

А. И. Ершов, профессор; И. М. Плехов, профессор; Ю. П. Лунчук, инженер

**ТЕХНИЧЕСКИЙ СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОТЕРЬ
И ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ РАСТВОРОВ
В ВЫПАРНЫХ АППАРАТАХ**

Results of experimental researches of the mechanism of interaction of gas and liquid in the biphase twirled stream, and also influences of account parameters on an overall performance of contact devices and their geometrical sizes are carried out.

Введение. При концентрировании растворов в химической, пищевой и других отраслях промышленности широко применяют выпарные установки – однокорпусные, многокорпусные и с тепловым насосом. Причем греющим агентом в подавляющем большинстве случаев используется насыщенный водяной пар, называемый первичным. Его удельный расход на единицу массы испаряемой влаги во многом зависит от способа проведения процесса и величины температурных потерь на термическую депрессию, гидростатический и гидравлические эффекты.

Из трех вышеуказанных способов самым энергоэкономичным в настоящее время признано многократное или многокорпусное выпаривание, при котором удельный расход греющего пара снижается пропорционально числу корпусов. Однако при этом адекватно увеличиваются и температурные потери, приводящие к снижению движущей силы теплового процесса и удорожанию оборудования.

Для локализации данного противоречия необходимо стремиться к уменьшению температурных потерь до минимума за счет оригинальных технических решений. Вместе с тем активно воздействовать на величину термической депрессии конструктивными методами нет возможности, т.к. она определяется физико-химическими свойствами самих растворов и практически не зависит от режимов и условий протекания процесса. Величина же температурных потерь на гидростатический эффект, обуславливаемая высотой уровня концентрируемого раствора в нагревательных устрой-

вах, существенно зависит от рабочего давления в зоне кипения и конструкции аппаратов. При повышенном давлении эта величина не играет заметной роли, а при вакууме и атмосферном давлении она может составлять определяющее значение.

С целью устранения негативных явлений гидростатического эффекта были разработаны выпарные аппараты трубчато-пленочного типа [1] и роторно-лопастные [2]. Однако первые очень громоздки по высоте, а вторые сложны по устройству и требуют дополнительных затрат энергии на вращение ротора.

Основная часть. В связи с вышеизложенным на кафедре процессов и аппаратов БГТУ ведутся разработки и исследования, направленные на создание энергоэкономичных выпарных установок. В одном из новых технических решений [3] поставлена задача обеспечить интенсивный теплообмен в процессе концентрирования и устранить перегрев раствора и его термическое разложение за счет создания организованной циркуляции у теплопередающих поверхностей при малой высоте уровня в зоне кипения. Поставленная задача достигается тем, что в выпарном аппарате (рис. 1), содержащем корпус 1, торцевые крышки, плоскую горизонтальную перегородку 2, штуцера для подвода 7 и отвода 8 раствора и вторичного пара 9, горизонтальные элементы плоскооальной формы 3 жестко заделаны по торцам в трубные решетки 4, 5 коллекторов для подвода греющего пара 6 и отвода конденсата 10 секциями по три штуки в каждой с соотношением зазоров

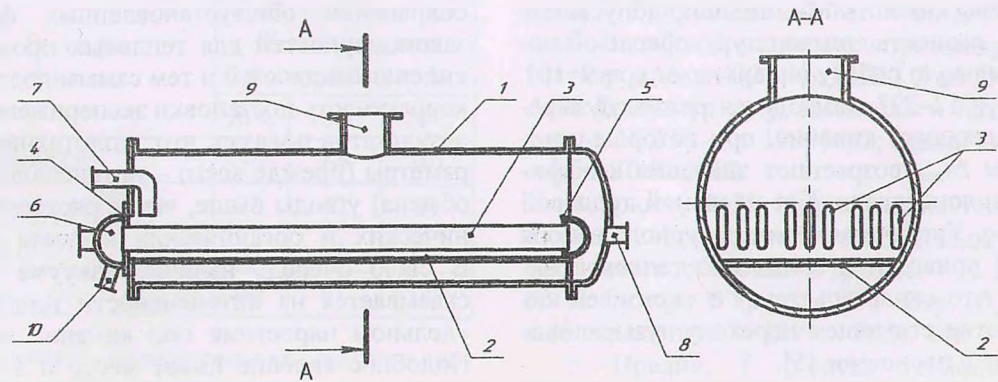


Рис. 1. Схема выпарного аппарата

между секциями к зазорам между элементами, равным $\sim 2,5$, а также расположением большой оси элементов вертикально и соблюдением расстояния между нижними овалами и горизонтальной перегородкой, равного зазору между элементами в секциях.

Благодаря секционированному расположению у наружной поверхности нагревательных устройств возникает организованный контур циркуляции кипящего раствора вместе с пузырьками образующегося вторичного пара в зазорах между элементами вверх, а в зазорах между секциями – вниз из-за существенной разности плотностей восходящего и нисходящего потоков, обусловливаемой тем, что поверхность теплообмена, приходящаяся на единицу объема раствора в зазоре между элементами, в несколько раз больше, чем в зазоре между секциями. При этом, кроме интенсификации теплообмена, температурные потери на гидростатический эффект и перегрев раствора могут быть существенно сокращены благодаря его низкому уровню в зоне кипения.

Для разработки методики расчета и проектирования подобных конструкций потребовалось проведение комплекса исследований, которые осуществлялись на лабораторном стенде [4], включавшем в себя модель выпарного аппарата, сепаратор-брызгоуловитель, конденсатор вторичного пара, емкость для замера расхода конденсата, подогреватель исходной жидкости, вакуумнасос и потенциометр. Опыты проводились на сменных моделях с различным количеством нагревательных устройств. На первоначальной стадии изучалась зависимость теплотехнических характеристик от расположения плоско-овальных элементов в секциях и их геометрических размеров, а также от величины движущей силы процесса. При этом давление в зоне кипения поддерживалось атмосферным, а давление греющего пара изменялось от 0,12 до 0,25 МПа, в результате чего менялся и перепад полезной разности температур от 6 до 30°.

Согласно наблюдениям и полученным результатам, с изменением температурного напора $\Delta t_{\text{пол}}$ в указанных пределах имеют место разные режимы кипения. Минимально допустимая полезная разность температур, обеспечивающая стабильную работу аппарата, $\Delta t_{\text{пол}} = 9\text{--}10^\circ$. При $\Delta t_{\text{пол}} = 12\text{--}22^\circ$ наблюдался режим пузырькового (ядерного) кипения, при котором с повышением $\Delta t_{\text{пол}}$ возрастают значения коэффициента теплопередачи K и удельной тепловой нагрузки q . Увеличение температурного напора выше 25° приводит к снижению тепловой нагрузки q , что свидетельствует о «кризисе» кипения, соответствующем переходу пузырькового кипения в пленочное [5].

Установлено также, что максимальный удельный паросъем достигается при соотноше-

нии ширины зазоров между секциями к ширине зазоров между нагревательными элементами, равном 2,5, и соотношении высоты элементов к их ширине ~ 7 .

В дальнейшем на модели выпарного аппарата с оптимальным вариантом секционированного нагревательного устройства, установленным по результатам первоначальной стадии, были выполнены экспериментальные исследования по изучению влияния физико-химических свойств растворов на основные рабочие характеристики процесса выпаривания, при этом выбор растворов определялся возможностью практической реализации новых выпарных аппаратов непосредственно в производстве данных продуктов. В качестве упариваемых жидкостей в опытах использовались вода и водные растворы карбамида, капролактама и сахара с изменением их свойств в следующих пределах:

вязкость кинематическая $\nu = (0,295\text{--}1,167) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
 плотность $\rho_{\text{ж}} = 958\text{--}1200 \text{ кг/м}^3$;
 теплопроводность $\lambda = 0,31\text{--}0,68 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$;
 теплоемкость $c = 3,00\text{--}4,23 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$;
 поверхностное натяжение $\sigma = (37,5\text{--}64,0) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Кроме того, проведена серия опытов по упариванию растворов карбамида и капролактама при атмосферном давлении и под разрежением. Это было сделано с целью изучения условий масштабного перехода при многократном концентрировании растворов, когда давление внутри аппаратов по разным ступеням может изменяться от избыточного до глубокого вакуума. Поскольку модель выпарного аппарата в лабораторных условиях представляла собой одну ступень, то начальную концентрацию растворов доводили до 50% весовых, а разрежение в зоне кипения до 0,05 МПа. При этом физико-химические и теплотехнические параметры тоже изменялись в широком интервале.

При обработке опытных данных получены графические зависимости коэффициента теплопередачи и плотности теплового потока от движущей силы процесса (рис. 2, 3) с учетом свойств растворов, которые свидетельствуют о сохранении общеустановленных физических закономерностей для тепловых процессов при кипении жидкостей и тем самым подтверждают корректность постановки эксперимента. Анализ результатов показал, что теплотехнические параметры (прежде всего – интенсивность теплообмена) у воды выше, чем у растворов неорганических и органических веществ (таблица). В свою очередь наличие вакуума негативно сказывается на интенсивности теплообмена и удельном паросъеме при кипении жидкостей. Подобное явление имеет место и в выпарных аппаратах с вертикальными трубчатыми испарителями.

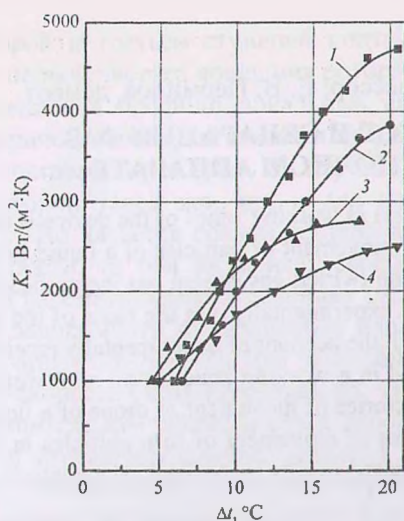


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопередачи K от движущей силы процесса теплопередачи Δt для водных растворов и воды: 1 – вода; 2 – сахар 50%; 3 – карбамид 50%; 4 – капролактан 50%

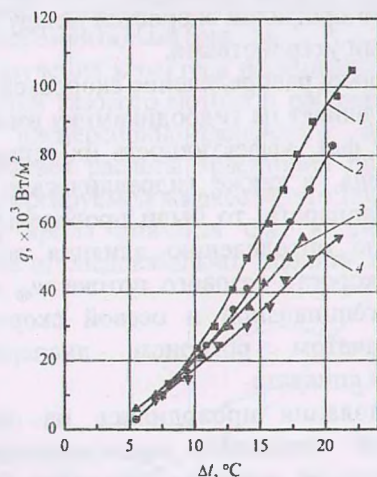


Рис. 3. Зависимость удельной тепловой нагрузки q от движущей силы процесса теплопередачи Δt для водных растворов и воды: 1 – вода; 2 – сахар 50%; 3 – карбамид 50%; 4 – капролактан 50%

Таблица

Результаты экспериментальных исследований модели выпарного аппарата

№ п/п	Растворы (% мас.)	Удельный паросъем W , кг/(м²·ч), при движущей силе Δt		
		10°C	15°C	20°C
1	Карбамид (50)	36	64	101
2	Капролактан (50)	28	52	81
3	Сахар (50)	31	71	126
4	Вода	40	87	147

Заключение. Сравнительная технико-экономическая оценка характеристик исследованного нами аппарата и выпарных аппаратов с

вертикальными кожухотрубными нагревательными камерами (см. журнал «Химическое и нефтяное машиностроение», № 5, 1967) показывает преимущества нового варианта по удельному паросъему и геометрическим параметрам.

Таким образом, результаты исследований свидетельствуют о перспективности использования выпарных аппаратов с горизонтальными нагревательными элементами плоскоооальной формы для концентрирования растворов в химической, пищевой и других отраслях промышленности.

В частности с участием авторов статьи по хозяйговору с концерном «Белнефтехим» разработан технический проект опытно-промышленной выпарной установки (ОПВА) для регенерации осадительной ванны (раствор роданистого натрия) в цехе «Нитрон» РУП «Полимир» взамен двух действующих двухкорпусных установок, изготовленных фирмой «Джон Томпсон», производительностью 40 т/ч по испаряемой влаге. В качестве кипятильников у них используются вертикальные кожухотрубные теплообменники с высотой труб 3–4 м, в которых из-за наличия гидростатического эффекта снижается полезная разность температур; происходит перегрев раствора и его частичное разложение. При этом средний удельный расход греющего пара составляет ~0,6 кг/кг, что приводит к существенным энергозатратам и завышенной стоимости готового продукта.

ОПВА включает в себя четыре ступени концентрирования в одном корпусе и рассчитан на производительность 40 т/ч по испаряемой влаге с удельным расходом греющего пара 0,29 кг/кг.

Литература

1. Выпарные трубчатые аппараты для химических производств. Каталог. – М.: ЦИНТИ, 1985.
2. Олевский, В. М. Роторно-пленочные тепло- и массообменные аппараты / В. М. Олевский, В. Р. Ручинский. – М.: Химия, 1977.
3. Выпарной аппарат для концентрирования растворов: пат. 4331 РБ, МПК⁷ В 01 D 1/04, С1 / А. И. Ершов [и др.]; заявитель и патентообладатель БГТУ. – а 19980492; заявл. 20.05.1998; опубл. 30.03.2002.
4. Ершов, А. И. Исследование теплообмена в секционированных теплообменных устройствах с плоскоооальными трубами / А. И. Ершов, Ю. П. Лунчук // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и хим. технология. – 1999. – Вып. VII. – С. 47–52.
5. Ирвайн, Т. Успехи теплопередачи / Т. Ирвайн, Дж. Хартнетт. – М.: Мир, 1971. – С. 98–117.