ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

EFFICIENCY OF TUBE-IN-TUBE HEAT EXCHANGER

А.М. Файрушин
Airat M. Fairushin

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

А.С. Романчук
Anastasia S. Romanchuk

Уфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская Федерация

Ufa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Рассматриваются актуальные вопросы повышения эффективности теплообмена в теплообменных аппаратах.

Предполагается, что применение ультразвуковых колебаний в теплообменных аппаратах поможет повысить эффективность теплообмена, а также позволит уменьшить количество отложений и накипи в межтрубном пространстве.

Ультразвуковая очистка как способ очистки поверхности твёрдых тел в моющих жидкостях, при котором в жидкость тем или иным способом вводятся ультразвуковые колебания, является известным технологическим приемом. Применение ультразвука обычно значительно ускоряет процесс очистки и повышает его качество. При этом удаётся заменить огнеопасные и токсичные растворители на более безопасные моющие вещества без потери качества очистки.

Очистка происходит за счёт совместного действия разных нелинейных эффектов, возникающих в жидкости под действием мощных ультразвуковых колебаний. Эти эффекты — кавитация, акустические течения, звуковое давление, звукокапиллярный эффект, из которых кавитация играет решающую роль. Кавитационные пузырьки, пульсируя и схлопываясь вблизи загрязнений, разрушают их. Этот эффект известен как кавитационная эрозия.

Как известно, ультразвуковое воздействие приводит к снижению вязкости среды и, соответственно, снижению гидравлического сопротивления, повышению скорости течения, что позволяет использовать в межтрубном пространстве теплообменников более вязкие среды.

Также возможно повышение теплоотдачи за счёт внутреннего трения молекул вещества в ультразвуковом поле. Прохождение ультразвука в средах сопровождается их нагреванием вследствие превращения акустической энергии в тепловую в результате поглощения ультразвука. Тепловой эффект неразрывно связан с механическим действием ультразвука, так как одной из возможностей теплообразования является превращение механической энергии в тепловую в результате поглощения.

В модуле CFX программного комплекса ANSYS было проведено моделирование теплообмена с изменением вязкости, которое обуславливается воздействием ультразвука. Результаты расчетов позволили сделать выводы о положительном влиянии ультразвуковых колебаний среды на теплообмен.

Ключевые слова

теплообменный аппарат,
труба в трубе,
ультразвуковые колебания,
очистка, вязкость,
моделирование

Actual problems of heat exchangers efficiency are considered.

It is assumed that the use of ultrasonic vibrations in heat exchangers will help to increase the of heat exchange efficiency, and to reduce the amount of deposits and spume in tube side.

Ultrasonic cleaning, as a method of cleaning the surface from solids in washing liquids, in which ultrasonic vibrations are introduced into the liquid in one way or another, is a known technological technique. Application of ultrasound usually significantly speeds up the cleaning process and improves its quality. At the same time, it is possible to replace flammable and toxic solvents with safer detergents without loss of cleaning quality.

Cleaning is due to the combined effect of various non-linear effects arising in the liquid under the influence of powerful ultrasonic vibrations. These effects are cavitation, acoustic currents, sound pressure, sound-capillary effect, among which cavitation plays a decisive role. Pulsating and collapsing near contaminants cavitation bubbles destroy them. This effect is known as cavitation erosion.

As is known, ultrasonic action leads to a decrease in the viscosity of the medium and, correspondingly, a decrease in the hydraulic resistance, an increase in the flow velocity, which makes it possible to use more viscous media in tube side of heat exchangers.

It is also possible to increase the heat transfer due to the internal friction of the molecules of the substance in the ultrasonic field. The passage of ultrasound in media is accompanied by their heating due to the conversion of acoustic energy into thermal energy as a result of ultrasound absorption. The thermal effect is inextricably linked with the mechanical action of ultrasound, since one of the possibilities of heat formation is the conversion of mechanical energy into thermal energy as a result of absorption. In the CFX module of the ANSYS software complex, modeling of heat exchange with a change in viscosity was carried out, which is caused by ultrasound effect. The calculations results draw conclusions about the positive effect of ultrasonic oscillations of the medium on heat transfer.

Key words

heat exchanger,
tube-in-tube, ultrasonic vibrations,
clearing, viscosity, modeling

На сегодняшний день широкое применение в промышленности нашли теплообменные аппараты различных типов. Они являются неотъемлемой частью большинства технологических процессов и составляют многочисленную группу теплосилового оборудования, занимая значительные производственные площади и превышая зачастую 50 % стоимости общей комплектации завода.

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов является актуальной проблемой на сегодняшний день. Касательно теплообменных аппаратов данная проблема решается путем увеличения эффективности теплообменных поверхностей, применением современных подходов к проектированию теплообменных аппаратов и созданием новых технологий производства [1].

Среди различных методов наиболее универсальным способом повышения коэффициента теплоотдачи является создание пульсаций потока. Повышение эффективности теплообмена за счет наложения на поток теплоносителя низкочастотных пульсаций рассмотрено авторами в работе [2].

Накипь, отложения и ржавчина ведут к снижению тепловой производительности технологического оборудования, увеличению гидравлического сопротивления в трубах и потере качества конечного продукта, поэтому трубы и трубные пучки теплообменников необходимо периодически очищать. В теплообменных аппаратах типа «труба в трубе» отсутствует возможность механической очистки межтрубного пространства, в связи с чем предъявляются высокие требования к чистоте продукта, направляемого в межтрубное пространство.

Исходя из этого предполагается, что применение ультразвуковых колебаний в теплообменных аппаратах поможет повысить эффективность теплообмена, а также позволит уменьшить количество отложений и накипи в межтрубном пространстве.

Ультразвуковая очистка как способ очистки поверхности твёрдых тел в моющих жидкостях, при котором в жидкость тем или иным способом вводятся ультразвуковые колебания, известна уже давно. Касательно теплообменного оборудования применение данной техно-

логии описано в документе [3] и авторами в работах [4, 5].

При этом в большинстве случаев удаётся исключить пожароопасные, токсичные и дорогие органические растворители и использовать исключительно водные растворы технических моющих средств. Причина ускорения

очистки в кавитации, при которой в жидкости образуются мельчайшие газовые пузырьки. Эти пузырьки лопаются (взрываются) и создают мощные гидротоки, которые практически полностью вымывают загрязнения (рисунк 1).

Рисунок 1. Схема отслоения пленки загрязнения: образование пузырька у поверхности под пленкой (а); отрыв кусочка пленки от поверхности при пульсации пузырька (б)

Наиболее широко используемые частоты для промышленной очистки находятся в интервале между 20 и 50 кГц. Оптимальная интенсивность ультразвуковых колебаний, используемых при очистке, составляет 3–5 Вт/см² для водных растворов и 1–3 Вт/см² для органических растворителей.

Известно, что специфические воздействия ультразвуковых колебаний являются благоприятными, т. к. приводят к снижению вязкости, что, в свою очередь, также улучшает теплообмен.

По данным исследований авторов [6–8], ультразвуковое воздействие способно изменить вязкость нефти в среднем в 2,8 раза при обработке её в акустическом поле с частотой 24 кГц и интенсивностью излучения 10 Вт/см² в течение 8 мин.

На сегодняшний день в условиях производства не используются теплообменные аппараты с сопутствующим ультразвуковым воздействием среды в межтрубном пространстве. Также отсутствуют исследовательские работы в этом направлении, что, безусловно, негативно сказывается на внедрении и практическом использовании подобных теплообменных аппаратов.

ANSYS — это программный пакет конечно-элементного анализа, решающий задачи в различных областях инженерной деятельности (прочность конструкций, термодинамика, механика жидкостей и газов, электромагнетизм), включая связанные многодисциплинарные задачи.

ANSYS CFX является высокопроизводительным инструментом для вычислительной гидродинамики, обеспечивающим надёжное и быстрое решение широкого круга задач, связанных с течениями жидкостей и газов.

Для определения влияния ультразвукового воздействия среды на теплообмен были произведены расчеты в программном комплексе ANSYS модуле CFX теплообменного аппарата «труба в трубе» длиной $L = 200$ мм, наружным диаметром внутренней трубы $d = 25$ мм, внутренним диаметром наружной трубы $D = 49$ мм. Построена сетка конечных элементов для межтрубного пространства методом Sweep. На границе теплообмена построены призматические слои (рисунок 2). Для упрощения расчетов действие ультразвука задавали путем снижения вязкости среды, находящейся в поле ультразвуковых колебаний.

Задана нефть со следующими свойствами: плотность — 890 кг/м³, теплоемкость — $1913,37 \cdot 10^3$ Дж/кг · К, динамическая вязкость — 0,005 Па · с, теплопроводность — 0,13133 Вт/м · К.

Проведен стационарный расчет для нефти со стандартной вязкостью и для нефти с измененной вязкостью в 2,8 раза. Подобие подобрано по скорости и по критерию Рейнольдса. Для данного расчета выбрана SST модель турбулентности [9].

Для первого расчета заданы следующие граничные условия:

Рисунок 2. Сетка конечных элементов межтрубного пространства

— вход нефти с динамической вязкостью $0,005 \text{ Па} \cdot \text{с}$ (Inlet) со скоростью $v = 0,104 \text{ м/с}$, $T = 10^\circ \text{C}$;

— выход нефти (Outlet) при давлении $P = 0 \text{ Па}$;

— теплопередающая стенка (Wall) с температурой $T = 90^\circ \text{C}$;

— адиабатическая стенка (Wallad).

Для второго расчета с подобием по скорости заданы следующие граничные условия:

— вход нефти с динамической вязкостью $0,00178571 \text{ Па} \cdot \text{с}$ (Inlet) со скоростью $v = 0,104 \text{ м/с}$, $T = 10^\circ \text{C}$;

— выход нефти (Outlet) при давлении $P = 0 \text{ Па}$;

— теплопередающая стенка (Wall) с температурой $T = 90^\circ \text{C}$;

— адиабатическая стенка (Wallad).

Для третьего расчета с подобием по Рейнольдсу заданы следующие граничные условия:

— вход нефти с динамической вязкостью $0,00178571 \text{ Па} \cdot \text{с}$ (Inlet) со скоростью $v = 0,037156 \text{ м/с}$, $T = 10^\circ \text{C}$;

— выход нефти (Outlet) при давлении $P = 0 \text{ Па}$;

— теплопередающая стенка (Wall) с температурой $T = 90^\circ \text{C}$;

— адиабатическая стенка (Wallad) (рисунок 3).

Для оценки расчета модели заданы следующие точки мониторинга:

— температура воды на выходе (Temp) по формуле $\text{areaAve(Temperature)}@Outlet$;

— скорость на входе (VelInl) по формуле $\text{areaAve(Velocity)}@Inlet$.

В таблице 1 представлены введенные вязкость и скорость, а также технологические параметры, полученные в результате расчета.

Рисунок 3. Граничные условия

Таблица 1. Технологические параметры расчетной модели

Показатель	Стандартная вязкость	Измененная вязкость в 2,8 раза, подобие по скорости	Измененная вязкость в 2,8 раза, подобие по Рейнольдсу
Вязкость μ , $\text{Па} \cdot \text{с}$	0,005	0,00178571	0,00178571
Скорость v , м/с	0,104	0,104	0,037156
Рейнольдс Re	500	1 541,034	500
Температура на выходе $T_{\text{вых}}$, $^\circ \text{C}$	283,164	283,161	283,177
	10,164	10,161	10,177
Коэффициент теплоотдачи α , $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{K}$	1 103,72	1 479,83	786,802
Тепловой поток q , Вт/м^2	88 007,1	118 147	62 529,9
Потери давления Δp , Па	6,9423	3,35568	0,88128

На рисунке 4 представлены области прогрева жидкости в рассчитываемых моделях.

Из результатов расчета видно, что в модели с уменьшенной вязкостью область прогрева жидкости больше.

На рисунке 5 представлен график изменения коэффициента теплоотдачи вдоль длины трубы для нефти со стандартной вязкостью и для нефти с измененной вязкостью и подобием по скорости.

Рисунок 4. Области прогрева жидкости: для нефти со стандартной вязкостью (а); для нефти с измененной вязкостью (б)

Рисунок 5. Коэффициент теплоотдачи от поверхности труб

Как видно из графика, теплоотдача при уменьшении вязкости нефти увеличивается на 20–22 %, что дает основание предполагать

возможность использования ультразвуковых колебаний в теплообменных аппаратах с целью повышения эффективности теплообмена.

Выводы

В данной работе предложено применение ультразвуковых колебаний в теплообменных аппаратах типа «труба в трубе» с целью повышения эффективности теплообмена и уменьшения отложений на поверхности труб. В программном комплексе ANSYS модуле CFX было проведено моделирование теплообмена с изменением вязкости.

Результаты моделирования показывают, что ультразвуковые колебания положительно влияют на теплообмен. В частности, воздействия ультразвуковых колебаний приводят к снижению вязкости, что, в свою очередь, увеличивает область прогрева жидкости, а в случае подбора по скорости приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Четверткова О.В., Ризванов Р.Г., Файрушин А.М. Применение дополнительных перегородок для повышения эффективности кожухотрубчатых теплообменников // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2017. № 3. С. 67–83.

2. Хайбуллина А.И., Ильин В.К. Экспериментальное исследование внешней теплоотдачи при поперечном обтекании коридорного пучка труб при $Re \leq 500$ с наложением на поток низкочастотных несимметричных пульсаций // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. 2014. № 1-2. С. 11–19.

3. РД 153-34.1-37.410-00. Методические указания по безреагентным способам очистки теплообменного оборудования от отложений. Руководящий документ для тепловых станций и котельных. М.: АООТ «ВТИ», 2000. 24 с.

4. Волк Г.М., Галутин В.З. Исследование эффективности применения ультразвуковой технологии предотвращения накипобразования в деаэраторе атмосферного давления // Энергетик. 1999. № 5. С. 31–32.

5. Волк Г.М., Галутин В.З. Об эффективности ультразвуковой защиты подогревателей МВН от накипи // Энергетик. 1999. № 8. С. 21–22.

6. Волкова Г.И., Прозорова И.В., Юдина Н.В., Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Ануфриев Р.В. Ультразвуковая обработка нефтей для улучшения их вязкостно-температурных характеристик // Нефтепереработка и нефтехимия. 2012. № 2. С. 3–6.

7. Евдокимов И.Н., Елисеев Н.Ю., Фесан А.А. Изменение реологических свойств высоковязкой структурированной нефти при ультразвуковой обработке // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2014. № 6. С. 146315-1-46315-5.

8. Ануфриев Р.В., Волкова Г.И. Влияние ультразвука на структурно-механические свойства нефтей и процесс осадкообразования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 10. С. 50–58.

9. Москвичев А.В. Применимость моделей турбулентности, реализованных в ANSYS CFX, для исследования газодинамики в щелевом канале ТНА ЖРД // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 5–1. С. 82–85.

and-Tube Heat Exchanger]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Neftegazovoe delo» — Electronic Scientific Journal «Oil and Gas Business»*, 2017, No. 3, pp. 67-83. [in Russian].

2. Khaibullina A.I., Il'in V.K. Eksperimental'noe issledovanie vneshnei teplootdachi pri poperechnom obtekanii koridornogo puchka trub pri $Re \leq 500$ s nalozheniem na potok nizkochastotnykh nesimmetrichnykh pul'satsii [Experimental Study of the External Heat Transfer in the Case of Transverse Flow Around a Corridor Bundle of Tubes at $Re \leq 500$ C by Applying Low-Frequency Asymmetric Pulsations to the Flow]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki — Proceedings of Higher Educational Establishments. Energy Problem*, 2014, No. 1-2, pp. 11-19. [in Russian].

3. RD 153-34.1-37.410-00. Metodicheskie ukazaniya po bezreagentnym sposobam ochistki teploobmennogo oborudovaniya ot otlozhenii. Rukovodyashchii dokument dlya teplovykh stantsii i kotel'nykh [RD 153-34.1-37.410-00. Methodical Instructions for Non-Reagent Methods of Cleaning Heat-Exchange Equipment from Deposits. Guidance Document for Heating Plants and Boiler Rooms]. Moscow, 2000. 24 p. [in Russian].

4. Volk G.M., Galutin V.Z. Issledovanie effektivnosti primeneniya ul'trazvukovoi tekhnologii predotvrashcheniya nakipeobrazovaniya v deaeratore atmosfernogo davleniya [Investigation of Effectiveness of Application of Ultrasonic Technology to Prevent Scale Formation in an Air Pressure Deaerator]. *Energetik — Energetik*, 1999, No. 5, pp. 31-32. [in Russian].

5. Volk G.M., Galutin V.Z. Ob effektivnosti ul'trazvukovoi zashchity podogrevatelei MVN ot nakipi [On the Effectiveness of Ultrasonic Protection of MVN Heaters from Deposits]. *Energetik — Energetik*, 1999, No. 8, pp. 21-22. [in Russian].

6. Volkova G.I., Prozorova I.V., Yudina N.V., Mullakaev M.S., Abramov V.O., Anufriev R.V. Ul'trazvukovaya obrabotka neftei dlya uluchsheniya ikh vyazkostno-temperaturnykh kharakteristik [Ultrasonic Treatment of Oils for Improvement of Viscosity-Temperature Characteristics]. *Neftepererabotka i neftekhimiya — Oil Refining and Petrochemistry*, 2012, No. 2, pp. 3-6. [in Russian].

7. Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu., Fesan A.A. Izmenenie reologicheskikh svoistv vysokovyazkoi strukturirovannoi nefiti pri ul'trazvukovoi obrabotke [The Change of Rheological Properties of High Viscosity of The structured oil when Ultrasonic Processing]. *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta — Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University*, 2014, No. 6. С. 146315-1– 46315-5. [in Russian].

REFERENCES

1. Chetvertkova O.V., Rizvanov R.G., Fairushin A.M. Primenenie dopolnitel'nykh peregorodok dlya povysheniya effektivnosti kozhukhotrubchatykh teploobmennikov [The Use of Additional Baffles to Improve Efficiency of Shell-

8. Anufriev R.V., Volkova G.I. Vliyanie ul'trazvuka na strukturno-mekhanicheskie svoistva neftei i protsess osadkoobrazovaniya [Influence of Ultrasonic Treatment on Structural-Mechanical Properties of Oil and Sedimentation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, Vol. 327, No. 10, pp. 50-58. [in Russian].

9. Moskvichev A.V. Primenimost' modelei turbulentsnosti, realizovannykh v ANSYS CFX, dlya issledovaniya gazodinamiki v shchelevom kanale TNA ZhRD [Applicability of Models of the Turbulence, Realized in ANSYS CFX, for Gas Dynamics Research in the Slit Channels TNA LRE]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2013, Vol. 9, No. 5-1, pp. 82-85. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Файрушин Айрат Миннуллович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Airat M. Fairushin, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of Petroleum Apparatus Construction Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: tna_ugntu@mail.ru

Романчук Анастасия Сергеевна, магистрант, кафедра «Технология нефтяного аппаратостроения», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Anastasia S. Romanchuk, Undergraduate Student of Petroleum Apparatus Construction Technology Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: rushaniya_romanchuk@mail.ru