

## **ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ, НЕФТЕХИМИИ И БИОТЕХНОЛОГИИ**

## **PROCESSES AND APPARATUS OF CHEMICAL ENGINEERING, PETROLEUM CHEMISTRY AND BIOTECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 536.24

<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-3-35-42>

EDN NHYQJV

### **Интенсификация процесса теплообмена в технологическом оборудовании**

**Эльвира Рафаэлевна Теличкина<sup>✉</sup>, Наталья Павловна Мемедейкина**

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Россия, elkarneeva@yandex.ru<sup>✉</sup>*

**Аннотация.** Интенсификация процесса теплообмена играет ключевую роль в современной промышленности. Эффективный теплообмен позволяет сократить потребление топлива и электроэнергии, необходимых для поддержания заданных технологических режимов. Чем быстрее осуществляется передача тепла, тем меньше времени и энергии тратится на нагрев или охлаждение сырья, продуктов и оборудования. Более интенсивный теплообмен сокращает продолжительность отдельных стадий технологического цикла, позволяя ускорить производство и выпускать больше продукции за единицу времени, кроме того, равномерный и быстрый теплообмен минимизирует риски появления дефектов изделий, вызванных неравномерным распределением температуры. В условиях морской добычи углеводородов процессы категоричной модернизации существующего оборудования или внедрения нового проблематичны ввиду ограниченной площади платформы, высокой плотности размещения установок, сложности транспортировки нововводимых элементов, а также их монтажа. Интенсифицировать процесс теплообмена в оборудовании можно использованием упругих колебаний звуковых волн, механических колебаний объекта, воздействия на поток электрически заряженных частиц, повышением температурного перепада тепловых носителей или изменением геометрических характеристик конструктивных элементов теплообменного оборудования. Для определения метода повышения теплообмена необходимо учитывать назначение аппарата, его конструкторские особенности, параметры тепловых носителей и другие факторы. При анализе способов интенсификации процессов теплообмена в технологическом оборудовании выявлено, что одним из самых простых и эффективных способов увеличения теплоотдачи является кольцевое профилирование поверхностей рабочих элементов оборудования. В среде программного комплекса Kompas Flow Vision произведено моделирование процесса теплообмена с использованием гладкого профиля трубы и трубы с кольцевым профилированием. Технологические параметры заданы на основе анализа технологической схемы подготовки нефти на месторождениях Северного Каспия. Выявлено, что профилирование рабочего элемента приводит к увеличению коэффициента переноса тепла на стенку. Определены оптимальные геометрические характеристики трубы.

**Ключевые слова:** способы интенсификации теплообмена, теплообменник, профилирование трубок

**Для цитирования:** Теличкина Э. Р., Мемедейкина Н. П. Интенсификация процесса теплообмена в технологическом оборудовании // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2025. № 3. С. 35–42. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-3-35-42>. EDN NHYQJV.

Original article

## Intensification of the heat exchange process in technological equipment

*Elvira R. Telichkina, Natalia P. Mamedeikina*

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia, elkarneeva@yandex.ru*

**Abstract.** The intensification of the heat exchange process plays a key role in modern industry. Efficient heat exchange reduces the consumption of fuel and electricity needed to maintain the specified technological modes. The faster the heat transfer is carried out, the less time and energy is spent on heating or cooling raw materials, products and equipment. More intensive heat exchange reduces the duration of individual stages of the technological cycle, allowing faster production and more production per unit time, in addition, uniform and rapid heat exchange minimizes the risks of product defects caused by uneven temperature distribution. In conditions of offshore hydrocarbon production, the processes of categorical modernization of existing equipment or the introduction of new ones are problematic due to the limited platform area, high density of installations, the complexity of transporting newly constructed elements, as well as their installation. It is possible to intensify the heat exchange process in equipment using elastic vibrations of sound waves, mechanical vibrations of an object, effects on the flow of electrically charged particles, an increase in the temperature difference of thermal carriers or a change in the geometric characteristics of the structural elements of heat exchange equipment. To determine the method of increasing heat transfer, it is necessary to take into account the purpose of the device, its design features, parameters of thermal media and other factors. When analyzing the methods of intensifying heat exchange processes in technological equipment, it was revealed that one of the simplest and most effective ways to increase heat transfer is annular profiling of the surfaces of the working elements of the equipment. The simulation of the heat exchange process using a smooth tube profile and a tube with annular profiling was performed in the environment of the Kompas Flow Vision software package. The technological parameters are set based on the analysis of the technological scheme of oil treatment in the fields of the Northern Caspian Sea. It is revealed that profiling of the working element leads to an increase in the coefficient of heat transfer to the wall. Optimal geometric characteristics of the tube have been determined.

**Keywords:** methods of heat exchange intensification, heat exchanger, tube profiling

**For citation:** Telichkina E. R., Mamedeikina N. P. Intensification of the heat exchange process in technological equipment. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2025;3:35-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-3-35-42>. EDN NHYQJV.

### Введение

К современным теплообменникам предъявляется большое количество технических и технологических требований. Одним из основных является обеспечение передачи требуемого количества тепла от одной среды к другой с получением необходимых конечных температур при наибольшей интенсивности теплообмена и наименьшими металлоемкостью и габаритами.

### Результаты исследования

Основные методы интенсификации теплообмена сводятся к увеличению поверхности теплообмена, гидродинамическому, механическому, электрическому или магнитному воздействию на поток. На сегодняшний день наиболее технологичным и эффективным методом интенсификации процесса теплообмена являются профилированные поверхности. Суть метода заключается в нанесении рельефов различной формы, например выемок или вы-

ступов, а также это могут быть элементы проволочных или прочих вставок (рис. 1, 2).

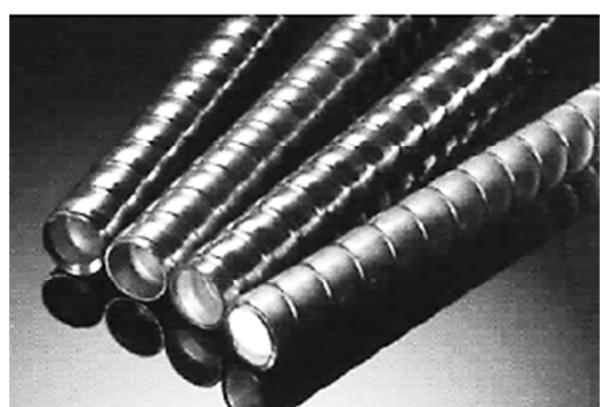


Рис. 1. Профилированные трубы со спиральной или кольцевой накаткой

Fig. 1. Profiled pipes with spiral or annular knurling

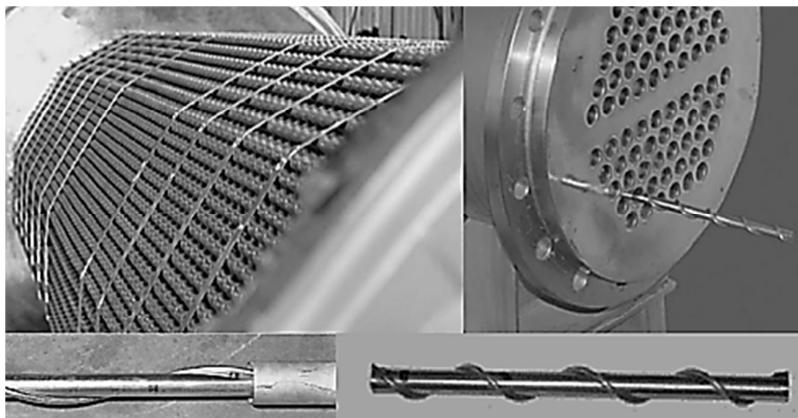


Рис. 2. Шнековые интенсификаторы и внешняя проволочная навивка на трубах теплообменных аппаратов

Fig. 2. Screw intensifiers and external wire winding on pipes of heat exchangers

В настоящее время одним из самых простых и эффективных способов интенсификации теплоотдачи при турбулентной конвекции является использование профилированных поверхностей [1–3]. Наличие этих элементов способствует разрушению или возмущению вязкого подслоя турбулентного пограничного слоя потока, что приводит к повышению теплоотдачи. Существует большое количество возможных геометрических конфигураций элементов профилирования поверхности [4, 5].

Сравнительный анализ теплообменных характе-

ристик гладкой и профилированной трубок теплообменника производился с помощью визуализации потоков сред в программном комплексе Kompas Flow Vision. Расчетная сетка проточной части теплообменника строилась на основе твердотельной геометрической модели, имитирующей объем, внутри которого происходит исследуемое течение. Значение начальной расчетной сетки задавалось по 20 ячеек на каждую плоскость, с шагом по времени до 15 секунд (рис. 3).

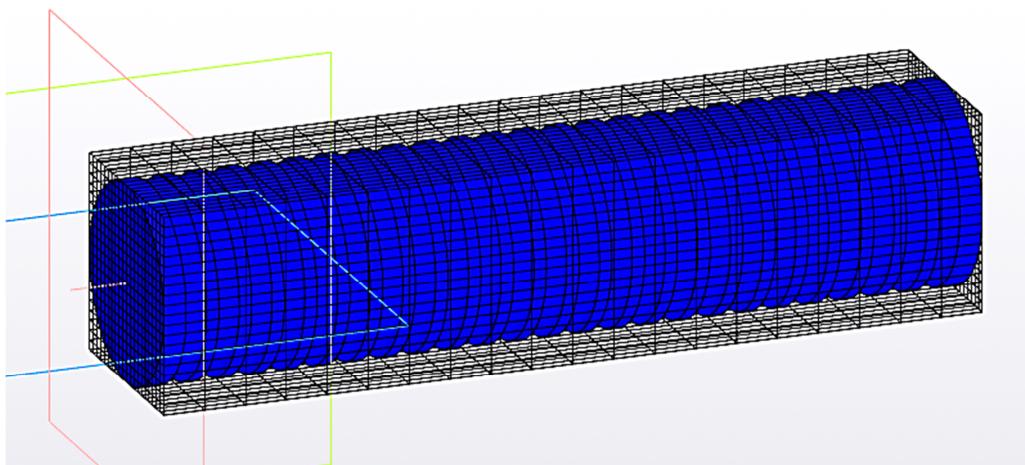


Рис. 3. Расчетная сетка трубы с кольцевым профилированием

Fig. 3. The design grid of the tube with annular profiling

Технологические параметры заданы на основе анализа технологической схемы подготовки нефти на месторождениях Северного Каспия [6–8]. Температура холодного агента на входе в трубный пучок теплообменного аппарата составляет 40 °C, массовый расход – 0,3 кг/м<sup>2</sup>·с. Горячий агент имеет температуру на входе в межтрубное пространство 80 °C.

В качестве контролируемых параметров выступали средняя температура в сечении расчетной сетки (по центру трубок), средняя температура на поверхности теплообмена, скорость распределения потока агента. Результаты распределения скорости потока агента в гладких трубках представлены на рис. 4, в трубках с кольцевым профилированием – на рис. 5.

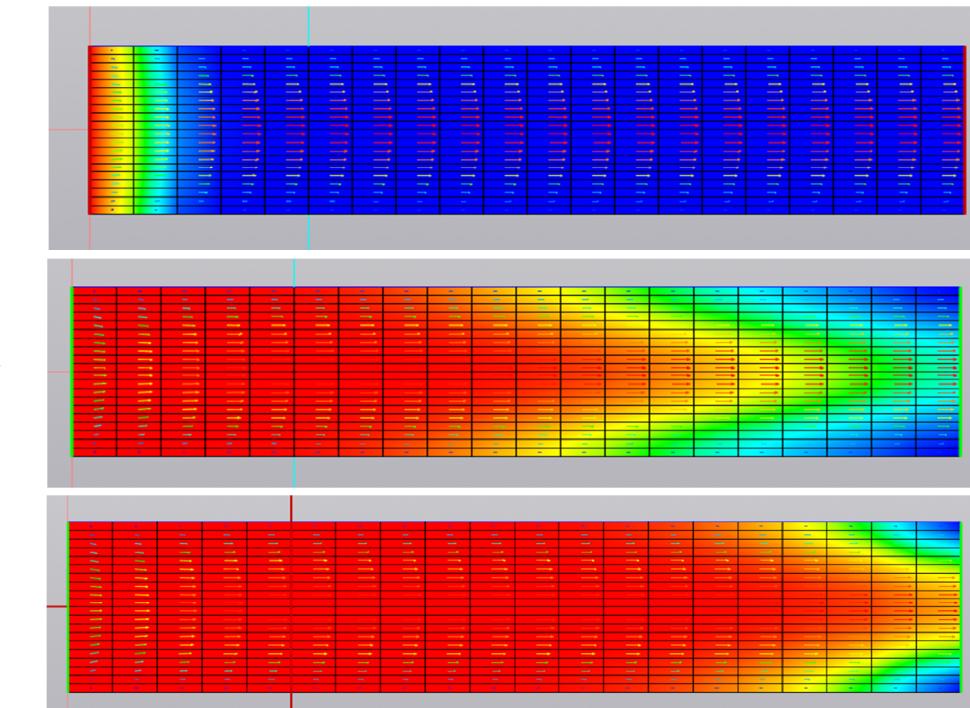


Рис. 4. Распределения скоростей потока жидкости в момент времени в гладкой трубке:  
 а – в начальный момент времени; б – через 120 с; в – через 300 с

Fig. 4. Distribution of fluid flow rates at a time in a smooth tube:  
 a – at the initial time; б – after 120 s; в – after 300 s

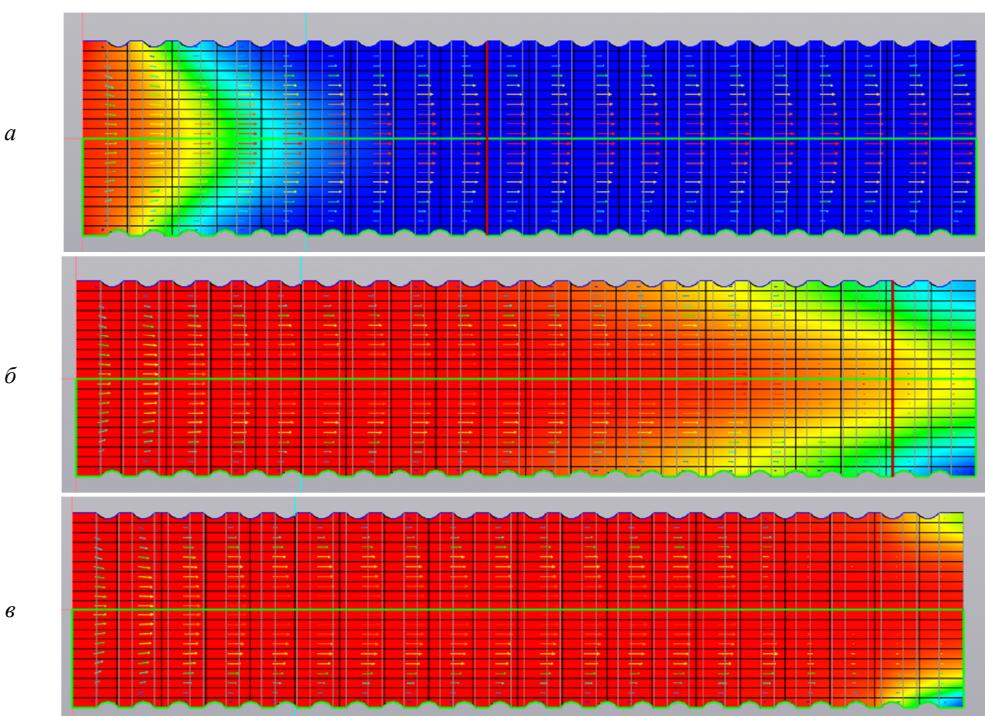


Рис. 5. Распределения скоростей потока жидкости в момент времени в трубке кольцевым профилированием:  
 а – в начальный момент времени; б – через 120 с; в – через 300 с

Fig. 5. Distribution of fluid flow rates at a time in the tube by annular profiling:  
 a – at the initial moment of time; б – after 120 s; в – after 300 s

Как видно из рис. 4 и 5, профилирование поверхности увеличивает скорость потока жидкости в трубке теплообменника. Это происходит за счет дополнительной турбулизации пристенных слоев жидкости, что увеличивает коэффициент переноса

тепла на стенку и, следовательно, скорость потока.

На рис. 6 и 7 представлены поля распределения средних значений температур в потоке трубного пространства гладкой трубы и с кольцевым профилированием.

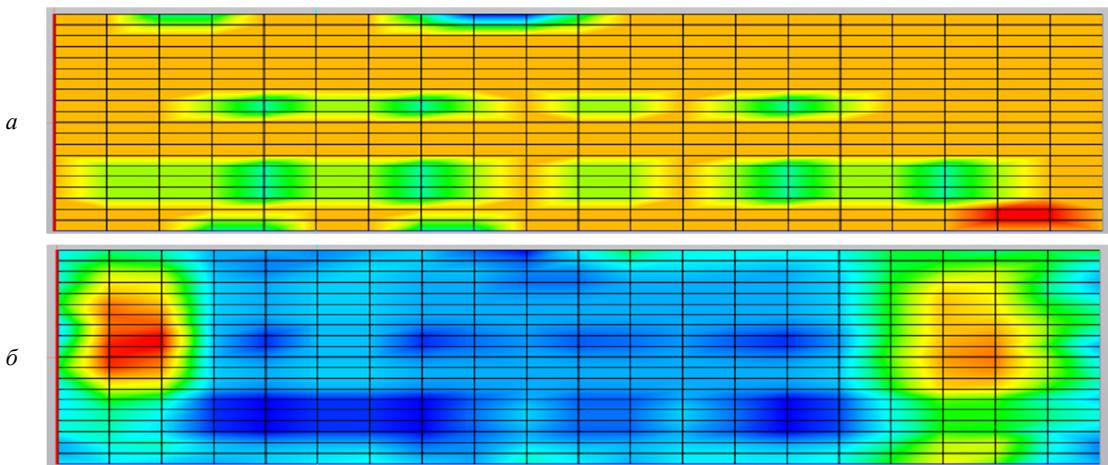


Рис. 6. Поля распределения средних значений температур в гладкой трубке;  
*a* – через 120 с; *б* – через 300 с

Fig. 6. Distribution fields of average temperatures in a smooth tube;  
*a* – after 120 с; *б* – after 300 с

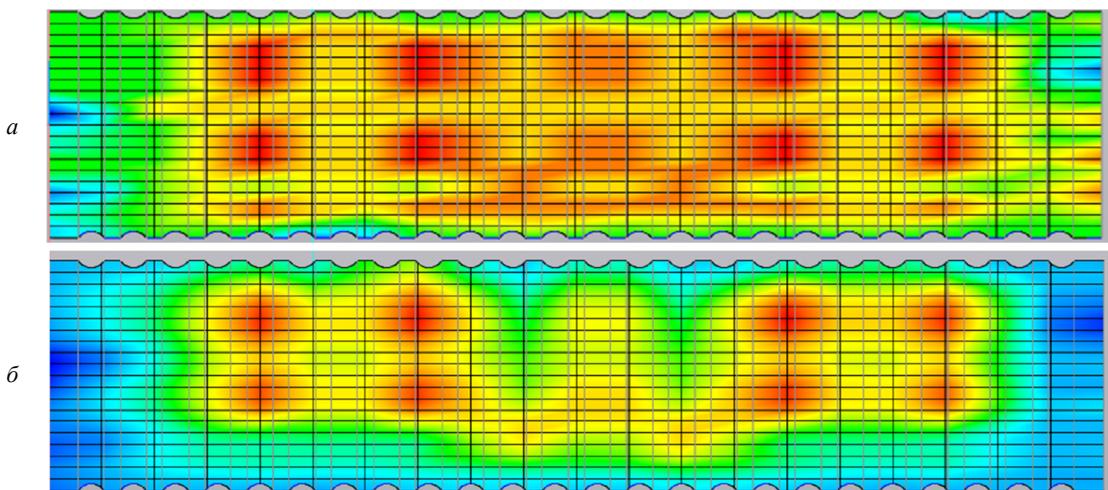


Рис. 7. Поля распределения средних значений температур в трубке кольцевым профилированием:  
*а* – через 120 с; *б* – через 300 с

Fig. 7. Fields of distribution of average temperatures in the tube by annular profiling:  
*a* – after 120 с; *б* – after 300 с

Профилирование приводит к уменьшению толщины пограничного слоя за счет пульсаций скорости в ламинарном пограничном слое на поверхности трубы, что влияет на изменение коэффициента теплоотдачи в сравнении с гладкой трубкой. На поверхности теплообмена температура увеличивается значительно быстрее в трубке с кольцевым профи-

лем. Из рис. 6, 7 видно, что теплообмен в трубке с кольцевым профилем и на ее поверхности происходит интенсивнее.

При моделировании процессов в среде Kompas Flow проводилось варьирование геометрических параметров кольцевых выступов. Основные геометрические параметры представлены на рис. 8.

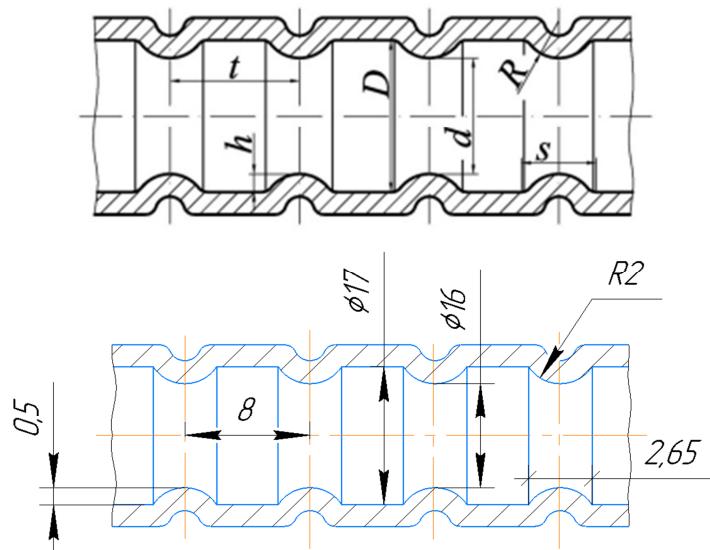


Рис. 8. Продольный разрез теплообменной трубы с кольцевыми выступами:  
 $D$  – внутренний диаметр трубы;  $h$  – высота выступов;  $d$  – диаметр отверстия диафрагм (по вершинам выступов);  
 $t$  – расстояния между диафрагмами (выступами);  $s$  – ширина диафрагм (выступов);  
 $R$  – радиус закругления диафрагм (выступов)

Fig. 8. Longitudinal section of a heat exchange pipe with annular projections:  
 $D$  is the inner diameter of the pipe;  $h$  is the height of the projections;  $d$  is the diameter  
of the orifice of the diaphragms (along the tops of the projections);  
 $t$  is the distance between the diaphragms (projections);  $s$  is the width of the diaphragms (projections);  
 $R$  is the radius of rounding of the diaphragms (projections)

Значительное влияние на теплоотдачу и гидросопротивление труб с кольцевыми выступами оказывают высота и форма выступа, а также шаг кольцевых выступов. Выявлено, что увеличение коэффициента теплоотдачи в 1,2–2,2 раза, а прирост гидросопротивления в 1,05–10,5 раза, по сравнению с гладкой трубой происходит в трубе с применением профилирования. Также для достижения значительных эффектов от искусственной турбулизации потока в области переходных чисел Рейнольдса следует использовать кольцевые выступы сравнительно боль-

шой высоты. Предложенные оптимальные значения безразмерных параметров выступов рекомендуются в диапазонах:  $d / D = 0,96–0,92$ ,  $t / D = 0,36–0,9$ .

Результаты исследований теплогидравлических характеристик теплообменного аппарата (рис. 9) показывают, что при использовании в качестве интенсификаторов теплообмена кольцевого профиля на внешней поверхности теплообменных труб происходит увеличения потерь давления по сравнению с гладкими трубами до 17 %.

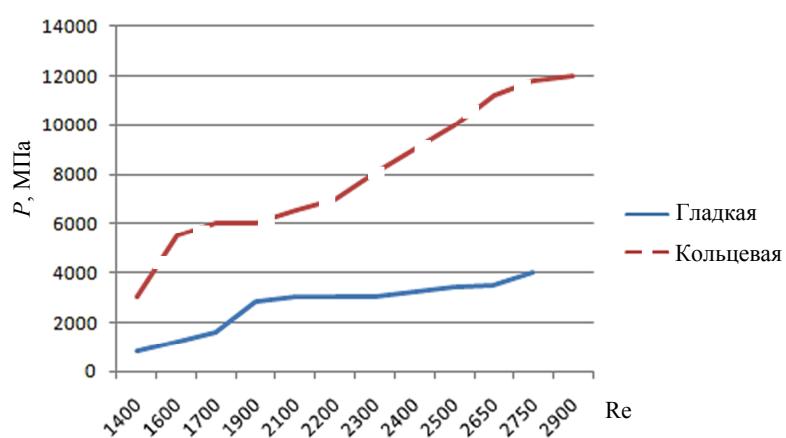


Рис. 9. Зависимость потерь давления от числа Рейнольдса

Fig. 9. Dependence of pressure losses on the Reynolds number

## **Заключение**

Увеличение потерь давления при теплообмене может иметь как положительные, так и отрицательные последствия в зависимости от конкретной ситуации. С одной стороны, увеличение потерь давления приводит к возрастанию теплообмена, с другой – рост давления и изменение скорости теплоносителя в системах теплообмена ведет к преждевременному износу всего оборудования (запорной арматуры, насосов, труб и т. д.).

Кольцевое профилирование увеличивает теплообмен в межтрубном пространстве примерно в 2 раза за счет турбулизации потока в пограничном слое.

Для профилирования на наружную поверхность трубы накаткой наносятся периодически расположенные кольцевые канавки. При этом на внутренней стороне трубы образуются кольцевые диафрагмы с плавной конфигурацией. Кольцевые диафрагмы и канавки турбулизируют поток в пристенном слое и обеспечивают интенсификацию теплообмена снаружи и внутри труб. При этом не увеличивается их наружный диаметр, что позволяет использовать данные трубы в тесных пучках и не менять существующей технологии сборки теплообменных аппаратов.

## **Список источников**

1. Бродов Ю. М., Аронсон К. Э., Рябчиков А. Ю., Блинков С. Н., Купцов В. К., Мурманский И. Б. Повышение эффективности теплообменных аппаратов паротурбинных установок за счет применения профильных витых трубок // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 7-8. С. 72–78.
2. Белозерцеви В. Н. др. Интенсификация теплообмена: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2018. 205 с.
3. Шаповалов А. В., Кидун Н. М., Никулина Т. Н. Способы интенсификации теплообмена в теплопередающих устройствах // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2021. № 4 (87). С. 67–76.
4. Яркаев М. З. Теплогидравлическая эффективность профилированных каналов различной формы при ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения теплоносителей: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2015. 149 с.
5. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олимпиев В. В. и др. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Интенсификация теплообмена: моногр. / под общ. ред. Ю. Ф. Гортышова. Казань: Центр иннов. технологий, 2009. 530 с.
6. Офиц. сайт компании «ЛУКОЙЛ». URL: <https://lukoil.ru/> (дата обращения: 01.09.2025).
7. Гужель Ю. А. Промысловая подготовка нефти и газа: учеб. пособие. Благовещенск: АмГУ, 2021. 115 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/345095> (дата обращения: 01.09.2025).
8. Лутошкин Г. С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды: учеб. для вузов. 3-е изд., стер. М.: Альянс, 2005. 319 с.

## **References**

1. Brodov Ju. M., Aronson K. Je., Rjabchikov A. Ju., Blinkov S. N., Kupcov V. K., Murmanskiy I. B. Povyshenie jeffektivnosti teploobmennyyh apparatov paroturbinnyyh ustalovok za schet primenenija profil'nyh vityh trubok [Increasing the efficiency of heat exchangers in steam turbine installations through the use of profile tubes]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki*, 2016, no. 7-8, pp. 72-78.
2. Belozercevi V. N. dr. *Intensifikacija teploobmena: uchebnoe posobie* [Heat exchange intensification: a study guide]. Samara, Izd-vo Samar. un-ta, 2018. 205 p.
3. Shapovalov A. V., Kidun N. M., Nikulina T. N. Sposoby intensifikacii teploobmena v teploperedajushhih ustrojstvah [Methods of heat transfer intensification in heat transfer devices]. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. P. O. Suhogo*, 2021, no. 4 (87), pp. 67-76.
4. Jarkaev M. Z. *Teplogidravlicheskaja jeffektivnost' profilirovannyh kanalov razlichnoj formy pri laminarnom, perehodnom i turbulentnom rezhimah techenija teplonositelej: dis. ... kand. tehn. nauk* [Thermohydraulic efficiency of profiled channels of various shapes in laminar, transient and turbulent flow modes of coolants: dissertation of the Candidate of Technical Sciences]. Kazan', 2015. 149 p.
5. Gortyshov Ju. F., Popov I. A., Olimpiev V. V. i dr. *Teplogidravlicheskaja jeffektivnost' perspektivnyh sposobov intensifikacii teplootdachi v kanalah teploobmennogo oborudovaniya. Intensifikacija teploobmena: monografija* [Thermohydraulic efficiency of promising methods of heat transfer intensification in channels of heat exchange equipment. Intensification of heat exchange: monograph] / pod obshhej redakcijej Ju. F. Gortyshova. Kazan', Centr innovacionnyh tehnologij, 2009. 530 p.
6. Oficial'nyj sajt kompanii «LUKOIL» [The official website of the LUKOIL company]. Available at: <https://lukoil.ru/> (accessed: 01.09.2025).
7. Guzhel' Ju. A. *Promyslovaja podgotovka nefti i gaza: uchebnoe posobie* [Field preparation of oil and gas: a training manual]. Blagoveshchensk, AmGU, 2021. 115 p. Available at: <https://e.lanbook.com/book/345095> (accessed: 01.09.2025).
8. Lutoshkin G. S. *Sbor i podgotovka nefti, gaza i vody: uchebnik dlja vuzov* [Collection and preparation of oil, gas and water textbook for universities]. 3-e izd., ster. Moscow, Al'jans, 2005. 319 p.

**Информация об авторах / Information about the authors**

**Эльвира Рафаэлевна Теличкина** – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; elkarneeva@yandex.ru

**Наталья Павловна Мемедейкина** – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой технологических машин и оборудования; Астраханский государственный технический университет; zolinatashka@mail.ru

**Elvira R. Telichkina** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; elkarneeva@yandex.ru

**Natalia P. Memedeikina** – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Technological Machines and Equipment; Astrakhan State Technical University; zolinatashka@mail.ru

