

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40

***Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Минко В.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: yulis3790@mail.ru

АКТУАЛЬНОСТЬ МОДЕЛЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Аннотация. В статье проведен анализ различных теоретических подходов к описанию процессов формирования слоев накипи на рабочих поверхностях теплообменных аппаратов. К основным задачам относятся анализ существующих моделей загрязнения каналов теплообмена, определение основного механизма солеотложения на поверхности нагрева пластинчатых теплообменных аппаратов систем теплоснабжения, определение основных факторов, определяющих интенсивность солеотложений на рабочей пластине в соответствии с динамикой тепло-гидравлических процессов в каналах теплообмена, образованных гофрированными пластинами, а также сформировать тенденции дальнейшего исследования. В статье представлены основные результаты исследований, посвященных изучению процессов загрязнения на поверхностях нагрева. Определены неточности в предложенных подходах по описанию характера образования слоев солеотложения. Методом обобщения существующих подходов математического описания процессов загрязнения, выявлены основные допущения при описании процессов образования солеотложений на рабочих пластинах. Предложена гипотеза о влиянии расположения каналов относительно входного патрубка на равномерность распределения потоков между параллельными каналами в аппарате. Отмечен достаточно большой разрыв между существующими расчетными методами моделирования процессов загрязнения и реальным распределением слоев накипи в ходе работы теплообменного оборудования систем теплоснабжения.

Ключевые слова: теплопотребление, энергоемкость, энергоэффективность, пластинчатые теплообменные аппараты, модель загрязнения, интенсивность теплообмена, дополнительные слои сопротивления, поверхность нагрева, накипеобразование, каналы теплообмена, потокораспределение, кристаллизационный механизм загрязнения, факторы формирования накипи.

Введение. В России наибольшая доля затрат потребляемой энергии приходится на сферу теплоснабжения, что подтверждается рядом исследований [1–4], посвященных оптимизации технических решений в этой области. При этом, основными категориями теплопотребления являются коммунально-бытовые службы и потребители тепла для технологических нужд [5].

Тенденция ввода в эксплуатацию современного модернизированного теплообменного оборудования решает вопросы повышения энергоэффективности работы пунктов распределения тепла, что в свою очередь снижает энергоемкость водогрейных аппаратов [6, 7]. Также известно, что теплообменники, как часть производственных процессов, выполняющие важную роль по обработке и передачи тепловой энергии, в период эксплуатации подвержены образованию коррозии, накипеобразующих солей, а также накоплению различного рода загрязнений на поверхности нагрева [8, 9]. При этом данный фактор существенным образом оказывает влияние на гидродинамические, тепловые и эксплуатационные характеристики теплообменника, изменение которых, в свою очередь, отражают экономические показатели, как отдельного агрегата, так и всего предприятия по переработке тепла в целом [10, 11].

Так для теплообменных аппаратов с расчетным коэффициентом теплопередачи свыше 3000 (Вт/м²К) характерно снижение тепловой эффективности более 50 % уже при толщине накипи от 0,5 мм [12].

Согласно исследованиям [9], потеря тепловой эффективности одного из теплообменников, установленного на ЦТП составила за 1-й год эксплуатации – 5 %, за 2-й год -15%, после 3-го более 25 %. В некоторых случаях потери энергии могли составить до 50–70 % за период от 3 до 6 недель. Поэтому с целью поддержания работы теплообменных устройств на заданном уровне, целесообразно своевременное принятие мер по борьбе и устранению продуктов накипеобразования.

В коммунально-бытовой сфере теплопотребления эффективность теплообменных устройств, принято оценивать коэффициентом «чистоты»:

$$\frac{K}{K_c} = \frac{1}{1 + K_c \left(\frac{\delta_n}{\lambda_n} \right)}, \quad (1)$$

где K и K_c – коэффициенты теплопередачи «загрязненного» и чистого теплообменника, (Вт/м²К); δ_n и λ_n – толщина и коэффициент теплопроводности дополнительно образованного слоя накипи на поверхности теплообмена.

Зависимость (1) характеризует техническое состояние теплообменного оборудования на основании эмпирического соотношения коэффициентов теплоотдачи чистой и «загрязненной» поверхностей теплообмена, но не раскрывает механизмов образования отложений [13].

Процессы загрязнения пластинчатых теплообменников достаточно сложны и зависят от многих факторов [4, 14–17], поэтому описание теплогидродинамических режимов в межпластинчатых каналах в условиях образования дополнительных отложений на поверхностях нагрева, представляют в виде математических моделей загрязнения.

Исследования закономерностей формирования накипеобразующих слоев сопротивления с практической точки зрения, являются основой в разработке информационно-диагностических систем контроля эффективности работы теплообменников, которые в свою очередь выполняют функции контроля качества работы аппарата [18, 19]. Своевременная диагностика эффективности эксплуатации водогрейных устройств обеспечивает условие поддержания бесперебойной и длительной работы оборудования. Поэтому теория описания процессов солеотложения требует высокой точности и соответствия экспериментальным данным.

Исследования теплогидродинамических процессов в каналах теплообмена пластинчатых водонагревателей, являются весьма актуальными и направлены на решение таких задач как: повышение эффективности пластинчатого теплообменного оборудования и рост его конкурентоспособности, а также на экономию энергетических и трудовых ресурсов.

Цель исследования. Определить справедливость существующих математических моделей загрязнения поверхностей нагрева в качестве интеллектуальной составляющей для информационно-диагностических систем контроля теплообменных водоподогревателей систем теплоснабжения.

Методы исследования. Анализ работ посвященных исследованию загрязнений поверхности теплопередачи пластинчатых теплообменников [9, 20–25 и др.], используемых с целью нагрева воды в сфере ЖКХ, показал, что низкие температуры теплоносителя образуют преимущественно иловые отложения, а повышение температуры способствует выпадению солей накипи. При этом процесс накипеобразования характеризуется образованием твердых слоев карбоната кальция, сульфата кальция или силикатов на поверхности теплопередачи в зависимости от химического состава теплоносителя. Именно та-

кие виды загрязнения характерны для теплообменников систем теплоснабжения. Согласно исследованиям [13, 16, 26], для каналов, образованных гофрированными пластинами характерен кристаллизационный механизм формирования загрязнений. Поэтому для пластинчатых теплообменных аппаратов справедливы модели загрязнения, учитывающие закономерности кристаллизационного формирования дополнительных слоев загрязнения, образованных из неорганических солей, растворенных в рабочей жидкости. Кроме того, при рассмотрении теоретических подходов по представлению механизмов солеотложения в пластинчатых теплообменных водонагревателях, следует учитывать описание характера интенсивности солеотложения и распределения толщины накипи по длине канала и пакета пластин.

Основная часть. Рассмотрим основные теоретические подходы к описанию процессов загрязнения в каналах нагрева.

Теоретическому изучению образования коллоидно-дисперсных отложений посвящены работы Керна и Сетона (Kern-Seaton) [20, 27]. Согласно модели загрязнения Керна и Сетона скорость отложения пропорциональна разности концентрации загрязняющего вещества на входе и выходе из теплообменника. Также учитывается и скорость удаления, которая зависит от величины касательных напряжений сдвига, в результате развитого движения потока теплоносителя на поверхности отложений. Показана связь теплоотдачи с касательным напряжением сдвига, что позволяет получить соотношения между теплоотдачей и интенсивностью формирования слоя накипи на рабочих поверхностях теплообмена [25, 28]. Недостатком предложенного математического описания процессов загрязнения является, то что авторы модели допускают применение зависимостей коллоидно-дисперсного осаждения для кристаллизационного типа.

Модель автора Beal [8] определяет пропорциональное отношение интенсивности образования дополнительных слоев сопротивления к коэффициенту броуновской и вихревой диффузии, а также к градиенту разности концентраций загрязняющего вещества в теплоносителе. При этом не учитывается гидродинамический снос частиц, что является существенным недостатком данной модели, так как в действительности данное явление имеет место быть и оказывает определенное влияние на работоспособность теплообменников.

Необходимо отметить, что модели Kern-Seaton и Beal справедливы для дисперсного механизма образования твердых отложений на тепло-

передающих поверхностях. В то время как, исследования, посвященные прогнозированию накипеобразования в пластинчатых водонагревателях [8, 16, 23, 29, 30] подтверждают, что большинство отложений, формирующихся на поверхности теплообмена пластинчатых аппаратов, имеют кристаллическую структуру и подчиняются закономерностям кристаллизационного типа загрязнения. Поэтому при описании процессов образования солеотложения в пластинчатом водогрейном оборудовании справедливо применять методы и зависимости, разработанные в теории кристаллизации.

Модели Hasson, Reitzer, Taborek, Najibi, [21, 31–33] основаны на закономерностях развития кристаллизационного механизма загрязнения, однако, между ними имеются разночтения при описании характера интенсивности отложений и факторов, оказывающих влияние на скорость образования отложений.

Также модели загрязнения Hasson, Reitzer, Najibi, Beal описывают процесс интенсивности отложений линейной зависимостью, что подразумевает образование твердого слоя, для которого процессами удаления и гидродинамического сноса можно пренебречь. При этом термическое сопротивление слоев накипи возрастает по линейному закону, а скорость осаждения частиц постоянна во времени.

Экспериментальные и теоретические исследования [29, 34–36 и др.] подтверждают асимптотическую зависимость интенсивности отложений на рабочей пластине, которая определяет закономерность равенства количества удаляемого с поверхности вещества в единицу времени количеству осаждаемого через определенный промежуток времени работы оборудования. Такое явление подразумевает влияние гидродинамического смыва частиц с поверхности твердого слоя накипи в результате сужения межпластинного канала при его зарастании.

Сагань И.И. [37] описывает процессы накипеобразования, основываясь на механизме кристаллизационного загрязнения с учетом асимптотической зависимости характера интенсивности солевых отложений. Обобщая подходы Kern и Reitzer, Сагань И.И. раскрывает связь факторов формирования и удаления накипи для определения интенсивности накипеобразования.

Научная теория Дахина О.Х. [38] описывает процесс формирования отложений на теплообменных поверхностях и их влияние на параметры работы теплообменников. Согласно данной модели динамика солеотложения описывается зависимостью, определяющей изменение толщины твердого слоя во времени:

$$\delta_n(\tau) = \delta_n^*(1 - e^{-k\tau}), \quad (2)$$

где δ_n^* – предельная толщина накипи, при которой поток образования отложений равен потоку сноса, м; τ – время процесса образования накипи (время работы аппарата), сек; k – коэффициент.

Подходы к описанию процесса накипеобразования в теплообменных аппаратах Дахина О.Х. подобны результатам исследований Саганя И.И. и Райтцера. Главным недостатком указанных моделей является, то что наибольшее значение пересыщения раствора, определяющее интенсивность накипеобразования [36], предполагается в начале сечения канала (при противоточной схеме движения теплоносителей в каналах теплообмена). При этом минимальную толщину накипи следует ожидать в конце канала, а максимальную в начале, что противоречит экспериментальным данным [9, 16, 39].

Достаточно детальный анализ работ по исследованию процессов накипеобразования на теплопередающих стенках теплообменных аппаратов представлен в работе Чернышева Д.В. [14]. Сделан вывод, что процесс накипеобразования подразумевает взаимодействие и взаимовлияние химических, гидродинамических и тепловых процессов между собой [39], но существующие экспериментальные исследования и математические модели загрязнения не устанавливают связи между показателями надежности теплообменного аппарата и показателями надежности оборудования.

Обобщив существующие подходы теоретического описания математической модели накипеобразования, Чернышевым Д.В. предложено решение двух задач, направленных на прогнозирование процесса солеотложений в каналах теплообмена пластинчатых аппаратов (прямая и обратная):

- определение толщины слоя накипи и коэффициента теплопередачи в определенный момент времени;
- прогнозирование момента времени, при котором толщина накипи достигнет определенного предельного значения.

При описании особенностей образования слоев солеотложения в каналах сложной формы пластинчатых теплообменников, Чернышевым Д.В. получены зависимости процесса формирования накипи в пластинчатых теплообменниках, которые учитывают совместное влияние периода эксплуатации оборудования, гидравлических характеристик пластин и скорости движения рабочих сред. Недостатком рассмотренной модели является, то что теоретическое описание процессов загрязнения межпластинных каналов справедливо для одинакового распределения слоев

накипи по длине пакета пластин, в то время как экспериментальные исследования самого же автора доказывают неравномерное загрязнение каналов, расположенных последовательно от входа теплоносителя в транзитный коллектор.

Заключение. Обзор моделей загрязнения на рабочих поверхностях теплообменников показал, что существующие модели загрязнения характеризуют равномерное распределение слоев накипи по длине пакета пластин, независимо от их расположения относительно входного патрубка. Данное допущение объясняется сложностью течения процессов накипобразования на рабочих поверхностях, а также использованием зависимостей, не учитывающих характер распределения потоков и потерь давления в каналах теплообмена в ходе образования слоев накипи.

Неравномерное образование наростов накипи как по каналу теплообмена, так и по длине пакета пластин подтверждается исследованиями [10, 14, 40] и характеризует сужение межпластинного канала, что может послужить причиной изменения гидравлической и тепловой устойчивости всего теплообменного аппарата, за счет перераспределения расхода теплоносителя между последующими каналами и изменения характеристики сопротивления загрязненного канала. Поэтому, существует достаточно большой разрыв между расчетными методами моделирования процессов загрязнения и реальным распределением слоев накипи в ходе работы аппарата. Пренебрежение неравномерностью распределения расходов теплоносителей в каналах теплообмена в процессе образования слоев загрязнения является значительным недостатком рассмотренных моделей.

Таким образом, математическое описание теплового и гидравлического режимов в каналах пластинчатых водонагревателей, требует уточнения и проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований. Кроме того, необходимо рассмотреть основные способы контроля, предупреждения и очистки пластинчатых теплообменников, с целью определения наиболее информативных и рациональных способов, особенности работы, которые будут учитываться в математическом описании теплового и гидравлического режимов в каналах теплообмена.

Источник финансирования. ГРАНТ ПСР по программе развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова до 2021 года.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Допшак В.Н., Асташев С.Ю. Оптимизация технических решений в теплоэнергетике // Вестник КузГТУ. 2014. №3. С. 96–99.
2. Немировский И.А. Энергоэффективность систем теплоснабжения // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2012. №8. С. 25–29.
3. Прохоренков А.М. Моделирование процессов теплообмена, протекающих в пластинчатых теплообменных аппаратах // Вестник МГТУ. 2014. №1. С. 92–101.
4. Коваленко Л.М., Глушков А.Ф. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи. М.: Энергоатомиздат, 1986. 240с.
5. Зысин Л.В., Калютюк А.А. Теплообменное оборудование. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 230 с.
6. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении. Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. 232 с.
7. Калабин С.Е. Экономический эффект от внедрения энергосберегающего оборудования: пластинчатых теплообменников, блочных индивидуальных тепловых пунктов // С.О.К. 2005. №8. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.c-o-k.ru/articles/ekonomicheskij-effekt-ot-vnedreniya-energoberegayuschego-oborudovaniya-plastinchatyh-teploobmennikov-blochnyh-individual-nyh-teplovyh-punktov> (дата обращения 03.09.2020)
8. Зеттлер Х.У. Влияние свойств поверхности и распределения потока на загрязнение поверхностей теплообмена. СПб.: Страта, 2014. 452 с.
9. Жаднов О.В. Пластинчатые теплообменники – дело тонкое // Интернет-журнал «Новости теплоснабжения». 2015. №4, [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=9670 (дата обращения 04.09.2020)
10. Kananeh A. B. Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience. Heat Exchangers // Basics Design Applications. 2012. Pp. 533–550.
11. Steinhagen R., Mueller-Steinhagen H., Maani K. Problems and costs due to heat exchanger fouling in New Zealand industries. Heat Transfer Engineering. 1993. Pp. 19–30.
12. Минко В.А., Семиненко А.С., Гунько И.В., Елистратова Ю.В. Влияние отложений на рабочих поверхностях системы отопления на показатели работы элементов системы // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. 2014. №5. С. 32–35.
13. Müller-Steinhagen H. C4 Fouling of Heat Exchanger Surfaces. In: VDI e. V. (eds) VDI Heat Atlas. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg. 2010. Pp. 79–104.
14. Чернышев Д.В. Прогнозирование накипобразования в пластинчатых водонагревателях

для повышения надежности их работы. дис. канд. техн. наук. Тула, 2002. 182 с.

15. Bott T.R. Fouling of Heat Exchangers. Elsevier Science & Technology Books, 1995. 546 p.

16. Kho T., Muller-Steinhagen H. An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchangers // Institution of Chemical Engineers. 1999. Pp. 124–130.

17. Клименюк И. В., Арапко А. А. Процесс образования отложений на теплообменных поверхностях // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. 2011. С. 144–152.

18. Трухний А.Д., Зройчиков Н.А., Ломакин Б.В., Седов И.В. Информационно-диагностическая система контроля подогревателей сетевой воды турбоустановки Т-250/300-240 // Теплоэнергетика. 1998. №1. С. 30–34.

19. Елистратова Ю.В., Глазков Р.А., Семенов А.С. Роль системы контроля эффективности пластинчатых теплообменников в области теплоэнергетики // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2020. (в печати)

20. Kern D.Q., Seaton R.E. A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling // British Chemical Engineering. 1959. Vol. 4, No. 5. Pp. 258–262.

21. Hasson D., Zaghavi J. Mechanism of Calcium Sulphate Scale Deposition on Heat Transfer Surfaces // I & EC Fundamentals. 1970. Vol. 9, No. 1. Pp. 1–10.

22. Hesselgreaves J.E. Compact heat exchangers. Selection, Design and Operation // An Imprint of Elsevier Science. 2001. 437 p.

23. Rybacki K.S. Calcium carbonate precipitation mechanisms and geochemical analysis of particulate material found within the waters of Maramec Spring // St. James, Missouri. Missouri S&T. 2010. 47 p.

24. Жданов О.В. Накипь и проблемы теплоэнергетики // Интернет-журнал «Новости теплоснабжения». 2006. №4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.nts.ru (дата обращения 04.09.2020)

25. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. К вопросу о загрязнениях поверхности теплопередачи пластинчатых теплообменников // Известия ВУЗов. Энергетика, 1984. №6. С. 101–102.

26. Kho T., Muller-Steinhagen H. An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchanger // IChemE. 1999. Vol 77. Pp. 124–130.

27. Kern D.Q., Seaton R.E. Surface Fouling: How to Calculate Limits // Chem. Eng. Prog. 1959. Vol. 55, Issue 6. Pp. 71–73.

28. Tovazhnyanski L.L., Kapustenko P.A. Intensification of Heat and Mass Transfer in Channels of Plate Condensers // Chem. Eng. Commun. 1984. Vol. 31. Pp. 351–366.

29. Li W., Kan Z., Manglik R.M., Li, G.-Q. Investigation of CaCO₃ fouling in plate heat exchangers // Heat and Mass Transfer. 2016. Pp. 1–14.

30. Bansal B. Crystallisation fouling in plate heat exchangers, PhD Diss, (Department of Chemical and Materials Engineering, University of Auckland, New Zealand). 1994.

31. Taborek J., Aoki T., Ritter R.B., Palen J.W. and Knudsen J.G. Fouling, the Major Unresolved Problem in Heat Transfer // Chem. Eng. Progress. 1972. Vol. 68. Pp. 59–67.

32. Reitzer B.J. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. 1964. No. 3. Pp. 345–348. DOI: 10.1021/i260012a013.

33. Najibi S.H. Heat Transfer and Heat Transfer during Subcooled Flow Boiling for Electrolyte Solutions, Ph.D. Thesis, University of Surrey. 1997. 271p.

34. Zhiming Xu, Zhao Yu, Zhimin Han, Jingtao Wang. Numerical simulation of calcium sulfate (CaSO₄) fouling in the plate heat exchanger // Heat and Mass Transfer. 2018. DOI: 10.1007/s00231-018-2282-x

35. Yang Qirong, Zhang Zhenglin, Yao Erren, Zhang Ning, Li Nan. Experimental Study of the Particulate Dirt Characteristics on Pipe Heat Transfer Surface // Journal of Thermal Science. 2019. Pp. 1–11.

36. Кекин П.А., Почиталкина И.А. Изучение свойств твердой фазы в процессе кристаллизации карбоната кальция // Успехи в химии и химической технологии. 2014. Т. 28. № 5. С. 111–113.

37. Сагань И.И., Разладин Ю.С. Борьба с накипеобразованием в теплообменниках. К.: Техника, 1986. С. 134.

38. Дахин О.Х. Исследование кинетики образования отложений осадка на стенках теплообменной аппаратуры // Химия и химическая технология. Волгоград. 1978. С. 237–286.

39. Чернышев Д.В., Купленов Н.И. Особенности распределения накипи по поверхности пластинчатого водонагревателя // Энергосбережение. 2000 Международная научно-техническая конференция. ТулГУ. 2000. 127 с.

40. Kho T. Effect of flow distribution on scale formation in plate and frame heat exchangers. Chem Eng Res Des. 1997. Pp. 635–640.

Информация об авторах

Елистратова Юлия Васильевна, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: yulis3790@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Семенов Артём Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: seminenko.as@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Минко Всеволод Афанасьевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: va.minko@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 03.09.2020 г.

© Елистратова Ю.В., Семенов А.С., Минко В.А., 2020

**Elistratova J.V., Seminenko S.A., Minko V.A.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: yulis3790@mail.ru*

RELEVANCE OF CONTAMINATION MODELS FOR DIAGNOSTICS OF PLATE HEAT EXCHANGERS

Abstract. *The article analyzes various theoretical approaches to describing the processes of formation of scale layers on the working surfaces of heat exchangers. The main tasks include analyzing existing models of contamination of heat exchange channels, determining the main mechanism of salt deposition on the heating surface of plate heat exchangers of heat supply systems, determining the main factors that determine the intensity of salt deposition on the working plate in accordance with the dynamics of heat and hydraulic processes in heat exchange channels formed by corrugated plates, as well as forming trends for further research. The article presents the main results of research devoted to the study of contamination processes on heating surfaces. Inaccuracies in the proposed approaches to describing the nature of the formation of salt deposition layers are identified. By generalizing existing approaches to the mathematical description of pollution processes, the main assumptions are revealed when describing the processes of salt deposition on working plates. A hypothesis is proposed about the influence of the location of channels relative to the inlet pipe on the uniformity of the flow distribution between parallel channels in the device. There is a fairly large gap between the existing computational methods for modeling pollution processes and the actual distribution of scale layers during the operation of heat exchange equipment of heat supply systems.*

Keywords: *heat consumption, energy intensity, energy efficiency, plate heat exchangers, pollution model, heat exchange intensity, additional resistance layers, heating surface, scale formation, heat exchange channels, flow distribution, crystallization mechanism of pollution, scale formation factors.*

REFERENCES

1. Dopshak V.N., Astashev S.Yu., Byakov A.G. Optimization of technical solutions in heat power engineering [Optimizaciya tekhnicheskikh reshenij v teloenergetike]. Bulletin of KuzSTU. 2014. No3. Pp. 96–99. (rus)
2. Nemirovskiy I.A. Energy Efficiency of heat supply systems [Energoeffektivnost' sistem teplosnabzheniya]. Energy saving. Energy. Energy audit. 2012. No.8. Pp. 25–29. (rus)
3. Prokhorenkov A.M. Modeling of heat transfer processes occurring in plate heat exchangers. [Modelirovanie processov teploobmena, protekayushchih v plastinchatyh teploobmennyyh apparatah]. MSTU Bulletin. 2014. No. 1. Pp. 92–101. (rus)
4. Kovalenko L.M., Glushkov A.F. heat Exchangers with heat transfer intensification. [Teploobmenniki s intensivatsiej teplootdachi] Moscow: Energoatomizdat, 1986. 240 p. (rus)
5. Zysin L.V., Kalyutik A.A. Heat Exchange equipment. [Teploobmennoe oborudovanie]. SPb.: Publishing house of Polytechnical Institute, 2010. 230 p. (rus)
6. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Khavin G.L., Arsenyeva O.P. Plate heat exchangers in heat supply. [Plastinchatye teploobmenniki v teplosnabzhenii]. Kharkiv: NTU "KHPI", 2004. 232 p. (rus)
7. Kalabin S.E. Economic effect from the introduction of energy-saving equipment: plate heat exchangers, block individual heat points. [Ekonomich-

eskij effekt ot vnedryaemogo energosberegayushchego oborudovaniya: plastinchatyh teploobmennikov, blochnyh individual'nyh teplovyh punktov]. Journal "S. O.K." 2005. No. 8. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/ekonomicheskij-effekt-ot-vnedreniya-energoberegayushchego-oborudovaniya-plastinchatyh-teploobmennikov-blochnyh-individual'nyh-teplovyh-punktov> (date of treatment: 04.09.2020) (rus)

8. Zettler H.U. Influence of surface properties and flow distribution on contamination of heat exchange surfaces [Vliyanie svoystv poverhnosti i raspredeleniya potoka na zagryaznenie poverhnostej teploobmena]. St. Petersburg: Strata, 2014. 452 p. (rus)

9. Zhadnov O.V. Plate heat exchangers—a delicate matter [Plastinchatye teploobmenniki-delo tonkoe]. Heat supply news. 2005. No. 3. URL: http://elibrary.ru/title_about.asp?id=9670 (date of treatment: 04.09.2020) (rus)

10. Kananeh A.B. Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience. Heat Exchangers. Basics Design Applications. 2012. Pp. 533–550.

11. Steinhagen R., Mueller-Steinhagen H., Maani K. Problems and costs due to heat exchanger fouling in New Zealand industries. Heat Transfer Engineering. 1993. Pp. 19–30.

12. Minko V. A., Seminenko A. S., Gunko I. V., Elistratova Yu. V. Influence of deposits on the working surfaces of the heating system on the performance of system elements [Vliyanie otlozhenij na rabochih poverhnostyah sistemy otopleniya na pokazateli raboty elementov sistemy]. Vestnik BSTU named after V.G. Shukhov. 2014. No. 5. Pp. 32–35. (rus)

13. Müller-Steinhagen H. C4 Fouling of Heat Exchanger Surfaces. In: VDI e. V. (eds) VDI Heat Atlas. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg. 2010. Pp. 79–104.

14. Chernyshev D.V. Predicting scale formation in plate water heaters to improve the reliability of their operation [Prognozirovanie nakipeobrazovaniya v plastinchatyh vodonagrevatelyah dlya povysheniya nadezhnosti ih sistemy]. Cand. tech. nauk-Tula, 2002. 182 p. (rus)

15. Bott T.R. Fouling of Heat Exchangers. Elsevier Science & Technology Books, 1995. 546 p.

16. Kho T., Muller-Steinhagen H. An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchangers. Institution of Chemical Engineers. 1999. Pp. 124–130.

17. Klimenyuk I.V., Arapko A.A. The process of formation of deposits on heat exchange surfaces [Process obrazovaniya otlozhenij na teploobmennyh

poverhnostyah]. Bulletin of the far Eastern state technical University. 2011 Pp. 144–152. (rus)

18. Trukhny A.D., Zroychikov N. A., Lomakin B.V., Sedov I.V. Information and diagnostic system for monitoring network water heaters of the turbine unit-250/300-240 [Informacionno-diagnosticheskaya sistema kontrolya podogrevatelej setevoy vody turboustanovki T-250/300-240]. Teploenergetika. 1998. No. 1. Pp. 30–34. (rus)

19. Elistratova Yu.V., Glazkov R.A., Seminenko A.S. The Role of the system for monitoring the efficiency of plate heat exchangers in the field of heat power engineering [Rol' sistemy kontrolya effektivnosti plastinchatyh teploobmennikov v oblasti teploenergetiki]. In the collection: International scientific and technical conference of young scientists of BSTU named after V.G. Shukhov Belgorod state technological University named after V. G. Shukhov. 2020. (in print). (rus)

20. Kern D.Q., Seaton R.E. A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling: British Chemical Engineering. 1959. Vol. 4, No. 5. Pp. 258–262.

21. Hasson D., Zaghavi J. Mechanism of Calcium Sulphate Scale Deposition on Heat Transfer Surfaces. I & EC Fundamentals. 1970. Vol. 9, No. 1. Pp. 1–10.

22. Hesselgreaves J.E. Compact heat exchangers. Selection, Design and Operation. An Imprint of Elsevier Science. 2001. 437 p.

23. Rybacki K.S. Calcium carbonate precipitation mechanisms and geochemical analysis of particulate material found within the waters of Maramec Spring, St. James, Missouri. Missouri S&T. 2010. 47 p.

24. Zhdanov O.V. Scale and problems of heat power engineering [Nakip' i problemy teploenergetiki]. Heat supply news. 2006. No. 4. URL: www.nts.ru (date of treatment: 05.09.2020) (rus)

25. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A. On the issue of contamination of the heat transfer surface of plate heat exchangers [K voprosu o zagryazneniyah poverhnosti teploperedachi plastinchatyh teploobmennikov]. Izvestiya Vuzov. Energetika, 1984. No. 6. Pp. 101–102. (rus)

26. Kho T., Muller-Steinhagen H. An experimental and numerical investigation of heat transfer fouling and fluid flow in flat plate heat exchanger. IChemE. March 1999. Vol 77, Pp. 124–130.

27. Kern D.Q. Surface Fouling: How to Calculate Limits. Kern D.Q., Seaton R.E. Chem. Eng. Prog. 1959. Vol. 55, Issue 6. Pp. 71–73.

28. Tovazhnyanski L.L., Kapustenko P.A. Intensification of Heat and Mass Transfer in Channels of Plate Condensers. Chem. Eng. Commun. 1984. Vol. 31. Pp. 351–366.

29. Li Wei, Zhou Kan, Manglik Raj, Li G.-Q. Investigation of CaCO₃ fouling in plate heat exchangers. *Heat and Mass Transfer*. 2016. Pp. 1–14.
30. Bansal B. Crystallisation fouling in plate heat exchangers, PhD Diss, (Department of Chemical and Materials Engineering, University of Auckland, New Zealand). 1994.
31. Taborek J., Aoki T., Ritter R.B., Palen J.W., Knudsen J.G. Fouling, the Major Unresolved Problem in Heat Transfer. *Chem. Eng. Progress*. 1972. Vol. 68. Pp. 59–67.
32. Reitzer B.J. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1964. No. 3. Pp. 345–348. DOI: 10.1021/i260012a013.
33. Najibi S.H. Heat Transfer and Heat Transfer during Subcooled Flow Boiling for Electrolyte Solutions, Ph.D. Thesis, University of Surrey. 1997. 271 p.
34. Xu Zhiming, Zhao Yu, Han Zhimin, Wang Jingtao. Numerical simulation of calcium sulfate (CaSO₄) fouling in the plate heat exchanger. *Heat and Mass Transfer*. DOI: 10.1007/s00231-018-2282-x
35. Yang Qirong, Zhang Zhenglin, Yao Erren, Zhang Ning, Li Nan. Experimental Study of the Particulate Dirt Characteristics on Pipe Heat Transfer Surface. *Journal of Thermal Science*. 2019. No. Pp. 28.
36. Kekin P.A. Crystallization of calcium carbonate in technological water systems [Izucheniye svoystv tverdoj fazy v processe kristallizacii karbonata kal'ciya]. 05.17.01-Dissertation for the degree of candidate of technical Sciences. Moscow. 2017. (rus)
37. Sagan I.I., Razladin Yu.S. fight against scale formation in heat exchangers [Bor'ba s nakipeobrazovaniem v teploobmennikah]. K.: Technika. 1986. 134 p. (rus)
38. Dakhin O.H. Investigation of the formation of deposits on the walls of heat exchange equipment and their influence on changes in hydrodynamic and thermal parameters of heat exchangers [Issledovanie kinetiki obrazovaniya otlozhenij osadka na stenkah teploobmennoj apparatury]. Cand. tech. science. Volgograd. 1971. 168 p. (rus)
39. Chernyshev D.V., Kuplenov N.I. Features of scale distribution on the surface of a plate water heater [Osobennosti raspredeleniya nakipi po poverhnosti plastinchatogo vodonagrevatelya]. Energy saving 2000 international scientific and technical conference: Tulu. Tula, 2000. Pp. 127 (rus)
40. Kho T. Effect of flow distribution on scale formation in plate and frame heat exchangers. *Chem Eng Res Des*. 1997. Pp. 635–640.

Information about the authors

Elistratova, Yulia V. Postgraduate student. E-mail: yulis3790@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Semenenko, Artem S. PhD. E-mail: seminenko.as@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Minko, Vsevolod A. DSc, Professor. E-mail: va.minko@gmail.com. Belgorod state technological University named after V.G. Shukhov. 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russia.

Received 03.09.2020

Для цитирования:

Елистратова Ю.В., Семенов А.С., Минко В.А. Актуальность моделей загрязнения для диагностики состояния пластинчатых теплообменников // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 10. С. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40

For citation:

Elistratova J.V., Semenenko S.A., Minko V.A. Relevance of contamination models for diagnostics of plate heat exchangers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 10. Pp. 33–40. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40