственно. Удельный вклад в эксергетический КПД выпарной установки процессов в этих корпусах составляет: 9,5; 6,6; 7,3.

Пути повышения эффективности работы выпарной батареи. Анализ параметров работы выпарной установки позволяет выявить причины и пути повышения эффективности работы выпарных установок. Основные причины низкой эффективности работы выпарной установки:

– низкий КТП в шестом корпусе выпарной установки. Основной из причин является высокая вязкость раствора при самой низкой температуре в процессе выпаривания;

– интенсивное инкрустирование теплообменной поверхности особенно первых корпусов выпарных аппаратов осадками различного химического и морфологического состава;

– отсутствие регенеративных теплообменников для нагрева раствора, что приводит к большой экономайзерной зоне в третьем и первом корпусах выпарных аппаратов.

Для ослабления или исключения названных недостатков можно предложить следующие пути модернизации:

– перевести все выпарные аппараты на падающую пленку с принудительной циркуляцией и распределением раствора на основе циклонных вставок в каждую кипятельную трубку;

– укомплектовать выпарную установку кавитационно-вихревыми теплообменниками смешения;

– процесс выпаривания вести в присутствии ингибиторов накипеобразования, например, на основе полиэтилсиликоната натрия или его аналогов.

6.3. Проектный тепловой расчет

Методика проектного теплового расчета выпарных батарей. Общие положения. Расчет ведется с помощью двух основных программ: «Тепловой расчет (тест-блок)», аналогичной примененной при поверочном тепловом расчете, и программы «Расчет КТП».

Тепловой расчет тест-блок. Отличие от поверочного расчета в составлении таблицы заключается в том, что в проектном тепловом расчете задана не полная информация по температурному режиму работы и концентрациям раствора выпарной батареи. В проектном расчете заданы лишь две температуры: температура греющего пара на входе в выпарную установку и температура вторичного пара в последнем вакуумном корпусе. Другим отличием являются значения концентрации раствора: известна начальная концентрация раствора на входе в выпарную установку и конечная концентрация на выходе из выпарной установки. Другие недостающие параметры для составления таблицы необходимо предварительно вычислить.

Расчет коэффициента теплопередачи. Основу расчета коэффициентов теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов и рекуперативных подогревателей составляют: вычисленные температуры по таблице теплового расчета тест-блока, конструкторские особенности выпарных аппаратов, физико-химические характеристики воды, водяного пара и выпариваемого раствора. Коэффициенты теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов и поверхностных подогревателей вычисляются с учетом тепловых процессов в них по формулам, рассмотренным выше. Полученные расчетные КТП умножают на коэффициент идентификации для каждого корпуса, принимаемых из опытных данных, или ожидаемых для принятых технических решений.

Взаимодействие программ. Так как вычисление параметров при составлении первого варианта таблицы носит приближенный характер, проектный расчет ведут методом итераций (последовательных приближений). Исходные данные из теплового расчета по тест-блоку подставляются в программу для вычисления коэффициентов теплопередачи. Полученные результаты КТП из программы расчета коэффициентов теплопередачи сравниваются с КТП, полученных по тест-блоку. Совпадение их достигается путем изменения поверхностей теплообмена корпусов выпарных аппаратов, полученных из теплового расчета по тест-блоку. Затем расчет повторяют (второе приближение). Расчет считается законченным при совпадении КТП по обеим программам (без последующих корректировок поверхностей нагрева), а также

по другим параметрам (концентрациям раствора, температурным депрессиям и др.).

Первое приближение. Расчет параметров для таблицы исходных данных

Концентрации крепкого раствора на выходе из каждого корпуса вычисляем по формуле:

$$c_n^{\text{п}} = c_{\text{и}} + n^{\text{р}} \times \frac{c_{\text{к}} - c_{\text{и}}}{N},$$

где $c_{\text{и}}$ и $c_{\text{к}}$ – концентрация исходного и крепкого раствора соответственно; N – число ступеней выпаривания; $n^{\text{р}}$ – номер корпуса по ходу раствора; $c_n^{\text{п}}$ – концентрация раствора на выходе из $n^{\text{п}}$ выпарного аппарата по ходу пара.

Пример. Рассмотрим конфигурацию выпарной батареи (4 – 5 – 6 – 3 – 1 – 2) Пусть $c_{\text{и}} = 19 \%$; $c_{\text{к}} = 70 \%$; $n^{\text{р}} = 5$; $N = 6$; $n^{\text{п}} = 2$. Вычислить концентрацию раствора из 2-го корпуса (по движению пара) или 5-го корпуса (по движению раствора). Тогда:

$$c_2^{\text{п}} = 19 + 5 \times \frac{70 - 19}{6} = 61,5 \%$$

Для 2-го и последующих приближений

Концентрации по корпусам выпарных аппаратов вычисляются по формуле:

$$b_n = b_0 \cdot S_0 / (S_0 - (\sum w_n^{\text{к}} + \sum w_n^{\text{н}}))$$

или

$$b_n = \frac{b_{\text{и}}}{\alpha},$$

где $\alpha = 1 - \frac{\sum_{n=1}^n w_{\text{в}}}{S_0} + 2 * \frac{\sum_n w_{\text{под}}}{S_0}$.

В формулах приняты обозначения:

b_n – концентрация раствора на выходе из n -го корпуса (по ходу раствора), а. с. в.; $b_{\text{и}}$ – концентрация исходного раствора, а. с. в.; $\sum_{n=1}^n w_{\text{в}}$ – сумма выпаренной воды по корпусам выпарных аппаратов от 1-го до n -ого (по ходу раствора), кг/с; $\sum_n w_{\text{под}}$ – сумма расходов пара на подогреватели смешения от 1-го до n -ого (по ходу раствора), кг/с;

Пример. Пусть получены результаты теплового расчета для первого приближения. Выпарная двухступенчатая прямоточная батарея с теплообменниками смешения.

Расход слабого раствора 1,11 кг/с; концентрации слабого и крепкого раствора: 48 и 60 %, соответственно; расходы пара по ступеням выпаривания и на подогреватель приведены в таблице результатов расчета (рис. 6.3).

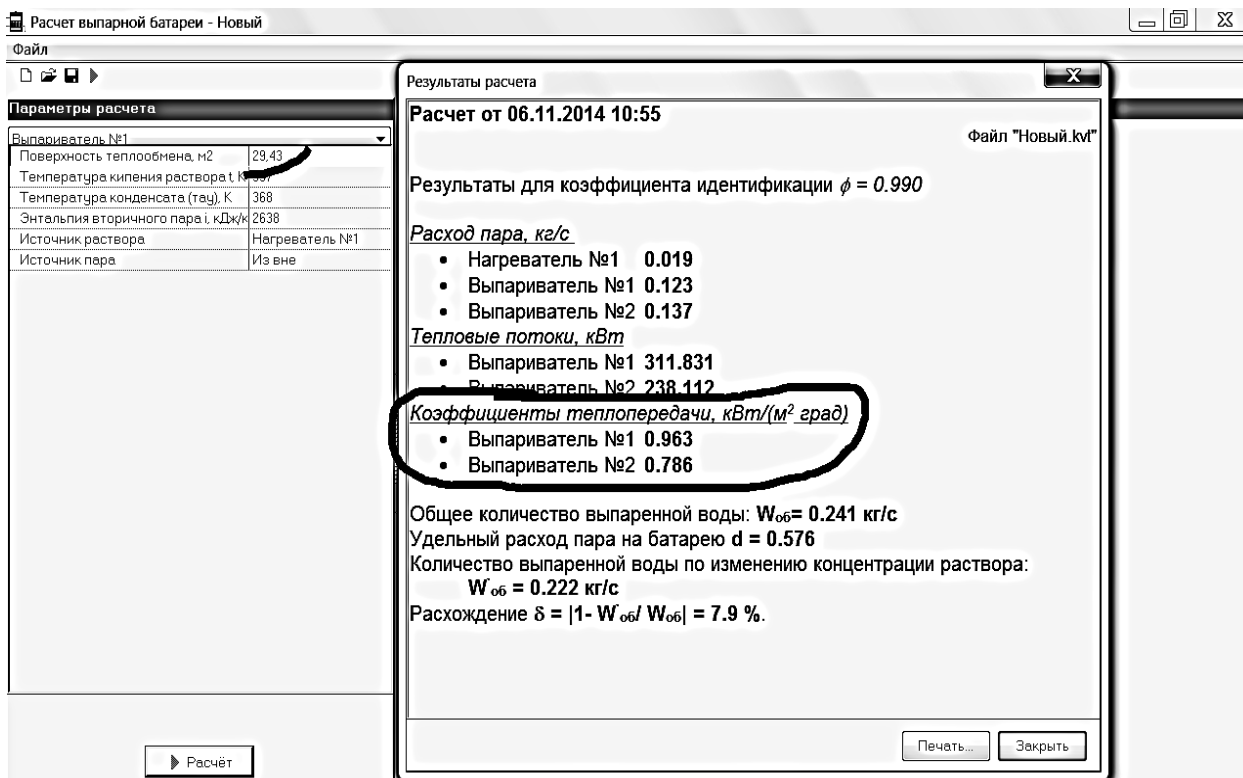


Рисунок 6.3 – Таблица результатов расчета

Вычислить концентрации раствора на выходе из каждого корпуса (по ходу раствора).

$$\alpha = 1 - \frac{\sum_{n=1}^n w_B}{S_0} + 2 * \frac{\sum_n w_{под.}}{S_0},$$

$$b_n = \frac{b_n}{\alpha}, \% \text{ а. с. в.}$$

Для первой ступени:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{0,123}{1,11} - \frac{2*0,019}{1,11} \right) = 0,92;$$

$$b_n = \frac{b_n}{\alpha} = \frac{48}{0,92} = 52 \%$$

Для второй ступени:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{0,123+0,137}{1,11} - \frac{2*0,019}{1,11} \right) = 0,8;$$

$$b_n = \frac{48}{0,80} = 60 \%$$

Определение полезных температурных напоров по корпусам выпарных аппаратов. Для определения полезных температурных напоров по корпусам выпарных аппаратов предварительно задаются коэффициентом теплопередачи (k_n) и принимают его одинаковым для всех корпусов выпарных аппаратов.

По программе «Депрессия. Сульфат», подставляя концентрацию раствора для соответствующего корпуса, получают физико-химические температурные депрессии для соответствующих корпусов. По программе «Расчет гидростатической депрессии» вычисляют гидростатические депрессии по корпусам выпарных аппаратов.

Для выпарных аппаратов с падающей пленкой и с принудительной циркуляцией гидростатической депрессией можно пренебречь.

Гидравлические депрессии принимают по числу ступеней выпаривания минус 1. Для последнего (вакуумного корпуса) величина гидравлической депрессии принимается равной нулю.

Находят сумму всех температурных депрессий.

Полезные температурные напоры по корпусам вычисляются по формуле и принимаются равными для всех корпусов выпарной батареи.

$$\Delta t_n = \frac{\Delta t_{пол}^{бам}}{k_n} \frac{1}{\sum_1^N \frac{1}{k_n}},$$

где Δt_n – полезный температурный напор в n-ом корпусе выпарного аппарата;

$\Delta t_{пол}^{бам}$ – полезный температурный напор по выпарной батарее;

$\Delta t_{пол}^{бам} = t_1 - t_N - \sum_1^N (\delta T + \theta + \vartheta)$, где t_1, t_N – температура греющего пара на первый корпус выпарного аппарата и температура вторичного пара в последнем корпусе выпарного аппарата; $\delta T, \theta, \vartheta$ – гидростатическая, физико-химическая и гидравлическая температурная депрессия для каждого корпуса, соответственно;

$\frac{1}{\sum_1^N \frac{1}{k_n}}$ – обратная величина суммы термических сопротивлений по корпусам

выпарных аппаратов.

Пример. Пусть имеется шестиступенчатая выпарная батарея с гравитационным течением раствора (выпарные аппараты с падающей пленкой). Температурные режимы работы выпарной батареи:

$$t_1 = 150 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_6 = 60 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$\sum_1^6 (\delta T + \theta + \vartheta) = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$. Вычислены для каждого корпуса по соответствующим программам при гидростатической депрессии $\delta T = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, так как принят аппарат с падающей пленкой. При вычислении физико-химической температурной депрессии для *первого приближения* принимается во внимание только концентрация раствора, поправкой на температуру можно пренебречь.

$$\Delta t_{пол}^{бам} = 150 - 60 - 45 = 45 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$k_n = 2000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{С.}$ (задается)

$$\frac{1}{\sum_1^N \frac{1}{k_n}} = \frac{1}{\sum_1^6 \frac{1}{2000} * 6} = 333,3,$$

$$\Delta t_n = \frac{\Delta t_{пол}^{бат}}{K_n} \frac{1}{\sum_1^N \frac{1}{k_n}} = \frac{45}{2000} * 333,3 = 7,5 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

Полезный температурный напор принимается в каждом корпусе 7,5 °С.

Таблица исходных данных. Открывается файл «Таблица».

В таблицу подставляется температура греющего пара с ТЭЦ и вторичного пара последней по пару ступени выпаривания; концентрации раствора по корпусам выпарных аппаратов, полученные физико-химические температурные депрессии по корпусам выпарных аппаратов и полезные температурные потери по корпусам выпарных аппаратов.

В программе «Таблица термодинамических свойств воды и водяного пара» открывается окно «Модуль».

Для каждого корпуса выпарной батареи определяются температуры греющего и вторичного пара, энтальпия и теплота фазового перехода (скрытая теплота парообразования). Полученные данные подставляются в таблицу.

В качестве исходных данных для работы программы «Тепловой расчет (тест-блок)» необходимо первоначально задать поверхности теплообмена кипятильников в каждом корпусе. Теплообменную поверхность можно определить из следующих соображений.

Из практики работы выпарных батарей количество выпаренной воды с одного м² поверхности можно предварительно оценить величиной 16 кг/м² · ч. С учетом этого выпаренную воду (по концентрациям) можно вычислить из соотношения:

$$S_0 \cdot \left(1 - \frac{c_c}{c_k}\right) = W, \text{ кг/с;}$$

$$\frac{W}{F} = 16 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$$

или

$$\frac{W}{F} = 16 / 3600, \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с;}$$

$$F_n = \frac{W \cdot 3600}{16 \cdot N} = \frac{W \cdot 225}{N}, \text{ м}^2,$$

где S_0 – расход слабого раствора, кг/с; c_c и c_k – концентрация слабого и крепкого раствора, соответственно; W – расход выпаренной воды в выпарной батарее, кг/с; F – общая теплообменная поверхность в выпарной батарее; F_n – поверхность теплообмена единичного кипятильника выпарного аппарата; N – число выпарных аппаратов в выпарной батарее.

Вычисленная поверхность теплообмена единичного выпарного аппарата вносится в программу «Таблица» и исходные данные программы «Тепловой расчет (тест-блок)».

Исходные данные параметров для внесения в программу «Тепловой расчет (тест-блок)». Данные таблицы и исходные данные для расчета выпарной батареи подставляются в программу «Тепловой расчет (тест-блок)».

Если невязка в результате расчета по программе «Тепловой расчет (тест-блок)» отлична от нуля, результаты расчета коэффициентов идентификации корректируются. При включении в схему рекуперативных подогревателей или без них, при выполнении условия невязки, равной нулю, расчет считается законченным.

При включении в схему подогревателей смешения невязка рассчитывается по программе «Расчет невязки». Для этого, как и в предыдущем случае, добиваются получения невязки равной нулю. Затем в программу «Расчет невязки» подставляются данные по сумме расходов пара на подогреватели и общий расход выпаренной воды по концентрациям. Полученная невязка обеспечивается корректировкой расхода пара. С достижением расчетной невязки расчет закончен.

Параметры, вводимые в программу «Тепловой расчет (тест-блок)»

Общие:

Расход раствора на батарею S_0 , кг/с.

Расход греющего пара D_0 , кг/с.

Температура исходного раствора T_0 , °С.

Теплоемкость воды C_v , кДж/кг С.

Теплоемкость раствора C_0 , кДж/кг С.

Энтальпия греющего пара I_0 , кДж/кг (из файла «Таблица термодинамических свойств»).

Конфигурация:

Число выпаривателей – шт.

Число нагревателей – шт.

Самоиспаритель – шт.

Дополнительно:

Концентрация слабого раствора B_1 , %.

Концентрация крепкого раствора B_2 , %.

Единицы измерения:

Температура, °С.

Количество теплоты, кДж.

Расход, кг/с.

Коэффициент идентификации:

Вариация – от 0 до 1.

Текущее значение – 0,99.

Параметры раствора и пара вносятся в программу «Тепловой расчет» на основе данных конфигурации выпарной установки и данных из составленной таблицы для каждого корпуса выпарного аппарата и подогревателя. При

подстановке параметров для подогревателей выбирается тип подогревателя (смешения или поверхностный).

Расчет производится путем нажатия кнопки «расчет».

Выходные данные. В результате расчета получают следующие выходные данные:

1. Расходы пара на подогреватели.
2. Расходы пара по корпусам выпарных аппаратов.
3. Тепловые потоки по корпусам выпарных аппаратов.
4. Коэффициенты теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов и подогревателей (при использовании рекуперативных подогревателей).
5. Общий расход выпаренной воды в выпарной батарее по концентрациям и тепловым балансам.
6. Удельный расход греющего пара (по выпаренной воде, определенной из теплового баланса).

Расчет коэффициентов теплопередачи из уравнений теплопередачи. В программе «Расчет КТП. Падающая пленка» вносятся исходные данные.

Технологические параметры режима работы батареи:

- Расход раствора на батарею, кг/с.
- Концентрация слабого раствора, %.
- Концентрация крепкого раствора, %.
- Температура исходного раствора, °С.
- Температура греющего пара, °С.
- Температура пара вакуумного корпуса, °С.

Конструктивные параметры выпарных аппаратов:

- Высота кипяtilьных труб (h), м.
- Диаметр (d), мм.
- Толщина стенки трубы (δ), мм.
- Коэффициент теплопроводности стенки трубы (λ), Вт/м·°С.
- Теплоемкость конденсата (ск). кДж/кг·°С.
- Циркуляционный расход раствора (принимается 2 м/с на одну трубу).

Количество трубок в выпарных аппаратах (вычисляется по принятой поверхности выпарных аппаратов, заданной в программе «Тепловой расчет (тест-блок)»): $F = \pi \cdot d \cdot l \cdot n$, где F – поверхность нагрева выпарного аппарата; d , l , n – внутренний диаметр, длина и количество трубок в кипяtilьнике выпарного аппарата, соответственно.

Коэффициент идентификации (ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3). Принимается $\phi_3 = 0,7$ при $\phi_1 = \phi_2 = 1$.

После занесения необходимых для работы программы исходных данных программа автоматически рассчитывает все коэффициенты теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов.

Второе приближение. Путем изменения поверхности теплообмена в каждом корпусе выпарного аппарата по программе «Тепловой расчет (тест-блок)» добиваются равных КТП по программе «Тепловой расчет (тест-блок)» и по программе «Расчет КТП. Падающая пленка». Полученные величины КТП

подставляются в формулу для определения полезных температурных напоров по корпусам выпарной батареи. При вычислении температурных депрессий расчет ведется по концентрациям с учетом температуры вторичного пара и теплоты фазового перехода (скрытой теплоты парообразования). Далее расчет повторяется по изложенному алгоритму.

Количество приближений заканчивается при совпадении всех температурных, концентрационных режимов и коэффициентов теплопередачи как по файлу «Таблица», так и по файлам «Тепловой расчет (тест-блок)» и «Расчет КТП».

Приложения

1. Таблица.
2. Депрессия сульфат.
3. Таблица термодинамических свойств.
4. Расчет гидростатической депрессии.
5. Плотность сульфат.
6. Расчет невязки.
7. Тепловой расчет (тест-блок).
8. Расчет КТП. Падающая пленка.

6.4. Оптимизация параметров выпарных батарей

Общие положения. При любой оптимизации вначале формируют критерий оптимизации или функцию цели. В качестве функции цели могут выступать минимум приведенных затрат, оптимальный КПД, оптимальная производительность и др. Наибольшее применение находит критерий оптимальности по приведенным затратам. В настоящем примере в качестве критерия оптимальности рассматривается минимум удельной стоимости выпаренной воды. Выпарная установка представлена 6-ступенчатой схемой смешанного тока: 4 – 5 – 6 – 1пс – 3 – 2пс – 1 – 2. Выпарные аппараты с падающей пленкой и принудительной циркуляцией, регенеративные теплообменники нагрева раствора – теплообменники смешения кавитационно-вихревого типа.

Автоматизация расчета определения оптимальных параметров выпарной батареи включает три основных программы:

- тепловой расчет (тест-блок);
- расчет коэффициентов теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов;
- минимизация критерия оптимальности и исследование влияния варьируемых переменных на математической модели.

Формирование критерия оптимальности выпарной батареи. В качестве критерия оптимальности принимается величина удельной себестоимости выпаренной воды по приведенным затратам.

$$\frac{C}{W} = \frac{\left[\frac{p_m \cdot (P_i + N_{\text{упн}})}{Q_p^H} + (p_f \cdot F + p_{\text{упн}} \cdot n) \cdot \frac{A_0}{\tau \cdot 3600} \right]}{\Sigma W},$$

где C – стоимость выпаривания, руб/кг выпаренной воды;

ΣW – суммарное количество выпаренной воды, кг/кг;

P_m – стоимость топлива, руб /кг;

Q_p^H – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

$N_{цн} = N_d \cdot n$ – общая удельная мощность циркуляционных насосов, кВт;

n – количество циркуляционных насосов (ступеней выпаривания), шт.;

p_f – стоимость 1 м² поверхности, руб/м² (принимается);

F – общая поверхность теплообмена выпарных аппаратов, м²;

$p_{цн}$ – стоимость циркуляционного насоса, руб (принимается);

A_0 – коэффициент амортизационных отчислений (принимается);

τ – число часов работы в год.

Из анализа критерия оптимальности видно, что критерий оптимальности состоит из 2 конкурирующих факторов:

- Первый фактор определяет затраты энергии для обеспечения процесса выпаривания. К ним относятся затраты энергии на компенсацию эксергетических потерь и затраты энергии на привод циркуляционных насосов.

- Второй фактор характеризует капитальные затраты на изготовление выпарных аппаратов и циркуляционных насосов.

Алгоритм раскрытия составляющих критерия оптимальности через варьируемые переменные. Выбор плана эксперимента в кодированных значениях для принятых варьируемых переменных. Варьируемыми параметрами, влияющими на себестоимость выпаривания, приняты:

- общий температурный напор – разность температур между греющим паром 1-го корпуса и вторичным паром в последнем корпусе по ходу пара, C ;

- число ступеней выпаривания, которое влияет на расход пара и общую поверхность теплообмена выпарных аппаратов;

- скорость падающей пленки, м/с.

Выбор плана эксперимента. Для раскрытия составляющих критерия оптимальности воспользуемся одним из планов планирования эксперимента. Применим ротатабельный центральный композиционный план второго порядка в кодированных значениях для трех переменных.

Данный метод позволяет получить и исследовать регрессионное уравнение аналитическими методами на оптимум целевой функции. Матрица центрального композиционного плана состоит из ядра плана, звездных точек и центра плана. В качестве ядра плана может быть использован полный 2_n факторный план. Величина плеча α для ротатабельного плана второго порядка вычисляется по формуле:

$$\alpha = 2_n / 4,$$

где n – число варьируемых переменных.

Составляется матрица планирования эксперимента для трех переменных в кодированных значениях (табл. 6.2). Выбираем нулевой уровень для каждой переменной, шаг для каждой переменной и определяем звездные точки.

Таблица 6.2 – Матрица планирования эксперимента

Наименование	Номер опыта	Переменные		
		X1	X2	X3
Ядро плана	1	-1	-1	-1
	2	+1	-1	-1
	3	-1	+1	-1
	4	+1	+1	-1
	5	-1	-1	+1
	6	+1	-1	+1
	7	-1	+1	+1
	8	+1	+1	+1
Звездные точки	9	-1,682	0	0
	10	+1,682	0	0
	11	0	-1,682	0
	12	0	+1,682	0
	13	0	0	-1,682
	14	0	0	+1,682
Центр плана	15	0	0	0

Для примера приняты следующие варьируемые переменные:

$$x_1^0 = 130 \text{ С}, x_{1\text{шаг}} = 20 \text{ С}, x_1^{-1} = 110 \text{ С}, x_1^{+1} = 150 \text{ С},$$

$$x_2^0 = 8 \text{ ступ}, x_{2\text{шаг}} = 2 \text{ ступ}, x_2^{-1} = 6 \text{ ступ}, x_2^{+1} = 10 \text{ ступ},$$

$$x_2^{-1,682} = 5 \text{ ступ}, x_2^{+1,682} = 11 \text{ ступ},$$

$$x_3^0 = 2 \text{ м/с}, x_{3\text{шаг}} = 0,5 \text{ м/с}, x_3^{-1} = 1,5 \text{ м/с}, x_3^{+1} = 2,5 \text{ м/с},$$

$$x_3^{-1,682} = 1,16 \text{ м/с}, x_3^{+1,682} = 2,84 \text{ м/с},$$

Согласно определенным варьируемым параметрам заполняем таблицу плана для трех переменных.

Все расчеты производятся в следующей последовательности:

1. Тепловой проектный расчет выпарных батарей по исходным данным матрицы планирования эксперимента для всех опытов. Используются две программы: программа теплового расчета (тест-блок) и программа для расчета коэффициентов теплопередачи по корпусам выпарных аппаратов. Расчет ведут аналогично методике проектного теплового расчета.

2. Материальный и тепловой балансы выпарных батарей по данным теплового расчета. В результате расчетов вычисляются значения критерия оптимальности для каждого опыта матрицы планирования эксперимента. При этом расчет ведется путем сравнения КТП, полученного по программе расчета КТП с КТП, полученном из теплового расчета (тест-блок). Основным принимается КТП, полученный по программе «Расчет КТП». Получение КТП в программе теплового расчета (тест-блок), равным КТП, полученный по программе «Расчет КТП», достигается путем корректировки значения поверхности теплообмена каждого кипятильника выпарного аппарата в программе тест-блок до полного совпадения КТП по обеим программам. При несовпадении исходных данных для расчетов КТП расчет повторяется вновь до полного совпадения не только КТП по обеим программам, но и по температурным и концентрационным режимам. Расчет можно считать законченным, когда полученные значения КТП по обеим программам совпадают и не требуют корректировки поверхностей нагрева кипятильников выпарных аппаратов.

Алгоритм обработки результатов эксперимента. В программу минимизации критерия оптимизации вводятся исходные данные, полученные из матрицы планирования эксперимента как целевой функции (удельная себестоимость выпаренной воды по приведенным затратам). По программе обрабатываются введенные исходные данные с получением математической модели в виде полинома второй или более степеней. Исследованием математической модели определяются значимые и незначимые факторы, аналитический минимум критерия оптимальности, а также строятся графические зависимости по влиянию варьируемых параметров выпарной батареи на себестоимость выпаривания.

Исследование уравнения проводится путем построения графиков зависимости варьируемых параметров и их взаимодействия на функцию цели (себестоимость выпаренной воды):

- общего температурного напора при различном числе ступеней выпаривания и нулевом значении скорости пленки;
- общего температурного напора при различной скорости пленки и нулевом значении числа ступеней выпаривания;
- числа ступеней выпаривания при различном общем температурном напоре и нулевом значении скорости пленки;
- числа ступеней выпаривания при различной скорости пленки и нулевом значении общего температурного напора;
- скорости пленки при различном числе ступеней выпаривания и нулевом значении общего температурного напора;
- скорости пленки при различном общем температурном напоре и нулевом значении числа ступеней выпаривания.

Вопросы для самоконтроля

1. Как на основе поверочного теплового расчета можно проанализировать работу действующей выпарной установки?
2. Что такое критерий оптимальности?
3. Как определяется коэффициент идентификации математической модели физической?
4. Что является исходными данными для проведения поверочного расчета?
5. Каким образом осуществляется составление таблицы основных режимных параметров МВУ?
6. Основные причины низкой эффективности работы выпарных установок?
7. Какие температуры известны в начале проектного теплового расчета выпарных батарей?
8. Как определяются концентрации крепкого раствора на выходе из каждого корпуса МВУ?
9. Как рассчитываются полезные температурные напоры по корпусам МВУ?
10. Что является варьируемыми параметрами, влияющими на себестоимость выпаривания?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Непенин, Н. Н. Технология целлюлозы, Т.1. / Н. Н. Непенин. – Москва: Лесная промышленность, 1976. – 571 с. – Текст: непосредственный.
2. Комплексная химическая переработка древесины: учебник для вузов / И. Н. Ковернинский, В. И. Комаров, С. И. Третьяков [и др.]; под редакцией И. Н. Ковернинского; Архангельский государственный технический университет. – Архангельск: Издательство АГТУ, 2002. – 347 с. – Текст: непосредственный. – ISBN 5-261-00054-3.
3. Иванов, С. Н. Технология бумаги: учебное пособие / С. Н. Иванов. – 3-е изд. – Москва: Школа бумаги, 2006. – 696с.; 21 см. – Библиогр.: С. 681-689. – Текст: непосредственный. – ISBN 5-86472-161-1.
4. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков: учебник для вузов / Б. Д. Богомолов, С. А. Сапотницкий, О. М. Соколов [и др.]; под редакцией Б. Д. Богомолова, С. А. Сапотницкого. – Москва: Лесная промышленность, 1989. – 360 с. – Текст: непосредственный. – ISBN 5-7120-0160-8.
5. Суслов, В. А. Основные процессы при выпаривании щелоков целлюлозного производства: учеб. пособие для вузов / В. А. Суслов. – Санкт-Петербург: СПбГТУРП, 2004. – 156 с. – Текст: непосредственный.
6. Жучков, П. А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве / П. А. Жучков. – Москва: Лесная промышленность, 1978. – 407 с. – Текст: непосредственный.
7. Мовсесян, В. Л., Суслов, В. А. Выпарные аппараты и схемы выпарных станций ЦБП / В. Л. Мовсесян, В. А. Суслов. – Москва: ЦИНТИхимнефтемаш, 1980. – 53 с. – Текст: непосредственный.
8. Мовсесян, В. Л. Проектирование выпарных установок ЦБП / В. Л. Мовсесян, В. А. Суслов, В. А. Ганичев, А. Ф. Мурзич. – Ленинград: ЛТА, 1987. – 81 с. – Текст: непосредственный.
9. Казаков, В. Г., Луканин, П. В., Смирнова, О. С. Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок: учеб. пособие для вузов / В. Г. Казаков, П. В. Луканин, О. С. Смирнова. – Санкт-Петербург: СПбГТУРП, 2011. – 93 с. – Текст: непосредственный. – ISBN 978-5-91646-051-3
10. Казаков, В. Г. Планирование экспериментальных исследований и статистическая обработка данных. Основы научных исследований в промышленной теплоэнергетике: учебное пособие/ В. Г. Казаков, П.В. Луканин, Е.Н. Громова; М-во науки и высшего образования РФ, С.- Петерб. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. – 2-е изд., доп. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 95 с. – Текст: непосредственный. – ISBN 978-5-91646-274-6.

Учебное издание

**Казakov Владимир Григорьевич
Луканин Павел Владимирович
Громова Екатерина Николаевна**

**ВЫПАРНЫЕ
ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
УСТАНОВКИ**

Учебное пособие

Редактор и корректор М. Д. Баранова
Техн. редактор Д. А. Романова

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
Электронное устройство с программным обеспечением
Для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю.
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 18.11.2024 г. Рег. № 5100/24

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.