

УДК: 66.048.5-956

DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.003

© 2024. Все права защищены.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КОМБИНИРОВАННОМ ВЫПАРНОМ АППАРАТЕ ПЛЕНОЧНОГО ТИПА ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ НИЗКОАКТИВНЫХ ЖИДКИХ ОТХОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Хомяков А. П.*, д-р. техн. наук (a.p.khomiakov@urfu.ru), Колупаев Д. Н.**, канд. техн. наук (Dimk1969@mail.ru),
Понизов А. В.***, канд. техн. наук (ponizov@secnrs.ru), Василишин А. Л.*** (vasilishin@secnrs.ru),
Шкурин П. А.**** (Shkurin@sniihim.ru), Прохоров С. В.**** (pro9999@yandex.ru),
Морданов С. В.*, канд. техн. наук (s.v.mordanov@urfu.ru), Гушшамова В. Н.* (79126634949@ya.ru),
Хомякова Т. В.* (homtv21@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 10 апреля 2024 г.

Аннотация

В статье представлены результаты исследования процессов гидродинамики и теплопередачи в комбинированном выпарном аппарате пленочного типа при концентрировании низкоактивных жидких отходов, содержащих поверхностно-активные вещества. Экспериментальное исследование процесса теплопередачи проводили на опытной выпарной установке при умеренных тепловых нагрузках для греющих камер в диапазоне от 15,6 до 31,6 кВт/м² с падающей пленкой и от 10,5 до 20,1 кВт/м² с поднимающейся. Интенсивность орошения для греющей камеры с падающей пленкой имела значения в диапазоне 500–900 кг/(м·ч). Для упаривания применяли раствор-имитатор, который имел свойства низкоактивных жидких отходов, содержащих поверхностно-активные вещества.

Исследование гидродинамики двухфазного потока упариваемого низкоактивного раствора, содержащего поверхностно-активные вещества, в теплообменных трубках греющих камер аппарата проводили с помощью численного моделирования. Результатами численного моделирования являются распределения локальных значений массового расхода низкоактивного раствора, содержащего поверхностно-активные вещества, массового расхода вторичного пара, скорости вторичного пара, абсолютного давления по длине теплообменной трубки в зависимости от различных значений начальной интенсивности орошения. Получены значения коэффициента теплопередачи в опытном выпарном аппарате.

В указанных условиях упаривание раствора-имитатора показало полное отсутствие пенообразования в сепараторе выпарного аппарата и отсутствие пены в конденсате образующегося вторичного пара, отводимого из конденсатора. Численное моделирование гидродинамики показало принципиальную возможность упаривания низкоактивных растворов, содержащих поверхностно-активные вещества, на комбинированном выпарном аппарате пленочного типа.

Показано, что комбинированный выпарной аппарат пленочного типа целесообразно применять при обращении с жидкими радиоактивными отходами на объектах использования атомной энергии.

Определены дальнейшие направления исследований.

► **Ключевые слова:** жидкие радиоактивные отходы, выпарной аппарат пленочного типа, теплопередача, численное моделирование.

* Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия.

** Федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат», г. Железногорск, Красноярский край, Россия.

*** Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

**** АО «СвердНИИХиммаш», г. Екатеринбург, Россия.

INVESTIGATION OF THE HYDRODYNAMICS PROCESSES AND HEAT TRANSFER IN THE COMBINED FILM-TYPE EVAPORATION APPARATUS DURING THE CONCENTRATION OF LOW-LEVEL LIQUID WASTE CONTAINING SURFACTANTS

Khomyakov A. P.*, D. Sc.,
Kolupaev D. N.**, Ph. D.,
Ponizov A. V.***, Ph. D.,
Vasilishin A. V.***,
Shkurin P. A.****,
Prokhorov S. V.****,
Mordanov S. V.*, Ph. D.,
Gushshamova V. N.*,
Khomyakova T. V.*

The article was received by the editors' crew on April 10, 2024.

Abstract

The article presents the results of the study of the hydrodynamics processes and heat transfer in the combined film-type evaporation apparatus during the concentration of low-level liquid waste containing surfactants. The experimental study of the heat transfer process was carried out on the experimental evaporation plant at moderate thermal loads in the range from 15.6 to 31.6 kW/m² for the heating chamber with the falling film and from 10.5 to 20.1 kW/m² for the heating chamber with the rising film. The irrigation intensity for the heating chamber with the falling film had values in the range of 500–900 kg/(m·h). For evaporation, a simulator solution was used, which had the properties of a low-level liquid waste containing surfactants.

The study of the hydrodynamics of the two-phase flow of the evaporated low-level solution containing surfactants in the heat exchange tubes of the heating chambers of the apparatus was carried out using numerical modeling. The results of numerical modeling are the distributions of local values of the mass flow rate of a low-level solution containing surfactants, the mass flow rate of secondary steam, the velocity of secondary steam, and the absolute pressure along the length of the heat exchange tube, depending on different values of the initial irrigation intensity.

The values of the heat transfer coefficient were obtained in the experimental evaporation apparatus. Under these conditions, evaporation of the simulator solution showed the complete absence of foaming in the separator of the evaporator and the absence of foam in the condensate of the resulting secondary steam discharged from the condenser. Numerical modeling of hydrodynamics has shown the fundamental possibility of evaporation of low-level solutions containing surfactants on the combined film-type evaporation apparatus.

It is shown that it is advisable to use the combined film-type evaporation apparatus when handling liquid radioactive waste from nuclear energy facilities.

Further research directions have been identified.

► **Keywords:** liquid radioactive waste, film-type evaporation apparatus, heat transfer, numerical modeling.

* Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

** Federal State Unitary Enterprise "Mining and Chemical Plant", Zheleznogorsk, Krasnoyarsk territory, Russia.

*** Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

**** JSC "Sverdlovsk Scientific Research Institute of Chemical Engineering", Ekaterinburg, Russia.

Введение

Процесс выпаривания широко применяется при обращении с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО) объектов использования атомной энергии [1]. Этот процесс сокращает объемы отходов и снижает затраты на последующие стадии их переработки и хранения. В настоящее время, как правило, на объектах использования атомной энергии процесс выпаривания реализуется в выпарных аппаратах пленочного типа с естественной циркуляцией [2–4].

ЖРО классифицируются в зависимости от:

- удельной активности и радионуклидного состава;
- физических и химических свойств.

Например, на АЭС с реактором ВВЭР-1000 в системах водоочистки (СВО-7) производится очистка вод спецпрачечных и душевых, которые относятся к низкоактивным отходам и имеют удельную активность 0,37–3,7 Бк/см³. В этих водах имеются изотопы, присутствующие в продуктах коррозии, долгоживущие изотопы продуктов деления, а также поверхностно-активные вещества (ПАВ). Общее количество вод спецпрачечных и душевых на АЭС составляет 20–30 тыс. м³/год [5–6]. Выпаривание этих вод в значительной степени осложняется процессом пенообразования, вызванным наличием ПАВ [6], которое, в свою очередь, вызывает потери перерабатываемого продукта, загрязняет конденсат вторичного пара и предопределяет усложнение технологии концентрирования таких ЖРО.

В настоящее время переработка ЖРО, содержащих ПАВ, реализуется в выпарных аппаратах с естественной циркуляцией и применением процесса озонирования исходного раствора, но это требует дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат [7].

Вместе с тем проведенные исследования указывают на возможность осуществления выпаривания пенообразующих растворов без дополнительных затрат на комбинированных выпарных аппаратах пленочного типа [8].

Численное моделирование гидродинамики двухфазных потоков в теплообменной трубке и теплокинетических характеристик аппаратов пленочного типа свидетельствуют о том, что наиболее благоприятные условия для эффективного выпаривания без пенообразования ЖРО, содержащих ПАВ, имеют данные комбинированные выпарные аппараты пленочного типа, которые представляют собой совокупность аппаратов с падающей и поднимающейся пленкой [8–12].

Целью данной статьи является экспериментальное обоснование возможности выпаривания низкоактивных растворов, содержащих ПАВ, на комбинированном выпарном аппарате пленочного типа.

Техника и методика проведения исследований

Исходя из поставленной цели, в задачи исследований входило следующее:

- с максимально возможным приближением на опытном аппарате воссоздать режим работы аппарата промышленного масштаба и проверить возможность концентрирования растворов, содержащих ПАВ;
- исследовать влияние температуры и расхода исходного раствора, начальной интенсивности орошения на интенсивность теплопередачи (коэффициенты теплопередачи в греющих камерах с падающей и поднимающейся пленкой);
- фиксировать отсутствие или наличие пенообразования в концентрированном растворе в сепараторе и вынос образовавшейся пены в конденсат вторичного пара, отводимого из конденсатора;
- с помощью численного моделирования исследовать гидродинамику двухфазного потока в теплообменных трубках греющих камер комбинированного выпарного аппарата, изучить влияние начальной интенсивности орошения на распределение локальных значений абсолютного давления, скорости вторичного пара и массового расхода упариваемого раствора по длине теплообменной трубки.

Экспериментальное исследование проводили на опытной выпарной установке, принципиальная схема которой приведена на рис. 1.

Установка включала опытный комбинированный выпарной аппарат пленочного типа (1)¹, оснащенный двумя греющими камерами, одна из которых (2) – с падающей пленкой, а другая (4) – с поднимающейся пленкой выпариваемого раствора.

Каждая греющая камера имела одну теплообменную трубу из нержавеющей стали 12X18H10T диаметром 38×3 мм, длиной 7 м. Поверхность теплопередачи каждой камеры составляла 0,75 м². Теплообменные трубы были соединены переходным участком, выгнутым в виде дуги радиусом 0,385 м. На верхнем срезе греющей камеры с падающей пленкой была установлена распределительная камера (6), в которую подавали исходный раствор. В ней было размещено устройство, которое

¹ Здесь и далее в скобках приведена нумерация в соответствии с рис. 1.

обеспечивало равномерное распределение пленки раствора по внутренней поверхности теплообменной трубки.

Перед пуском установки бак (11) заполняли исходным раствором, на конденсатор (10) подавали охлаждающую воду, включали в работу электрический парогенератор (20) и вакуум-насос (16).

При пуске установки на выпарной аппарат в распределительную камеру (6) через ротаметр (17) и подогреватель (9) подавали исходный раствор.

Затем в межтрубное пространство греющих камер (2) и (4) и в подогреватель (9) из парогенератора (20) подавали пар, в сепараторе (7) выпарного аппарата устанавливали заданное давление (вакуум). При этом выпариваемый раствор проходил в виде пленки сначала по теплообменной трубе (3) в греющей камере (2), далее по колену (8) поступал снизу в теплообменную трубу (5) в греющей камере (4) и в виде пленки образующимся вторичным паром увлекался вверх.

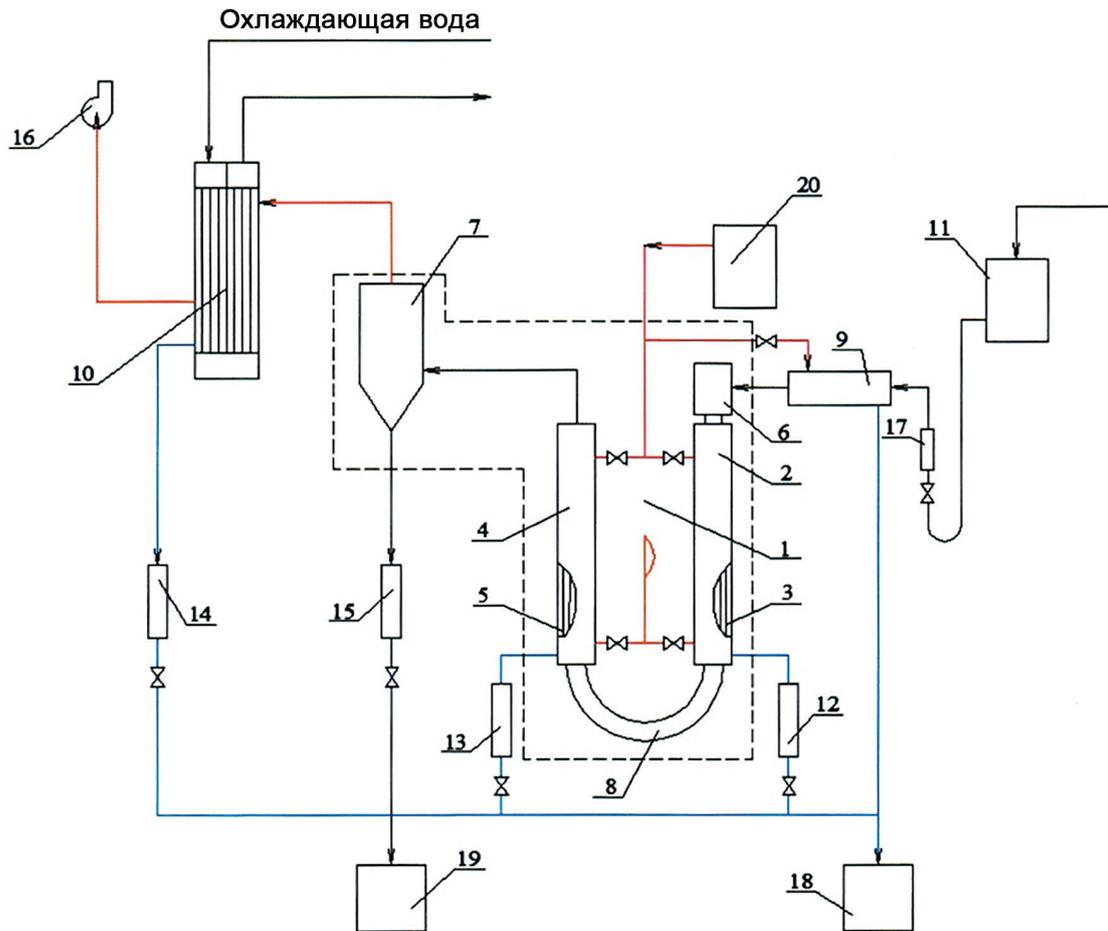


Рис. 1. Принципиальная схема опытной выпарной установки:

- 1 – опытный комбинированный выпарной аппарат пленочного типа (границы выпарного аппарата показаны пунктирной линией); 2 – греющая камера с падающей пленкой;
 - 3, 5 – теплообменные трубы; 4 – греющая камера с поднимающейся пленкой;
 - 6 – распределительная камера; 7 – сепаратор; 8 – колено;
 - 9 – комбинированный подогреватель (паровой и электрический); 10 – конденсатор;
 - 11 – бак исходного раствора; 12–14 – мерные устройства для конденсата;
 - 15 – мерное устройство для концентрированного раствора; 16 – вакуум-насос; 17 – ротаметр;
 - 18 – бак-гидрозатвор для конденсата; 19 – бак-гидрозатвор для концентрированного раствора; 20 – парогенератор.
- Коммуникации: — раствора, — греющего пара, — вторичного пара, — конденсата, — неконденсирующихся газов

[Fig. 1. Schematic diagram of an experimental evaporator system:

- 1 – experimental combined film evaporation apparatus (the boundaries of the evaporation apparatus are shown by the dotted line); 2 – heating chamber with falling film; 3, 5 – heat exchange tubes; 4 – heating chamber with rising film;
- 6 – distribution chamber; 7 – separator; 8 – knee; 9 – combined heater (steam and electric); 10 – condenser;
- 11 – tank of initial solution; 12–14 – dimensional devices for condensate; 15 – dimensional device for concentrated solution;
- 16 – vacuum pump; 17 – rotameter; 18 – tank-hydraulic seal for condensate;
- 19 – tank-hydraulic seal for concentrated solution; 20 – steam generator.

Communications: — solution, — heating steam, — secondary steam, — condensate, — non-condensing gases]

Из трубы (5) упаренный раствор и образовавшийся вторичный пар отводились в сепаратор (7), откуда концентрированный раствор стекал через мерное устройство (15) в бак (19), а вторичный пар поступал в конденсатор (10). Образующийся конденсат через мерное устройство (14) стекал в бак (18). Конденсат греющего пара из камер (2) и (4) через мерные устройства (12) и (13) также отводился в бак (18).

Схема комбинированного выпарного аппарата с указанием мест измерения основных режимных параметров в ходе исследований приведена на рис. 2.

Измеряемые параметры при проведении исследований:

- T_1 – температура греющего пара в камере с падающей пленкой, °C;
- T_2 – температура греющего пара в камере с поднимающейся пленкой, °C;

- S_0 – расход исходного раствора, кг/ч;
- D_1 – поток конденсата из греющей камеры с падающей пленкой, кг/с;
- D_2 – поток конденсата из греющей камеры с поднимающейся пленкой, кг/с;
- $D_{\text{сп}}$ – поток упаренного раствора из сепаратора, кг/с;
- W и $D_{\text{конд}}$ – поток вторичного пара и поток его конденсата, измеряемый на выходе из конденсатора, кг/с;
- t_0 – температура исходного раствора, °C;
- t_u – температура раствора в колене на выходе из греющей камеры с падающей пленкой, °C;
- $t_{\text{сп}}$ – температура раствора в сепараторе на выходе из греющей камеры с поднимающейся пленкой, °C;
- P_1 и P_2 – давление в растворной камере и в сепараторе, мм. вод. ст.

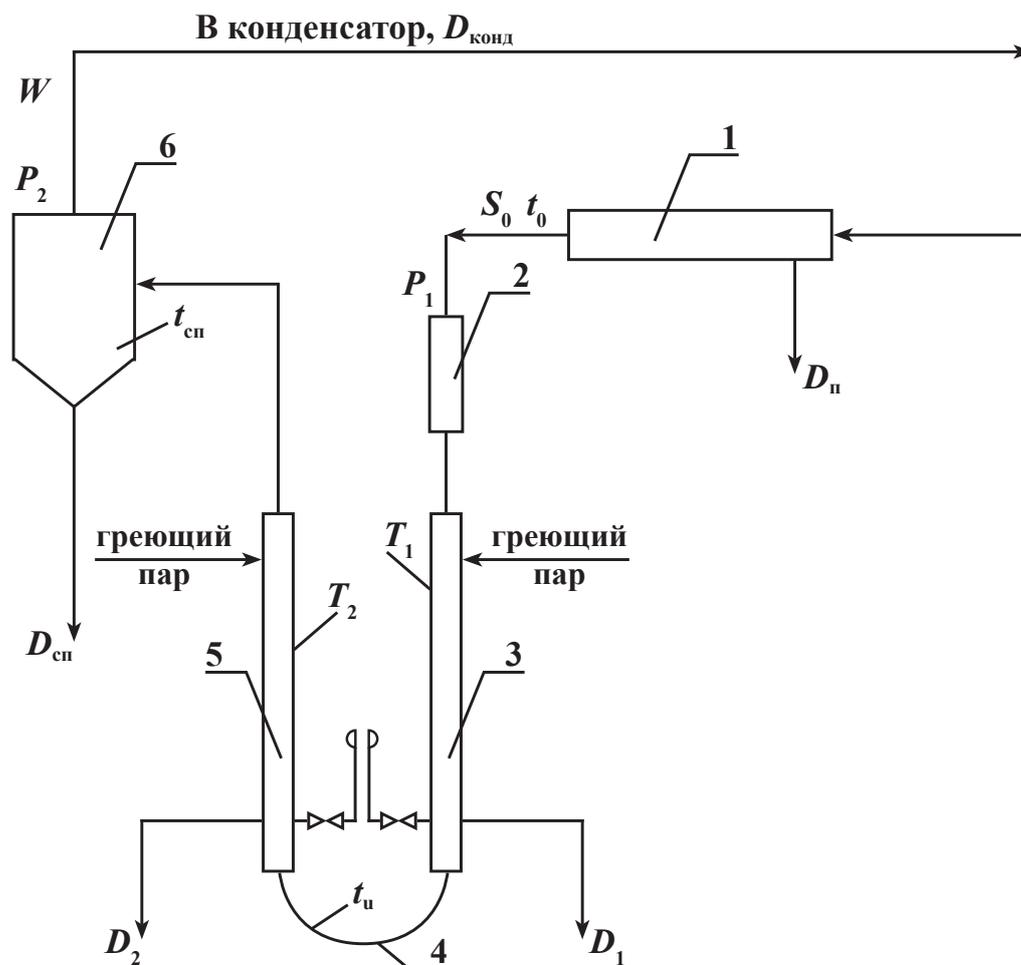


Рис. 2. Схема комбинированного выпарного аппарата с указанием мест измерения основных режимных параметров: 1 – паровой подогреватель исходного раствора; 2 – растворная камера; 3 – греющая камера с падающей пленкой; 4 – колено; 5 – греющая камера с поднимающейся пленкой; 6 – сепаратор

[Fig. 2. Scheme of the combined evaporation apparatus with indication of the measurement locations of the main operating parameters:

1 – steam heater of the initial solution; 2 – solution chamber; 3 – heating chamber with a falling film; 4 – knee; 5 – heating chamber with a creeping film; 6 – separator]

Учитывая, что в выпарном аппарате пленочного типа присутствуют два вида парообразования [13–15] – испарение со свободной поверхности жидкости (перенос тепла конвекционными токами к поверхности пленки) и пузырьковое кипение, – то принято решение упарить пенообразующие ЖРО в комбинированном аппарате пленочного типа для условий умеренных тепловых нагрузок для греющих камер в диапазоне от 5 до 32 кВт/м² с падающей пленкой и от 6 до 24 кВт/м² с поднимающейся. Интенсивность орошения для греющей камеры с падающей пленкой имеет значения в диапазоне 500–900 кг/(м·ч). В таких режимах работают промышленные аппараты пленочного типа как в составе многокорпусных батарей, так и однокорпусных агрегатов [16–18].

Экспериментальные исследования проводили на растворе-имитаторе, свойства которого представлены в табл. № 1. Раствор-имитатор имеет свойства низкоактивных жидких отходов, содержащих ПАВ, спецпрачечных предприятий ядерного топливного цикла.

Таблица № 1

**Свойства раствора-имитатора
Properties of the simulator solution**

Плотность раствора, кг/м³	1 000
Состав раствора	смачиватель ОП-10 – 0,95 г/л; комплексообразователь трин-н-пропилфосфат (ТПФ) – 1,8 г/л

Раствор-имитатор подавали в распределительную камеру при начальной температуре в диапазоне от 62 до 85 °С при следующих значениях расхода: 54, 75, 90 кг/ч.

Расчет полезной разности температур осуществлялся в следующей последовательности:

1. Средняя температура раствора в греющей камере с падающей пленкой, °С:

$$t_{cp1} = \frac{t_0 + t_u}{2}; \quad (1)$$

2. Полезная разность температур в греющей камере с падающей пленкой, °С:

$$\Delta t_1 = T_1 - t_{cp1}; \quad (2)$$

3. Полезная разность температур в греющей камере с поднимающейся пленкой, °С:

$$\Delta t_2 = T_2 - t_{cp2}; \quad (3)$$

4. Интенсивность орошения теплообменной трубы рассчитывалась так:

$$J = \frac{s_0}{\pi \cdot d_{вн}}, \quad (4)$$

где J – интенсивность орошения внутренней поверхности теплообменной трубки комбинированного выпарного аппарата пленочного типа, кг/(м·ч);
 $d_{вн}$ – внутренний диаметр теплообменной трубы, м;

5. Коэффициент теплопередачи выпарного аппарата с падающей пленкой рассчитывался следующим образом:

$$K_1 = \frac{D_1 \cdot r}{F \cdot \Delta t_1}, \quad (5)$$

где K_1 – коэффициент теплопередачи выпарного аппарата с падающей пленкой, Вт/(м²К);

r – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

F – поверхность теплопередачи, м²;

6. Коэффициент теплопередачи выпарного аппарата с поднимающейся пленкой рассчитывался следующим образом:

$$K_2 = \frac{D_2 \cdot r}{F \cdot \Delta t_2}, \quad (6)$$

где K_2 – коэффициент теплопередачи выпарного аппарата с поднимающейся пленкой, Вт/(м²К).

Для исследования гидродинамики двухфазного потока в теплообменных трубках греющих камер использовали математическую модель [19], которая базируется на разработках автора трудов [8, 19]. Результаты численного моделирования были получены по длине теплообменной трубы с шагом $\Delta L_i = 0,5$ м при технологических параметрах работы исследуемого опытного выпарного аппарата.

Результаты исследования

Результаты измерений в характерных режимах работы аппарата представлены в табл. № 2 и 3.

Зависимость коэффициента теплопередачи в греющей камере с падающей пленкой от температуры поступающего исходного раствора представлена на рис. 3. При увеличении температуры исходного раствора коэффициент теплопередачи в греющей камере возрастает и при температуре раствора, приближающейся к температуре кипения, достигает значений 3 000–3 300 Вт/(м² · К) (табл. № 3).

Изменение температуры исходного раствора не повлияло на работу греющей камеры с поднимающейся пленкой – значения коэффициентов теплопередачи и полезной разности температур практически не изменились (табл. № 2).

Зависимость коэффициента теплопередачи в греющих камерах от значений массового расхода исходного раствора в теплообменную трубку

опытного комбинированного выпарного аппарата представлена на рис. 4. Увеличение массового расхода положительно влияет на эффективность теплопередачи.

Установлено, что значения коэффициента теплопередачи в греющей камере с падающей пленкой выше, чем в греющей камере с поднимающейся (табл. № 3 и рис. 4).

Таблица № 2

Технологические параметры работы опытного комбинированного выпарного аппарата при изменении начальной температуры раствора
Technological parameters of the operation of the experimental combined evaporator when the initial temperature of the solution changes

S_0 , кг/ч	Температура пара, °С		Температура раствора, °С			Полезная разность температур		Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)		Тепловая нагрузка, кВт/м ²		Интенсивность орошения теплообменных труб, кг/(м·ч)	
	T_1	T_2	t_0	t_u	t_{cn}	Δt_1	Δt_2	K_1	K_2	q_1	q_2	J_1	J_2
54	95,0	96,0	62,5	93,4	91,2	17	3,7	790	1 760	15,6	11,69	540	410
54	94,7	96,3	63,0	88,3	87,6	18,8	8,1	1 107	1 369	24,6	12,9	540	208
54	94,7	96,2	63,0	89,0	87,5	18,7	8,0	1 205	1 728	26,2	16,1	540	187
54	94,5	96,3	66,2	90,0	88,4	16,4	7,1	1 260	1 268	24,0	10,5	540	300
54	93,8	95,9	68,2	88,5	87,3	15,4	8,0	1 225	1 450	21,9	14,2	540	248
54	94,5	96,3	70,5	91,0	89,8	13,8	6,9	1 430	1 586	22,3	10,9	540	280
54	94,5	97,6	76,0	90,2	88,0	11,4	8,5	1 983	1 542	18,1	15,4	540	254
54	96,4	96,6	82,5	88,8	87,6	11,0	8,4	2 470	1 314	31,6	10,9	540	191
54	96,2	96,6	83,5	89,0	87,8	9,9	8,2	2 360	1 450	27,2	13,8	540	168

Таблица № 3

Технологические параметры работы опытного комбинированного выпарного аппарата при изменении начального расхода исходного раствора
Technological parameters of the operation of the experimental combined evaporator when changing the initial flow rate of the initial solution

S_0 , кг/ч	Температура пара, °С		Температура раствора, °С			Полезная разность температур		Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)		Тепловая нагрузка, кВт/м ²		Интенсивность орошения теплообменных труб, кг/(м·ч)	
	T_1	T_2	t_0	t_u	t_{cn}	Δt_1	Δt_2	K_1	K_2	q_1	q_2	J_1	J_2
54	96,2	96,6	83,5	89,0	87,8	9,9	8,2	2 360	1 686	27,2	13,8	540	168
54	96,4	96,6	82,5	88,8	87,6	11,0	8,4	2 470	1 296	31,6	10,9	540	191
75	94,4	96,4	83,3	89,3	87,8	8,1	7,9	3 187	2 210	25,8	19,4	750	318
75	94,2	96,4	84,0	89,5	87,9	7,6	7,8	3 012	1 814	22,9	15,8	750	369
90	95,4	97,5	85,5	88,3	87,7	8,5	9,0	3 260	2 100	27,7	18,1	900	468
90	94,7	97,5	84,6	90,0	87,7	7,4	8,7	3 040	2 319	26,5	20,1	900	375

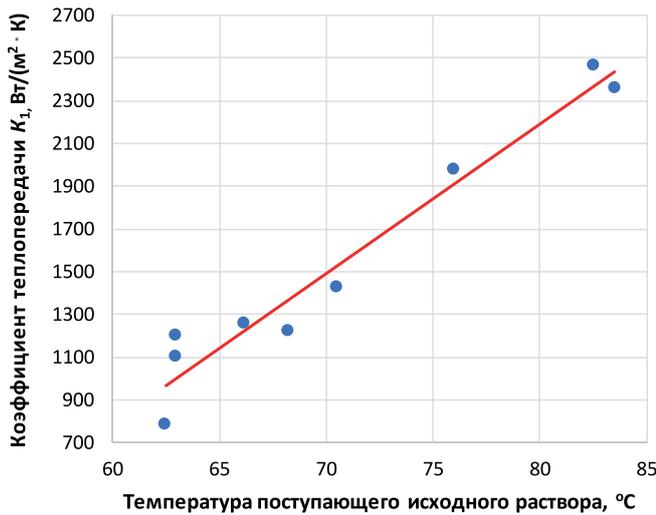


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи в греющей камере с падающей пленкой K_1 от различных значений температуры поступающего исходного раствора t_0 [Fig. 3. The dependence of the heat transfer coefficient in a heating chamber with a falling film K_1 at different temperatures of the incoming initial solution t_0]

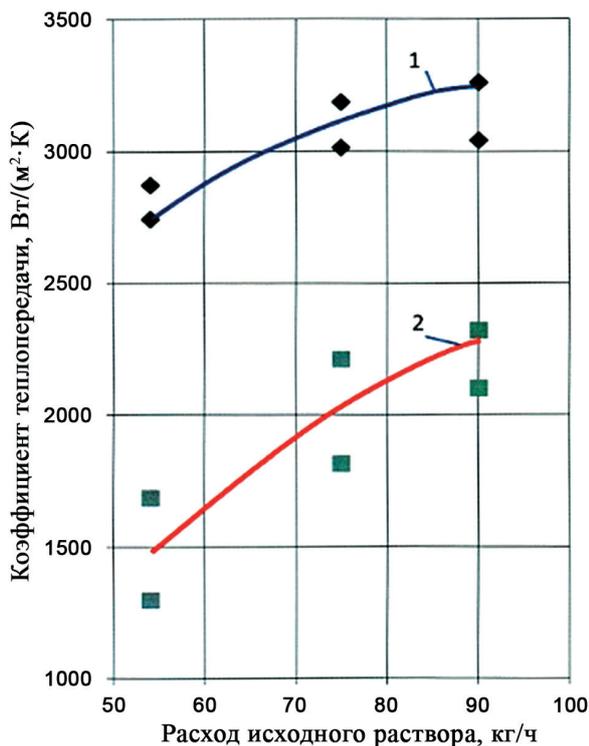


Рис. 4. Зависимости коэффициентов теплопередачи от массового расхода исходного раствора в теплообменных трубках опытного комбинированного выпарного аппарата: 1 – в греющей камере с падающей пленкой; 2 – в греющей камере с поднимающейся пленкой [Fig. 4. Dependences of heat transfer coefficients in the heat exchange tubes of the experimental combined evaporation apparatus: 1 – in the heating chamber with a falling film; 2 – in the heating chamber with a rising film]

Коэффициенты теплопередачи в греющих камерах в зависимости от значений начальной интенсивности орошения теплообменных трубок представлены на рис. 5. Проведенные исследования позволили оценить влияние начальной интенсивности орошения теплообменных трубок на распределение коэффициентов теплопередачи. В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость коэффициента теплопередачи от начальной интенсивности орошения, и рассчитана погрешность аппроксимации:

$$K = 124 \cdot J^{0.48} \pm 21 \% . \quad (7)$$

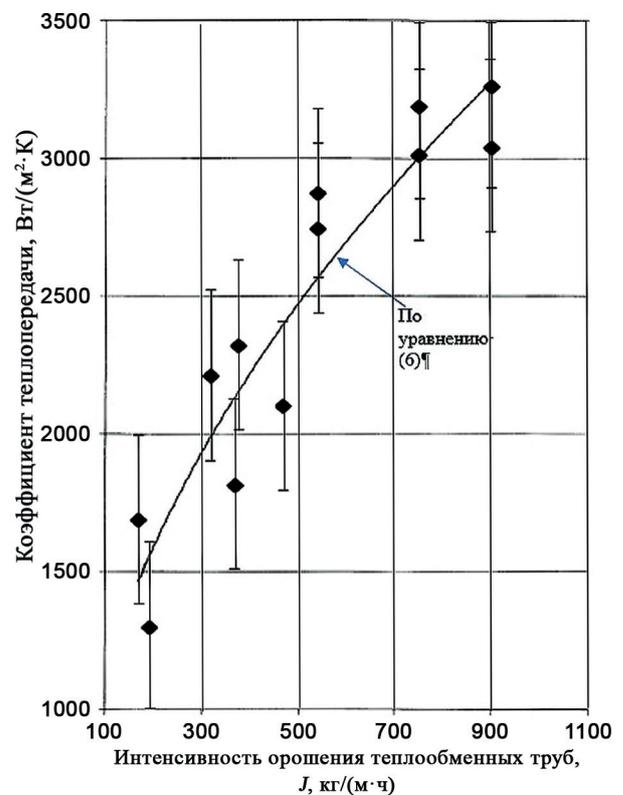


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопередачи в греющих камерах от значений начальной интенсивности орошения теплообменных трубок, где: ♦ – экспериментальные данные [Fig. 5. The dependence of the heat transfer coefficient in the heating chambers on the values of the initial irrigation intensity of the heat exchange tubes, where: ♦ – experimental data]

Результаты экспериментального исследования показали принципиальную возможность упаривания низкоактивных растворов, содержащих ПАВ, на комбинированном выпарном аппарате пленочного типа. При проведении экспериментов не наблюдалось вспенивания раствора в сепараторе и выноса пены в конденсатор.

Результаты численного моделирования гидродинамики двухфазного потока в теплообменных трубках греющих камер исследуемого комбинированного выпарного аппарата представлены на рис. 6–8.

Распределение локальных значений абсолютного давления в трубном пространстве греющих камер по длине теплообменных трубок при значениях начальной интенсивности орошения 540, 750 и 900 кг/(м·ч) представлено на рис. 6.

Установлено, что абсолютное давление по длине трубки снижается при всех рассмотренных значениях начальной интенсивности орошения. Снижение абсолютного давления в трубном пространстве

объясняется потерями давления на трение: пленки раствора о поверхности трубок, вторичного пара о поверхность пленки и изменение скоростного напора. При восходящем движении пленки и вторичного пара дополнительные потери напора возникают за счет преодоления действия силы тяжести, а в колене – за счет местных сопротивлений.

Характер распределения абсолютного давления по длине трубки в греющей камере с падающей пленкой при всех рассматриваемых значениях начальной интенсивности орошения идентичен, и влияние этих значений на изменение абсолютного давления незначительно.

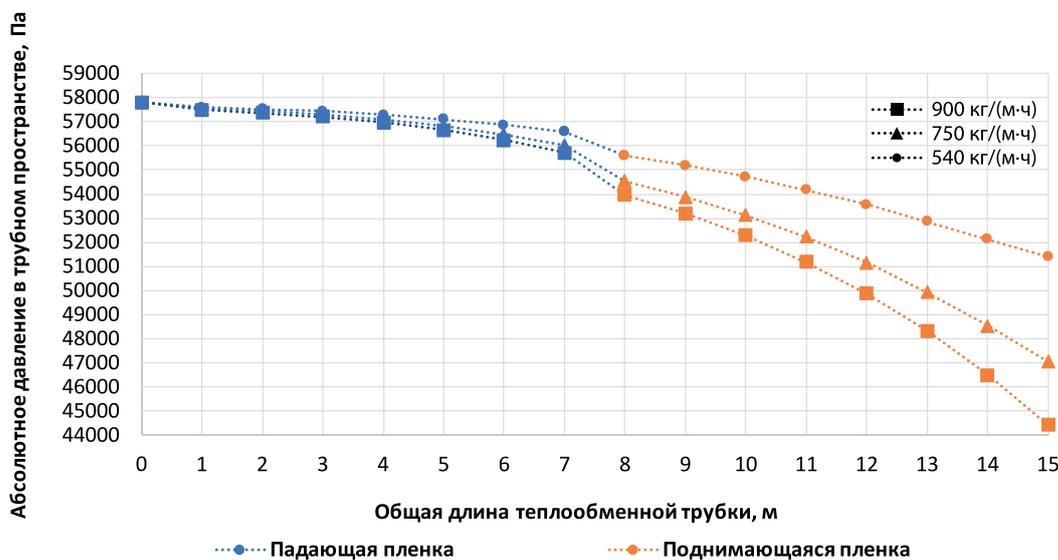


Рис. 6. Распределение локальных значений абсолютного давления в трубном пространстве по длине теплообменной трубки при различных значениях начальной интенсивности орошения [Fig. 6. Distribution of local absolute pressure values in the tube space along the length of the heat exchange tube at different values of the initial irrigation intensity]

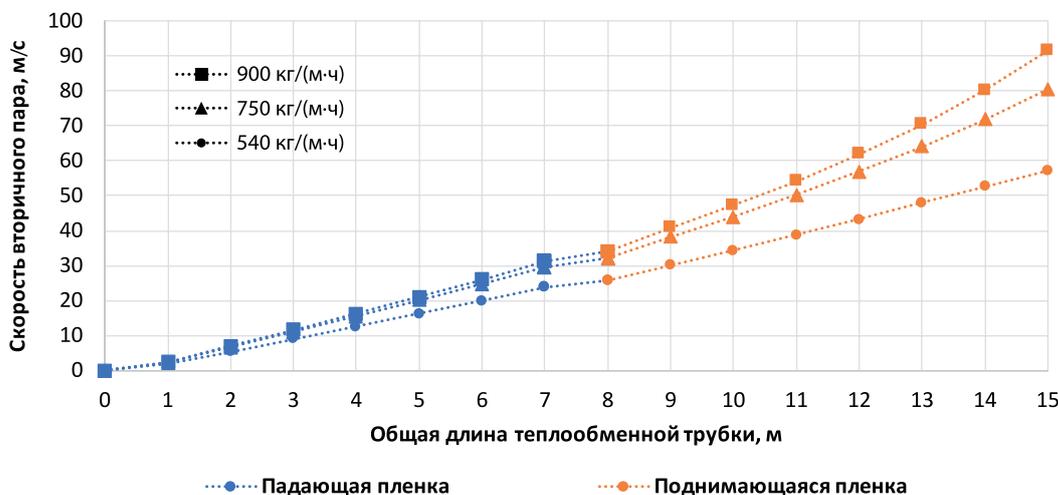


Рис. 7. Распределение локальных значений скорости вторичного пара по длине теплообменной трубки при различных значениях начальной интенсивности орошения [Fig. 7. Distribution of local values of the secondary steam velocity along the length of the heat exchange tube at different values of the initial irrigation intensity]

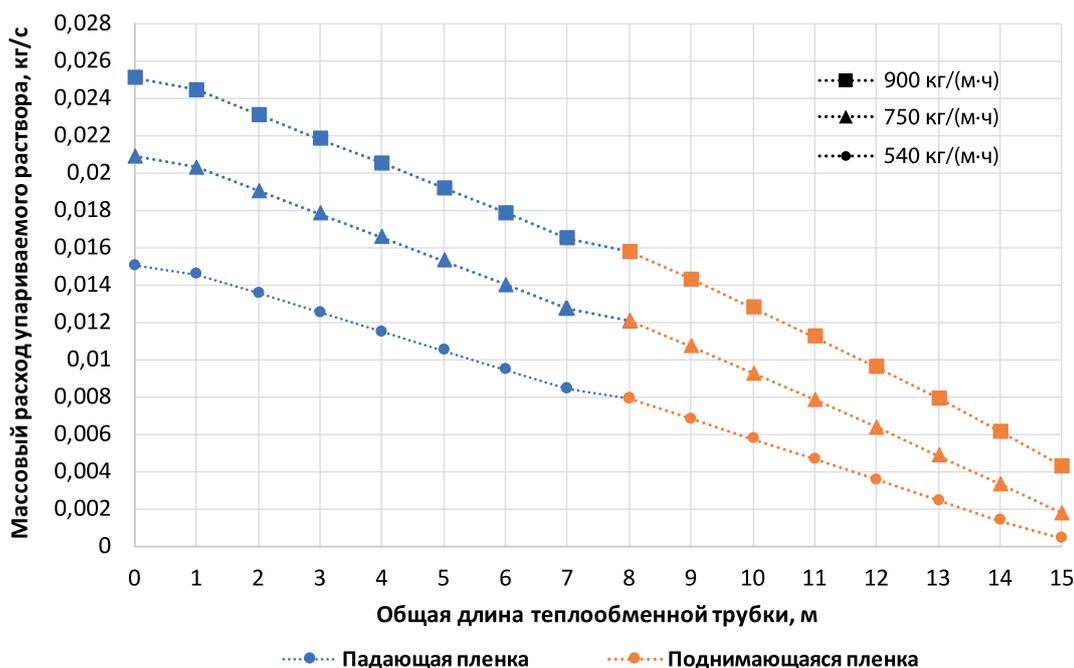


Рис. 8. Распределение локальных значений массового расхода упариваемого раствора по длине теплообменной трубки при различных значениях начальной интенсивности орошения [Fig. 8. Distribution of local values of the mass flow rate of the evaporated solution along the length of the heat exchange tube at different values of the initial irrigation intensity]

Значительное снижение абсолютного давления возникает при движении двухфазного потока по колену (8) (рис. 1), причем наиболее резкое снижение наблюдается при начальной интенсивности орошения 750 и 900 кг/(м·ч).

Наибольшие потери давления имеют место в теплообменной трубке в греющей камере с поднимающейся пленкой.

Установлено, что общие потери абсолютного давления при начальной интенсивности орошения 540 кг/(м·ч) составляют $\Delta P = 6,5$ кПа, при 750 кг/(м·ч) – $\Delta P = 11$ кПа, а при 900 кг/(м·ч) – $\Delta P = 13,5$ кПа. Снижение абсолютного давления в трубном пространстве приводит к снижению температуры кипения раствора в трубках, что положительным образом сказывается на производительности комбинированного выпарного аппарата в связи с увеличением полезной разности температур.

На рис. 7 представлено распределение локальных значений скорости вторичного пара по длине теплообменных трубок при различных значениях начальной интенсивности орошения.

Увеличение скорости вторичного пара в теплообменной трубке греющей камеры с падающей пленкой и в колене имеет практически линейный характер, а влияние значений начальной интенсивности орошения незначительно.

В греющей камере с поднимающейся пленкой наблюдается резкое нелинейное увеличение скорости вторичного пара по длине теплообменной трубки, установлено существенное влияние значений начальной интенсивности орошения на увеличение локальных значений скорости вторичного пара. Резкое увеличение скорости пара обусловлено значительным уменьшением абсолютного давления, что приводит к увеличению полезной разности температур и самоиспарению раствора.

Анализ полученных данных показывает, что скорость вторичного пара на входе в нижнюю часть греющей камеры с поднимающейся пленкой составляет 23–30 м/с. Учитывая, что во время проведения экспериментальных исследований наблюдалась устойчивая работа выпарного аппарата без срыва пленки жидкости при движении снизу вверх, данные значения скоростей можно принять минимальными при конструировании аппаратов данного типа. Скорость вторичного пара на входе в сепаратор составляла 60 м/с при начальной интенсивности орошения 540 кг/(м·ч) и 90 м/с при 900 кг/(м·ч). Такие значения скоростей вторичного пара обеспечивали прижатие жидкой фазы к стенкам сепаратора, что способствовало отсутствию пенообразования.

На рис. 8 представлено распределение локальных значений массового расхода упариваемого раствора по длине теплообменной трубки в зависимости от различных значений начальной интенсивности орошения. Характер распределения локальных значений массового расхода практически идентичен при всех исследуемых значениях интенсивности орошения, но имеет разные численные значения. Снижение массового расхода имеет практически линейный характер на всех рассматриваемых участках. Наблюдается явное влияние значений начальной интенсивности орошения.

Анализ полученных данных показывает следующее. Степень снижения массового расхода для начальной интенсивности орошения 540 кг/(м·ч) составляет 2,7 %, для 750 кг/(м·ч) – 19 %, а для 900 кг/(м·ч) – 23 %. При начальной интенсивности орошения 540 кг/(м·ч) ее конечное значение – 1,44 кг/(м·ч), что соответствует массовому расходу 0,0004 кг/с; при 750 – 7,2 кг/(м·ч), что соответствует массовому расходу 0,002 кг/с; при 900 – 16,2 кг/(м·ч), что соответствует массовому расходу 0,0045 кг/с. Таким образом, при эксплуатации аппарата данной геометрии и при исследуемых технологических режимах возможно оголение внутренней поверхности теплообменных трубок в верхней части греющей камеры с поднимающейся пленкой. Одним из способов ликвидации данного недостатка является увеличение начальной интенсивности орошения.

Заключение

В результате проведенного исследования процессов гидродинамики и теплопередачи в комбинированном выпарном аппарате пленочного типа при концентрировании низкоактивных жидких отходов, содержащих ПАВ:

- показана принципиальная возможность упаривания низкоактивных растворов, содержащих ПАВ, в комбинированном аппарате пленочного типа при умеренных тепловых нагрузках в диапазоне от 5 до 32 кВт/м² для греющей камеры с падающей пленкой и от 6 до 24 кВт/м² для греющей камеры с поднимающейся пленкой при интенсивности орошения в диапазоне 500–900 кг/(м·ч);

- установлено отсутствие пенообразования в сепараторе выпарного аппарата и отсутствие пены в конденсате образующегося вторичного пара, отводимого из конденсатора;

- получены значения коэффициента теплопередачи в опытном выпарном аппарате: в греющей камере с падающей пленкой $K_1 = 2\ 700 - 3\ 200$ Вт/(м²·К)

при $\Delta t = 8 - 11$ °С, в греющей камере с поднимающейся пленкой $K_2 = 1\ 300 - 2\ 300$ Вт/(м²·К) при $\Delta t = 8 - 9$ °С;

- получены зависимости коэффициентов теплопередачи в греющих камерах с падающей и поднимающейся пленкой от температуры исходного раствора, расхода исходного раствора, начальной интенсивности орошения;

- наблюдалась наиболее эффективная работа исследованного выпарного аппарата при температуре поступающего исходного раствора, которая соответствует температуре кипения раствора в аппарате;

- с помощью численного моделирования получены распределения локальных значений абсолютного давления, скорости вторичного пара и массового расхода низкоактивного раствора, содержащего ПАВ, по длине теплообменной трубки в зависимости от различных значений начальной интенсивности орошения;

- установлено устойчивое движение двухфазного потока по теплообменным трубкам греющих камер комбинированного выпарного аппарата. Данный комбинированный выпарной аппарат соответствует теплокинетическим и технологическим характеристикам выпарных аппаратов с падающей и поднимающейся пленкой промышленного масштаба, используемых для оснащения различных производств.

Таким образом, можно сделать общий вывод о том, что применение комбинированного выпарного аппарата пленочного типа при обращении с жидкими радиоактивными отходами объектов использования атомной энергии является целесообразным.

В дальнейшем в рамках работ по исследованию концентрирования жидких радиоактивных отходов в выпарных аппаратах пленочного типа планируется:

- провести экспериментальное исследование на комбинированном выпарном аппарате для определения оптимальных режимов работы (расхода, интенсивности орошения, температуры, абсолютного давления), обеспечивающих гарантированное пленочное течение жидкой фазы (без срыва пленки) по всей длине в теплообменных трубках греющих камер, особенно при переходе потока из одной греющей камеры в другую, а также отсутствие оголения внутренней поверхности теплообменных трубок;

- провести экспериментальное исследование комбинированного выпарного аппарата при условиях работы в составе многокорпусной установки;

- изучить влияние основных технологических параметров (расхода, интенсивности орошения, температуры, абсолютного давления, тепловой нагрузки, полезной разности температур) на гидродинамику двухфазного потока в теплообменных трубках методом численного моделирования;
- оценить факторы, наиболее влияющие на потери абсолютного давления в аппарате;
- изучить влияние геометрических параметров аппарата (длину теплообменных трубок, диаметр трубки) на гидродинамику двухфазного потока в теплообменных трубках.

Литература

1. Воронюк Д. Ю. Обращение с жидкими радиоактивными отходами / Актуальные проблемы энергетики - 2018: материалы студенческой научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 546–553.
2. Долина Л. Ф. Защита вод от радиоактивного загрязнения: монография / Л. Ф. Долина, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Днепропетровск: «ЛИРА», 2016. – 477 с.
3. Хамад Амин М. С. Радиационные методы очистки воды / М. С. Хамад Амин // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. 2021. № 3.
4. Милютин В. В., Козлов П. В., Некрасова Н. А. Современные методы переработки жидких радиоактивных отходов: учеб. пособие для студентов, обучающихся по специальности «Химическая технология материалов современной энергетики». – Изд. 2-е, доп. – Озёрск: ОТИ НИЯУ МИФИ, 2021. – 172 с.
5. Коростелев Д. П. Водный режим и обработка радиоактивных вод атомных электростанций: учеб. пособие для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 240 с.
6. Скачек М. А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Атомные электрические станции и установки» направления подготовки «Техническая физика» / М. А. Скачек. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 447 с.
7. Novoselov I. K., Khomyakov A. P., Mordanov S. V., Nikulin V. A., Bir A. A., Kostromin K. V., Khomyakova T. V. (2022). Two-phase flow hydrodynamics research in the LWR ozonation contact apparatus. AIP Conference Proceedings, No. 2466.
8. Хомяков А. П. Процессы и аппаратурное оформление производств для получения порошкообразных химических веществ: дис. ... д-ра технич. наук: 05.17.08, 05.18.12. – Екатеринбург, 2007. – 612 с.
9. Патент РФ № 2039438. МКИ А23С 1/12. Многокорпусная выпарная установка для пищевых продуктов и выпарной аппарат / В. И. Левераш, А. П. Хомяков, А. В. Обухов, Н. М. Борисоник; опубл. 20.07.1995; бюл. № 20.
10. Патент РФ № 2261134. МПК В01D1/22, А23С1/12. Выпарной аппарат / А. П. Хомяков, К. А. Хомяков, В. М. Фахрадов (РФ). № 2004126071/15; заявлено 25.06.2004; опубл. 27.09.2005; бюл. № 27.
11. Патент на полезную модель № 48709. МПК А 23 С 1/12. Выпарной аппарат / А. П. Хомяков, К. А. Хомяков (РФ). № 2005115438; заявлено 20.05.2005; опубл. 10.11.2005; бюл. № 31.
12. Патент РФ № 2294786. МПК В01D 1/06. Выпарной аппарат / А. П. Хомяков (РФ). № 2005115166/15; опубл. 03.10.2007.
13. Левераш В. И. Экспериментальное исследование теплоотдачи к жидкости в выпарных аппаратах с падающей пленкой применительно к условиям работы дистилляционных опреснительных установок: дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск, 1968.
14. Левераш В. И. О характере парообразования в тонкой пленке, свободно стекающей по вертикальной поверхности теплообмена / сб. трудов «Вопросы атомной науки и техники». Серия: Опреснение соленых вод. Вып. 4. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1973. – С. 74–81.
15. Доманский И. В., Соколов В. Н. Определение режимов устойчивой работы выпарных аппаратов с падающей жидкостной пленкой // ЖПХ. 1967. № 40, вып. 1. С. 365–370.
16. Воронцов Е. Г. Теплообмен в жидкостных пленках / Е. Г. Воронцов, Ю. М. Тананайко. – Киев: Техніка, 1972. – 193 с.
17. Murray A. J. (1986). Practical and economic benefits of falling film evaporation. Plant. Operation progress. V. 5. No. 1. Pp. 31–34.
18. Purcell A. M. (1985). The concentration of medium level radioactive wastes by evaporation. United Kingdom Atomic Energy Authority AERF – R 10835. Horwall.

19. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V., Khomyakova T. V. (2021). Mathematical model of two-phase flow processes in heat exchange tubes of the falling film evaporator. AIP Conference Proceedings. No. 2388.

References

1. Voronyuk D. Y. (2018). Obrashchenie s zhidkimi radioaktivnymi otkhodami [Handling of liquid radioactive waste]. Aktual'nye problemy ehnergetiki - 2018 – Actual problems of energy - 2018: proceedings of the student scientific and technical conference (pp. 546–553). Minsk: BNTU. [in Russian].
2. Dolina L. F. (2016). Zashchita vod ot radioaktivnogo zagryazneniya [Protection of waters from radioactive contamination]. Monograph. Dnepropetrovsk: “LIRA”, 477 p. [in Russian].
3. Hamad Amin M. S. (2021). Radiatsionnye metody oчитki vody [Radiation methods of water purification]. Vestnik VGU – Bulletin of the Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics. No. 3. [in Russian].
4. Milyutin V. V., Kozlov P. V., Nekrasova N. A. (2021). Sovremennye metody pererabotki zhidkikh radioaktivnykh otkhodov [Modern methods of processing liquid radioactive waste]. A textbook for students studying in the specialty “Chemical technology of materials of modern energy”, 2nd edition, supplemented. Ozersk: Ozersk Technological Institute, 172 p. [in Russian].
5. Korostelev D. P. (1983). Vodnyi rezhim i obrabotka radioaktivnykh vod atomnykh ehlektrostantsii [Water regime and treatment of radioactive waters of nuclear power plants]. A textbook for technical schools. Moscow: Energoatomizdat, 240 p. [in Russian].
6. Skachek M. A. (2007). Obrashchenie s otrabotavshim yadernym toplivom i radioaktivnymi otkhodami AEHS [Treatment of spent nuclear fuel and radioactive waste of nuclear power plants]. A textbook for university students studying in the specialty “Nuclear power plants and installations” areas of training “Technical physics”. Moscow: Publishing house of the MEI, 447 p. [in Russian].
7. Novoselov I. K., Khomyakov A. P., Mordanov S. V., Nikulin V. A., Bir A. A., Kostromin K. V., Khomyakova T. V. (2022). Two-phase flow hydrodynamics research in the LWR ozonation contact apparatus. AIP Conference Proceedings, No. 2466.
8. Khomyakov A. P. (2007). Protsessy i apparaturnoe oformlenie proizvodstv dlya polucheniya poroshkoobraznykh khimicheskikh veshchestv [Processes and hardware design of productions for the production of powdered chemicals]. Dissertation of the Doctor of Technical Sciences: 05.17.08, 05.18.12. Yekaterinburg, 612 p. [in Russian].
9. Patent of the Russian Federation No. 2039438. MKI A23S 1/12. Mnogokorpusnaya vyparnaya ustanovka dlya pishchevykh produktov i vyparnoi apparat [Multi-body evaporation plant for food products and evaporation apparatus]. V. I. Leverash, A. P. Khomyakov, A. V. Obukhov, N. M. Borysonic; publ. 07.20.1995, issue No. 20. [in Russian].
10. Patent of the Russian Federation No. 2261134. IPC B01D1/22, A23C1/12. Vyparnoi apparat [Evaporation apparatus]. A. P. Khomyakov, K. A. Khomyakov, V. M. Fakhradov (RF). No. 2004126071/15; announced 25.06.2004; publ. 27.09.2005; byul. No. 27. [in Russian].
11. Utility model patent No. 48709. IPC A 23 From 1/12. Vyparnoi apparat [Evaporation apparatus]. A. P. Khomyakov, K. A. Khomyakov (RF). No. 2005115438; announced 05/20/2005; published 11.10.2005; issue No. 31. [in Russian].
12. Patent of the Russian Federation No. 2294786. IPC B01D 1/06. Vyparnoi apparat [Evaporation apparatus]. A. P. Khomyakov (RF). No. 2005115166/15; publ. 03.10.2007. [in Russian].
13. Leverash V. I. (1968). Ehksperimental'noe issledovanie teplootdachi k zhidkosti v vyparnykh apparatakh s padayushchei plenкой primenitel'no k usloviyam raboty distillyatsionnykh opresnitel'nykh ustanovok [Experimental study of heat transfer to liquid in evaporators with a falling film in relation to the operating conditions of distillation desalination plants]. Dissertation of Candidate of Technical Sciences. Sverdlovsk. [in Russian].
14. Leverash V. I. (1973). O kharaktere paroobrazovaniya v tonkoi plenke, svobodno stekayushchei po vertikal'noi poverkhnosti teploobmena [On the nature of vaporization in a thin film flowing freely over a vertical heat exchange surface]. Collection of works “Issues of atomic science and technology”. Series: Desalination of salt water. Issue 4. Moscow: Tsniiatominform, pp. 74–81. [in Russian].

15. Domansky I. V., Sokolov V. N. (1967). Opredelenie rezhimov ustoichivoi raboty vyparnykh apparatov s padayushchei zhidkostnoi plenкой [Determination of modes of stable operation of evaporators with a falling liquid film]. Zhurnal prikladnoi khimii – Journal of Applied Chemistry, 40, issue 1, pp. 365–370. [in Russian].
16. Vorontsov E. G., Tananaiko Yu. M. (1972). Teploobmen v zhidkostnykh plenках [Heat transfer in liquid films]. Kiev: Technika, 193 p. [in Russian].
17. Murray A. J. (1986). Practical and economic benefits of falling film evaporation. Plant. Operation progress. V. 5. No. 1. Pp. 31–34.
18. Purcell A. M. (1985). The concentration of medium level radioactive wastes by evaporation. United Kingdom Atomic Energy Authority AERF – R 10835. Horwall.
19. Khomyakov A. P., Gushshamova V. N., Mordanov S. V., Khomyakova T. V. (2021). Mathematical model of two-phase flow processes in heat exchange tubes of the falling film evaporator. AIP Conference Proceedings. No. 2388.

Сведения об авторах

Хомяков Анатолий Павлович, заведующий кафедрой «Машины и аппараты химических производств», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Колупаев Дмитрий Никифорович, генеральный директор, федеральное государственное унитарное предприятие «Горно-химический комбинат» (662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, д. 53).

Понизов Антон Владимирович, начальник отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Василишин Александр Леонидович, заместитель начальника отдела безопасности предприятий топливного цикла, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Шкурин Павел Александрович, генеральный директор, АО «СвердНИИхиммаш» (620010, г. Екатеринбург, ул. Грибоедова, д. 32).

Прохоров Сергей Валерьевич, инженер, АО «СвердНИИхиммаш» (620010, г. Екатеринбург, ул. Грибоедова, д. 32).

Морданов Сергей Вячеславович, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Гушишамова Виктория Надимовна, ассистент кафедры «Машины и аппараты химических производств», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Хомякова Татьяна Владимировна, старший преподаватель кафедры «Машины и аппараты химических производств», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19).

Authors credentials

Khomyakov Anatoliy Pavlovich, Head of the Department “Chemical and atomic production machines and apparatuses”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002), e-mail: a.p.khomiakov@urfu.ru.

Kolupaev Dmitry Nikiforovich, General Director of Federal State Unitary Enterprise “Mining and Chemical Plant” (53, Lenin str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk territory, 662972), e-mail: Dimk1969@mail.ru.

Ponizov Anton Vladimirovich, Head of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Vasilishin Alexander Leonidovich, Deputy Head of Division for Safety of Fuel Cycle Facilities, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., Moscow, 107140), e-mail: vasilishin@secnrs.ru.

Shkurin Pavel Alexandrovich, General Director of JSC “Sverdlovsk Scientific Research Institute of Chemical Engineering” (32, Griboyedov str., Ekaterinburg, 620010), e-mail: Shkurin@snihim.ru.

Prokhorov Sergey Valerievich, Engineer of JSC “Sverdlovsk Scientific Research Institute of Chemical Engineering” (32, Griboyedov str., Ekaterinburg, 620010), e-mail: pro9999@yandex.ru.

Mordanov Sergey Vyacheslavovich, Assistant Professor of the Department “Chemical and atomic production machines and apparatuses”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002), e-mail: s.v.mordanov@urfu.ru.

Gushshamova Viktoria Nadimovna, Assistant of the Department “Chemical and atomic production machines and apparatuses”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002), e-mail: v.n.gushshamova@urfu.ru.

Khomyakova Tatiana Vladimirovna, Senior Lecturer of the Department “Chemical and atomic production machines and apparatuses”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002), e-mail: homtv21@gmail.com.

Для цитирования

Хомяков А. П., Колупаев Д. Н., Понизов А. В., Василишин А. Л., Шкурин П. А., Прохоров С. В., Морданов С. В., Гушшамова В. Н., Хомякова Т. В. Исследование процессов гидродинамики и теплопередачи в комбинированном выпарном аппарате пленочного типа при концентрировании низкоактивных жидких отходов, содержащих поверхностно-активные вещества // Ядерная и радиационная безопасность. 2024. № 2 (112). С. 28–42. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.003.

For citation

Khomyakov A. P., Kolupaev D. N., Ponizov A. V., Vasilishin A. V., Shkurin P. A., Prokhorov S. V., Mordanov S. V., Gushshamova V. N., Khomyakova T. V. Investigation of the hydrodynamics processes and heat transfer in the combined film-type evaporation apparatus during the concentration of low-level liquid waste containing surfactants. Nuclear and Radiation Safety Journal, 2024, No. 2 (112), pp. 28–42. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2024.112.2.003.

