

Влияние отложений на теплогидравлику пластинчатого теплообменника с модифицированной поверхностью

Рецензия эксперта на статью получена
28.07.2026 [The expert review of the article
was received on July 28, 2026]

Пластинчатые теплообменники в настоящее время являются одним из основных видов теплообменного оборудования, применяемого в центральных и индивидуальных тепловых пунктах, что обусловлено их высокой интенсивностью теплообмена и компактностью [1]. По сравнению с кожухотрубными аппаратами они обеспечивают более высокий коэффициент теплопередачи при меньших габаритах, а разборная конструкция позволяет изменять мощность аппарата и выполнять очистку с частичной разборкой оборудования [1].

В то же время пластинчатые теплообменники отличаются высокой чувствительностью к качеству теплоносителя и образованию отложений на теплообменной поверхности [2]. Для систем теплоснабжения эта проблема имеет принципиальное значение, поскольку образование термобарьерных отложений приводит к снижению тепловой эффективности оборудования, росту гидравлического сопротивления и увеличению эксплуатационных затрат [2–3]. В работах В. А. Рыженкова, М. В. Лукина показано, что накапливающиеся в процессе эксплуатации отложения являются одной из ключевых причин ухудшения термодинамических и гидравлических характеристик теплоэнергетического оборудования систем теплоснабжения [3–4].

Образующиеся в процессе эксплуатации отложения обладают низкой теплопроводностью и, как следствие, создают дополнительное термическое сопротивление, снижая коэффициент теплопередачи, тепловую мощность и эффективность пластинчатого теплообменного аппарата (ТОА) [3]. Также отложения уменьшают

проходное сечение каналов, изменяют структуру течения в межпластинчатом пространстве и вызывают рост потерь давления [5]. Для пластинчатых теплообменников этот эффект особенно выражен вследствие малой ширины каналов и развитого рельефа поверхности пластин [1, 5].

Пластинчатые теплообменники высокочувствительны к качеству теплоносителя и образованию отложений на теплообменной поверхности. Для систем теплоснабжения эта проблема принципиальна, поскольку образование термобарьерных отложений приводит к снижению тепловой эффективности оборудования, росту гидравлического сопротивления и увеличению эксплуатационных затрат

Состав и интенсивность образования отложений определяются качеством воды, температурным режимом, скоростью теплоносителя и материалом поверхности [3, 6]. По данным исследования [6], даже в сравнительно низкотемпературных системах горячего водоснабжения образование отложений приводит к увеличению термического и гидравлического сопротивлений, причём свойства поверхности и материал оборудования оказывают существенное влияние на скорость накопления загрязнений. Аналогичные выводы о влиянии загрязнений на работу пластинчатых теплообменников приведены и в зарубежных исследованиях [7].

УДК 697.328. Научная специальность: 2.4.5.

Результаты экспериментальных исследований влияния отложений на теплогидравлические характеристики пластинчатого теплообменника с модифицированными поверхностями

Дарья Александровна Абрамова, аспирант, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **Артём Вячеславович Рыженков**, д.т.н., доцент, профессор кафедры теоретических основ теплотехники им. М. П. Вукаловича (ТОТ), НИУ «МЭИ»; **Марат Равилович Дасаев**, к.т.н., доцент, кафедра ТОТ, НИУ «МЭИ»; **Евгений Андреевич Ушак**, аспирант, НИУ «МЭИ»

В работе экспериментально исследовано влияние образования отложений на теплогидравлические характеристики пластинчатого теплообменника с необработанной поверхностью и с покрытием на основе ПАВ. Установлено, что покрытие на основе октадециламина повышает гидрофобность пластин, изменяет структуру и адгезионные свойства отложений, замедляет рост гидравлического сопротивления и ухудшение теплопередачи. Показана перспективность применения покрытия для повышения надёжности и эффективности теплообменников в системах централизованного теплоснабжения.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменник, тепловые сети, отложения, теплопередача, гидравлическое сопротивление, перепад давления, октадециламин, защитное покрытие, теплогидравлические характеристики.

UDC 697.328. Scientific specialty number: 2.4.5.

Results of experimental studies on the influence of fouling on the thermohydraulic performance of a plate heat exchanger with modified surfaces

Darya A. Abramova, postgraduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Artem V. Ryzhenkov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical Foundations of Thermal Engineering named after M.P. Vukalovich (TFTE), NRU "MPEI"; **Marat R. Dasaev**, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of TFTE, NRU "MPEI"; **Evgeny A. Ushak**, postgraduate student, NRU "MPEI"

The paper presents experimental investigation of fouling effects on the thermohydraulic performance of a plate heat exchanger with untreated surfaces and surfaces coated with a surfactant-based treatment. It was found that an octadecylamine-based coating increases plate hydrophobicity, alters the structure and adhesion properties of deposits, and slows the rise of hydraulic resistance and degradation of heat transfer. The coating is shown to be a promising means to improve reliability and efficiency of heat exchangers in centralized heat supply systems.

Key words: plate heat exchanger, district heating, fouling, heat transfer, hydraulic resistance, pressure drop, octadecylamine, protective coating, thermohydraulic performance.

Традиционные методы борьбы с отложениями, включая водоподготовку, химическую и механическую очистку, фильтрацию и различные варианты стабилизационной обработки воды, позволяют лишь частично ограничить развитие загрязнений и, как правило, требуют дополнительных затрат, остановки оборудования или сложного эксплуатационного сопровождения [3, 8]. В связи с этим актуальным является поиск методов, позволяющих снижать интенсивность образования отложений непосредственно на поверхности теплообмена.

Одним из таких перспективных методов является модификация теплообменной поверхности поверхностно-активными веществами [4, 9–10]. В исследованиях, выполненных в НИУ «МЭИ», показано, что формирование молекулярных слоёв ПАВ на металлической поверхности способно снизить скорость накопления термобарьерных отложений, а также обеспечить дополнительный антикоррозионный эффект [4, 9].

Одним из факторов, определяющих склонность поверхности к загрязнению, является её смачиваемость. При модификации металла ПАВ формируется гидрофобный адсорбционный слой, что проявляется в увеличении краевого угла смачивания, снижении удержания жидкой фазы и растворённых солей на поверхности, уменьшении адгезии зарождающихся отложений и ограничении контакта агрессивных компонентов среды с металлом. Таким образом, гидрофобизация поверхности может рассматриваться как один из механизмов одновременного снижения отложений и повышения коррозионной стойкости металла. Практический опыт применения подобных технологий в системах теплоснабжения города Москвы также показал их перспективность для восстановления и стабилизации теплогидравлических характеристик теплообменного оборудования [10].

Однако, несмотря на наличие положительных результатов для трубных поверхностей и кожухотрубных аппаратов, вопрос применения таких покрытий в пластинчатых теплообменниках исследован недостаточно [4, 6]. Из-за особенностей гидродинамики в узких щелевых каналах пластинчатого аппарата перенос ранее полученных результатов на такие условия требует отдельной экспериментальной проверки.

В связи с изложенным целью настоящей работы являлось экспериментальное изучение изменения теплогидравлических характеристик пластинчатого теплообменника с модифицированными

поверхностями пластин при образовании отложений. Модификация проводилась путём нанесения покрытия на основе октадециламина (ОДА). В ходе исследования анализировались изменения тепловой мощности, перепада давления и массы отложений на пластинах в процессе формирования загрязняющего слоя. Выбор октадециламина в качестве ПАВ обусловлен его широким практическим применением и достаточно высокой степенью изученности, что делает его удобным веществом для формирования защитного слоя на металлической поверхности.

Испытания проводились для двух вариантов состояния поверхности пластин теплообменника:

- пластины без обработки;
- пластины с покрытием на основе октадециламина.

Выбор октадециламина в качестве модифицирующего вещества обусловлен известными данными о его способности формировать на металлической поверхности тонкие адсорбционные плёнки, уменьшающие коррозионную активность среды и склонность поверхности к загрязнению [9].

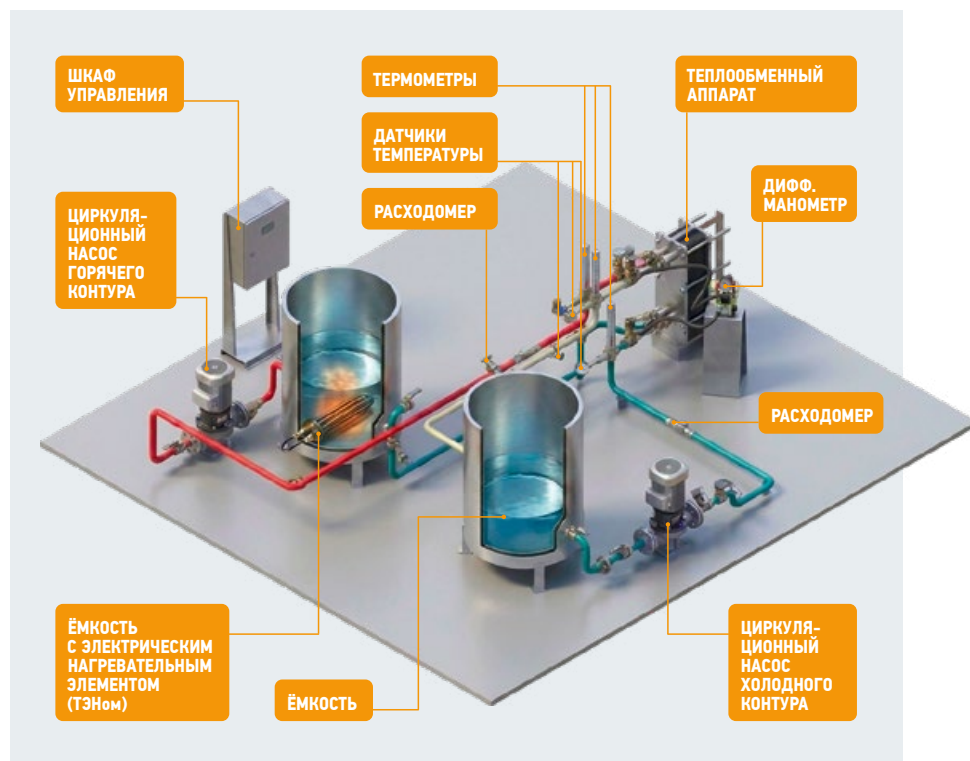


Рис. 1. 3D-модель лабораторного стенда по изучению влияния отложений на теплогидравлические характеристики пластинчатого теплообменника

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования был разработан лабораторный стенд, моделирующий работу пластинчатого теплообменника в условиях ускоренного формирования отложений. 3D-модель стенда представлена на рис. 1. При формировании программы испытаний учитывались подходы к экспериментальному моделированию процессов загрязнения теплообменных поверхностей, ранее применявшиеся в работах Национального исследовательского университета (НИУ) «МЭИ» при исследовании накопления отложений в системах теплоснабжения [4, 9].

В качестве объекта исследования использовались пластины пластинчатого теплообменника НН-04 из нержавеющей стали AISI 316.

Эксперимент проводился в одинаковых гидравлических и температурных условиях для обеих серий испытаний.

В ходе испытаний регистрировались температуры теплоносителей на входе и выходе, перепад давления на холодной стороне теплообменного аппарата, а по завершении цикла формирования отложений выполнялся гравиметрический анализ пластин.

Программа исследований включала следующие этапы:

1. Снятие исходных теплогидравлических характеристик ТОО.
2. Подбор и установление рабочих параметров эксперимента (температуры в бочках, расход и т.п.).
3. Создание минерализованной рабочей среды, имитирующей реальные свойства отложения.

:: Состав модельного раствора для формирования отложений

табл. 1

Концентрация компонентов, мг/дм ³			Ж _о , мг-экв/дм ³	pH
CaCl ₂	MgSO ₄ · 7 H ₂ O	NaHCO ₃		
680	1524	2080	20,0	7,35

4. Получение теплогидравлических характеристик по мере нарастания отложений на поверхности пластин.

5. Демонтаж и замена пластин в исходном (поставочном) состоянии.

6. Нанесение и формирование молекулярных слоёв поверхностно-активных веществ на поверхности пластин (модификация поверхности).

7. Повторное получение теплогидравлических характеристик теплообменника с обработанными пластинами при тех же параметрах и той же минерализованной среде.

8. Гравиметрический анализ для определения массы отложений.

9. Сопоставление полученных данных, анализ влияния модификации и формулировка выводов.

На первом этапе исходные необработанные пластины (в состоянии поставки) устанавливаются в стенд, после чего в широком диапазоне расходов и температур теплоносителей выполняется серия измерений перепада давления и температурных напоров.

По результатам этих измерений строились зависимости гидравлического сопротивления и коэффициента теплопередачи от режимных параметров, на основе анализа которых были выбраны оптимальные значения расходов и температур, обеспечивающие максимальную тепловую эффективность при приемлемом уровне гидравлических потерь. Данные параметры принимаются в качестве базовых для всех последующих испытаний.

На втором этапе при выбранных оптимальных режимных параметрах система выводится на стационарный режим, и для исходных пластин фиксируются перепад давления и температуры в ходе проведения эксперимента, после чего рассчитываются тепловой баланс, количество переданной теплоты и исходный коэффициент теплопередачи, а также определяется начальное гидравлическое сопротивление каналов.

Полученные значения служат контрольными точками для сравнения с результатами после обработки пластин.

На следующем этапе пластины извлекаются из стенда и подвергаются обработке эмульсией октадециламина с концентрацией 20–40 мг/дм³, после чего вновь устанавливаются в стенд. При тех же базовых расходах и температурах система выводится на стационарный режим, фиксируются перепад давления и температуры, и выполняются расчёты теплового баланса, теплового потока и коэффициента теплопередачи для образцов с нанесённым ПАВ-покрытием.

Стоит отметить, что испытания проводятся циклично, пока снижение коэффициента теплопередачи, обусловленное формированием отложений, не превышает погрешности измерений в несколько раз. Критерием останова серии принято превышение потерь тепловой эффективности над погрешностью на 5%, что позволяет исключить влияние случайных погрешностей измерений и обеспечить достоверность получаемых результатов.

На заключительном этапе испытаний проводится сопоставление тепловых потоков, коэффициентов теплопередачи и гидравлических сопротивлений для двух типов образцов при идентичных базовых режимных параметрах. Формулируется вывод о влиянии ПАВ-покрытий на тепловые и гидродинамические характеристики пластинчатого теплообменника и об их эффективности по предотвращению формирования отложений. ПАВ-покрытия на основе октадециламина должны были показать высокую эффективность в снижении коррозии и уменьшении образования отложений

После завершения всех циклов испытаний пластины извлекаются из стенда, высушиваются и подвергаются взвешиванию. Поскольку продолжительность каждого цикла фиксируется, то увеличение массы пластин относительно исходного состояния позволяет рассчитать среднюю скорость формирования отложений на поверхности за единицу времени. Сопоставление этих величин для исходных пластин и образцов с нанесённым ПАВ позволяет оценить эффективности таких покрытий. Дополнительно оцениваются стабильность покрытий по сохранению угла смачиваемости поверхности при многократных циклах и термическая стойкость, подтверждаемая сохранением защитных свойств при рабочих температурах 80–90 °С.

На заключительном этапе проводится сопоставление тепловых потоков, коэффициентов теплопередачи и гидравлических сопротивлений для двух типов об-

разцов при идентичных базовых режимных параметрах. На основе этого сравнения формулируется вывод о влиянии ПАВ-покрытий на тепловые и гидродинамические характеристики пластинчатого теплообменника и об их эффективности по предотвращению формирования отложений. Ожидается, что ПАВ-покрытия на основе октадециламина должны показать высокую эффективность в снижении коррозии и уменьшении образования отложений благодаря изменению смачиваемости и свободной поверхностной энергии пластин.

Для формирования отложений был использован модельный раствор, соответствующий по качеству водам артезианских источников с повышенной жёсткостью и щёлочностью, что позволило сократить время исследований.

В табл. 1 приведён состав данного модельного раствора.

Выбор именно этих солей вызван тем, что они моделируют типичные неорганические отложения в теплообменниках.

NaHCO₃ при нагреве и изменении кислотно-щелочного равновесия способствует образованию карбонат-ионов, участвующих в последующем осаждении карбонатных соединений.

CaCl₂ служит источником ионов кальция Ca²⁺, необходимых для образования карбонатных отложений, прежде всего карбоната кальция (CaCO₃), который составляет основную массу накипи и формирует плотные слои, снижающие интенсивность теплообмена и увеличивающие гидравлическое сопротивление.

MgSO₄ · 7 H₂O вводилась для учёта влияния ионов магния на структуру осадка, ионы Mg²⁺ формируют более пористые или смешанные фазы, изменяя адгезию и механические свойства отложений [20].

Относительную погрешность тепловой мощности определяли с учётом погрешности измерения расхода и температурного напора:

$$\delta_Q = \frac{\Delta Q}{Q} = \sqrt{\frac{\Delta G^2}{G^2} + \frac{\Delta t^2}{t^2}} = \sqrt{\delta_G^2 + \delta_{\Delta t}^2}, \quad (1)$$

где δ_G и ΔG — относительная и абсолютная погрешности измерения расхода; $\delta_{\Delta t}$ и Δt — относительная и абсолютная погрешности измерения температурного напора, соответственно.

Относительная погрешность расчёта тепловой мощности составила 12 %.

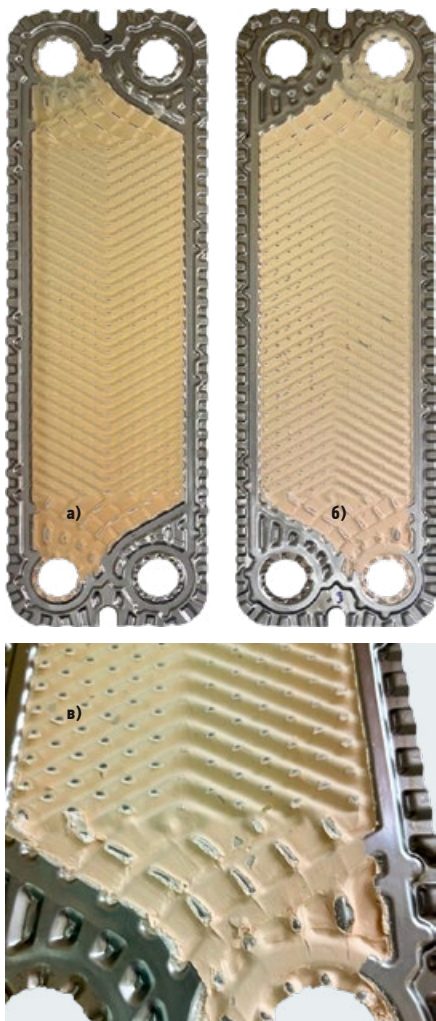


Рис. 2. Внешний вид пластин (без модификации (а) и с ПАВ (б) со сформированными отложениями и морфология отложений на пластине с ПАВ при большем увеличении (в)

Результаты измерений

Для изучения влияния гидрофобности поверхности на скорость формирования отложений были измерены краевые углы смачивания. Смачиваемость поверхности для образцов определяли с использованием оптического тензометра OCA 20 (производитель — компания Data Physics Instruments GmbH). Для получения наиболее точных значений угла контакта с водой измерения проводились трижды в разных точках модифицированной поверхности каждой пластины. Затем был определён средний угол, и значение этого угла было внесено в сводную табл. 2. Также до и после формирования отложе-

Значение угла смачиваемости на поверхности пластин и массы сформировавшихся отложений в ходе исследования

Тип пластин	Без ПАВ	с ПАВ
Угол до модификации и испытаний, град.	82	82
Угол после модификации, град.	—	113
Угол после испытаний, град.	—	81
Масса сформировавшихся отложений, г	6,4	8,8

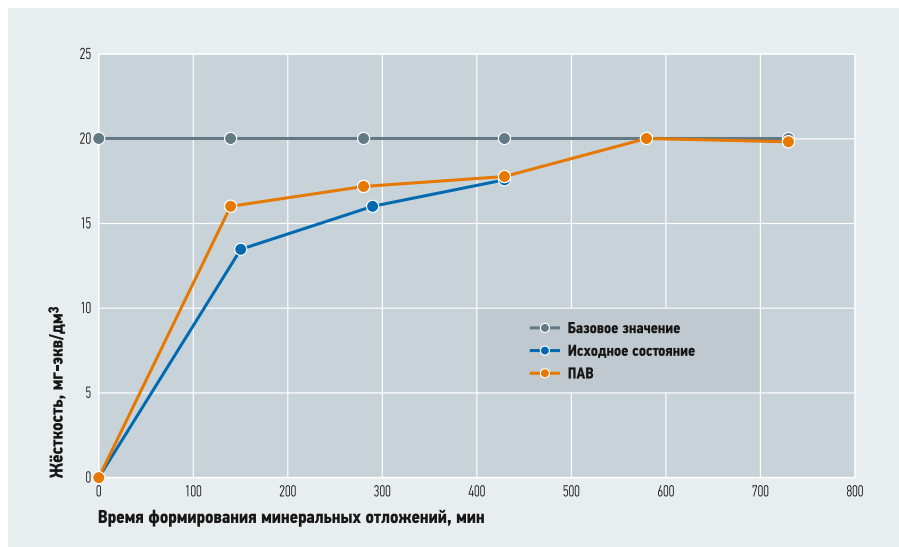


Рис. 3. Зависимость жёсткости в системе от времени формирования отложений

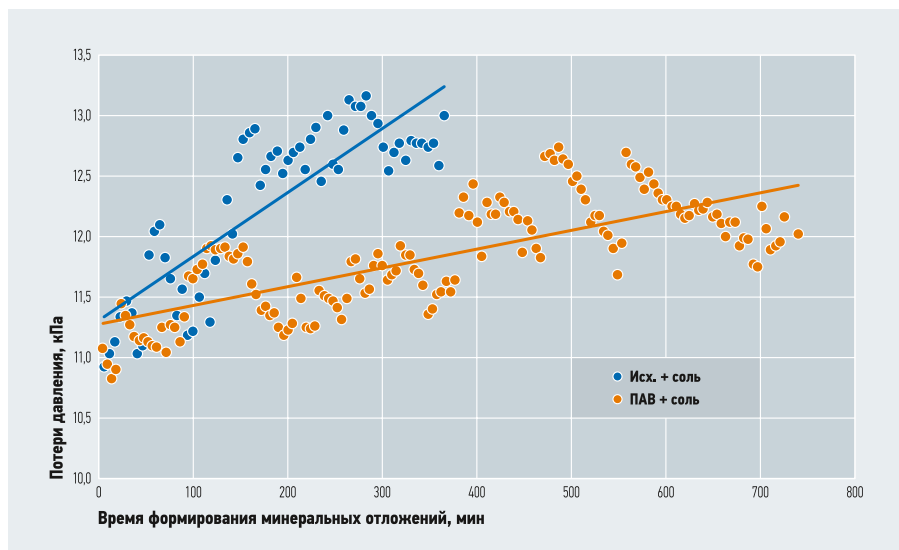


Рис. 4. Зависимость перепада давления в системе от времени формирования отложений

ний измеряли массу пластин, по разности этих значений определяли массу сформировавшихся отложений, которую также включали в сводную табл. 2.

По результатам исследования установлено, что на пластинах без модификации образовалось меньшее количество отложений. Вместе с тем внешний вид отложений различался, а именно — отложения имеют разный цвет, а также на пластинах с модифицированной поверхностью отложения удерживались менее прочно и легче отделялись от металла.

На рис. 2 наблюдаются фрагменты отколовшихся отложений, что может свидетельствовать об их частичном смывании

в процессе испытаний. Данный вывод согласуется с результатами измерения жёсткости, выполнявшегося после каждого цикла для подтверждения осаждения солевых компонентов. Исходная жёсткость для каждого цикла контролировалась и поддерживалась на уровне 20 мг-экв/дм³. Зависимость жёсткости раствора в бочке от времени формирования отложений для каждого опыта представлена на рис. 3.

Анализ зависимости показывает, что для экспериментов с пластинами без модификации уже после двух часов испытаний общая жёсткость снизилась на 6,5 мг-экв/дм³, что указывает на формирование слоёв отложений на их поверхностях. Для экспериментов на пластинах с обработанными ПАВ поверхностями за это же время изменение жёсткости в системе составило 4 мг-экв/дм³, а к 9,5 часу испытаний изменение практически отсутствует. Это указывает на то, что заметного накопления солей в системе не происходит. В ходе исследования фиксировался перепад давления в ТОА — результаты измерений представлены на рис. 4.

табл. 2

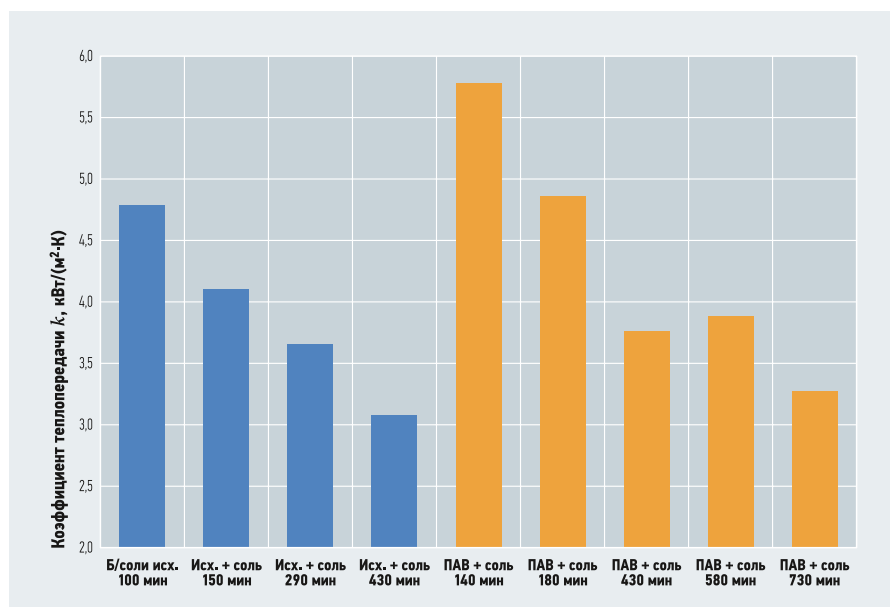


Рис. 5. Изменение среднего значения коэффициента теплопередачи в ходе исследования для двух опытов: на исходных пластинах и на пластинах с модификацией ПАВ

Можно видеть, что модифицированные образцы с ПАВ характеризуются меньшим углом наклона аппроксимирующих линейных трендов. Данная тенденция свидетельствует о том, что нанесённое покрытие эффективно снижает темпы накопления отложений, что, в свою очередь, приводит к улучшению гидравлических характеристик системы по сравнению с немодифицированными образцами.

Для оценки снижения эффективности теплообмена были рассчитаны средние значения коэффициентов теплопередачи. После модификации пластин коэффициент теплопередачи увеличился из-за изменения состояния поверхности пластин. После модификации пластин посредством ПАВ смачиваемость поверхности уменьшилась, образовался гидрофобный слой, снижающий адгезию отложений и влияющий на теплообмен.

Изменение среднего значения коэффициента теплопередачи в ходе формирования отложений для каждого опыта представлено на рис. 5.

Анализируя изменение среднего значения коэффициента теплопередачи в ходе исследования на рис. 5, можно сделать вывод, что для ТОА с пластинами без ПАВ коэффициент теплопередачи постепенно ухудшается в ходе формирования отложений до значения 3074,9 Вт/(м²·К) уже за 430 минут. Для пластин с модификацией после 430 минут формирования отложений значение коэффициента теплопередачи составило 3758,3 Вт/(м²·К). Можно сделать вывод, что модификация ПАВ способствует снижению темпа падения коэффициента теплопередачи в процессе загрязнения пластинчатых теплообменных аппаратов и обеспечивает более длительное сохранение высокой интенсивности теплообмена в них.

Также можно видеть, что на пластинах с поверхностно-активным веществом наблюдается скачок значения коэффициента теплопередачи. Это может быть связано с тем, что в системе реализуется колебательный процесс, обусловленный чередующимися фазами сорбции и десорбции отложений на поверхностях пластин.

Выводы

1. Установлено, что обработка пластин теплообменника ПАВ приводит к заметному изменению смачиваемости поверхности: краевой угол увеличивается с 82° до 113°, что подтверждает формирование гидрофобного слоя на поверхности металла пластины.
2. В процессе формирования отложений в модельной среде гидрофобные свойства модифицированной поверхности пластины теплообменника снижаются.
3. По данным гравиметрического анализа масса отложений на пластинах с ПАВ оказалась выше, чем на немодифицированных пластинах (8,8 против 6,4 г). Однако визуальные наблюдения и динамика жёсткости раствора показали, что эти отложения обладают меньшей прочностью сцепления с поверхностью, легче растрескиваются и частично смываются в поток.
4. Контроль общей жёсткости раствора показал, что в системе с модифицированными пластинами осаждение солей на начальном этапе происходит менее интенсивно, а на последующих стадиях прекращается. Это свидетельствует об изменении механизма взаимодействия отложений с гидрофобизированной поверхностью пластин.
5. Нанесение покрытия на основе ПАВ положительно влияет на гидравлические характеристики пластинчатого теплообменника в условиях образования отложе-

ний, рост перепада давления в ходе исследования происходит медленнее, чем для немодифицированных пластин.

6. Установлено, что модификация пластин теплообменного аппарата посредством ПАВ способствует замедлению деградации теплообменных характеристик в условиях формирования отложений и обеспечивает более длительное сохранение высокой эффективности работы аппарата по сравнению с немодифицированными пластинами. Анализ изменения среднего значения коэффициента теплопередачи (рис. 5) показал, что для пластинчатого теплообменного аппарата с немодифицированными пластинами коэффициент теплопередачи последовательно снижается по мере загрязнения и уже через 430 минут достигает 3074,9 Вт/(м²·К). Для пластин, обработанных ПАВ, после того же времени формирования отложений значение коэффициента теплопередачи составляет 3758,3 Вт/(м²·К).

Таким образом, применение ПАВ может рассматриваться как эффективный способ модификации пластин теплообменных аппаратов систем теплоснабжения, особенно с точки зрения замедления снижения тепловой мощности и роста гидравлического сопротивления в процессе эксплуатации. ●

1. Юркина М.Ю., Маскинская А.Ю., Хомченко Н.В. Расчёт и проектирование пластинчатых теплообменников тепловых пунктов: учебное пособие. — М.: Изд-во МЭИ, 2022. 52 с.
2. Галковский В.А., Чупова М.В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности // Научное издание, 2017. Т. 9. №2. С. 8–11.
3. Рыженков В.А., Волков А.В., Лукин М.В. Образование термобарьерных отложений на функциональных поверхностях теплообменного оборудования: методич. пособие. — М.: Изд-во МЭИ, 2009. 28 с.
4. Рыженков В.А. О повышении эффективности эксплуатации отечественных систем теплоснабжения в современных условиях // Новости теплоснабжения, 2006. №9. С. 36–42.
5. Хавин Г.Л. Тепловой и гидравлический расчёт пластинчатых теплообменников с учётом загрязнений // Проблемы машиностроения, 2012. Т. 15. №3–4. С. 61–67.
6. Li W., Zhou K., Manglik R.M., Li G.-Q., Bergles A.E. Investigation of CaCO₃ Fouling in Plate Heat Exchangers. Heat and Mass Transfer. 2016. Vol. 52. Pp. 2401–2414.
7. Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. Водоподготовка в энергетике: учебн. пособие. — М.: Изд-во МЭИ, 2003. 310 с.
8. Лукин М.В., Рыженков А.В., Калакуцкая О.В., Орлов М.П. Повышение надёжности и продление ресурса тепловых сетей на основе снижения скорости коррозии функциональных поверхностей оборудования и трубопроводов в периоды эксплуатации, простоя и ремонта // Промышленная энергетика, 2012. №6. С. 16–20.
9. Лукин М.В., Рыженков А.В. Опыт реновации систем отопления жилых и общественных зданий // Промышленная энергетика, 2014. №2. С. 18–22.
10. Аколзин П.А., Зайцева З.И., Лазарева К.И. Предупреждение кислородной и углекислотной коррозии энергетического оборудования с помощью октадециламина // Теплоэнергетика, 1958. №10. С. 54–55.

References — see page 78.

Results of experimental studies on the influence of fouling on the thermo-hydraulic performance of a plate heat exchanger with modified surfaces. Pp. 27–31.

Darya A. Abramova, postgraduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Artem V. Ryzhenkov**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical Foundations of Thermal Engineering named after M. P. Vukalovich (TFTE), NRU "MPEI"; **Marat R. Dasaev**, PhD (Engineering), Associate Professor, Department of TFTE, NRU "MPEI"; **Evgeny A. Ushak**, postgraduate student, NRU "MPEI"

1. M.Yu. Yurkina, A.Yu. Maskinskaya, N.V. Khomchenko. *Raschet i projektirovanie plastinchatykh teploobmennikov teplovykh punktov: ucheb. posobie* [Calculation and design of plate heat exchangers for heating substations: A tutorial]. Moscow. *Izd-vo MEI* [Publishing House of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. 2022. 52 p. [In Russian]
2. V.A. Galkovskij, M.V. Chupova. *Analiz snizheniya koeffitsienta teploperedachi teploobmennyykh apparatov vsledstvie zagryazneniya poverkhnosti* [Analysis of the reduction of the heat transfer coefficient of heat exchangers due to surface fouling]. *Naukovedenie* [Science Studies ("Naukovedenie" Magazine)]. 2017. Vol. 9. No. 2. Pp. 8–11. [In Russian]
3. V.A. Ryzhenkov, A.V. Volkov, M.V. Lukin. *Obrazovanie termobar'ernykh otlozhenij na funktsional'nykh poverkhnostyakh teploobmennogo oborudovaniya: metodich. posobie* [Formation of thermal barrier deposits on the functional surfaces of heat exchange equipment: A methodological guide]. Moscow. *Izd-vo MEI* [Publishing House of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. 2009. 28 p. [In Russian]
4. V.A. Ryzhenkov. *O povyshenii effektivnosti ekspluatatsii otechestvennykh sistem teplosnabzheniya v sovremennykh usloviyakh* [On improving the operating efficiency of domestic heat supply systems in modern conditions]. *Novosti teplosnabzheniya* ["Heat Supply News" Magazine]. 2006. No. 9. Pp. 36–42. [In Russian]
5. G.L. Khavin. *Teplovoy i gidravlicheskiy raschet plastinchatykh teploobmennikov s uchetyom zagryaznenij* [Thermal and hydraulic calculation of plate heat exchangers taking into account pollution]. *Problemy mashinostroeniya* ["Problems of Mechanical Engineering" Magazine]. 2012. Vol. 15. No. 3–4. [In Russian]
6. W. Li, K. Zhou, R.M. Manglik, G.-Q. Li, A.E. Bergles. Investigation of CaCO₃ Fouling in Plate Heat Exchangers. *Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 52. Pp. 2401–2414.
7. A.S. Kopylov, V.M. Lavygin, V.F. Ochkov. *Vodopodgotovka v energetike: ucheb. posobie* [Water treatment in the power industry: A study guide]. Moscow. *Izd-vo MEI* [Publishing House of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute"]. 2003. 310 p. [In Russian]
8. M.V. Lukin, A.V. Ryzhenkov, O.V. Kalakutskaya, M.P. Orlov. *Povyshenie nadezhnosti i prodlenie resursa teplovykh setej na osnove snizheniya skorosti korrozii funktsional'nykh poverkhnostej oborudovaniya i truboprovodov v periody ekspluatatsii, prostoya i remonta* [Improving the reliability and extending the service life of heating networks by reducing the corrosion rate of functional surfaces of equipment and pipelines during operation, downtime, and repair]. *Promyshlennaya energetika* ["Industrial Power Engineering" Magazine]. 2012. No. 6. Pp. 16–20. [In Russian]
9. M.V. Lukin, A.V. Ryzhenkov. *Opyt renovatsii sistem otopeniya zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Experience in renovating heating systems in residential and public buildings]. *Promyshlennaya energetika* ["Industrial Power Engineering" Magazine]. 2014. No. 2. Pp. 18–22. [In Russian]
10. P.A. Akol'zin, Z.I. Zajtseva, K.I. Lazareva. *Preduprezhdenie kislородной i uglekislотной korrozii energeticheskogo oborudovaniya s pomoshch'yu okтаdetsilamina* [Prevention of oxygen and carbon dioxide corrosion of power equipment using octadecylamine]. *Teploenergetika* ["Thermal Power Engineering" Magazine]. 1958. No. 10. Pp. 54–55. [In Russian]