

И.Г. ГАВРИЛИЧЕНКО, аспирант, НТУ «ХПИ»;
Ю.Б. ДАНИЛОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫПАРИВАНИЯ ПРИ ПЛЁНОЧНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ

Рассмотрены экспериментальные исследования выпарного аппарата плёночного типа с многократным использованием тепла греющего пара. Предложена математическая модель течения плёнки раствора и определения коэффициента теплоотдачи при гравитационном режиме течения.

Ключевые слова: выпаривание, теплопередача, плёночное течение, испарение, теплоотдача.

Введение и постановка задачи. Плёночные процессы выпаривания получили достаточно широкое распространение в химической, пищевой, целлюлозно-бумажной, фармацевтической, атомной энергетике и других отраслях техники. В тонких жидкостных слоях, имеющих незначительное термическое и диффузионное сопротивление, частицы интенсивно перемешиваются, что, в свою очередь, вызывает интенсивный перенос тепла и массы. Этому способствуют процессы волнообразования, искусственная турбулизация потока специальными методами. Однако технологическое оформление плёночных потоков вызывает затруднения связанные с необходимостью создания равномерного распределения по периметру жидкого слоя с обеспечением равномерного распределения жидкости по поверхности. При разрыве плёнки жидкости снижается интенсивность теплообмена и приводит к накипеобразованию. Использование плёночных аппаратов при выпаривании недостаточно чистых жидкостей приводит к загрязнению поверхностей теплообмена, забивке распределительных устройств, что ухудшает распределение жидкостной плёнки.

Анализ последних достижений и литературы. В настоящее время имеется множество литературных источников, рассматривающих теплообмен и выпаривание при плёночном движении раствора. Однако эти процессы достаточно сложны и специфичны для различных конструкций аппаратов, поверхностей теплообмена физико-химических свойств жидкостей, давлений и температур, что требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью проведения экспериментов является получение уточненных

© И.Г. Гавриличенко, Ю.Б. Данилов. 2014

законов Ньютона, Фурье, Фика о переносе тепла и массы, и использования теории подобия применительно к решаемым прикладным задачам. При проведении экспериментальных исследований, как известно, наиболее сложными и труднодостижимыми результатами являются: достаточно точное определение температур теплопередающих стенок и потоков теплоносителей (для получения значений температурного напора) и интенсивности переноса тепла в функции «полезных» гидросопротивлений. И, если первая задача (о распределении температур) в результате многочисленных исследований и обобщений решена достаточно полно (от простейшего движения в трубах до течений в каналах сложной формы), то вторая – определяется множеством частных решений, зависящих от геометрической формы каналов, их удобообтекаемости, траектории течений, режимов движений, изменений физических параметров, термодинамических свойств и другое.

Для турбулентных (квазистационарных) течений, широко используемых для интенсивной передачи тепла, локальный коэффициент теплоотдачи определяется по закону Ньютона – Рихмана:

$$dQ = \alpha \cdot (t_{ct} - t_{жс}) \cdot dF \quad (1)$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи α находится с помощью интегрирования уравнения и осреднения локальных значений температур:

$$\bar{\alpha} = \frac{Q}{F \cdot (\bar{t}_{ct} - \bar{t}_{жс})} \quad (2)$$

Как уже ранее сказано современные направления развития и совершенствования ресурсосберегающих технологических процессов открывает большие возможности и перспективы использования пленочных течений при упаривании растворов. Оптимальные режимы работы пленочных аппаратов имеют место при невысоких температурных напорах, что позволяет создавать выпарные аппараты с многократным использованием тепла греющего пара.

Рассматриваемые выпарные аппараты (рис.1) являются аппаратами пленочного типа, обладают высокими коэффициентами теплопередачи и низкими энергозатратами, ввиду исключения из конструкции многочисленных гидropотерь в громоздких системах и устройствах коммуникаций для перетоков раствора, пара и конденсата, имеющих место в действующих многокорпусных установках. Они имеют низкую металлоемкость из-за оригинального решения вопросов сепарации между теплообменными элементами, а принятые конструктивные решения обеспечивают высокую устойчивость конструкций, что позволяет применять тонколистовой конструкционный материал.

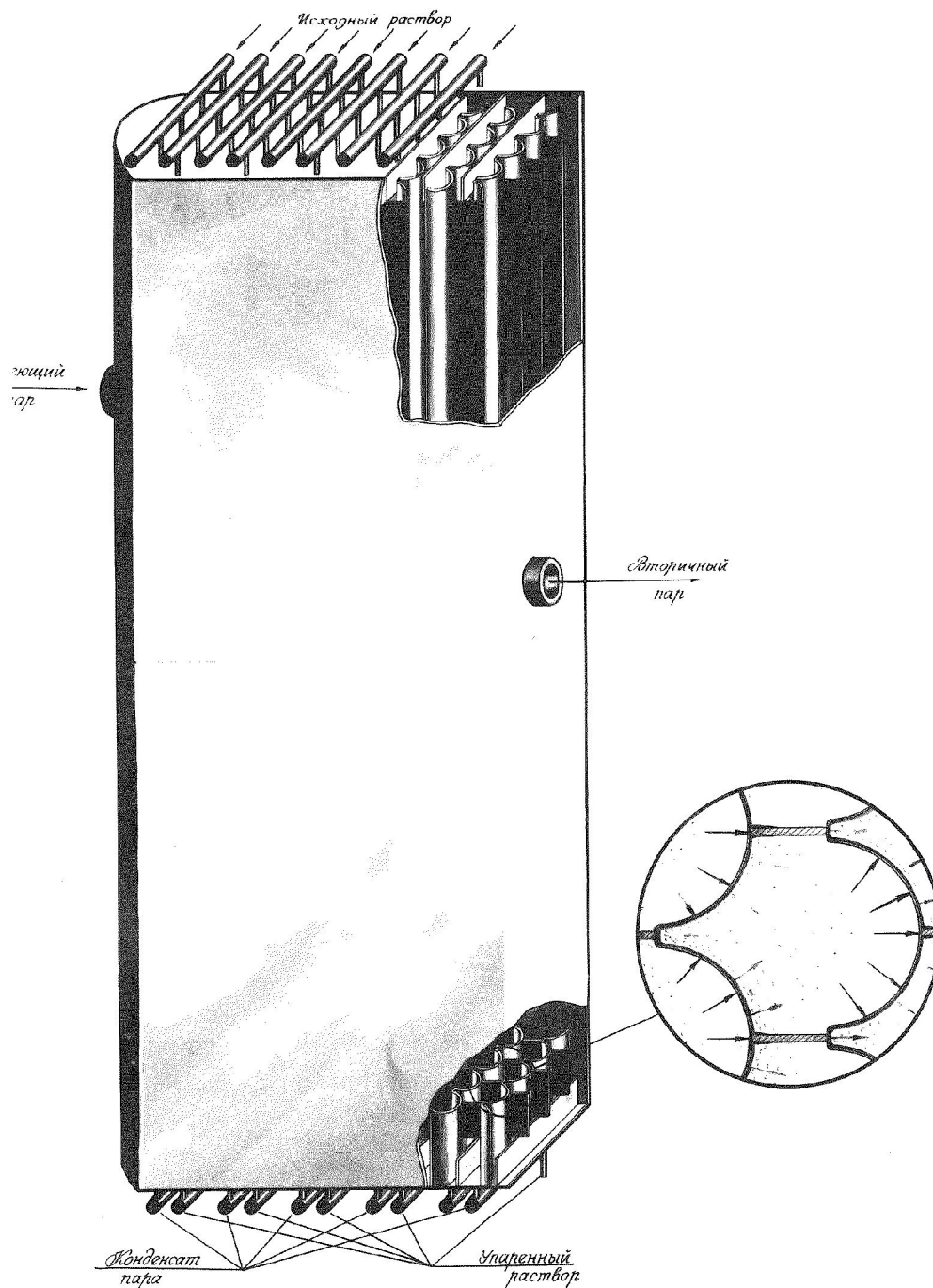


Рис.1 Выпарной аппарат плёночного типа с многократным использованием тепла греющего пара

Технические решения, заложенные в конструкции выпарных аппаратов с многократным использованием тепла греющего пара, в едином агрегате не имеют аналогов в отечественной и зарубежной технике. Для создания промышленных образцов выпарных аппаратов плёночного типа с многократным использованием тепла греющего пара, поверхности теплообменных элементов, которые выполнены в виде из листа, созданы

теории и методы расчетов и проведены экспериментальные исследования и подтверждена их работоспособность, изучена их гидродинамика и теплообмен.

Экспериментальные исследования многоступенчатого выпаривания в едином агрегате. Предложенные исследования конструкций выпарных аппаратов позволяют изучить процессы выпаривания растворов при многократном использовании тепла греющего пара и найти оптимальные пути высокоэффективного использования теплоты греющего пара, выпариваемого раствора и конденсата.

Программа и методика исследований. Целью работы является экспериментальное подтверждение работоспособности и эффективности применения выпарных аппаратов пленочного типа, поверхности теплообмена которых выполнены из листа и имеют форму вертикальных полуцилиндров, что позволит создать выпарные аппараты нового типа.

Задачами работы являются: исследование влияния на теплообмен плотности орошения, полезной разности температур, конструктивных особенностей аппаратов и свойств раствора; подтверждение работоспособности конструкции, распределение тепловой нагрузки между стадиями упаривания, получение теплотехнических характеристик; создание методики расчета коэффициента теплопередачи данных конструкций теплообменных элементов.

Схема экспериментальной установки и условия проведения работ. Установка для исследования выпарного аппарата с теплообменными элементами выполненными в виде вертикальных цилиндров.

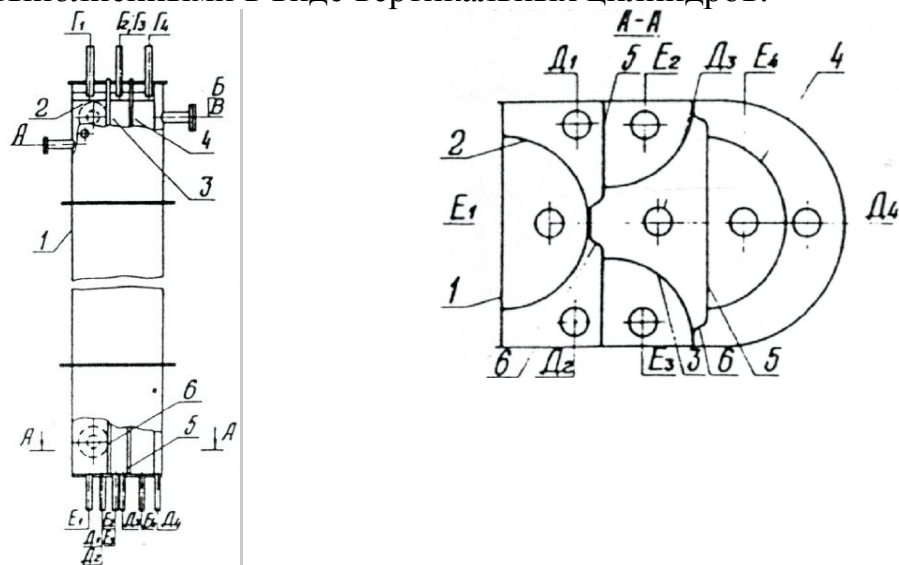


Рис.2. Экспериментальный выпарной аппарат пленочного типа с трехкратным использованием тепла с вертикальными теплообменными элементами, исполненными в виде полуцилиндров: 1 – корпус аппарата; 2, 3, 4 – теплообменный элемент; 5 – нижняя разделительная перегородка, 6 – вертикальный упор

Объектом исследования является выпарной аппарат пленочного типа с трехкратным использованием тепла греющего пара, теплообменные элементы которого выполнены в виде вертикальных полуцилиндров. Конструкция аппарата представлена на рис. 2 и 3.

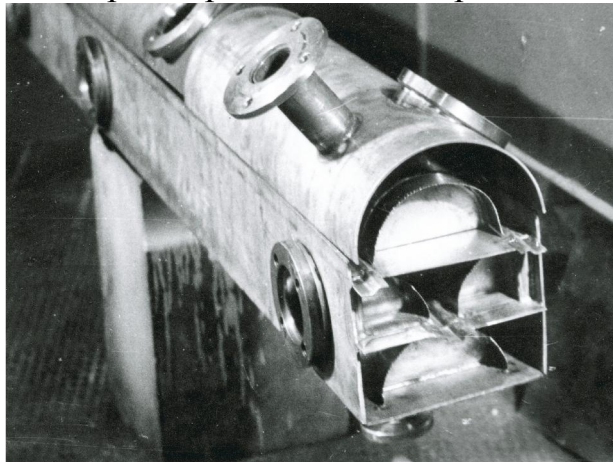


Рис.3. Общий вид выпарного аппарата при сборке

Схема экспериментальной установки для изучения гидродинамики и теплообмена в выпарном аппарате с многократным использованием тепла греющего пара, выполненного в виде полуцилиндров, представлена на рис. 4.

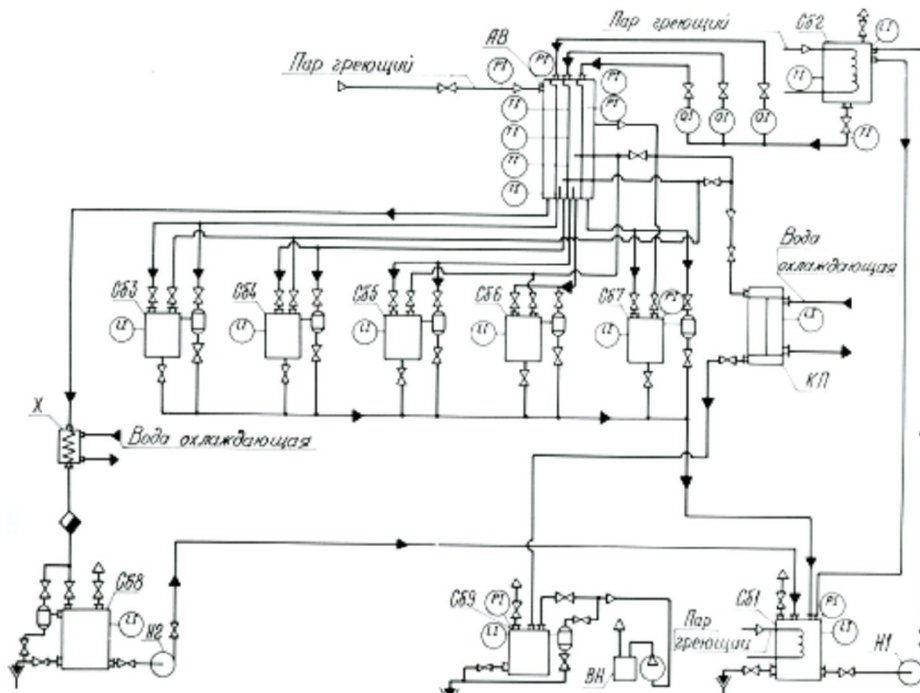


Рис. 4. Схема экспериментальной установки с выпарным аппаратом многократного использования тепла греющего пара с теплообменными элементами, выполненными в виде полуцилиндров: АВ – выпарной аппарат; Сб 1, Сб 2 – сборник исходного раствора; Сб 3, Сб 5, Сб 7 – сборник упаренного раствора; Сб 4, Сб 7, Сб 9 – сборники конденсата вторичного пара; Сб 8 – сборник конденсата греющего пара; КП – конденсатор; X – холодильник; Н1, Н2 – насосы; ВН – вакуумный насос.

Экспериментальный выпарной аппарат имеет следующие характеристики: размеры теплообменного аппарата: радиус – 0,075 м, длина – 1,83 м; количество стадий – 3; поверхность нагрева каждой стадии – 0,432 м²; материал теплообменного элемента – сталь 12Х18Н10Т.

Установка работает следующим образом (рис. 5.). Исходный раствор,

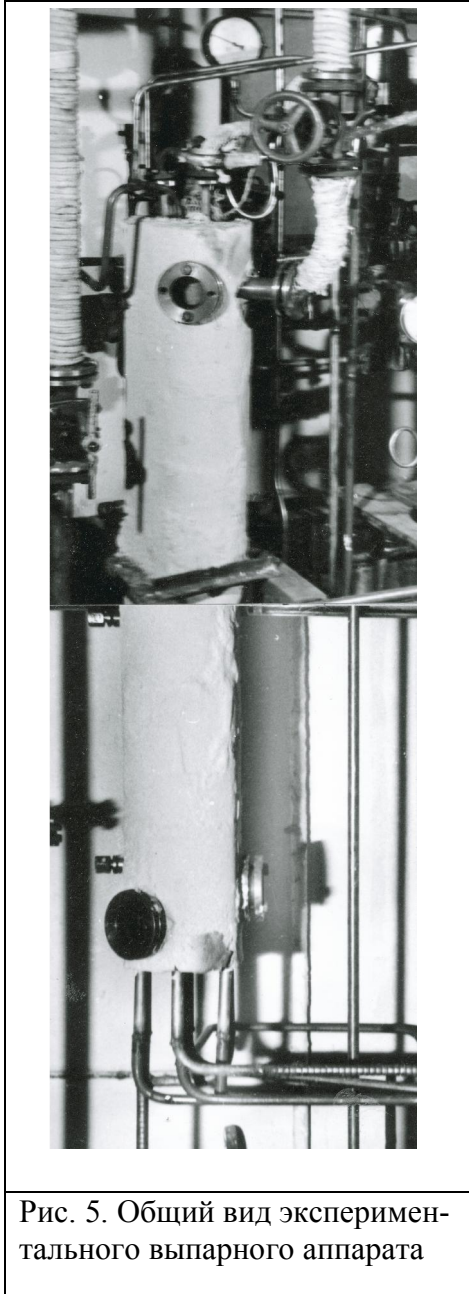


Рис. 5. Общий вид экспериментального выпарного аппарата

подогретый до температуры кипения раствора на первой стадии выпаривания в сборнике Сб2, через ротаметры, позволяющие поддерживать необходимый расход жидкостного раствора на каждую из трех стадий выпаривания, поступает в выпарной аппарат АВ и в виде тонкой пленки стекает по выпуклой поверхности теплообменных элементов. Первая ступень выпаривания обогревается греющим паром заданного давления. Выпаренная на первой стадии вода обогревает вторую стадию выпаривания. Вторичный пар второй стадии обогревает третью ступень выпаривания, с которой вторичный пар конденсируется в поверхностном конденсаторе и собирается в мерном сборнике Сб9. Конденсат греющего пара, предварительно охладившись в холодильнике Х, собирается в сборнике Сб8. Упаренный раствор первой стадии выпаривания собирается в сборнике Сб8, а конденсат вторичного пара – Сб4. Упаренный раствор и конденсат вторичного пара второй стадии собирается соответственно в сборниках Сб 5 и Сб 6. Упаренный раствор и конденсат третьей стадии собирается в сборниках Сб 7 и Сб 8. Раствор и конденсат из сборников сливается в емкость приготовления исходного раствора Сб1, с которого насосом Н1 исходный раствор подается в растворный бак исходного раствора Сб2.

Перечень замеров и средства измерения. В процессе работы измерялись и фиксировались параметры работы установок. Давление греющего пара, вторичного пара первой стадии выпаривания измерялось образцовыми пружинными манометрами класса 0,4 со шкалой 0–1 кгс/см² с ценой деления 0,01 кгс/см². Разрежение измерялось мановакууметром со шкалой – 1-1 кгс/см² с ценой деления 0,05 кгс/см² класса 0,4;

образцовым вакуумметром со шкалой – 1–0 кгс/см² с ценой деления 0,01 кгс/см² класса 0,4.

Температура исходного раствора, вторичного и греющего пара измерялась лабораторными термометрами с ценой деления 0,1 град со шкалами 0 ÷ 100 °С, 50 ÷ 150 °С, 100 ÷ 150 °С.

Расходы исходного раствора, конденсата греющего пара, вторичного пара первой, второй и третьей стадии, упаренного раствора первой, второй и третьей стадий замерялись с помощью мерных баков с перехватчиками (предварительно тарированными), и секундомера, погрешность измерения ± 1,0 %.

В ручном режиме поддерживались параметры работы установки: давление греющего пара; разрежение вторичного пара последней стадии; расход исходного раствора стабилизировался на каждую стадию выпаривания по показаниям ротаметров РС-7 и РС-5. Общая погрешность измерения составила не более 10 %

Результаты исследований выпарного аппарата с теплообменными элементами, выполненными в виде цилиндров. Результаты испытаний представлены на рис. 6 и 7. На рис. 6 отражены результаты испытаний выпарного аппарата, на примере работы первой ступени выпаривания, а именно, влияние на коэффициент теплопередачи объемной плотности орошения от $1 \cdot 10^{-4}$ м²/с до $4 \cdot 10^{-4}$ м²/с при вакууме 0,08 МПа. Из графика видно, что при плотности орошения свыше $2 \cdot 10^{-4}$ м²/с среднее значение коэффициента теплопередачи резко возрастает. Связано это с переходом ламинарно-волнового течения пленки в турбулентное.

В общем полученная закономерность изменения среднего коэффициента теплопередачи в зависимости от плотности орошения (числа Рейнольдса). Зависимость среднего значения коэффициента k от объемной плотности орошения представлены на рис. 6.

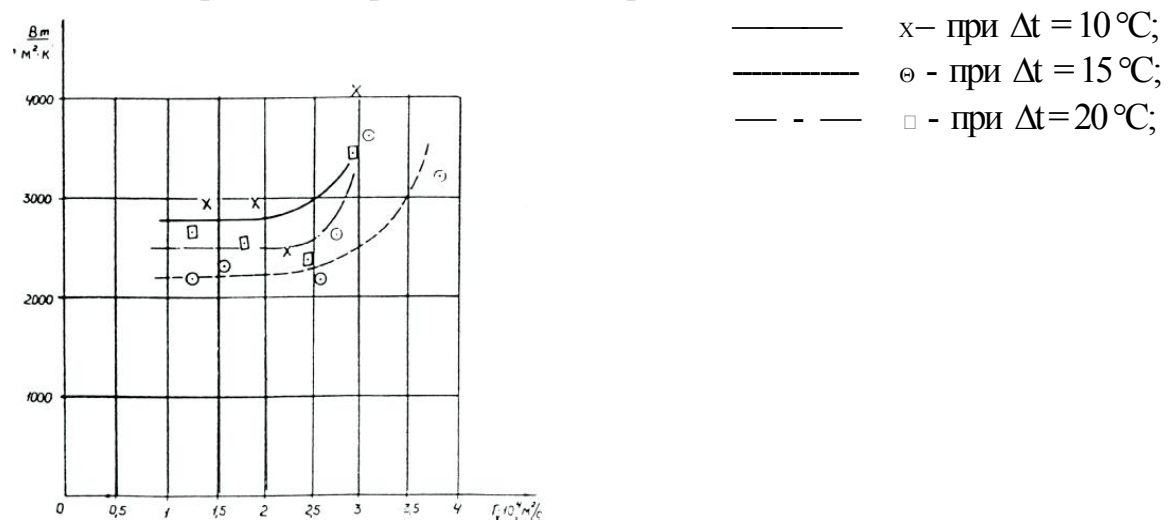


Рис. 6. Среднее значение k от объемной плотности орошения Γv

На рис. 7 представлены зависимости изменений удельной тепловой нагрузки от полезной разности температур Δt при объемных плотностях орошения от 0,00012 до 0,000381 м²/с.

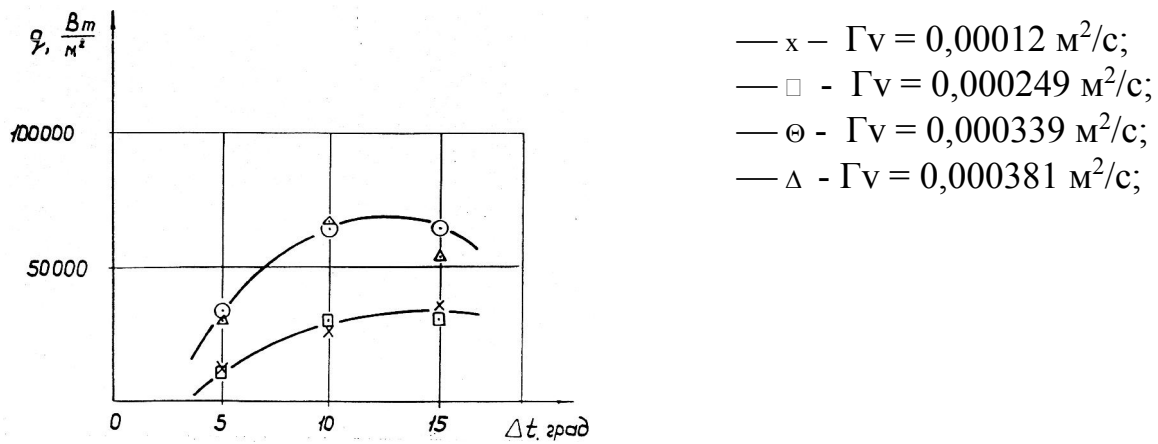


Рис. 7. Зависимость удельной тепловой нагрузки q от полезной разности температур

Из графика видно, что в области поверхностного испарения удельный тепловой поток растет пропорционально полезной разности температур. С ростом полезной разности температур тепловая нагрузка достигает предела, начиная с которого число центров парообразования возрастает, паросодержание потока достигает максимума, и процесс идет на границе устойчивой пленки, что приводит к снижению тепловой нагрузки и коэффициента теплоотдачи. Следовательно, работу выпарного аппарата *выгодно осуществлять при малых разностях температур, что целесообразно и возможно при многократном использовании тепла греющего пара.*

Результаты испытаний показали устойчивую и высокоэффективную работу выпарного аппарата с многократным использованием тепла греющего пара на примере аппарата с трехкратным использованием. На работоспособность теплообменного элемента, выполненного в виде вертикального полуцилиндра, влияет целый ряд конструктивных и технологических факторов. С точки зрения связанной задачи гидродинамики и теплообмена можно выделить следующие факторы: уменьшение поверхности теплообмена при движении раствора от периферии к центру и увеличение при этом толщины стекающей пленки; уменьшение толщины пленки за счет испарения растворителя; изменение плотности теплового потока от греющего пара к раствору, связанное, прежде всего, с изменением толщины пленки раствора; изменение температуры кипения раствора при изменении его концентрации.

Методика расчета коэффициента теплопередачи. На работоспособность теплообменного элемента, выполненного в виде вертикального полуцилиндра, влияет целый ряд конструктивных и технологических

факторов. С точки зрения связанной задачи гидродинамики и теплообмена можно выделить следующие факторы: за счет изменением толщины пленки раствора при испарения растворителя; изменение плотности теплового потока от греющего пара к раствору; изменение температуры кипения раствора при изменении его концентрации.

Исходными данными для расчета являются: G_0 (кг/с), R_0 (м), L (м), φ (°), t_{rn} (°C), t_{bn} (°C), δ_s , r , λ_p , λ_s , ρ_p , μ_p . Вычисляем комплексы:

$$\eta = \frac{\delta_p}{\delta_0}; \quad \xi = \frac{x}{R_0}; \quad S_p = \frac{\lambda_s \cdot (t_{zp} - t_k) \cdot R_0^2}{r \cdot G_0 \cdot \delta_0}; \quad k_\lambda = \frac{\lambda_s}{\lambda_Q}; \quad k_s = \frac{S_s}{S_0}, \quad (3)$$

Проводим численное решение задачи Коши для уравнения:

$$\frac{d_\eta}{d_\xi} = \frac{\eta \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{3 \cdot \left(1 - \xi \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right)} - \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot S_p \cdot k_i \cdot \eta^2 \cdot (k_i \cdot \eta + k_s)}, \quad (4)$$

с начальным условием $\eta(\xi = 0) = 1,0$.

Для значения $\xi = \frac{L}{R_0}$ находим численным интегрированием значение

$$\eta_0 = \eta(\xi_0), \quad (5)$$

Определяем локальный коэффициент теплопередачи:

$$k_L = \frac{\lambda_s \cdot (t_{rn} - t_k)}{k_\lambda \cdot (\delta_L + \delta_s)}. \quad (6)$$

Определяем средний коэффициент теплопередачи:

$$k = \frac{\lambda_s \cdot (t_{zp} - t_k)}{k_\lambda \cdot \left(\frac{(1 + \eta_0) \cdot \delta_0}{2} + \delta_s\right)}. \quad (7)$$

Перечень принятых условных обозначений: G – расход раствора, кг/с; W – расход выпаренной воды, кг/с; t – температура, °C; c – удельная теплоемкость, кДж/кг, °C; Γ – поверхность теплообмена, м²; Π – периметр теплообменного элемента, м; d – диаметр, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; L – длина, м; P – давление, Па; Q – тепловая нагрузка, Вт; q – удельная тепловая нагрузка, Вт/м²; R – радиус, м; r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; U – скорость, м/с; U_x – ось координат в направ-

лении течения, м; y – ось координат, направленная нормально к направлению течения, м; y_z – ось координат, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К); Γ – массовая плотность орошения, кг/(м · с); Γ_y – объемная плотность орошения, м²/с; δ – толщина пленки, м; Θ – краевой угол смачивания, град.; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); μ – динамическая вязкость жидкости, Па · с; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с; Q – плотность, кг/м³; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; τ – время, с; φ – угол, град.; $k_{nl} \frac{\sigma^3 \cdot Q}{q^4 \cdot \mu}$ – пленочное число, (критерий

Капицы); $Ku = \frac{q}{\rho_n \cdot U_x}$ – критерий кипения; $Re = \frac{4 \cdot \Gamma_v}{\nu}$ – критерий Рейнольдса для пленочного течения.

Индексы: ρ – раствор; b – выпаренная вода; k – кипение; 0 – начальная величина; bn – вторичный пар; gn – греющий пар; s – стенка элемента; $исх.$ – исходный раствор; $1, 2, 3$ – стадия выпаривания.

Заключение и выводы. Современное состояние отечественной нефтегазохимической техники, мировые тенденции ее развития, а также национальные научные разработки, включающие экспериментальные исследования опытных и опытно-промышленных образцов высокоэффективных теплообменных и выпарных устройств, представляющих энерго-сберегающую технику новых поколений, позволяют сформировать приоритетные направления работ и пути реализации.

Список литературы: 1. Данилов Ю.Б, Гавриличенко И.Г. Выпаривание при гравитационном течении плёнки раствора // Вестник НТУ «ХПИ», 2013. –№55. –С.148–154. 2. Данилов Ю.Б, Ульев Л.М. Теоретические и экспериментальные исследования теплопередачи и кипения в выпарных аппаратах со стекающей плёнкой// Интегрированные технологии энергосбережения. –Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – №3. – С 84–96. 3. Гимбутис Г. Теплообмен в гравитационном течении плёнки жидкости // Вильнус. Моксла. 1988. 232с. 4. Воронцов Е.Г., Татанайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных плёнках // Киев. Техника. 1972. – 196с.

УДК 696.41

Экспериментальные исследования теплогидродинамических процессов выпаривания при плёночном течении жидкости / Гавриличенко И.Г., Данилов Ю.Б. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – Х.: НТУ «ХПІ» – 2014. – № 16 (1059). – С. 12 – 21. Бібліогр.: 4 назв.

Проведені експериментальні дослідження випарного апарату плівчатого типу з багатократним використанням тепла гріючої пари. Запропонована математична модель течії плівки розчину та визначення коефіцієнту тепловіддачі при гравітаційному режимі течії.

The experimental study of the film type evaporator with multiple use heat heating steam. A mathematical model of film flow solution and determine the coefficient of heat transfer in a gravitational flow regime.

Keywords: evaporation, heat transfer, film flow, evaporation, heat.