

УДК 66.045.1:532.5

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В ТРУБЧАТОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ СТЕРЖНЕВЫХ ВСТАВОК

Ауесбаев А.У., Адизов Б.З.

*Каракалтакский государственный университет, г.Нукус.**Институт общей и неорганической химии АН РУз, г.Ташкент. e-mail:*

1. Введение. Теплообменные аппараты являются одним из основных видов оборудования нефтеперерабатывающей, газоперерабатывающей, химической и энергетической промышленности. Эффективность их работы во многом определяет уровень энергопотребления технологических процессов, производительность установок и эксплуатационные затраты [1, 2].

Одной из наиболее распространённых проблем эксплуатации трубчатых теплообменников является снижение интенсивности теплообмена при движении рабочих сред в ламинарном и переходном режимах течения. При таких условиях наблюдается формирование устойчивого пограничного слоя, уменьшается интенсивность перемешивания потока и ухудшается использование поверхности теплообмена [3, 4].

Для повышения эффективности теплообменных процессов широко применяются методы интенсификации теплоотдачи, основанные на изменении структуры потока внутри теплообменных каналов. К наиболее распространённым способам относятся использование витых лент, проволоочных спиралей, оребрённых поверхностей и различных турбулизирующих элементов [5–7]. Указанные методы позволяют увеличить скорость переноса тепла за счёт формирования вторичных течений и разрушения теплового пограничного слоя.

Ряд исследователей изучал влияние различных вставок на гидродинамические характеристики потока. Так, установлено, что применение витых вставок приводит к росту коэффициента теплоотдачи, однако одновременно сопровождается увеличением гидравлического сопротивления системы [8–10]. В работах [11–13] показано, что применение проволоочных спиралей обеспечивает интенсификацию течения, но может приводить к образованию загрязнений и усложнению обслуживания оборудования.

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых использованию винтовых и спиральных турбулизаторов, вопросы применения простых внутренних стержневых вставок изучены недостаточно, особенно применительно к потокам нефти и газового конденсата. Простая геометрия таких элементов может обеспечить изменение гидродинамического режима без существенного усложнения конструкции аппарата.

В связи с этим целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния внутренних стержневых вставок различного диаметра на гидродинамические режимы движения нефти и газового конденсата в трубчатом теплообменнике. В рамках исследования определены изменения скорости потока и числа Рейнольдса в зависимости от массового расхода сырья и геометрических параметров вставок.

2. Методы и материалы.

2.1. Экспериментальная установка. Экспериментальные исследования выполнены на лабораторной установке, представляющей собой горизонтальный двухтрубный теплообменник концентрического типа. Общая длина теплообменника составляла 2000 мм. Внутренний диаметр рабочей трубы составлял 20 мм, диаметр внешней трубы — 50 мм. В качестве теплоносителя использовались пары газового конденсата с температурой 120°C, подаваемые в межтрубное пространство. Исследуемые среды (нефть и газовый конденсат) перемещались внутри внутренней трубы.

Экспериментальная установка включала: центробежный насос для подачи сырья; парогенератор и систему нагрева; регулируемую арматуру; измерительные приборы для контроля температуры и давления; теплообменный аппарат с возможностью установки внутренних стержневых элементов.

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.

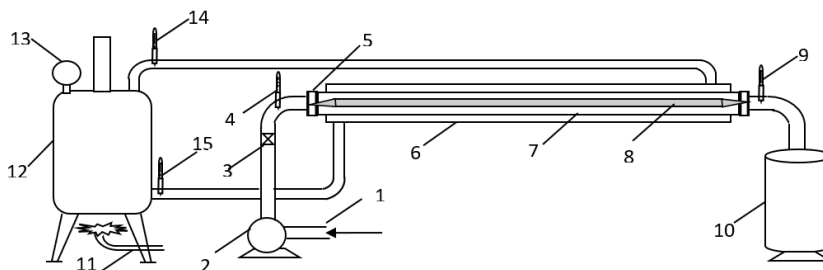


Рис. 1. Экспериментальная установка лабораторного двухтрубного теплообменника.

2.2. Исследуемые материалы и конструкция вставок. В качестве объектов исследования использовались нефть и газовый конденсат, представляющие собой типичные углеводородные среды нефтегазоперерабатывающей промышленности. Для изменения гидродинамического режима потока во внутреннюю трубу устанавливались гладкие стальные стержни диаметром: 10 мм; 12 мм; 15 мм. Длина каждого стержня составляла 2000 мм, что соответствовало полной длине экспериментального участка.

Использование стержневых элементов позволило изменять эффективное проходное сечение потока и исследовать влияние геометрических параметров на режим движения жидкости.

2.3. Методика проведения эксперимента. Эксперимент проводился в следующей последовательности: запуск системы нагрева и вывод теплоносителя на стационарный температурный режим; подача исследуемой среды через внутреннюю трубу; установка стержневой вставки требуемого диаметра; изменение массового расхода жидкости в диапазоне от 2 до 14 кг/мин; измерение параметров установившегося режима течения.

2.4. Методика расчёта гидродинамических параметров

Средняя скорость движения жидкости в гладкой трубе определялась по зависимости:

$$\omega_1 = 4G/(\pi d_{\text{вн}}^2) \quad 1)$$

где: ω — скорость потока, м/с; G — массовый расход, кг/мин; $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр трубы, м.

После установки стержневой вставки скорость потока определялась по площади кольцевого сечения:

$$\omega_2 = 4G/(\pi(d_{\text{вн}}^2 - d_{\text{стер}}^2)) \quad 2)$$

где: $d_{\text{стер}}$ — диаметр установленного стержня.

Для определения режима течения рассчитывалось число Рейнольдса:

$$Re = \omega d_{\text{экв}} / \nu \quad 3)$$

где: $d_{\text{экв}}$ — эквивалентный гидравлический диаметр; ν — кинематическая вязкость жидкости.

На основании полученных значений выполнялась классификация режимов движения: ламинарный режим: $Re < 2300$; переходный режим: $2300 \leq Re \leq 10000$; турбулентный режим: $Re > 10000$.

3. Результаты исследования и обсуждение. Для оценки влияния внутренних стержневых вставок на гидродинамические характеристики потока проведены экспериментальные исследования движения нефти и газового конденсата в двухтрубном теплообменнике при различных массовых расходах сырья.

Одним из основных параметров, определяющих характер движения жидкости, является скорость потока. Изменение скорости оказывает непосредственное влияние на интенсивность перемешивания среды, структуру пограничного слоя и условия перехода между различными гидродинамическими режимами.

Результаты определения скорости движения нефти и газового конденсата в гладкой трубе представлены в таблице 1.

Табл. 1. Зависимость скорости движения сырья от массового расхода

Массовый расход сырья G , кг/мин	Расход нефти ω , м/с	Расход газового конденсата ω , м/с
2	0,126	0,144
6	0,379	0,429
10	0,605	0,716
14	0,859	1,003

Полученные данные из табл.1. показывают, что при увеличении массового расхода от 2 до 14 кг/мин скорость движения нефти возрастает от 0,126 до 0,859 м/с, тогда как скорость газового конденсата увеличивается от 0,144 до 1,003 м/с. Более высокие значения скорости газового конденсата объясняются его меньшей вязкостью по сравнению с нефтью. Установлено, что при одинаковых расходах скорость движения газового конденсата превышает скорость движения нефти в среднем на 12–18%. После установки внутренних стержневых вставок наблюдалось дополнительное увеличение скорости движения среды вследствие уменьшения эффективного проходного сечения.

На рисунке 2 представлены зависимости скорости нефти от массового расхода при различных диаметрах стержня.

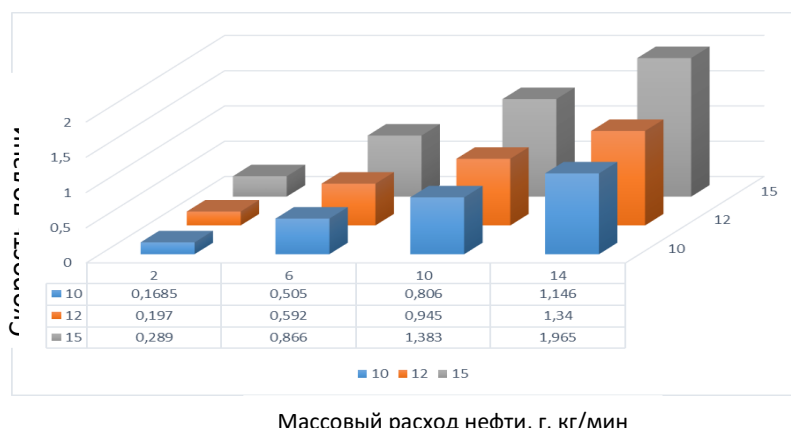


Рис.2. Зависимость скорости нефти от массового расхода при различных диаметрах стержня.

Анализ экспериментальных данных из рисунка 2 показал, что увеличение диаметра стержня сопровождается ростом локальной скорости движения жидкости в кольцевом пространстве между трубой и вставкой.

Для стержня диаметром 10 мм скорость движения возрастала до 1,146 м/с, при диаметре 12 мм достигала 1,340 м/с, а при использовании вставки диаметром 15 мм максимальное значение составило 1,965 м/с.

Аналогичная зависимость наблюдалась для газового конденсата (рисунок 4), где максимальная скорость достигла 2,293 м/с. Полученные результаты свидетельствуют о том, что уменьшение гидравлического диаметра

приводит к ускорению движения потока и создаёт предпосылки для изменения режима течения. Для количественной оценки режима движения рассчитаны значения числа Рейнольдса, представленные в таблице 2.

Табл.2. Зависимость числа Рейнольдса от массового расхода сырья.

Массовый расход G , кг/мин	Расход нефти ω , м/с	Число Рейнольдса для нефти, Re	Расход газового конденсата ω , м/с	Число Рейнольдса для газового конденсата, Re
2	0,126	649	0,144	4800
6	0,379	1953	0,429	14300
10	0,605	3118	0,716	23866
14	0,859	4427	1,003	33433

Результаты показывают, что для нефти при расходе 2 кг/мин число Рейнольдса составило $Re=649$, что соответствует ламинарному режиму течения. При увеличении расхода до 14 кг/мин значение достигло $Re=4427$, что соответствует переходному режиму.

Для газового конденсата диапазон изменения составил от $Re=4800$ до $Re=33433$, что свидетельствует о развитии турбулентном режиме практически во всём исследованном диапазоне. Для более детального анализа влияния геометрии вставок выполнен расчёт числа Рейнольдса при различных диаметрах стержней.

Табл. 4. Зависимость числа Рейнольдса от массового расхода сырья и диаметра стержня

Массовый расход G , кг/мин	Расход нефти ω , м/с	Число Рейнольдса для нефти, Re	Расход газового конденсата ω , м/с	Число Рейнольдса для газового конденсата, Re
$d_{\text{стерж}} = 10 \text{ мм}$				
2	0,1685	434	0,191	492
6	0,505	1301	0,573	1476
10	0,806	2077	0,955	2461
14	1,146	2954	1,337	3446
$d_{\text{стерж}} = 12 \text{ мм}$				
2	0,197	406	0,224	461
4	0,592	1220	0,671	1383
10	0,945	1948	1,12	2309
14	1,34	2762	1,567	3231
$d_{\text{стерж}} = 15 \text{ мм}$				
2	0,289	372	0,328	422
4	0,866	1116	0,982	1265
10	1,383	1782	1,637	2109
14	1,965	2532	2,293	2954

Установлено, что увеличение диаметра стержня сопровождается уменьшением эквивалентного диаметра канала и снижением расчётного числа Рейнольдса. Однако одновременно наблюдается рост локальных скоростей движения жидкости, что способствует интенсификации гидродинамических процессов.

Таким образом, применение внутренних стержневых вставок позволяет эффективно управлять режимом движения углеводородных потоков и создавать условия для последующей интенсификации теплообмена.

4. Заключение. По результатам проведённых экспериментальных исследований влияния внутренних стержневых вставок на гидродинамические характеристики движения нефти и газового конденсата в трубчатом теплообменнике можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что увеличение массового расхода исследуемых сред приводит к закономерному росту скорости движения потока внутри теплообменной трубы. При изменении расхода от 2 до 14 кг/мин скорость движения нефти увеличивалась от 0,126 до 0,859 м/с, а скорость газового конденсата — от 0,144 до 1,003 м/с.

2. Применение внутренних стержневых вставок диаметром 10, 12 и 15 мм изменяет геометрические характеристики канала и приводит к уменьшению эффективного проходного сечения, вследствие чего наблюдается дополнительное увеличение скорости движения среды.

3. Максимальные значения скорости потока получены при использовании стержня диаметром 15 мм. Для нефти скорость достигала 1,965 м/с, для газового конденсата — 2,293 м/с.

4. Анализ числа Рейнольдса показал, что для нефти при исходных условиях характерен преимущественно ламинарный и переходный режим течения, тогда как для газового конденсата наблюдался переход к развитому турбулентному режиму.

5. Показано, что изменение геометрии внутреннего канала посредством установки стержневых вставок позволяет эффективно управлять гидродинамическими условиями движения углеводородных потоков без существенного изменения конструкции теплообменного аппарата.

6. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации существующих теплообменных аппаратов нефтеперерабатывающих и газоперерабатывающих предприятий с целью повышения эффективности эксплуатации оборудования.

Таким образом, использование внутренних стержневых вставок является перспективным направлением совершенствования гидродинамических режимов движения рабочих сред в трубчатых теплообменниках.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dutta B.K. Heat Transfer Principles and Applications. – New Delhi, 2007. – 275–277 p.
2. Kuppan T. Handbook of Heat Transfer Design. – New York, 2000. – 1245 p.
3. Bergles A.E. Techniques to augment heat transfer // Handbook of Heat Transfer Applications. – New York: McGraw-Hill, 1985.
4. Webb R.L., Kim N.H. Principles of Enhanced Heat Transfer. – 2nd ed. – New York: Taylor & Francis Group, 2005. – 792 p.
5. Wang L., Sunden B. Performance comparison of some tube inserts // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 29, №1. – P. 45–56.
6. Chiou A., Pedro J.P. Experimental investigation of forced convection heat transfer augmentation in circular tubes using spiral inserts // ASME Journal of Heat Transfer. – 1987. – Vol. 109. – P. 300–307.
7. Viedma A., Garcia A., Viedma M. Experimental study of heat transfer enhancement with wire coil inserts in laminar-transition-turbulent regimes // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2005. – Vol. 48. – P. 4640–4651.
8. Liao Q., Xin M.D. Augmentation of convective heat transfer inside tubes with internal extended surfaces and twisted tape inserts // Chemical Engineering Journal. – 2000. – Vol. 78. – P. 95–105.
9. Naphon P., Sriromrulk P. Single-phase heat transfer and pressure drop in microfin tubes with coiled wire insert // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2006. – Vol. 33. – P. 176–183.
10. Ozceyhan V. Conjugate heat transfer and thermal stress analysis of wire coil inserted tubes // Energy Conversion and Management. – 2005. – Vol. 46. – P. 1543–1559.
11. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 578 с.
12. Хурмамов А.М., Исмаилов О.Й., Худойбердиев А.А. Гидродинамика нагрева углеводородного сырья в трубчатых теплообменниках: монография. – Ташкент: Navroz, 2019. – 110 с.
13. Исмаилов О.Й. Влияние гидродинамических режимов на эффективность нагрева жидких углеводородных потоков в трубчатых аппаратах: дисс. ... PhD по техн. наукам. – Ташкент, 2018. – 109 с.

Annotatsiya. Maqolada quvurli issiqlik almashinish qurilmasida neft va gaz kondensatining gidrodinamik harakat rejimlariga ichki sterjenli qo'shimchalarning ta'siri bo'yicha eksperimental tadqiqot natijalari keltirilgan. Tadqiqotlar ichki diametri 20 mm bo'lgan ikki quvurli issiqlik almashinish qurilmasida diametri 10, 12 va 15 mm bo'lgan silliq sterjenlar o'rnatilgan holda amalga oshirildi. Xomashyo massaviy sarfi va sterjenlarning geometrik parametrlarining oqim tezligi hamda Reynolds soniga ta'siri o'rganildi. Sterjenlar o'rnatilishi natijasida oqim kesimining kamayishi muhit harakat tezligining ortishiga va oqim rejimining o'zgarishiga olib kelishi aniqlandi. Olingan natijalar asosiy konstruksiyani o'zgartirmasdan gidrodinamik sharoitlarni boshqarish orqali issiqlik almashinish qurilmalari samaradorligini oshirish mumkinligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: quvurli issiqlik almashinish qurilmasi, gidrodinamik rejim, sterjenli qo'shimcha, Reynolds soni.

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния внутренних стержневых вставок на гидродинамические режимы движения нефти и газового конденсата в трубчатом теплообменнике. Исследования проведены в двухтрубном теплообменнике с внутренним диаметром трубы 20 мм при установке гладких стержней диаметром 10, 12 и 15 мм. Изучено влияние массового расхода сырья и геометрических параметров вставок на скорость потока и число Рейнольдса. Установлено, что уменьшение проходного сечения за счёт установки стержней приводит к увеличению скорости движения среды и изменению режима течения. Полученные результаты показывают возможность повышения эффективности работы теплообменных аппаратов за счёт управления гидродинамическими условиями без изменения основной конструкции оборудования.

Ключевые слова: трубчатый теплообменник, гидродинамический режим, стержневая вставка, число Рейнольдса.

Abstract. This article presents the results of an experimental study on the influence of internal rod inserts on the hydrodynamic flow regimes of crude oil and gas condensate in a tubular heat exchanger. The experiments were carried out in a double-pipe heat exchanger with an inner tube diameter of 20 mm using smooth rod inserts with diameters of 10, 12, and 15 mm. The effects of feed mass flow rate and insert geometric parameters on flow velocity and Reynolds number were investigated. It was found that reducing the flow cross-sectional area by installing rod inserts leads to an increase in fluid velocity and changes in the flow regime. The obtained results demonstrate the possibility of improving the efficiency of heat exchange equipment by controlling hydrodynamic conditions without modifying the main structural design.

Keywords: tubular heat exchanger, hydrodynamic regime, rod insert, Reynolds number, flow velocity.