

А.В. Коваль
студент группы ХТ-409
М.К. Захаров
профессор кафедры ПАХТ
Г.А. Носов
заведующий кафедрой ПАХТ
МИТХТ им. М.В. Ломоносова

СПОСОБЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ВЫПАРИВАНИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

УДК: 66.021

Предложен и проанализирован новый способ экономии греющего пара в многокорпусных выпарных установках за счет возвращения части теплоты конденсата после его дросселирования. Проведено сопоставление этого варианта энергосбережения при выпаривании растворов с уже известными.

На химических производствах часто получают концентрированные растворы из разбавленных, иногда - чистый растворитель (например, при опреснении морской воды). В применяемых для этих целей установках могут использоваться самые различные источники теплоты: топочные газы, электроэнергия, различного рода высокотемпературные теплоносители (масла или специально синтезированные органические соединения, позволяющие работать при температурах до 300°C) и другие. Но самым распространенным греющим агентом на производствах является сухой насыщенный водяной пар из-за его доступности и относительной экологической безвредности получающегося конденсата (не считая теплового загрязнения).

Процесс выпаривания характеризуется повышенными энергозатратами, поскольку на удаление 1 кг воды из раствора расходуется более 1 кг свежего пара.

Энергоемкость выпарной установки можно уменьшить за счет использования вторичного пара для выпаривания того же раствора. Для этого нужно решить проблему, связанную с тем, что температура получившегося вторичного пара меньше температуры кипения раствора вследствие температурной депрессии. Для создания необходимой движущей силы процесса теплопередачи применяются 2 способа [1]:

- повышение температуры конденсации пара.
- понижение температуры кипения раствора.

Первый способ реализуется при использовании различных тепловых насосов (ТН). Принцип действия таких насосов заключается в повышении параметров вторичного пара до значений греющего. Это можно сделать различными способами, например сжатием вторичного пара в компрессоре или смешением его с острым паром в инжекторе. Такие насосы называются соответственно полным и частичным - по количеству возвращаемого в установку вторичного пара. Схемы таких установок приведены на рис. 1.

Частичный тепловой насос использует лишь часть вторичного пара, которая определяется коэффициентом инжекции. Он экономит меньше свежего пара, чем полный, однако позволяет отводить экстра-пар. Если последний находит применение, то он может быть выгоднее полного, поскольку не требует затрат дорогостоящей электроэнергии на компрессор. Если же нет потребителя на вторичный пар, то разумнее использовать полный тепловой насос. В этом случае теплота вторичного пара используется полнее, и, как показано в [2], в этом случае можно достичь экономии до 43% затрат.

Однако, для этих двух насосов все еще требуется подвод дополнительного пара D_+ или D_0 . Кроме того, после сжатия вторичного пара получается перегретый пар, который перед конденсацией должен отдать теплоту перегрева, а для этого требуется существенно увеличить поверхность теплообмена греющей камеры.

Чтобы избавиться от этих недостатков, применяется усовершенствованный тепловой насос [3]. В усовершенствованном тепловом насосе для компенсации дополнительного потока пара используется дросселирование конденсата греющего пара до давления вторичного, что позволяет получать влажный пар и, после разделения на воду и сухой насыщенный пар, возвращать последний в установку.

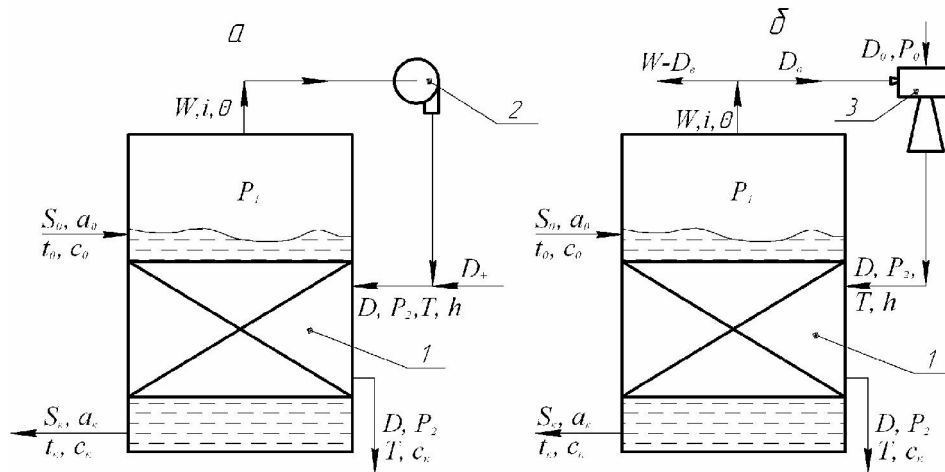


Рис. 1. Схема работы выпарных аппаратов с тепловым насосом: а – полный ТН, б – частичный ТН
1 – выпарной аппарат, 2 – турбокомпрессор, 3 – инжектор

Рис. 1. Схема работы выпарных аппаратов с тепловым насосом: а – полный ТН, б – частичный ТН (1 – выпарной аппарат, 2 – турбокомпрессор, 3 – инжектор)

Кроме того, для получения сухого насыщенного пара используется барботирование сжатого в компрессоре пара через конденсат греющего, в результате получается поток пара D'' , который, как показано в [3], может быть даже больше необходимого потока D . В этом случае возможен отвод из установки экстра-пара.

Схема усовершенствованного теплового насоса позволяет использовать не только теплоту вторичного пара, но и частично возвращать в установку теплоту конденсата. Примечательно, что в такой схеме процесса не требуется подвода греющего пара, то есть установка работает только с затратами электроэнергии на сжатие пара.

Как уже было упомянуто, второй способ использования вторичного пара в качестве греющего заключается в понижении температуры кипения раствора во втором корпусе за счет уменьшения давления в нем. Поэтому часто второй корпус работает под вакуумом, для создания которого необходим барометрический конденсатор смешения.

Теплота конденсации получающегося вторичного пара примерно равна теплоте конденсации греющего пара, поэтому в двух корпусах можно выпарить в 2 раза больше растворителя по сравнению с однокорпусной. Еще более выгодным является использование трехкорпусной выпарной установки

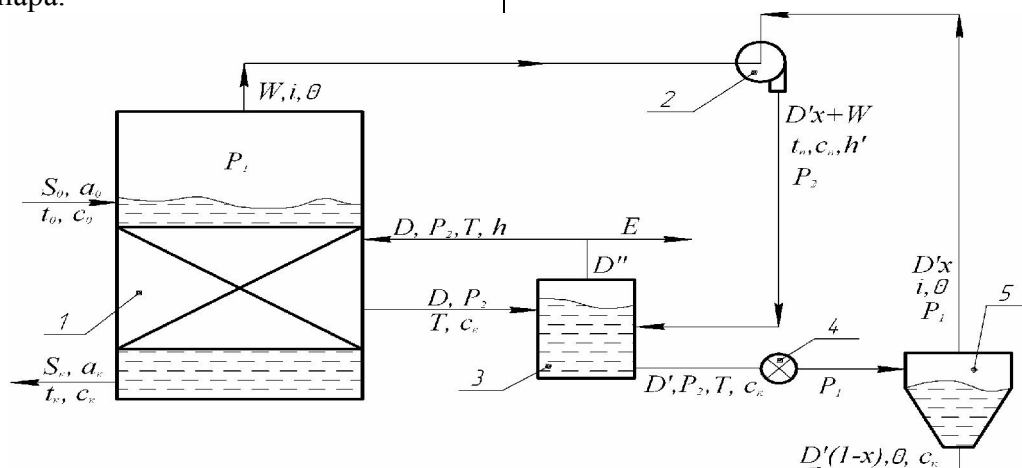


Рис. 2. Схема работы выпарного аппарата с усовершенствованным тепловым насосом
1 – выпарной аппарат, 2 – турбокомпрессор, 3 – сепаратор высокого давления,
4 – дроссель, 5 – сепаратор низкого давления

Рис. 2. Схема работы выпарного аппарата с усовершенствованным тепловым насосом.
(1 – выпарной аппарат, 2 – турбокомпрессор, 3 – сепаратор высокого давления,
4 – дроссель, 5 – сепаратор низкого давления)

Данный способ очень эффективен, поскольку при высокой экономии (2 корпуса позволяют экономить почти 50% пара) обеспечивает простоту эксплуатации установки. Применение полного теплового насоса имеет ограниченное применение из-за использования турбокомпрессора, имеющего малые степени сжатия при больших объемных расходах пара. Поэтому его выгодно использовать при соотношении

давлений $P_2/P_1 \approx 2,5$ и при производительности по вторичному пару более $1,5 \text{ м}^3/\text{с}$ [1].

Многокорпусную установку можно усовершенствовать путем упомянутого ранее процесса дросселирования конденсата греющего пара до давления вторичного пара и затем добавлением образующегося при дросселировании потока пара ко вторичному.

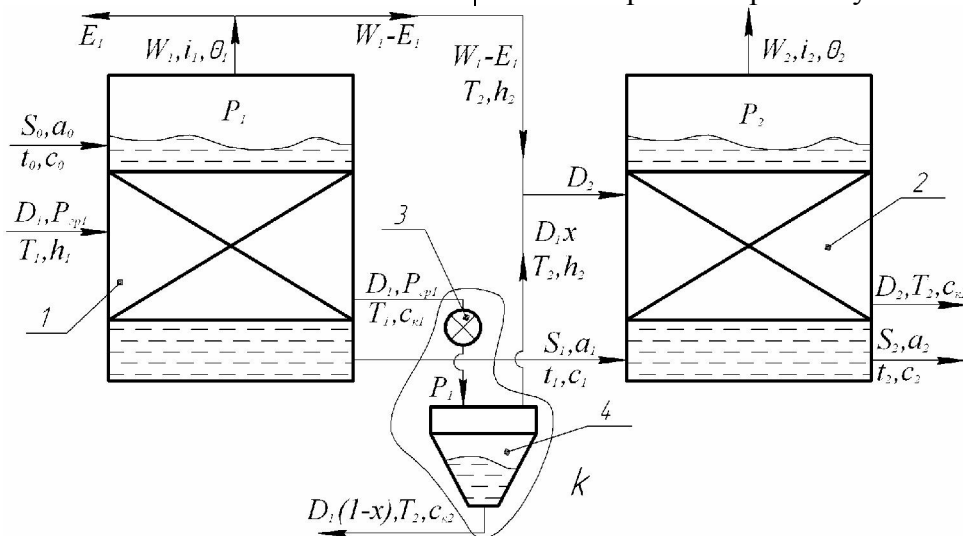


Рис. 3. Схема работы усовершенствованного двухкорпусного выпарного аппарата

1 – первый корпус, 2 – второй корпус, 3 – дроссель, 4 – сепаратор

Рис. 3. Схема работы усовершенствованного двухкорпусного выпарного аппарата (1 – первый корпус, 2 – второй корпус, 3 – дроссель, 4 – сепаратор)

Схема такой установки представлена на рис. 3: конденсат под давлением $P_{зр1}$ атм температурой T_1 °C проходит через дроссель 3 и превращается во влажный пар с давлением P_1 атм и температурой T_2 °C, после чего поступает в сепаратор 4, где разделяется на сухой насыщенный пар и конденсат. Пар затем используется в качестве дополнительного греющего пара во втором корпусе. Заметим, что конденсат имеет достаточно высокую температуру, и его можно использовать для подогрева исходного раствора.

В данной схеме часть теплоты в виде водяного пара возвращается в установку и позволяет получить дополнительную экономию греющего пара. Количество дополнительного пара определяется как произведение общего количества греющего пара (конденсата) на степень сухости x полученного влажного пара. Для определения этого параметра составим тепловой баланс по тепловым потокам по

контур k , охватывающему дроссель и сепаратор.

$$D_1 T_1 c_{k1} - D_1 (1-x) T_2 c_{k2} - D_1 x \cdot h_2 = 0,$$

$$\text{откуда } x = \frac{T_1 c_{k1} - T_2 c_{k2}}{h_2 - T_2 c_{k2}}.$$

При расчете выпарной установки необходимо также составить тепловые балансы по корпусам. Для первого корпуса он будет таким же, как и для установки без дросселирования:

$$Q_1 = D_1 (h_1 - T_1 c_{k1}) = S_1 c_1 t_1 - S_0 c_0 t_0 + W_1 i_1$$

Для второго корпуса добавится теплота дополнительного потока пара: $Q_2 = (W_1 - E_1 + D_1 x)(h_2 - T_2 c_{k2}) = S_2 c_2 t_2 - S_1 c_1 t_1 + W_2 i_2$ Как и при расчете выпарной установки без дросселирования выражения $S_1 c_1$ и $S_2 c_2$ можно заменить по правилу аддитивности теплоемкости, например:

$$S_2 c_2 = S_0 c_0 - W_1 c_p - W_2 c_p.$$

Тогда получается:

$$Q_1 = D_1(h_1 - T_1 c_{k1}) = S_0 c_0(t_1 - t_0) + W_1(i_1 - c_P \cdot t_1) \quad (1)$$

$$Q_2 = (W_1 - E_1 + D_1 x)(h_2 - T_2 c_{k2}) = S_0 c_0(t_2 - t_1) - W_1 c_P(t_2 - t_1) + W_2(i_2 - c_P t_2) \quad (2)$$

При известной степени сухости пара система уравнений (1) и (2) с двумя неизвестными W_1 и D_1 легко решается. Однако, расчет такой установки осложнен невозможностью определения величины x , поскольку первоначально неизвестны параметры ведения процесса и поэтому лишь после вычисления площади поверхности теплообмена и уточнения движущих сил по корпусам возможно рассчитать величину x .

Процесс расчета выпарной установки является достаточно трудоемким из-за поиска справочных данных и использования громоздких формул. Современные программы позволяют автоматизировать эти процессы. В наших расчетах использовалась программа Microsoft Excel, где помимо основного файла, содержащего результаты и формулы для расчетов, использовался дополнительный – с таблицами справочных данных (параметров растворов, воды и водяного пара), откуда автоматически выбирались необходимые величины и соответствующая подпрограмма делала интерполяцию. Это позволило выполнить

расчет выпарных установок для 5 видов солей с конечной концентрацией до 50%, контролировать все стадии расчета и сравнить показатели работы усовершенствованной установки с обычной.

Ниже приведены результаты расчета для конкретной задачи – выпаривания раствора гидроксида натрия производительностью $S_0 = 9000 \text{ кг/ч}$ от начальной концентрации $a_0 = 8\% \text{ масс.}$ до конечной $a_2 = 34\% \text{ масс.}$ Для обычной установки расход пара составил 4340 кг/ч и 4130 кг/ч для усовершенствованной, то есть экономия равна 210 кг/ч, что составляет 5% от исходного количества греющего пара. Несмотря на казалось бы небольшую цифру, это довольно хороший результат: дроссель и сепаратор, единожды установленные, не создают дополнительных эксплуатационных затрат и окупают себя достаточно быстро. Также следует отметить, что степень сухости составляет 9,3%, то есть почти десять процентов конденсата возвращаются в установку в виде пара.

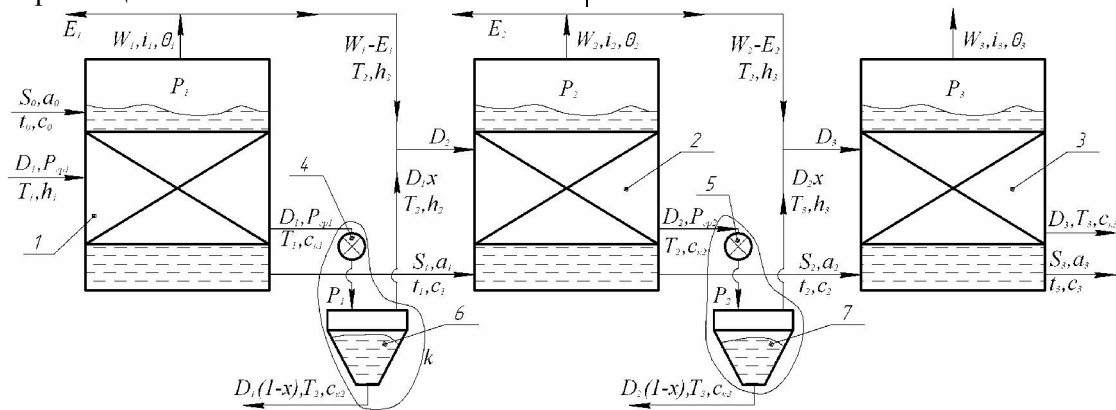


Рис. 4. Схема работы усовершенствованного трехкорпусного выпарного аппарата
1,2,3 – корпуса установки, 4,5 – дроссели, 6,7 – сепараторы

Рис. 4. Схема работы усовершенствованного трехкорпусного выпарного аппарата
1,2,3 – корпуса установки, 4,5 – дроссели, 6,7 – сепараторы

Аналогичная схема для трехкорпусной выпарной установки представлена на рис.4. В этом случае дросселирование можно сделать как для конденсата греющего пара в первом корпусе, так и во втором. Балансы для трехкорпусной установки и схема расчета аналогичны двухкорпусной.

Степень сухости получаемого после дросселирования влажного пара получается из тепловых балансов по сепаратору и дросселю:

Для первого корпуса:
 $D_1 T_1 c_{k1} - D_1(1-x)T_2 c_{k2} - D_1 x \cdot h_2 = 0,$

$$\text{откуда } x_1 = \frac{T_1 c_{k1} - T_2 c_{k2}}{h_2 - T_2 c_{k2}}$$

Для второго корпуса: $(D_2 \cdot T_2 c_{k2} - D_2(1 - x_2)T_3 c_{k3} - D_2 x_2 \cdot h_3 = 0$, откуда

$$x_2 = \frac{T_2 c_{k2} - T_3 c_{k3}}{h_3 - T_3 c_{k3}}$$

Тепловые нагрузки по корпусам:

$$Q_1 = D_1(h_1 - T_1 c_{k1}) = S_0 c_0(t_1 - t_0) + W_1(i_1 - c_p \cdot t_1)$$

$$Q_2 = (W_1 - E_1 + D_1 x_1)(h_2 - T_2 c_{k2}) = S_0 c_0(t_2 - t_1) - W_1 c_p(t_2 - t_1) + W_2(i_2 - c_p t_2)$$

$$Q_3 = (W_2 - E_2 + D_2 x_2)(h_2 - T_2 c_{k2}) = S_0 c_0(t_3 - t_2) - (W_1 + W_2)c_p(t_3 - t_2) + W_3(i_3 - c_p t_3)$$

Очевидно, что здесь имеется система 3-х уравнений с 3-мя неизвестными (D_1, W_1, W_2), поскольку $D_2 = D_1 \cdot x_1 + W_1 - E_1$ и $W_3 = W - (W_1 + W_2)$. Проблема с неизвестными x_1 и x_2 здесь также решается итерационным методом.

Расчет обычной трехкорпусной установки дает расход греющего пара 3270 кг/ч, а для аппарата с дросселированием 3090 кг/ч, то есть экономится 180 кг/ч греющего пара, или 5,5%.

На предприятиях одним из часто используемых способов уменьшения суммарного расхода пара в цехе, на заводе является отвод экстра-пара с выпарной установки. Как известно, вторичный пар имеет более низкое давление, однако вполне может использоваться в качестве греющего в других технологических процессах, где требуется пар меньшего давления. Например, для нагревания воды до определенной температуры зачастую используют греющий пар, и разумно

использовать не пар высокого давления из центрального паропровода, а экстра-пар из выпарной установки. Это выгодно, поскольку стоимость пара в интервале 2,5-15 атм. обычно различается не более, чем на 8-10%, а на многих предприятиях даже одинакова. Кроме того, это приводит к уменьшению потока пара, идущего в барометрический конденсатор смешения и снижает затраты энергии на создание вакуума.

Рассмотрим, как влияет применение дросселирования на работу установок с отводом экстра пара. Но сначала проанализируем, как зависит расход греющего пара от количества отводимого экстра-пара. Результаты расчетов приведены на рис. 5. Для двухкорпусной установки зависимость D_1 от E имеет вид прямой линии, тангенс угла наклона которой составляет 0,497. На каждый дополнительный килограмм получаемого экстра-пара расходуется всего 0,5 кг свежего пара. Для разных видов солей и различных концентраций раствора такая зависимость сохраняется.

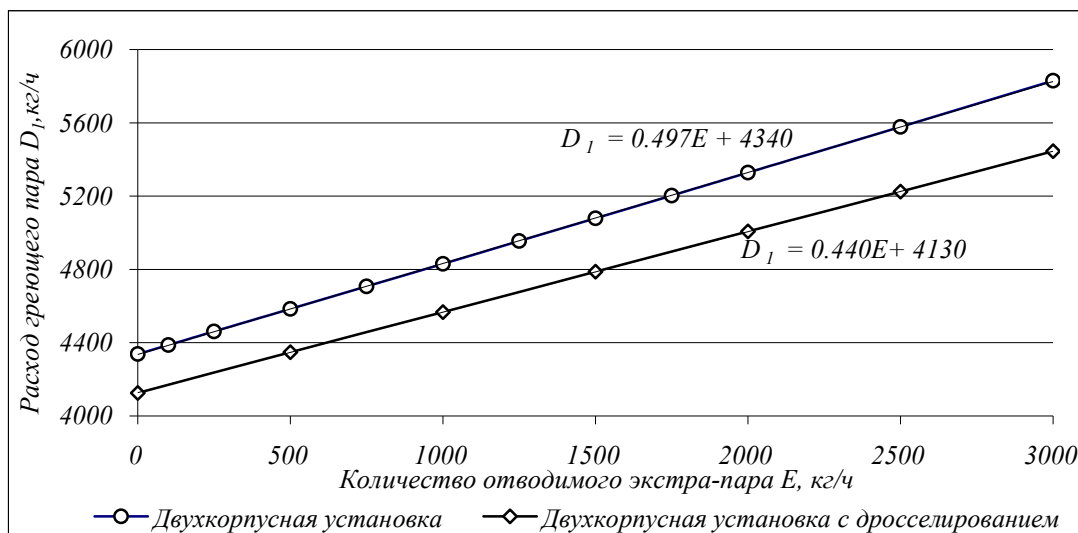


Рис. 5. Зависимость расхода греющего пара от количества отводимого экстра-пара в двухкорпусной установке.

Объясняется это следующим. Представим, что в двухкорпусную установку необходимо удалить 4 кг пара из раствора, чтобы получить заданную концентрацию. Считая постоянными теплоты конденсации водяного пара в рабочем интервале давлений, в первый корпус для этого необходимо подать 2 кг греющего пара: в первом корпусе он испарит 2 кг вторичного пара из раствора, а во втором эти 2 килограмма вторичного пара в качестве греющего пойдут на выпаривание еще двух килограммов воды. Теперь предположим, что из установки можно отвести некоторое количество экстра-пара. Для этого, очевидно, надо увеличить расход греющего. Предположим, мы добавили дополнительный килограмм острого пара. Теперь в первый корпус подается 3 кг пара, которые выпаривают столько же килограммов воды. Теперь во втором корпусе надо удалить только 1 килограмм воды, израсходовав на это 1 кг вторичного пара. А поскольку поток из первого корпуса

– 3 кг, то получившиеся таким образом 2 «лишних» килограмма мы и отводим в качестве экстра-пара.

Следовательно, и линия зависимости расхода греющего пара от количества отводимого экстра-пара должна иметь тангенс угла наклона $\frac{1}{2}$, что и подтверждается расчетами. Небольшое отклонение можно объясняется изменением теплоты конденсации с температурой.

Аналогичное рассуждение приводит к тому, что в трехкорпусной установке тангенс угла наклона линии должен составить $1/1,5$ или $2/3$, поскольку в ней на испаренный «лишний» килограмм вторичного пара из первого корпуса в остальных двух корпусах очевидно экономится только 0,5 кг пара (которые нужны были бы для испарения этого килограмма) и суммарно на 1 кг дополнительного острого пара можно отвести только 1,5 кг экстра-пара. Это также соответствует полученной зависимости.

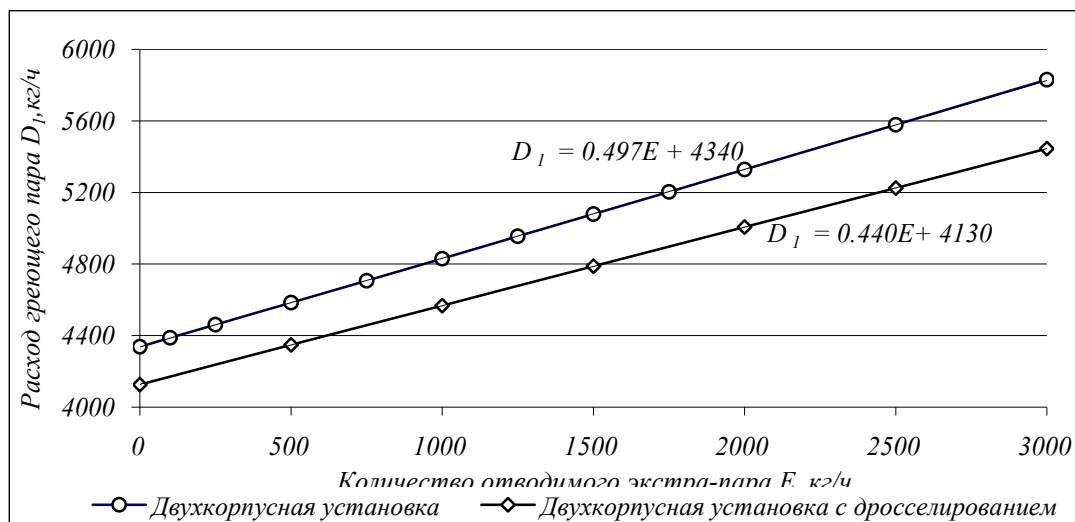


Рис. 6. Зависимость расхода греющего пара от количества отводимого экстра-пара в трехкорпусной установке.

Главным ограничением при таком способе экономии является упомянутое выше ухудшение характеристик отводимого пара. Достаточно сложно найти применение пару с давлением 1,2 атмосферы, а пар ниже 1 атм не используется, поскольку имеет низкую температуру конденсации и, следовательно, малую движущую силу теплопередачи. Данные графики оканчиваются значением $E = 3000$ кг/ч отводимого экстра-пара, поскольку в окрестностях этого значения для большинства установок давление

отводимого пара становится неприемлемо низким – менее 1 атм.

Итак, при увеличении количества отводимого экстра-пара увеличивается и расход греющего пара. Таким образом становится еще более привлекательной идея дросселирования конденсата, поскольку при увеличении его потока будет получаться все большее количество дополнительного пара. Это позволяет предположить для усовершенствованной установки более пологую зависимость D_1 от E и большую экономию греющего пара.

Расчет, естественно, подтвердил это. Так, при отводе 3000 кг/ч экстра-пара экономия составляет уже 6,6% греющего пара. Еще более выгодным представляется использование дросселирования в трехкорпусной установке (для 3000 кг/ч экономия составляет 8,2% пара). Примечательно, что при этом пар имеет достаточно высокие параметры. Это оптимальный вариант установки, поскольку при высоком качестве отводимого пара достигаются хорошие экономические показатели. Объясняется это тем, что при возрастании количества греющего пара, возрастает и поток возвращаемого в установку пара из сепараторов, особенно из первого корпуса, который затем «отрабатывает» в двух корпусах, давая соответственно двойную выгоду.

В случае трехкорпусной установки можно предложить несколько вариантов отвода экстра-пара. И если для первого корпуса тангенс угла наклона линии $D_1 = f(E)$ больше, чем у двухкорпусной, то при отводе из второго корпуса он должен быть меньше и очевидно равняться 1/3. Для аппарата с применением дросселя он получился еще меньше (однако экономия получается очень маленькой, соответствующая небольшому увеличению потока острого пара) и при этом получается пар низкого качества. Можно попытаться совместить достоинства обоих способов отвода с помощью инжектора – в этом случае часть пара высокого давления отводится из первого корпуса, часть с низким давлением из второго а затем они смешиваются в инжекторе.

Основные обозначения:

- D - массовый расход греющего пара, кг/с или кг/ч
- x - степень сухости пара, кг сухого насыщ.пара/кг вл. пара.
- T - температура конденсации греющего пара, °C
- c - теплоемкость жидкостей, кДж/(кг·K)
- h - энтальпия паров, кДж/кг
- S - массовый расход раствора, кг/с или кг/ч
- t - температура раствора, °C
- W - массовый расход вторичного пара кг/с или кг/ч
- E - массовый расход экстра-пара кг/с или кг/ч
- Q - тепловая нагрузка в корпусе, кВт
- a - концентрация, %масс.
- P - давление в корпусе, атм или бар.

Индексы.

- гр – греющего пара
- к – конденсата
- +
- дополнительный поток пара

ЛИТЕРАТУРА:

1. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А., и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии.// М.Химия, 1999 – 1 кн 888с, 2000 – 2 кн. 1760с.
2. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. Компенсирующий тепловой насос в химико-технологических процессах (возможности и основы расчета). Хим. Пром, 2000, №9, с. 454-462
3. Захаров М.К. Сравнение эффективности применения различных вариантов теплового насоса. Хим. Пром, 2002 №8 с. 10-16