

Научная статья
УДК 66-9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛЕЗНОЙ РАЗНОСТИ ТЕМПЕРАТУР НА ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНКИ ЖИДКОЙ ФАЗЫ И ВТОРИЧНОГО ПАРА ПО ДЛИНЕ ТЕПЛООБМЕННОЙ ТРУБКИ ПЛЕНОЧНОГО ВЫПАРНОГО АППАРАТА

**Виктория Надимовна Гушшамова¹, Анатолий Павлович Хомяков,
Сергей Вячеславович Морданов, Татьяна Владимировна Хомякова**

Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

¹ v.n.gushshamova@urfu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты математического численного моделирования гидродинамики двухфазного потока по длине теплообменной трубки пленочного выпарного аппарата.

Ключевые слова: пленочный выпарной аппарат, гидродинамика двухфазного потока, повышение эффективности теплопередачи

Для цитирования: Исследование влияния полезной разности температур на изменение гидродинамических параметров пленки жидкой фазы и вторичного пара по длине теплообменной трубки пленочного выпарного аппарата / В. Н. Гушшамова, А. П. Хомяков, С. В. Морданов, Т. В. Хомякова // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика. Даниловские чтения — 2021 = Energy and Resource Saving. Power Supply. Non-traditional and Renewable Energy Sources. Nuclear Energy. Danilov Readings — 2021 : сборник научных трудов. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2023. С. 309–315.

Original article

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE USEFUL TEMPERATURE DIFFERENCE ON THE CHANGE IN THE HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF THE LIQUID PHASE FILM AND SECONDARY STEAM ALONG THE HEAT EXCHANGE TUBE LENGTH OF THE FALLING-FILM EVAPORATOR

Victoria N. Gushshamova¹, Anatoliy P. Khomyakov, Sergey V. Mordanov, Tatyana V. Khomyakova

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

¹ v.n.gushshamova@urfu.ru

Abstract. The paper presents the results of mathematical numerical simulation of the hydrodynamics of the two-phase flow along the heat exchange tube length of the falling-film evaporator.

Keywords: falling-film evaporator, hydrodynamics of two-phase flow, increasing the efficiency of heat transfer

For citation: Gushshamova V. N., Khomyakov A. P., Mordanov S. V., Khomyakova T. V. (2023). Issledovanie vliyaniya poleznoy raznosti temperature na gidrodinamicheskie parametryi plenki zhidkoy fazy i vtorichnogo para po dline teploobmennoy trubki plenochnogo vyparnogo apparata [Investigation of the Effect of the Useful Temperature Difference on the Change in the Hydrodynamic Parameters of the Liquid Phase Film and Secondary Steam Along the Heat Exchange Tube Length of the Falling-Film Evaporator]. *Ehnergo- i resursosberezhenie. Ehnergoobespechenie. Netradicionnye i vozobnovlyaemye istochniki ehnergii. Atomnaya ehnergetika. Danilovskie chteniya — 2021* [Energy and Resource Saving. Power Supply. Non-traditional and Renewable Energy Sources. Nuclear Energy. Danilov Readings — 2021]. Ekaterinburg : Ural University Publishing House, 2023. P. 309–315. (In Russ).

Выпарные аппараты с падающей пленкой широко применяются для различных промышленных процессов: опреснение [1], дистилляция [2], упаривание термолабильных растворов [3] и т. д. Исследование гидродинамики пленочных выпарных аппаратов является актуальной задачей [3; 4].

Нами проводится комплекс исследований, которые посвящены изучению влияния эксплуатационных режимов работы пленочного

выпарного аппарата на гидродинамику двухфазного потока в теплообменной трубке [4; 5] методом математического численного моделирования.

Целью настоящей работы является исследование влияния полезной разности температур на изменение гидродинамических параметров пленки жидкой фазы и вторичного пара по длине теплообменной трубки выпарного аппарата пленочного типа.

Исследование проводилось методом численного математического моделирования с помощью модели [5], которая описывает изменения гидродинамических параметров (объемных расходов, критерия Рейнольдса, скорости и т. д.) двухфазного потока по длине теплообменной трубки выпарного аппарата (табл. ниже).

Таблица

Основные технологические параметры работы выпарного аппарата

Показатель	Значение
Модельная жидкость в трубном пространстве	Вода
Абсолютное давление в верхней растворной камере, Па	30450
Расход исходного раствора, л/ч	100
Коэффициент теплопередачи, который принимается постоянным по всей длине теплообменной трубки, Вт/(м ² ×К)	2000

Исследуемый аппарат оснащен теплообменной трубкой диаметром $\varnothing 38 \times 2$ мм и длиной $L = 7$ м. Решения получены по длине теплообменной трубки с шагом $\Delta L_i = 100$ мм.

В результате математического моделирования получены распределения локальных значений критерия Рейнольдса пленки жидкой фазы в зависимости от значений полезной разности температур ($\Delta t = 5$ °С; $\Delta t = 10$ °С; $\Delta t = 15$ °С) и длины теплообменной трубки (рис. 1). С помощью регрессионной обработки данных численного моделирования, методом наименьших квадратов, получена функция для определения критерия Рейнольдса пленки жидкой фазы с погрешностью аппроксимации 3 %.

Установлено, что значения критерия Рейнольдса пленки жидкой фазы по длине теплообменной трубки уменьшаются по длине теплообменной трубки при всех рассматриваемых значениях Δt . При этом, с ростом значений Δt , критерий Рейнольдса пленки жидкой фазы уменьшается. Так, например, при $\Delta t = 5$ °С критерий Рейнольдса на нижнем срезе теплообменной трубки (7 м) равен 2157, а при

$\Delta t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ критерий Рейнольдса на нижнем срезе теплообменной трубки равен 1446.

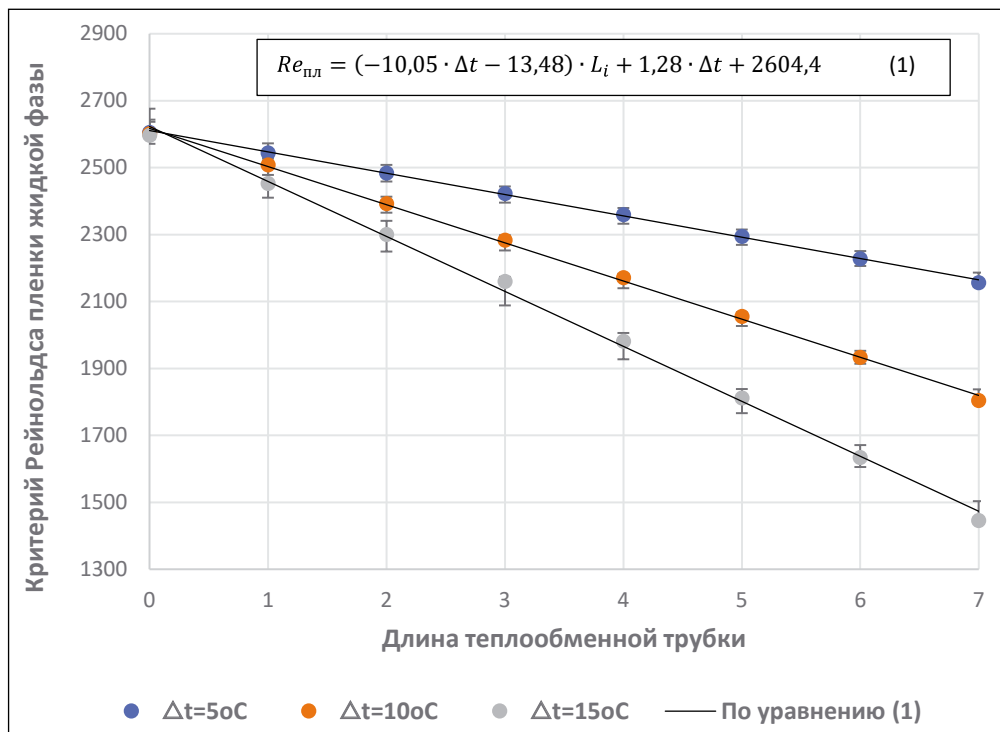


Рис. 1. Распределение локальных значений критерия Рейнольдса пленки жидкой фазы в зависимости от L_i и Δt

Также установлено, что изменения значений критерия Рейнольдса пленки жидкой фазы по длине теплообменной трубки увеличиваются с ростом значений Δt . Например, при $\Delta t = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ изменение критерия Рейнольдса равно 449, а при $\Delta t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ изменение критерия Рейнольдса равно 1151.

Такое распределение локальных значений критерия Рейнольдса пленки жидкой фазы обусловлено зависимостью критерия Рейнольдса пленки от объемного расхода жидкой фазы. По ходу движения двухфазного потока по теплообменной трубки происходит уменьшение объемного расхода жидкой фазы в процессе упаривания, к тому же при увеличении Δt уменьшение расхода происходит интенсивнее.

На рисунке 2 представлено распределение локальных значений критерия Рейнольдса вторичного пара по длине теплообменной труб-

ки в зависимости от различных значений Δt . С помощью регрессионной обработки данных численного моделирования получена функция для определения критерия Рейнольдса вторичного пара с погрешностью аппроксимации 4 %.

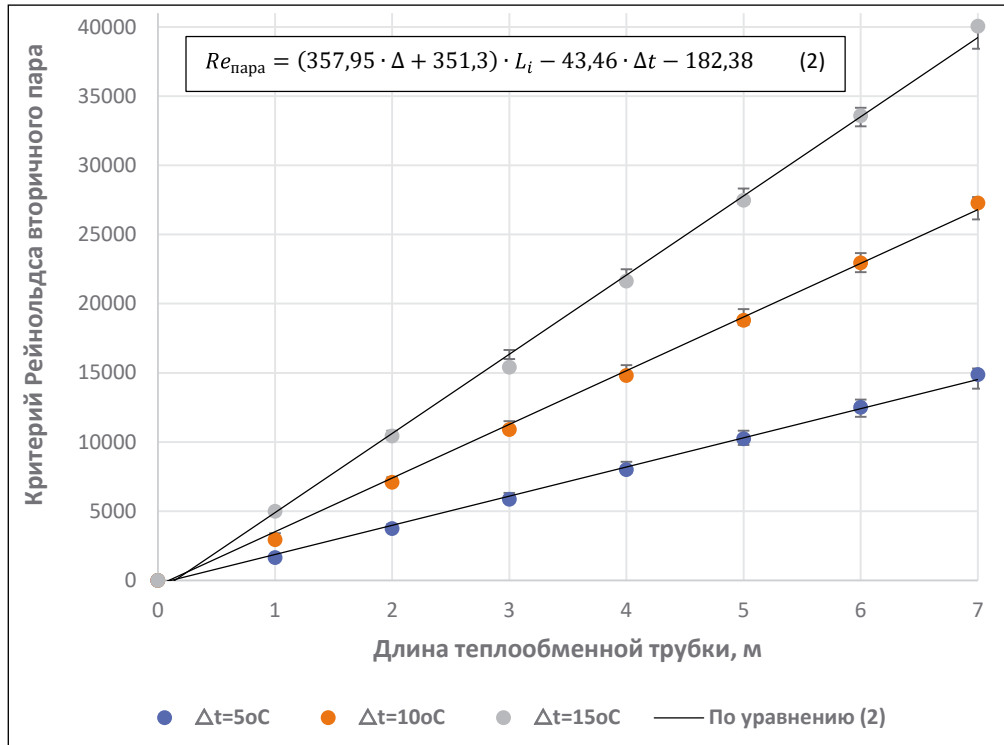


Рис. 2. Распределение локальных значений критерия Рейнольдса вторичного пара в зависимости от L_i и Δt

Показано, что значения критерия Рейнольдса вторичного пара увеличиваются по длине теплообменной трубки при всех рассматриваемых значениях Δt . При этом с ростом значений Δt критерий Рейнольдса вторичного пара увеличивается. Так, например, при $\Delta t = 5^\circ\text{C}$ критерий Рейнольдса вторичного пара на нижнем срезе теплообменной трубки равен 14870, а при $\Delta t = 15^\circ\text{C}$ критерий Рейнольдса вторичного пара на нижнем срезе теплообменной трубки равен 40063.

Такое распределение значений критерия Рейнольдса обусловлено увеличением скорости вторичного пара, а этот гидродинамический параметр зависит от объемного расхода вторичного пара. Соответ-

ственно, увеличение объемного расхода вторичного пара приводит к увеличению критерия Рейнольдса вторичного пара, причем с ростом Δt , увеличение объемного расхода вторичного пара происходит интенсивнее.

Таким образом, показано влияние полезной разности температур на изменение критерия Рейнольдса двухфазного потока в теплообменной трубке выпарного аппарата с падающей пленкой. Увеличение Δt приводит к уменьшению значений критерия Рейнольдса пленки жидкой фазы и увеличению значений критерия Рейнольдса вторичного пара, что положительным образом сказывается на процессе теплопередачи в пленочном выпарном аппарате.

Список источников/References

1. Effect of the tube surface temperature on the seawater fouling process during falling film evaporation outside horizontal tubes / X. H. Liu, S. Y. Liu, S. B. Sun [et al.] // *Desalination and Water Treatment*. 2018. Vol. 136. P. 1–6. DOI:10.5004/dwt.2018.21500.

2. Falling film distillation column with heat transfer by means of a vapor chamber — part I: isothermal operation / C. Marangoni, A. P. Meneguelo, J. G. Teleken [et al.] // *Chemical Engineering Communications*. 2019. Vol. 206, Iss. 8. P. 994–1005. DOI:10.1080/00986445.2018.1542250.

3. Evaporation of water film in a three-dimensional vertical rectangular channel by laminar mixed convection / L. J. Zhang, Y. Y. Huang, J. Y. Wu [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 130. P. 242–253. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2017.11.023.

4. Investigation of two-phase flow hydrodynamics of heat exchange tube outlet falling film evaporator / V. N. Gushshamova, A. P. Khomyakov, S. V. Mordanov, T. V. Khomyakova // *Modern synthetic methodologies for creating drugs and functional materials (MOSM 2020) : Proceedings of the IV International Conference, 16–20 November 2020. Ekaterinburg*. 2021. Vol. 2388, Iss. 1. P. 020006. DOI: 10.1063/5.0068409.

5. Gushshamova V. N., Khomyakov A. P., Mordanov S. V. Mathematical model of two-phase flow processes in heat exchange tubes of the falling film evaporator // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 864, Iss. 1. P. 012037. DOI: 10.1088/1755–1315/864/1/012037.

Информация об авторах

Виктория Надимовна Гушшамова — аспирант кафедры машины и аппараты химических производств Химико-технологического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), v.n.gushshamova@urfu.ru

Анатолий Павлович Хомяков — доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой машины и аппараты химических производств Химико-технологического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), a.p.khomiakov@urfu.ru

Сергей Вячеславович Морданов — кандидат технических наук, доцент кафедры машины и аппараты химических производств Химико-технологического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия), s.v.mordanov@urfu.ru

Татьяна Владимировна Хомякова — старший преподаватель кафедры машины и аппараты химических производств Химико-технологического института Уральского федерального университета (Екатеринбург, Россия)

Information about the authors

Viktoria N. Gushshamova — Postgraduate Student of the Department Machines and Apparatuses of Chemical Production of the Institute of Chemical Technology of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), v.n.gushshamova@urfu.ru, ORCID: 0000–0002–5635–0320

Anatoliy P. Khomyakov — Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department Machines and Apparatuses of Chemical Production of the Institute of Chemical Technology of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), a.p.khomiakov@urfu.ru, ORCID: 57191836902

Sergey V. Mordanov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Machines and Apparatuses of Chemical Production of the Institute of Chemical Technology of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), s.v.mordanov@urfu.ru, ORCID: 55746551100

Tatyana V. Khomyakova — Senior Lecturer of the Department Machines and Apparatuses of Chemical Production of the Institute of Chemical Technology of the Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia), ORCID: 57196029795