

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-42-51

*\*Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Уваров В.А., Щербинина О.А*  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
*\*E-mail: tgv.info@mail.ru*

## ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ДИАГНОСТИКИ НАКИПЕОБРАЗУЮЩИХ СЛОЕВ В ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

**Аннотация.** Составляющая надежности и эффективности работы теплоэнергетической сети 3-го поколения характеризуется применением теплообменных устройств, а именно пластинчатого типа, основная функция которых заключается в нагреве теплоносителя для нужд горячего водоснабжения и систем отопления. Однако особенности химического состава теплоносителя являются причиной загрязнения теплообменников в виде накипных слоев на поверхностях нагрева. Процесс накипеобразования на пластинах теплообменных аппаратов является одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на выход из строя оборудования и увеличение показателей энергоемкости распределительных пунктов тепла, что приводит к снижению качества предоставляемых услуг и росту финансовых затрат в сфере теплоснабжения. В ходе исследования методом обобщения известных данных сформирована последовательность расчета транспортных затрат на эксплуатацию пластинчатых теплообменных аппаратов при различных условиях накипеобразования. При этом учтено влияние толщины накипи на общую стоимость перекачивания  $1 \text{ м}^3$  теплоносителя, что позволяет сопоставить транспортные затраты и стоимость удаления накипи с поверхностей нагрева (согласно принятому методу очистки) в зависимости от толщины солеобразующего слоя и периодов очистки. Результаты исследования подтверждают целесообразность регулярного контроля толщины солеобразующих слоев в пластинчатых теплообменниках для снижения эксплуатационных затрат на перекачивание теплоносителя.

**Ключевые слова:** пластинчатый теплообменник, энергоэффективность, эксплуатационные затраты, энергоемкость, контроль накипеобразования.

**Введение.** Одним из направлений развития теплоэнергетических сетей 3-го поколения является оснащение пунктов распределения тепла пластинчатыми теплообменными аппаратами, в качестве неотъемлемого структурного элемента [1–3]. Однако особенности химического состава теплоносителя (вода) в большинстве регионов как РФ, так и в зарубежных странах [4–7] являются причиной загрязнения теплообменников в виде накипных слоев на поверхностях нагрева [8, 9]. Процесс накипеобразования на пластинах теплообменных аппаратов является одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на выход из строя оборудования и увеличение показателей энергоемкости распределительных пунктов тепла [7, 10–13], что приводит к снижению качества предоставляемых услуг [10, 14].

Общая доля финансовых потерь для развитых стран в сфере промышленного производства, связанных с загрязнением, составляет от 0,25 % до 0,3 % от их общего ВВП [11–13]. При этом суммарные затраты на очистку теплообменников активизируют поиск решений по защите теплообменных устройств от воздействия процессов солеотложения и поддержания бесперебойной работы аппаратов [11, 12].

С экономической точки зрения стоимость теплообменника определяет капитальные затраты, а стоимость на техническое обслуживание

и прокачку теплоносителей обуславливает эксплуатационные затраты. Процесс формирования накипи не только снижает общий коэффициент теплопередачи теплообменного оборудования [9, 10, 15], но и создает дополнительное сопротивление движению жидкости, что в свою очередь отражается на затратах по транспортировке теплоносителя [16]. Кроме того, накопление твердого осадка в щелях между пластинами и прокладками при высокой температуре приводит к образованию трещин, а длительная эксплуатация теплообменников с накипными отложениями на поверхностях нагрева приводит к прогоранию пластин [17, 18].

Согласно исследованиям [10, 19] установлено, что создать условия для полного отсутствия процессов солеотложения, на сегодняшний день, практически невозможно, так как эффективность каждого мероприятия зависит от химического состава воды, наличия уже сформировавшихся накипных отложений и текущих параметров теплообменного аппарата [16]. Поэтому исследования, направленные на снижение энергетической ёмкости работы пластинчатых теплообменников в условиях активного воздействия накипеобразующих процессов, являются актуальными и требуют проведения дополнительных исследований и технических решений.

**Цель** – установить значимость регулярной диагностики толщины накипеобразующих слоев

в пластинчатых теплообменниках для снижения эксплуатационных затрат на перекачивание теплоносителя.

#### Задачи исследования:

- сформировать последовательность расчета транспортных затрат при эксплуатации пластинчатых теплообменных аппаратов в условиях накипеобразования;

- определить экономические затраты на перекачивание теплоносителя в зависимости от периодов очистки теплообменника.

**Методы исследования.** К расчету принят пластинчатый теплообменный аппарат, эксплуатация которого обеспечивает параметры горячего водоснабжения согласно [20]. Расходы теплоносителя по греющему и нагреваемому контуру имеют значения 5,1 кг/с и считаются постоянными в течение всего расчетного периода. Теплообменник эксплуатируется в качестве II-й ступени подогрева с начальными температурами 95 и 38 °С на входе в аппарат по «горячему» и «холодному» контуру соответственно. Схема движения теплоносителя – противоток. Общее количество пластин – 50 шт. площадью 0,15 м<sup>2</sup> каждая. 25 каналов по греющему контуру и 24 по нагреваемому (с учетом 2-х концевых пластин). Тип канала – «жесткий канал», который образуется установкой пластин типа TL [21]. При этом величина карбонатной жесткости сетевой воды 9,3 + 1,4 °Ж, а карбонатный индекс  $I_k$  не более 4 (мг-экв/дм<sup>3</sup>)<sup>2</sup>, значение водородного показателя рН=8,3.

Сравниваемые расчетные условия приведенных транспортных затрат, следующие:

- 1) чистая поверхность теплообмена;
- 2) толщина накипных отложений по нагреваемому контуру принимается для условий эксплуатации теплообменника без применения методов предупреждения и удаления солеотложений за расчетный период работы;
- 3) учитывается условие очистки пластин от образовавшейся накипи при достижении перепада давления на входе и выходе из аппарата по нагреваемой стороне  $\Delta P_n$  свыше 20 %;
- 4) применение методов борьбы с накипными

отложениями толщиной 0,3 мм (объясняется обязательным критерием для возможности использования физических методов воздействия на солеотложения).

Затраты транспортных расходов на перекачивание рабочих сред определяются стоимостью затраченной электроэнергии:

$$C_{np} = (\mathcal{E}_z + \mathcal{E}_x) \cdot c_3, \quad (1)$$

где  $c_3$  – цена за 1 кВт·ч электрической энергии согласно [22], руб./кВт·ч;  $\mathcal{E}_z$  и  $\mathcal{E}_x$  – расход электроэнергии на перекачивание греющей и нагреваемой жидкости соответственно, кВт·ч.

Расходы электроэнергии на транспортировку теплоносителей:

$$\mathcal{E}_z = \frac{\Delta P_z \cdot V_z}{\eta_z} \cdot \tau_{общ}, \quad (2)$$

$$\mathcal{E}_x = \frac{\Delta P_x \cdot V_x}{\eta_x} \cdot \tau_{общ}, \quad (3)$$

где  $\Delta P_z$  и  $\Delta P_x$  – полные потери давления в греющем и нагреваемом контурах, Па;  $V_z$  и  $V_x$  – объемные расходы теплоносителей, м<sup>3</sup>/час;  $\eta_z$  и  $\eta_x$  – КПД насосов по горячей и холодной стороне теплоносителей;  $\tau_{общ}$  – общая продолжительность работы насосного оборудования за период эксплуатации, час.

Образование накипи на теплообменных стенках, характеризуется сужением проходного канала, что является причиной увеличения потерь давления в канале.

При увеличении слоя накипи, расстояние между пластинами будет уменьшаться на величину равную толщине солеотложений, тогда формула расчета эквивалентного диаметра имеет вид:

$$d_3 = \frac{2(a \cdot (h - \delta_n))}{(a + (h - \delta_n))}, \quad (4)$$

где  $a$  – ширина канала, м;  $h$  – расстояние между пластинами, м;  $\delta_n$  – толщина накипного слоя, м (учитывая условие отложения накипи на обеих пластинах, образующих нагреваемый канал).

Тогда годовые приведенные эксплуатационные затраты  $C_{np}$  пластинчатых водонагревателей с учетом накипеобразования определяются по формуле:

$$C_{np} = c_3 \cdot \tau_{общ} \left( \frac{\Delta P_z \cdot V_z}{\eta_z} + \zeta_x \frac{L_{np} \cdot V_x}{\eta_x \cdot \left( \frac{2(a \cdot (h - \delta_n))}{(a + (h - \delta_n))} \right)^2} \frac{w_x^2}{2} \right), \quad (5)$$

где  $\zeta_x$  – условный коэффициент общего гидравлического сопротивления единицы относительно длины межпластинного канала [23];  $L_{np}$  – приведенная длина канала с гофрами, м;  $w$  – скорость движения теплоносителя м/с.

Известно, что интенсивность образования слоя накипи зависит от химического состава теплоносителя, режимных параметров работы оборудования и рассматриваемого периода времени.

Продолжительность формирования определенной толщины накипи определяется согласно зависимости [2424]:

$$\tau_{\delta_n} = -\frac{1}{k} \ln \left( 1 - \frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right), \quad (6)$$

где  $k = 1/\tau_c$  – константа скорости процесса накипеобразования, 1/с;  $\tau_c$  – время релаксации системы, с;  $\delta_n$  – ожидаемое значение толщины накипи, м;  $\delta_n^*$  – предельная толщина накипи, м.

Так как процесс накипеобразования в каналах теплообмена пластинчатых водонагревателей имеет асимптотический характер [4, 16, 24], то существуют условия, при которых толщина накипи достигает своего предельного значения.

Величина предельной толщины накипи определяется по формуле:

$$\delta_n^* = \frac{1}{\rho_n} \left( M_\infty - \frac{I_n}{k} \right), \quad (7)$$

$$C_{mp(\delta_n)} = c_3 \cdot \left( -\frac{1}{k} \right) \ln \left( 1 - \frac{\delta_n}{\delta_n^*} \right) \left( \frac{\Delta P_z \cdot V_z}{\eta_z} + \zeta_x \frac{L_{II} \cdot V_x}{\eta_x \cdot \left( \frac{2(a \cdot (h - \delta_n))}{(a + (h - \delta_n))} \right)} \frac{w_x^2}{2} \right), \quad (10)$$

На практике мероприятия по очистке пластин от солеотложений, производятся при перепаде давления на входе и выходе из аппарата по нагреваемому контуру более 20 % по показаниям манометров. Согласно нашим экспериментальным исследованиям, толщина отложений на пластинах при указанном перепаде давления составила 0,5 мм [16].

Тогда затраты на перекачивание теплоносителя по нагреваемой стороне рассчитываются за период формирования накипи до 0,5 мм для третьего расчетного условия приведенных транспортных затрат.

После достижения слоя накипи 0,5 мм предполагается очистка пластин, далее продолжается расчет транспортных затрат за новый период формирования слоя накипи 0,5 мм и так до окончания расчетного периода эксплуатации. Следовательно, количество периодов образования толщи солеотложений заданной величины определяется как отношение общего значения периода эксплуатации оборудования к значению периода формирования ожидаемого значения накипи:

$$N_{\delta_n} = \frac{\tau_{общ}}{\tau_{\delta_n}}. \quad (11)$$

При этом приведенные эксплуатационные затраты складываются из затрат на перекачивание жидкости до момента достижения ожидаемой толщины накипи за все возможные периоды

где  $M_\infty$  – максимально возможная масса образующейся накипи в заданных условиях, кг/м<sup>2</sup>;  $M$  – удельное значение массы накипи, кг/м<sup>2</sup>;  $I_n$  – удельная масса удаляемой накипи вследствие гидродинамического воздействия теплоносителя, кг/(м<sup>2</sup>·с).

$$I_n = u \frac{\tau_{cm}}{\varphi_n}, \quad (8)$$

где  $\tau_{cm}$  – касательное напряжение сдвига, Па;  $u$  – постоянная;  $\varphi_n$  – прочность накипи, Па.

$$\tau_{cm} = \frac{\Delta P_x d_3}{2l}, \quad (9)$$

где  $l$  – длина канала, м.

С учетом выше представленных зависимостей, эксплуатационные затраты на перекачивание теплоносителя в условиях образования конкретной величины накипи  $\delta_n$  за период ее формирования определяется по формуле:

формирования данной величины в течении эксплуатационного периода:

$$C_{mp} = N_{\delta_n} \cdot C_{mp(\delta_n)}. \quad (12)$$

Оценка расчетных транспортных затрат, при указанных условиях применения методов очистки поверхностей нагрева, основана на сравнении цены за перекачивание 1 м<sup>3</sup> теплоносителя с учетом принятых вариантов расчета приведенных транспортных затрат, согласно зависимости:

$$C_{mp} = \frac{C_{mp}}{(V_{\tau_{общ}})}, \quad (13)$$

где  $V_{\tau_{общ}}$  – объем перекаченного теплоносителя за 1 год эксплуатации, м<sup>3</sup>.

**Основная часть.** Сравнение приведенных затрат на перекачивание теплоносителей в условиях «чистой» поверхности теплообмена на протяжении всего периода работы и в условиях образования слоев накипи на поверхности пластин по нагреваемому контуру за время эксплуатации без применения мер очистки представлены на рис. 1. Согласно полученным данным (рис. 1), годовые затраты на эксплуатацию теплообменного оборудования при условии работы теплообменника без применения методов борьбы с солеотложениями увеличиваются на 34,4 % по отношению к условиям работы аппарата с «чистой» поверхностью нагрева.

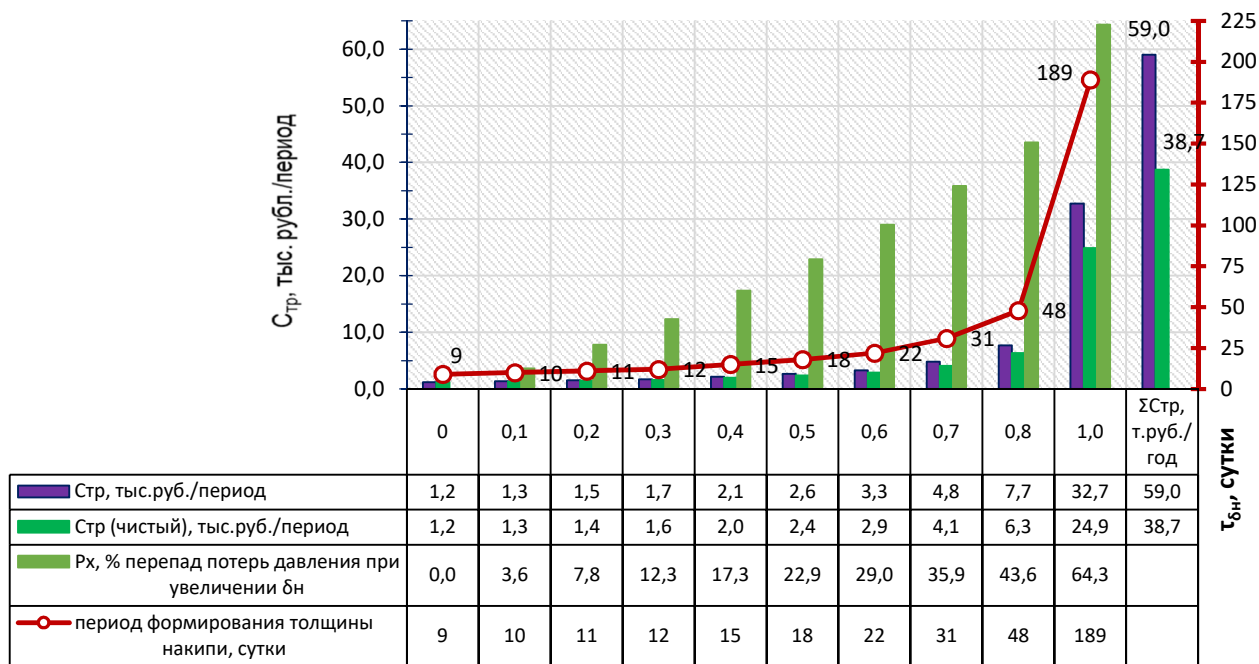


Рис. 1. Диаграмма сравнения приведенных транспортных расходов в условиях чистой поверхности теплообмена и с учетом формирования наростов накипи на протяжении всего периода работы

Примечание: значения периода формирования толщины накипи привязываются к вспомогательной оси

Приведенные эксплуатационные затраты, учитывая удаление накипных отложений при достижении перепада давления на входе и выходе из аппарата по нагреваемой стороне свыше 20 %, (рис. 2) превышают затраты работы теплообменника без загрязнения на 27 %. В то же время наблюдается снижение транспортных затрат на 7,4 % относительно варианта работы теплообменника без очистки пластин. Однако при

$\Delta P_x = 20$  % потребуется производить останов оборудования на промывку химическими реагентами или разбор для механической очистки 3 раз за расчетный период. Следовательно, затраты на обслуживание теплообменника увеличиваются на стоимость химических реагентов или на комплектующие материалы для обратной сборки аппарата.

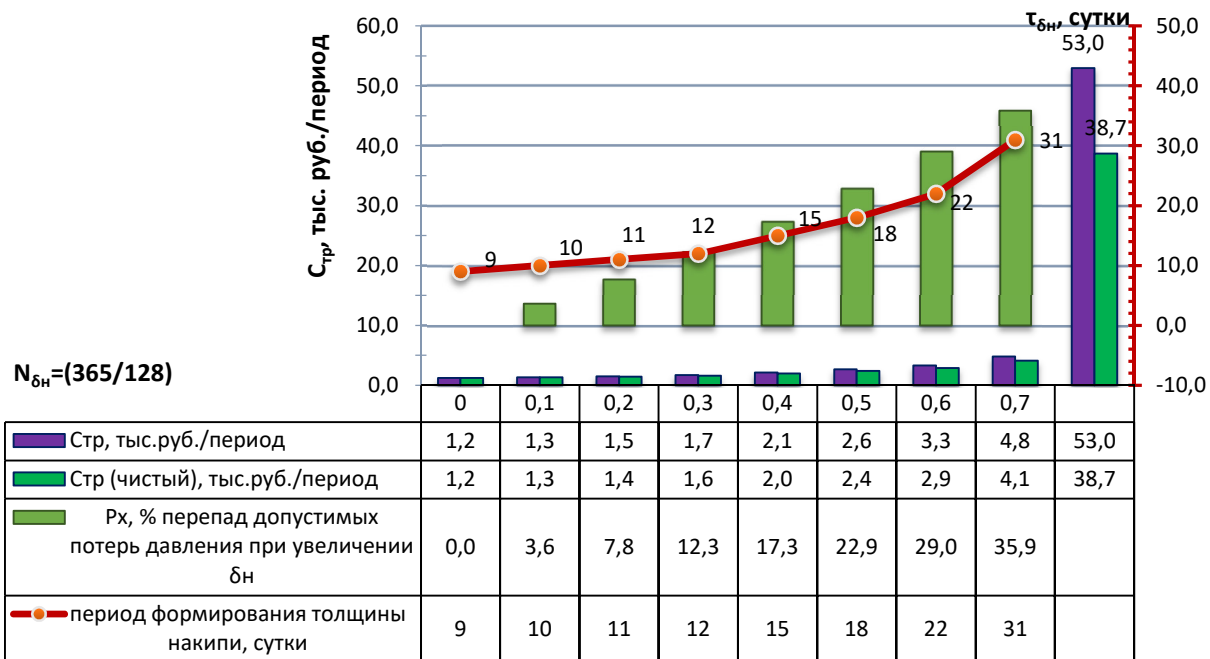


Рис. 2. Диаграмма сравнения приведенных транспортных расходов в условиях «чистой» поверхности теплообмена и с учетом формирования наростов накипи до достижения перепадов давления на входе и выходе из аппарата по нагреваемой стороне свыше 20 %

Примечание: значения периода формирования толщины накипи, сутки и  $P_x$ , % удельный перепад допустимых потерь давления при увеличении  $\delta_n$  привязываются к вспомогательной оси

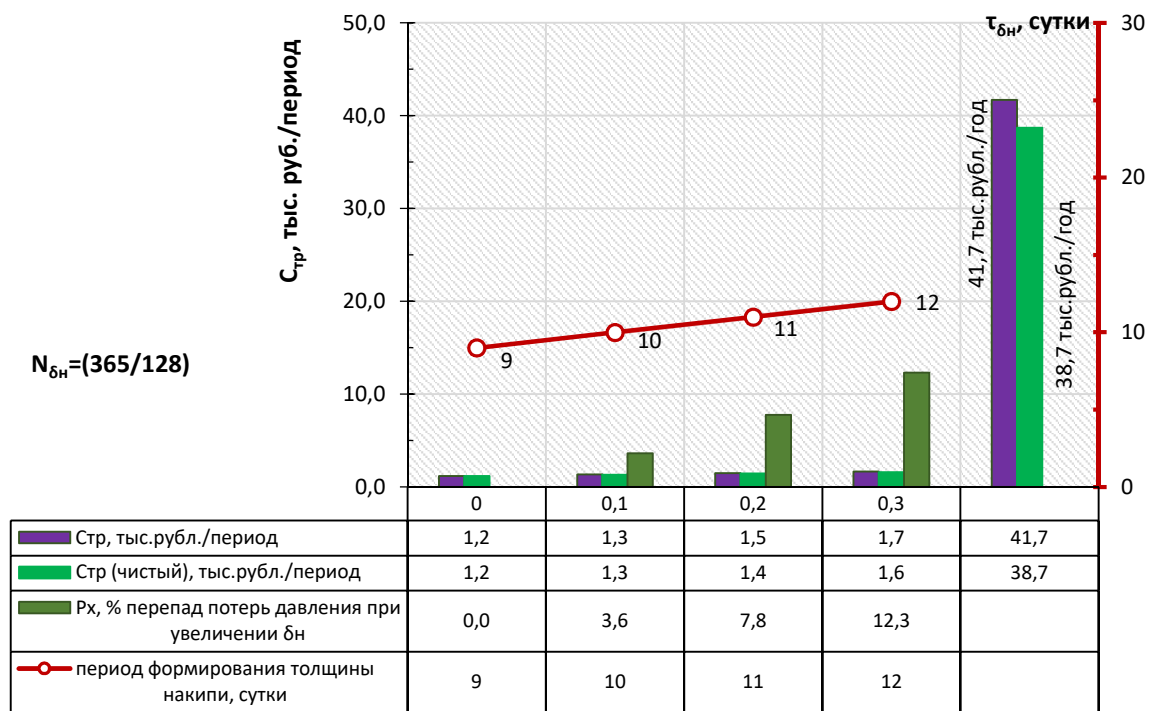


Рис. 3. Приведенные транспортные расходы с учетом очистки теплообменника при достижении толщины накипи 0,3 мм и в условиях «чистой» поверхности теплообмена

Примечание: значения периода формирования толщины накипи привязываются к вспомогательной оси

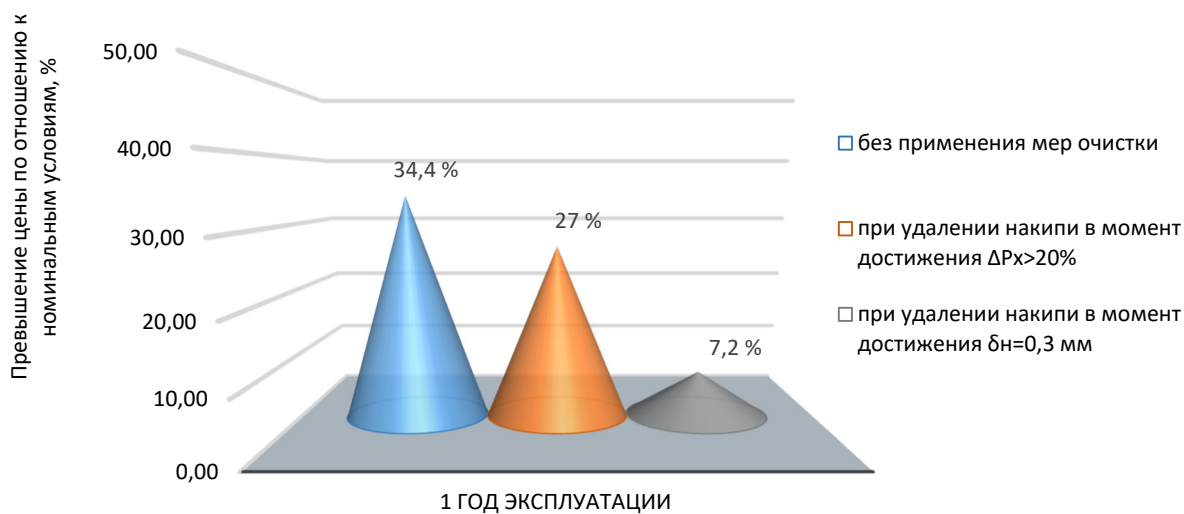


Рис. 4. Диаграмма соотношения затрат на перекачивание 1 м<sup>3</sup> теплоносителя в условиях чистой поверхности к затратам: с учетом формирования наростов накипи на протяжении всего периода работы; с учетом формирования наростов накипи до достижения ΔP<sub>х</sub> на входе и выходе из аппарата по нагреваемой стороне свыше 20 %; с учетом солеотложения до δ<sub>н</sub> = 0,3 мм

Результаты расчета транспортных затрат при своевременном устранении продуктов засорения толщиной 0,3 мм по отношению к номинальным условиям работы теплообменного оборудования (рис. 3) доказывают экономическую эффективность своевременного удаления накипных отложений относительно малых размеров. При этом превышение затрат составило 7,2 %. Дальнейшие расчеты при толщине менее 0,3 мм не проводились, так как для полноценной оценки

рациональности удаления накипи данной величины потребуются данные о методе очистки и затрат на его проведение.

На рисунке 4 представлен анализ сравнения цен за перекачивание 1 м<sup>3</sup> теплоносителя в зависимости от принятых условий расчета приведенных транспортных затрат. Превышение цены за перекачивание 1 м<sup>3</sup> теплоносителя по отношению к цене в условиях «чистой» поверхности составило:

- при своевременной очистке поверхности

пластин в момент достижения накипи 0,3 мм превышение – 7,2 %;

- при удалении продуктов солеотложения в период достижения перепада давления свыше 20 %, цена превысила на 27 %;

- в условиях эксплуатации теплообменного оборудования без применения мер очистки цена за перекачивание 1 м<sup>3</sup> теплоносителя выше на 34,4 %.

**Выводы.** Представленная последовательность расчета транспортных затрат в текущем режиме эксплуатации пластинчатых теплообменников учитывает влияние толщины накипи на общую стоимость перекачивания 1 м<sup>3</sup>, что позволяет сопоставить затраты на перекачивание теплоносителя и стоимость затрат на удаление накипи с поверхностей нагрева (согласно принятому методу очистки) в зависимости от толщины солеобразующего слоя и периодов очистки. Согласно результатам исследования, стоимость перекачивания 1 м<sup>3</sup> теплоносителя при удалении продуктов солеотложения в период достижения перепада давления свыше 20 % увеличивается относительно номинальных условий работы теплообменника («чистая» поверхность пластин) на 27 %, а своевременная очистка от накипи толщиной 0,3 мм позволяет снизить затраты до 7,2 % и использовать физические методы разрушающего воздействия на толщину накипных отложений без останова оборудования.

Таким образом, регулярный контроль толщины накипеобразующих слоев в пластинчатых теплообменниках является целесообразным в комплексе мер, направленных на снижение эксплуатационных затрат на перекачивание теплоносителя.

**Примечание.** Часть результатов исследования была представлена в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему: «Повышение эффективности пластинчатых теплообменных устройств в системах теплоснабжения», 2021 г. Елистратова Ю.В.

**Источник финансирования.** Исследования проводились в рамках Гранта Президента Российской Федерации для ведущей научной школы № НШ-25.2022.4 с использованием оборудования Центра высоких технологий Белгородского государственного технологического университета имени В.Г. Шухова.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соловьев В.И. Цифровая трансформация систем теплоснабжения муниципального образования // Информационные и математические технологии в науке и

управлении. 2019. № 2 (14). С. 52–61. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-05

2. Рыбкина Г.В., Яблокова А.А. Современное состояние теплоснабжения и его развитие // Промышленные процессы и технологии. Т. 2. № 2. 2022. С. 89–99. DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99.

3. Mol C., GeoWatt. Research of fourth generation heating networks // [Internet] EnergyVille. 2018. [Cited 18.01.2023]. Available from:

<https://www.energyville.be/en/research/geowatt-research-fourth-generation-thermal-grids>

4. Елистратова Ю.В., Семиненко 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

5. Xu Z., Han Z., Wang J., Li Y. Numerical simulation of CaSO<sub>4</sub> crystallization fouling in a rectangular channel with vortex generators // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2019. Pp. 42–50. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.12.01.

6. Томилин А.К., Беспалов В.И., Беспалов В.В. Технология магнитной обработки воды против солеотложения: теория и практика // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Т. 332. № 1. 2021. С. 54–63. DOI:10.18799/24131830/2021/1/2999.

7. Berche J., Zupancic M., Mauger M. Overview of fouling by crystallization in heat exchangers // Processes. 2021. Doi: 9. 1356.10. DOI:10.3390/pr9081356.

8. Татаринцев В.А. Особенности накипеобразования в трубах теплообменных аппаратов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. Том. 22. № 1. 2022. С. 97–105. DOI: 10.14529/power220111 DOI: 10.14529/power220111.

9. Kumar A., Yadav S., Mondloe D., Baware V., Kumar Y., Pandit V. CFD analysis of Gypsum crystallization fouling in 2D plate heat exchangers // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2022. 9. 2394–7454. DOI:10.19101/IJATEE.2021.874616.

10. Faes W., Lecompte S., Ahmed Z., Bael J., Salenbien R., Verbeken K. et al. Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers // Corrosion Reviews. 2019. Vol. 37. Pp. 131–155 DOI:10.1515/corrrev-2018-0054.

11. Sundar S., Rajagopal M.C., Zhao H., Kuntumalla G., Meng Y., Chang H.C., et al. Fouling modeling and prediction approach for heat exchangers using deep learning // Int. J. Heat Mass

Transf. 2020. 159. 120112. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120112.

12. Kananeh A.B. Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience // Heat Exchangers – Basics Design Applications. 2012. Pp. 533–550. DOI:10.5772/34026.

13. Müller-Steinhagen H., Malayeri M.R., Watkinson P. Fouling of Heat Exchangers-New Approaches to Solve an Old Problem // Heat Transfer Engineering. 2005. Vol. 26. Pp. 1–4. DOI:10.1080/01457630590889906.

14. Kang S., Junyub L., Sungho Y., Dongwoo K., Yongchan K. Composite fouling characteristics of CaCO<sub>3</sub> and CaSO<sub>4</sub> in plate heat exchangers at various operating and geometric conditions // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 136. Pp. 555–562. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.032.

15. Галковский В.А., Чупова М.В. Анализ снижения коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов вследствие загрязнения поверхности // [Электронный ресурс]. Интернет-журнал «Науковедение». Т. 9. №2. 2017. Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf> (дата обращения 01.02.2023).

16. Елистратова Ю.В. Повышение эффективности пластинчатых теплообменных устройств в системах теплоснабжения: дис. кан. тех. наук.: 05.23.03 / Ю.В. Елистратова. Белгород. 2021. 174 с.

17. Khodamorad S.H., Alinezhad N., Fatmehsari H., Davoud, Ghahtan K. Stress corrosion cracking in Type.316 plates of a heat exchanger // Case Studies in Engineering Failure Analysis. 2016. Vol. 5-6. Pp. 59–66. DOI:10.1016/j.csefa.2016.03.001.

18. Deen K.M., Virk M.A., Haque C.I., Ahmad R., Khan I.H. Failure investigation of heat exchanger

plates due to pitting corrosion // Eng Fail Anal. 2010. Vol. 17. Pp. 886–893.

19. Жаднов О.В. Накипь и проблемы теплоэнергетики [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения 2006. №4. Режим доступа: [www.nts-n.ru](http://www.nts-n.ru). (дата обращения 05.02.2023)

20. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения: Санитарно-эпидемиологические правила и нормы. –М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 15 с.

21. Аппараты теплообменные пластинчатые разборные типа НН. Руководство по эксплуатации // РДАМ.0665145.001 РЭ. – Нижний Новгород: Акционерное общество "Ридан".

22. Тариф на электроэнергию в г. Белгород. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://stroyfora.ru/tariff/area-02e9c019-ab4d-4fa0-928e-d6c0a41dc256/year-2023/type-16>. (дата обращения 03.02.2023).

23. Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. М.: «Машиностроение», 1973. 288 с.

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

#### *Информация об авторах*

**Елистратова Юлия Васильевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: [tg.v.info@mail.ru](mailto:tg.v.info@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

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

**Уваров Валерий Анатольевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: [isi@bstu.ru](mailto:isi@bstu.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Щербинина Ольга Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: [shcherbinina.oa@gmail.com](mailto:shcherbinina.oa@gmail.com). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 02.02.2023 г.

© Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Уваров В.А., Щербинина О.А., 2023

**\*Elistratova Yu.V., Seminenko A.S., Uvarov V.A., Shcherbinina O.A.***Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov**\*E-mail: tgv.info@mail.ru***THE ECONOMIC ASPECT OF THE SCALE-FORMING DIGNOSTICS LAYERS  
IN PLATE HEAT EXCHANGERS**

**Abstract.** *The reliability and efficiency component of the 3rd generation heat and power network is characterized by the use of heat exchange devices, namely the plate type. Its main function is to heat the coolant for the needs of hot water supply and heating systems. However, the peculiarities of the chemical composition of the heat carrier cause contamination of heat exchangers in the form of scale layers on the heating surfaces. The process of scale formation on the plates of heat exchangers is one of the key factors affecting the failure of equipment and an increase in the energy intensity of heat distribution points, which leads to a decrease in the quality of services provided and an increase in financial costs in the field of heat supply. In the course of the study, by summarizing the known data, a sequence is formed for calculating the transport costs for the operation of plate heat exchangers under various conditions of scale formation. At the same time, the influence of scale thickness on the total cost of pumping one square meter of coolant is taken into account. This allows comparing transportation costs and the cost of removing scale from heating surfaces (according to the accepted cleaning method) depending on the thickness of the salt-forming layer and cleaning periods. The results of the study confirm the feasibility of regular monitoring of the thickness of salt-forming layers in plate heat exchangers to reduce operating costs for pumping the coolant.*

**Keywords:** *plate heat exchanger, energy efficiency, operating costs, energy intensity, scale control.*

**REFERENCES**

1. Soloviev V.I. Digital transformation of heat supply systems of a municipality [Cifrovaya transformaciya sistem teplosnabzheniya municipal'nogo obrazovaniya Cifrovaya transformaciya sistem teplosnabzheniya municipal'nogo obrazovaniya] Information and Mathematical Technologies in Science and Management. 2019. No. 2 (14). Pp. 52–61. DOI:10.25729/2413-0133-2019-2-05. (rus)
2. Rybkina G.V., Yablokova A.A. The current state of heat supply and its development [Sovremennoe sostoyanie teplosnabzheniya i ego razvitiye]. Industrial processes and technologies. Vol. 2. No. 2. 2022. Pp. 89–99. DOI:10.37816/2713-0789-2022-2-2(4)-89-99. (rus)
3. Mol C., GeoWatt. Research of fourth generation heating networks. [Internet]. energyville. 2018. [cited 01.18.2023]. Available from: <https://www.energyville.be/en/research/geowatt-research-fourth-generation-thermal-grids>.
4. Elistratova Yu.V., Seminenko A.S., Minko V.A. The relevance of pollution models for diagnosing the state of plate heat exchangers [Aktual'nost' modelej zagryazneniya dlya diagnostiki sostoyaniya plastinchatyyh teploobmennikov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 10. Pp. 33–40. DOI:10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40. (rus)
5. Xu Z., Han Z., Wang J.b, Li Y. Numerical simulation of CaSO<sub>4</sub> crystallization fouling in a rectangular channel with vortex generators. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2019. Pp. 42–50. DOI:10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.12.01.
6. Tomilin A.K., Bepalov V.I., Bepalov V.V. Technology of magnetic water treatment against scaling: theory and practice [Tekhnologiya magnitnoy ochistki vody ot nakipi: teoriya i praktika]. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. Vol. 332. No. 1. 2021. Pp. 54–63. DOI:10.18799/24131830/2021/1/2999. (rus)
7. Berche J., Zupancic M., Mauger M. Overview of fouling by crystallization in heat exchangers. Processes. 2021. Doi: 9. 1356.10. DOI:10.3390/pr9081356.
8. Tatarintsev V.A. Peculiarities of scale formation in pipes of heat exchangers [Osobennosti obrazovaniya nakipi v trubah teploobmennikov]. Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy. Volume. 22. No. 1. 2022. Pp. 97–105. DOI: 10.14529/power220111 (rus)
9. Kumar A., Yadav S., Mondloe D., Barewar V., Kumar Y., Pandit V. CFD analysis of Gypsum crystallization fouling in 2D plate heat exchangers. International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2022. 9. 2394–7454. DOI:10.19101/IJATEE.2021.874616.
10. Faes W., Lecompte S., Ahmed Z, Bael J., Salenbien R., Verbeken K. et al. Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. Corrosion Reviews. 2019. 37. Pp. 131–155. DOI:10.1515/corrrev-2018-0054.
11. Sundar S., Rajagopal M.C., Zhao H., Kuntumalla G., Meng Y., Chang H.C., et al. Fouling



modeling and prediction approach for heat exchangers using deep learning. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2020. 159. 120112. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120112.

12. Kananeh A. B. Fouling in Plate Heat Exchangers: Some Practical Experience. *Heat Exchangers - Basics Design Applications*. 2012. Pp. 533–550. DOI:10.5772/34026

13. Müller-Steinhagen H., Malayeri M.R., Watkinson P. Fouling of Heat Exchangers-New Approaches to Solve an Old Problem. *Heat Transfer Engineering*. 2005. 26. Pp. 1–4. DOI:10.1080/01457630590889906.

14. Kang S., Junyub L., Sungho Y., Dongwoo K., Yongchan K. Composite fouling characteristics of CaCO<sub>3</sub> and CaSO<sub>4</sub> in plate heat exchangers at various operating and geometric conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 136. Pp. 555–562. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.03.032.

15. Galkovsky V.A., Chupova M.V. Analysis of the decrease in the heat transfer coefficient of heat exchangers due to surface contamination [Analiz snizheniya koeffitsienta teploperedachi teploobmennikov iz-za zagryazneniya poverhnosti]. [Electronic resource]. Online journal "Science Studies". Vol. 9. No. 2. 2017 Access mode: <http://naukovedenie.ru/PDF/41TVN217.pdf>. (date of treatment: 01.02.2023). (rus)

16. Elistratova Yu.V. Improving the efficiency of plate heat exchange devices in heat supply systems [Povyshenie effektivnosti plastinchatykh teploobmennyykh ustrojstv v sistemah teplosnabzheniya]: Diss. candidate of Technical Sciences: Belgorod. 2021. 174 p.

17. Khodamorad S.H., Alinezhad N., Fatmehsari H., Davoud, Ghahtan K. Stress corrosion cracking in Type.316 plates of a heat exchanger. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 5-6. Pp. 59–66. DOI:10.1016/j.csefa.2016.03.001.

18. Deen K.M, Virk M.A., Haque C.I., Ahmad R., Khan I.H. Failure investigation of heat exchanger plates due to pitting corrosion *Eng Fail Anal*. 2010. Vol. 17. Pp. 886–893.

19. Zhadnov O.V. Scale and problems of thermal power engineering [Masshtaby i problemy teploenergetiki]. *News of heat supply*. 2006. No. 4. [Electronic resource] Access mode: [www.nts.ru](http://www.nts.ru). (date of treatment: 05.02.2023). (rus)

20. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Hygienic requirements for ensuring the safety of hot water supply systems: Sanitary and epidemiological rules and norms [Pit'evaya voda. Gigienicheskie trebovaniya k kachestvu vody centralizovannykh sistem pit'evogo vodosnabzheniya. Kontrol' kachestva. Gigienicheskie trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti sistem goryachego vodosnabzheniya: Sanitarno-epidemiologicheskie pravila i normy]. M. Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 15 p. (rus)

21. Heat-exchange lamellar collapsible type HH [Teploobmennyy plastinchatyy razbornyy tip HH]. Operation manual. RDAM.0665145.001 RE. - Nizhny Novgorod: Joint Stock Company "Ridan". (rus)

22. Electricity tariff in Belgorod [Tarif na elektroenergiyu v Belgorode]. [Electronic resource]. Access mode: <https://stroyfora.ru/tariff/area-02e9c019-ab4d-4fa0-928e-d6c0a41dc256/year-2023/type-16>. (date of treatment: 03.02.2023). (rus)

23. Baranovsky N.V., Kovalenko L.M., Yastrebenetsky A.R. Plate and spiral heat exchangers [Plastinchatye i spiral'nye teploobmenniki]. M.: "Engineering", 1973. 288 p. (rus)

24. Chernyshev D.V., Kuplenov N.I. Peculiarities of scale distribution over the surface of a plate water heater [Osobennosti raspredeleniya nakipi po poverhnosti plastinchatogo vodonagrevatelya]. 2000 Energy Saving: International Scientific and Technical Conference: TulSU. Tula. 2000. 127 p. (rus)

#### *Information about the authors*

**Elistratova, Yulia V.** PhD, Assistant professor. E-mail: [tg.v.info@mail.ru](mailto:tg.v.info@mail.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Seminenko, Artem S.** PhD, Assistant professor. E-mail: [seminenko.as@gmail.com](mailto:seminenko.as@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Uvarov, Valery A.** DSc, Professor. E-mail: [isi@bstu.ru](mailto:isi@bstu.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Shcherbinina, Olga A.** PhD, Assistant professor. E-mail: [shcherbinina.oa@gmail.com](mailto:shcherbinina.oa@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

*Received 02.02.2023*

**Для цитирования:**

Елистратова Ю.В., Семиненко А.С., Уваров В.А., Щербинина О.А. Экономический аспект диагностики накипеобразующих слоев в пластинчатых теплообменниках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 5. С. 42–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-42-51

**For citation:**

Elistratova Yu.V., Seminenko A.S., Uvarov V.A., Shcherbinina O.A. The economic aspect of the scale-forming diagnostics layers in plate heat exchangers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 5. Pp. 42–51. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-42-51