

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА  
ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЯ  
НА ТЕПЛООБМЕН В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ  
С ЛЕНТОЧНЫМИ ЗАВИХРИТЕЛЯМИ**

**Т.Д. Демкина**

ORCID: **0000-0003-3748-3790** e-mail: **tatyana07041998@gmail.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.А. Добров**

ORCID: **0000-0001-7363-8791** e-mail: **dobrov@nntu.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**Д.В. Доронков**

ORCID: **0000-0003-0668-4215** e-mail: **nevid000@mail.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**Д.Д. Курицин**

ORCID: **0000-0001-9384-6950** e-mail: **fomius.kisik@gmail.com**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**Д.С. Малыгин**

ORCID: **0000-0002-5953-925X** e-mail: **mlygin97@mail.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.Н. Пронин**

ORCID: **0000-0001-7174-3643** e-mail: **Proninaleksei@mail.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.В. Рязанов**

ORCID: **0000-0002-4951-8930** e-mail: **a\_v\_ryazanov@mail.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**М.А. Петунин**

ORCID: **0009-0009-8990-0868** e-mail: **l4ikotyara@yandex.ru**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**Л.М. Суглицкая**

ORCID:0000-0003-2785-0630 e-mail: [lubov286@yandex.ru](mailto:lubov286@yandex.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**Р.В. Яковлев**

ORCID: 0009-0007-6270-3907 e-mail: [rvnn152@gmail.com](mailto:rvnn152@gmail.com)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Исследованы процессы формирования минеральных отложений на рабочих поверхностях и их влияние на теплообмен в энергетическом оборудовании с ленточными интенсификаторами теплообмена. Актуальность обусловлена задачей повышения эффективности работы теплообменного оборудования, использующего в своей работе теплоноситель с высоким содержанием растворенных органических и неорганических веществ. Для проведения исследований спроектирован и изготовлен циркуляционный контур с двумя экспериментальными моделями. Конструкции моделей отличаются наличием в одной из них ленточного интенсификатора. Исследования позволили изучить динамику процесса образования минеральных отложений в оборудовании в зависимости от времени эксплуатации. Установлено, что наличие в конструкции ленточных завихрителей замедляет процесс образования минеральных отложений на теплообменных поверхностях, но не предотвращает его. Использование ленточных интенсификаторов позволяет повысить коэффициенты теплоотдачи и снизить влияние образующихся отложений на тепловую мощность оборудования, но при этом повышается его гидравлическое сопротивление. Полученные результаты показали возможность эффективного использования ленточных завихрителей в теплообменном оборудовании в условиях интенсивного образования минеральных отложений.

**Ключевые слова:** теплообменная поверхность, ленточный интенсификатор, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, минеральные отложения.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Демкина, Т.Д. Экспериментальные исследования процесса образования минеральных отложений и их влияния на теплообмен в энергетическом оборудовании с ленточными завихрителями / Т.Д. Демкина, А.А. Добров, Д.В. Доронков, Д.Д. Курицин, Д.С. Малыгин, А.Н. Пронин, М.А. Петунин, Л.М. Суглицкая, Р.В. Яковлев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2023. № 2. С. 60-68.

DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_2\_60

## **EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE FORMATION OF MINERAL DEPOSITS AND THEIR EFFECT ON HEAT TRANSFER IN POWER EQUIPMENT WITH TWISTED TAPE**

**T.D. Demkina**

ORCID: 0000-0003-3748-3790 e-mail: [tatyana07041998@gmail.ru](mailto:tatyana07041998@gmail.ru)

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.A. Dobrov**

ORCID: 0000-0001-7363-8791 e-mail: [dobrov@nntu.ru](mailto:dobrov@nntu.ru)

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.V. Doronkov**

ORCID: 0000-0003-0668-4215 e-mail: [nevid000@mail.ru](mailto:nevid000@mail.ru)

Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.D. Kuritsin**

ORCID: **0000-0001-9384-6950** e-mail: **fomius.kisik@gmail.com**  
Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**D.S. Malygin**

ORCID: **0000-0002-5953-925X** e-mail: **mlygin97@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.N. Pronin**

ORCID: **0000-0001-7174-3643** e-mail: **Proninaleksei@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.V. Ryazanov**

ORCID: **0000-0002-4951-8930** e-mail: **a\_v\_ryazanov@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**M.A. Petunin**

ORCID: **0009-0009-8990-0868** e-mail: **l4ikotyara@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**L.M. Suglitskaya**

ORCID: **0000-0003-2785-0630** e-mail: **lubov286@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**R.V. Yakovlev**

ORCID: **0009-0007-6270-3907** e-mail: **rvnn152@gmail.com**  
Nizhny Novgorod State Technical University. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The presented work is devoted to the study of the process of formation of mineral deposits on working surfaces and their influence on heat transfer in power equipment with heat-exchange belt intensifiers. Carrying out this work is due to the task of increasing the efficiency of heat exchange equipment, which uses in its work a coolant with a high content of organic and inorganic substances dissolved in it. For research, a circulation circuit with two experimental models was designed and manufactured. The designs of the models are distinguished by the presence of a belt intensifier in one of them. The studies made it possible to study the dynamics of the formation of mineral deposits in equipment depending on the operating time. It has been established that the presence of tape swirlers in the design slows down the formation of mineral deposits on heat exchange surfaces, but does not prevent it. The use of belt intensifiers makes it possible to increase the heat-transfer coefficients and reduce the effect of deposits formed on the thermal power of the equipment, but at the same time it increased its hydraulic resistance. The results showed the possibility of effective use of twisted tapes in heat exchange equipment under conditions of intensive formation of mineral deposits.

**Key words:** heat-exchange surface, belt intensifier, heat-exchange, heat-transfer coefficient, mineral deposits.

**FOR CITATION:** T.D. Demkina, A.A. Dobrov, D.V. Doronkov, D.D. Kuritsin, D.S. Malygin, A.N. Pronin, A.V. Ryazanov, M.A. Petunin, L.M. Suglitskaya, R.V. Yakovlev. Experimental research of the formation of mineral deposits and their effect on heat transfer in power equipment with twisted tape. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2023. № 2. Pp. 60-68. DOI: 10.46960/1816-210X\_2023\_2\_60

## Введение

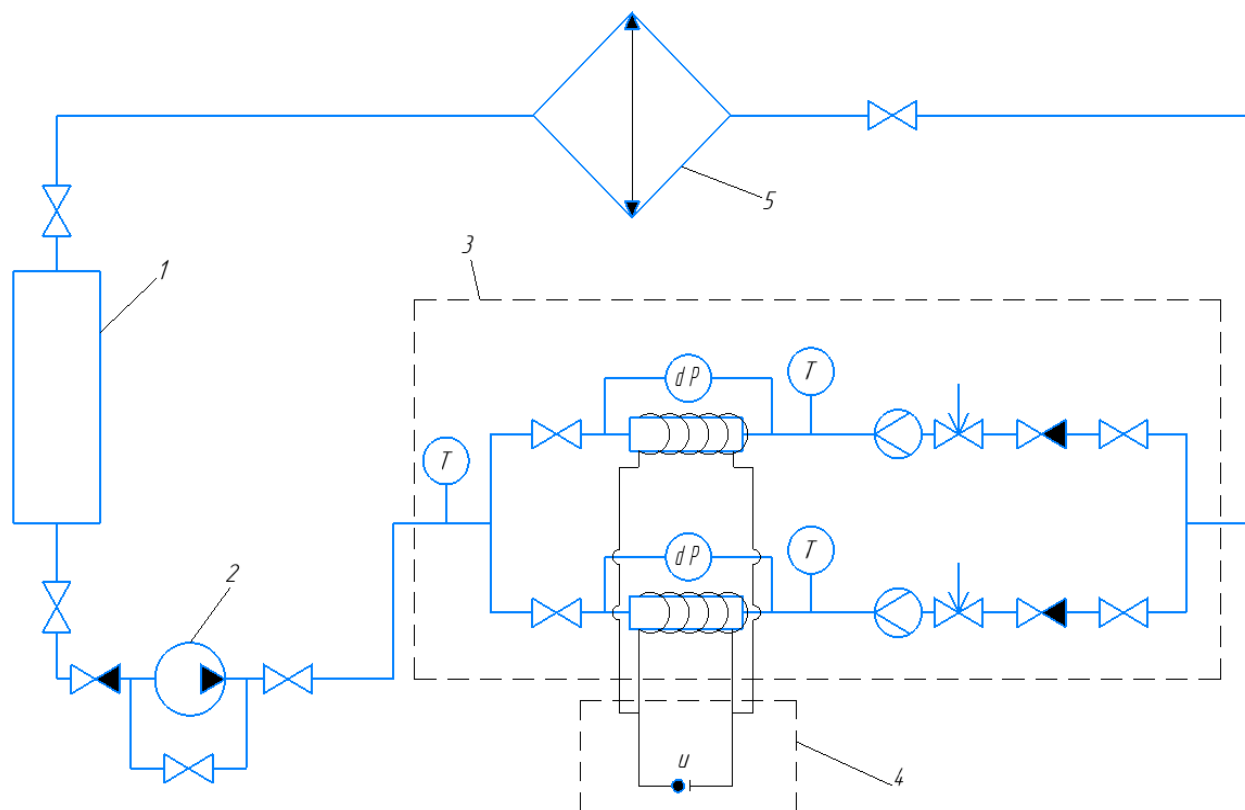
Повышение эффективности и надежности работы теплообменного оборудования атомных и тепловых электрических станций является важной задачей, решение которой позволит снизить затраты на производство тепловой и электрической энергии, обеспечив стабильность и качество подаваемой населению энергии. Широкое распространение получил способ повышения эффективности работы энергетических установок за счет интенсификации процессов теплообмена при установке специальных интенсификаторов различных конструкций [1-4]. В качестве одного из вариантов конструкции, показавших высокую эффективность, можно обозначить ленточные завихрители [5-11]. При их установке увеличивается скорость движения теплоносителя у теплообменной поверхности, возникают вторичные течения под действием центробежных сил, что приводит к интенсивному перемешиванию массы жидкости и увеличению коэффициента теплоотдачи.

На атомных и тепловых электрических станциях эксплуатируются теплообменные аппараты, использующие при своей работе в качестве теплоносителя воду из естественных источников – рек, водохранилищ, озер и прудов-охладителей. Часть данного оборудования (конденсаторы турбин, бойлеры теплофикационных установок) требует большого количества теплоносителя, что затрудняет проведение полноценной водоподготовки. Растворенные в теплоносителе вещества осаждаются на теплообменных поверхностях, ухудшая теплообмен, увеличивая гидравлическое сопротивление и тем самым снижая эффективность работы оборудования. В конечном итоге это ведет к выходу оборудования из строя и внеплановым ремонтам. В работе [12] отмечено, что при средней скорости роста отложений 0,6 мм/год энергоблок мощностью 1000 МВт из-за отложений теряет до 4 % КПД за год, что оборачивается потерями в виде невыработанной электроэнергии на сумму 175 000 000 руб. в год.

В настоящее время остается открытым вопрос использования интенсификаторов теплообмена, в частности, ленточных завихрителей, в условиях образования минеральных отложений на теплообменных поверхностях. В Научно-исследовательской лаборатории теплогидравлики ядерных энергетических установок нового поколения (НИЛ ТГ ЯЭУ) НГТУ проведен комплекс работ по исследованию гидравлики и теплообмена в оборудовании с ленточными завихрителями в условиях образования минеральных отложений на теплообменных поверхностях. В ходе экспериментальных исследований изучена динамика процесса образования минеральных отложений на теплообменных поверхностях, определены гидравлические характеристики и характеристики теплообмена в зависимости от длительности эксплуатации, а также рассмотрен процесс образования отложений на теплообменных поверхностях.

## Экспериментальный стенд

Для проведения исследований создан экспериментальный стенд (рис. 1). Он представляет собой контур, в состав которого входят: бак запаса теплоносителя 1, циркуляционный насос 2, система измерения, состоящая из термоэлектрических преобразователей, дифференциальных преобразователей давления и расходомерных устройств. Экспериментальный участок 3 включает в себя две модели, каждая из которых представляет собой трубопровод диаметром 42x4 мм. Одна из моделей снабжена ленточным интенсификатором – лентой, закрученной вокруг центральной оси (рис. 2). Толщина ленты составляет 1 мм, длина 1 м, ширина равна диаметру трубопровода. Нагрев происходит за счет работы электрических нагревателей 4, которые изготовлены из нихромовой проволоки и керамических изоляторов. Система охлаждения 5 состоит из двух водо-воздушных теплообменников [13]. Для измерения температуры теплообменных поверхностей и теплоносителя используются термоэлектрические преобразователи с точностью измерения 1,5 °С. Погрешность измерения расхода теплоносителя не превышает 5 %, погрешность измерения перепада давления на экспериментальных моделях – 1,45 %.



**Рис. 1. Схема экспериментального стенда:**

1 – бак запаса теплоносителя; 2 – циркуляционный насос; 3 – экспериментальный участок;  
4 – система нагрева экспериментальных моделей; 5 – система охлаждения

**Fig. 1. Scheme of the experimental stand:**

1 – coolant reserve tank; 2 – circulation pump; 3 – experimental area;  
4 – heating system for experimental models; 5 – cooling system

В качестве теплоносителя использовалась вода, не подвергающаяся какой-либо водоподготовке.



**Рис. 2. Ленточный завихритель экспериментальной модели**

**Fig. 2. Twisted tape of experimental model**

### Результаты экспериментальных исследований

При проведении исследований была рассмотрена динамика процесса образования минеральных отложений на теплообменных поверхностях в зависимости от длительности эксплуатации. На рис. 3-6 показано состояние теплообменных поверхностей экспериментальных моделей и поверхности ленточного завихрителя после 75, 150 и 225 часов эксплуатации. При визуальном осмотре теплообменных поверхностей было установлено, что после 75 часов эксплуатации в модели без ленточного завихрителя образование минеральных отложений происходит интенсивнее, возникают крупные очаги, которые хаотично разбросаны по всей площади поверхности. В модели с ленточным завихрителем после 75 часов эксплуатации минеральные отложения практически отсутствуют, наблюдается незначительный налет, который равномерно распределен по всей поверхности.

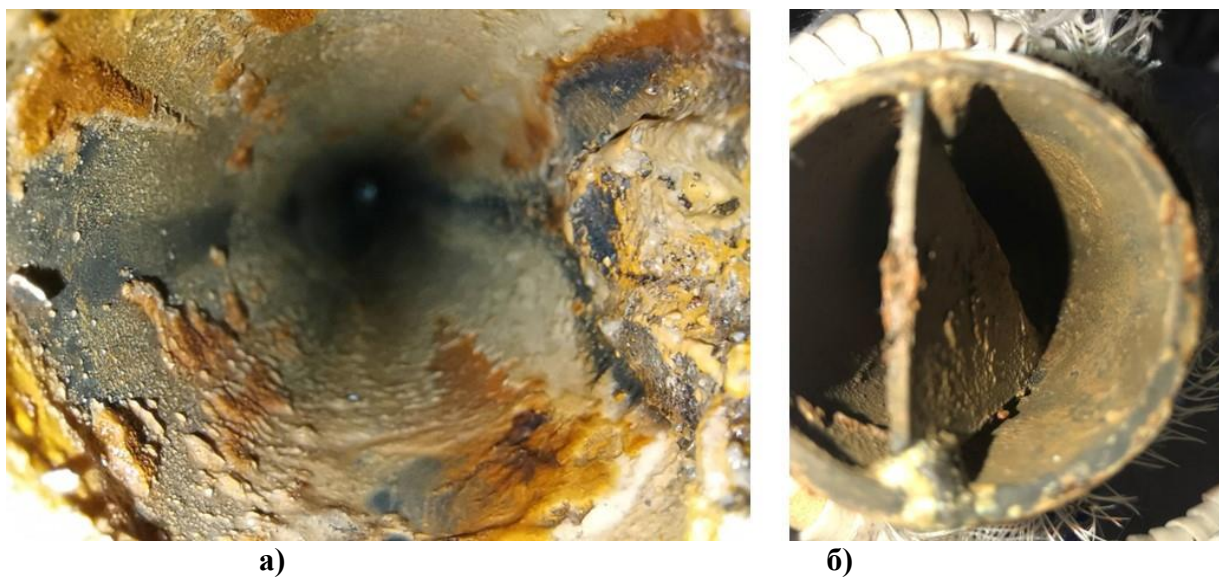


Рис. 3. Теплообменные поверхности экспериментальных моделей после 75 часов эксплуатации:  
*а* – без ленточного завихрителя, *б* – с ленточным завихрителем

Fig. 3. Heat exchange surfaces of experimental models after 75 hours of operation:  
*a* – without a twisted tape, *b* – with a twisted tape

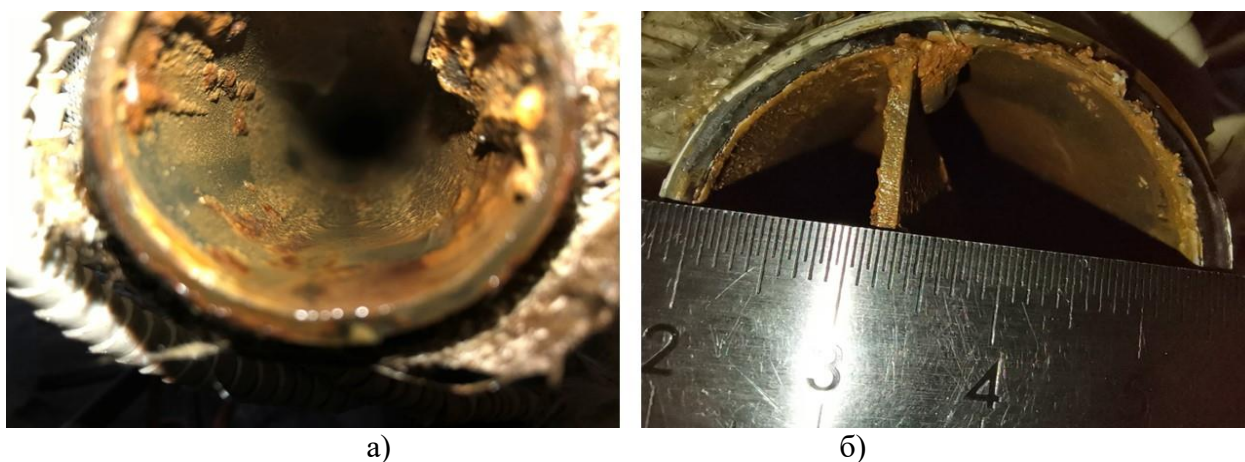
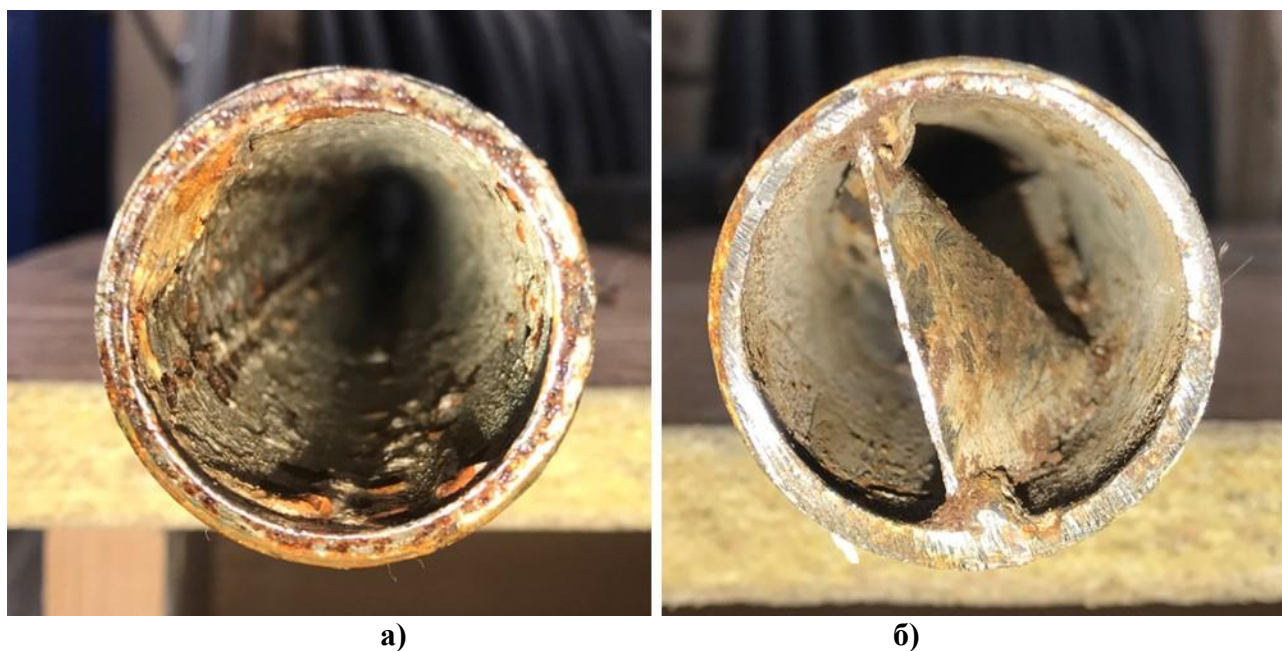


Рис. 4. Теплообменные поверхности экспериментальных моделей  
после 150 часов эксплуатации:  
*а* – без ленточного завихрителя, *б* – с ленточным завихрителем

Fig. 4. Heat exchange surfaces of experimental models after 150 hours of operation:  
*a* – without a twisted tape, *b* – with a twisted tape

При осмотре теплообменных поверхностей после 150 часов эксплуатации в модели без ленточного завихрителя наблюдается дальнейший рост площади минеральных отложений, происходит срастание отдельных очагов. Кроме того, происходит увеличение толщины слоев ранее образовавшихся отложений. В модели с ленточным завихрителем отмечается появление локальных очагов образования отложений незначительной площади. Происходит образование отложений на поверхности ленточного завихрителя (рис. 4).

По истечении 225 часов эксплуатации (рис. 5) на обеих теплообменных поверхностях образовались минеральные отложения. В модели с ленточным завихрителем имелись локальные участки, на которых отложения отсутствовали. Площадь данных участков по сравнению со всей площадью экспериментальной модели незначительна. В экспериментальной модели без ленточного завихрителя сформировался слой отложений, полностью покрывающий теплообменную поверхность, при этом толщина слоя больше, чем в другой модели.



**Рис. 5. Теплообменные поверхности экспериментальных моделей после 225 часов эксплуатации:**

*а – без ленточного завихрителя, б – с ленточным завихрителем*

**Fig. 5. Heat exchange surfaces of experimental models after 225 hours of operation:**

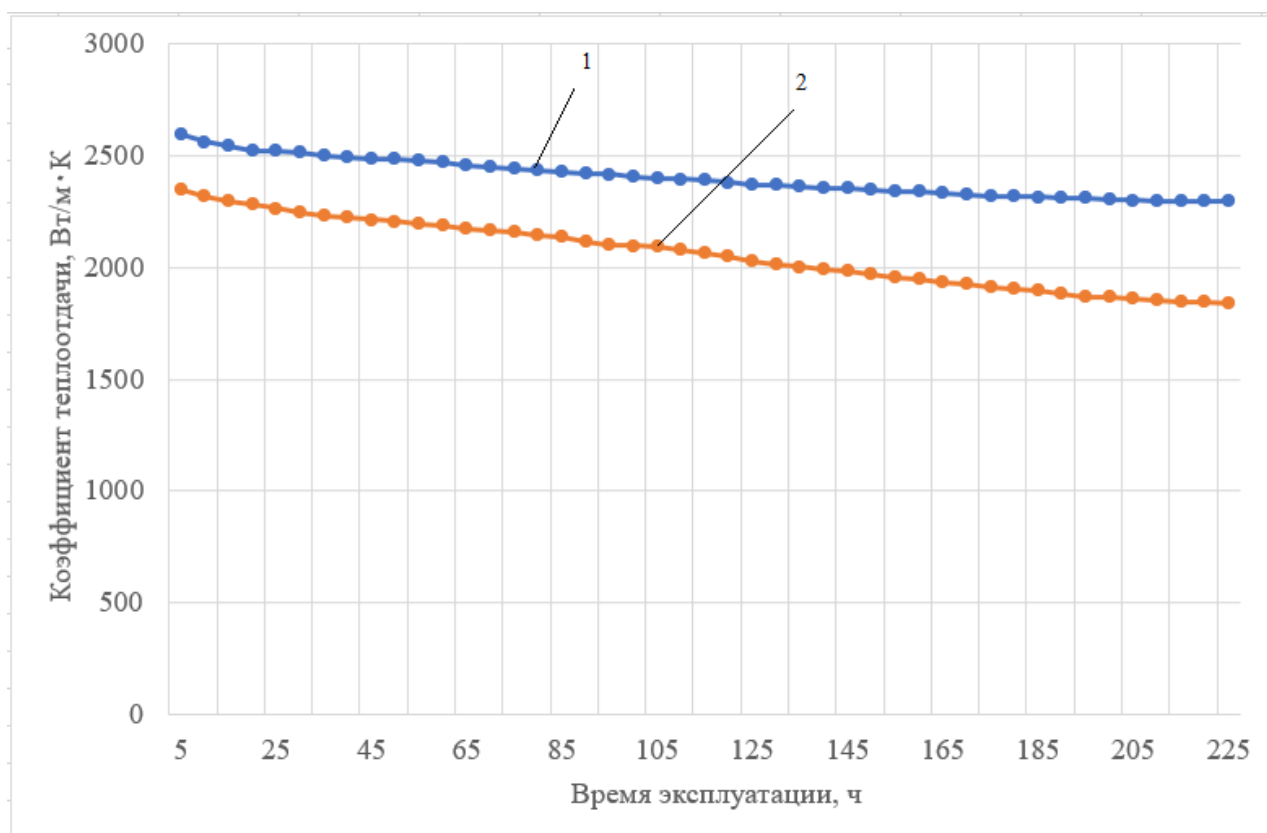
*a – without a twisted tape, b – with a twisted tape*

В работе [12] для определения толщины отложений в трубопроводах различных систем предлагается зависимость:

$$\delta_{\text{загр}} = \frac{d_{\text{тр}}}{2} \left( 1 - \sqrt[4]{\frac{0,75 \cdot \Delta P_{\text{чист}}}{2 \cdot \Delta P_{\text{загр}} - \Delta P_{\text{чист}}}} \right) \quad (1)$$

При использовании экспериментальных значений перепадов давления на моделях, согласно формуле (1), было определено, что после 225 часов эксплуатации толщина слоя минеральных отложений в модели с завихрителем должна составлять 0,5 мм, а в модели без завихрителя 1,1 мм. Визуальный осмотр показал, что в случае установки завихрителя образовался слой минеральных отложений толщиной ~0,3-0,4 мм. В модели гладкой трубы отложения имеют значительную неравномерность, которая выражается в наличии отдельных крупных выступов высотой 2-3 мм. Основная часть теплообменной поверхности покрыта слоем толщиной 0,9-1,3 мм. Установка ленточного завихрителя позволяет повысить коэффициент теплоотдачи. Было определено, что в начальный период времени в модели с интенсификатором

ром теплообмена коэффициент теплоотдачи выше на 9,7 %, а по истечении 225 часов эксплуатации разница составила 19,8 % (рис. 6). Таким образом, установка ленточного завихрителя не исключает образования минеральных отложений, но снижает скорость их осаждения и позволяет повысить коэффициент теплоотдачи при эксплуатации.



**Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи в экспериментальной модели от времени эксплуатации:**

*1 – экспериментальный участок с ленточным завихрителем;  
2 – экспериментальный участок без ленточного завихрителя*

**Fig. 6. Dependence of the heat transfer coefficient in the experimental model on the operating time:**  
*1 – experimental section with a twisted tape; 2 – experimental section without a twisted tape*

Перепад давления в экспериментальной модели с ленточным завихрителем на 10,5 % выше при расхождении расходов по моделям не более 3 %. Зависимость коэффициента трения для каждой модели от числа Рейнольдса ( $Re$ ) после 225 часов эксплуатации показана на рис. 6.

### Выводы

Проведенные исследования показали, что использование в энергетическом оборудовании ленточных завихрителей, работающих в условиях недостаточной водоподготовки, приводит к следующим результатам:

- снижению скорости образования минеральных отложений на теплообменных поверхностях;
- повышению коэффициента теплоотдачи и уменьшению скорости его снижения по мере образования отложений;



- повышению затрат на эксплуатацию энергетических объектов из-за увеличения гидравлического сопротивления оборудования.

*Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE–2021–0008).*

### Библиографический список

1. Будов, В.М. Форсированные теплообменники ЯЭУ / В.М. Будов, С.М. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. Вилемас, Ю.В. Интенсификация теплообмена. Успехи теплопередачи / Ю.В. Вилемас, Г.И. Воронин, Б.В. Дзюбенко. – Вильнюс: Мокслас, 1988. – 188 с.
3. Попов, И.А. Промышленное применение интенсификации теплообмена – современное состояние проблемы (обзор) / И.А. Попов, Ю.Ф. Гортышов, В.В. Олимпиев // Теплоэнергетика. 2012. № 1. С. 3-14.
4. Лаптев, А.Г. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие. / А. Г. Лаптев, Н. А. Николаев, М. М. Башаров. – М.: Теплотехник, 2011. – 335 с.
5. Экспериментальные исследования перспективных способов интенсификации теплопередачи в трубчатом теплообменнике / Б.О. Кустов, А.В. Бальчугов, А.В. Бадеников // Известия Томского политехнического университета. 2020. № 3. С. 174-183.
6. Соборнов, А.Е. Оценка эффективности применения ленточных завихрителей в каналах теплообменного оборудования для интенсификации процесса теплоотдачи / А.Е. Соборнов [и др.] // Современные техника и технологии: сб. научных трудов. СТТ-2013: в 8 т. М., 2013. Т. 1. С. 17-27.
7. Ahmed, H.Y. Enhancement Heat Transfer in a Tube Fitted with Passive Technique as Twisted Tape Insert – A Comprehensive Review / H. Y. Ahmed, R. K. Maher // American Journal of Mechanical Engineering. 2019. № 7(1). С. 20-34.
8. Obed, Y.W. Heat Transfer Enhancement in an Axially Rotating Pipe with Twisted Tape Insert / Y.W. Obed, J.P. Kizito // American Journal of Mechanical Engineering. 2020. № 8(1). Pp. 1-8.
9. Smithberg, E. Friction and Forced Convection Heat-Transfer Characteristics in lutes fill Twisted Tape Swirl Generator / E. Smithberg, F. Landis // Journal of Heat and Mass Transfer. 1964. № 4. Pp. 39-48.
10. Клименюк, И.В. Процесс образования отложений на теплообменных поверхностях / И.В. Клименюк, А.А. Арапко // Вестник Дальневосточного государственного технического университета. 2011. №1 (6). С. 144-152.
11. Гарифулин, Р.Я. Влияние качества воды на снижение коэффициента теплопередачи теплообменных аппаратов и способ очистки от отложений накипи // Наука и мир. 2019. № 4. С. 47-50.
12. Бубликов, И.А. Научные принципы диагностирования и разработка методов снижения интенсивности образования отложений в теплообменном оборудовании тепловых и атомных электростанций: автореферат дисс... д-ра техн. наук. – Новочеркасск, 2004. – 34 с.
13. Рязанов, А.В. Экспериментальные исследования характеристик теплообмена в энергетическом оборудовании с интенсификаторами в условиях образования минеральных отложений / А.В. Рязанов, М.А. Григорьев, Д. Д. Курицин [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 12. С. 256-259.

*Дата поступления  
в редакцию: 06.03.2023*

*Дата принятия  
к публикации: 05.06.2023*