

# ТАДҚИҚОТ ВА ИННОВАЦИЯЛАР ЖУРНАЛИ

ЖУРНАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИННОВАЦИИ | JOURNAL OF RESEARCH AND INNOVATIONS

**ИСМАИЛОВ Ойбек Юлибоевич**

*Ведущий научный сотрудник лаборатории  
«Процессы и аппараты химической технологии»  
Института общей и неорганической химии АН РУз  
д.т.н., проф. (DSc)*

**ИСАМАТОВА Джамиля Нигматуллаевна**

*Ташкентский химико-технологический институт  
начальник научного отдела, д.ф.т.н. PhD*

**БАЛТАБАЕВА Мовлюда Жаббарбергеновна**

*Базовый докторант лаборатории  
«Процессы и аппараты химической технологии»  
Института общей и неорганической химии АН РУз  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.13819719>*

## ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХТРУБЧАТЫХ АППАРАТОВ ОТ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ПОТОКА

### АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты исследования экспериментальных данных по влиянию массового расхода нефти и газового конденсата на коэффициент теплопередачи в двухтрубчатом теплообменнике. С увеличением массового расхода от 2 до 14 м/с скорость газового конденсата возрастает в 7 раз, что приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  от 194 до 921 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и варьированию коэффициента теплопередачи К от 179 до 653 Вт/(м<sup>2</sup>·К). При нагревании газового конденсата коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) повышается в 4,7 раза. Коэффициент теплоотдачи К, Вт/(м<sup>2</sup>·К) в 4,46 раза.

**Ключевые слова:** теплообменник, эффективность, коэффициент теплопередачи, коэффициент теплопередачи, скорость потока, Критерий Рейнольдса, Критерий Нуссельта, нефть, газовый конденсат, смесь, кинематическая и динамическая вязкость.

## ИККИ ҚУВУРЛИ АППАРАТНИНГ ИССИҚЛИК САМАРАДОРЛИГИНИНГ ОҚИМ РЕЖИМИГА БОҒЛИҚЛИГИ

### АННОТАЦИЯ

Мақолада нефт ва газ конденсатини массавий сарфининг икки қувурли иссиқлик алмаштиргичдаги иссиқлик узатиш коэффициентига таъсири бўйича экспериментал маълумотларни ўрганиш натижалари келтирилган. Массавий сарфининг 2 дан 14 м/с гача ошиши билан газ конденсати тезлиги 7 баробар ортади, бу  $\alpha_2$  иссиқлик узатиш коэффициентининг 194 дан 921 Вт/(м<sup>2</sup>·К) гача ошишига ва К иссиқлик узатиш коэффициентининг 179 дан 653 Вт/(м<sup>2</sup>·К)гача ўзгаришига олиб келади. Газ конденсати қиздирилганда  $\alpha_2$  иссиқлик узатиш коэффициенти 4,7 баравар ошади. Иссиқлик узатиш коэффициенти К, Вт/(м<sup>2</sup>·К)·4,46 марта ошади.

**Калит сўзлар:** иссиқлик алмаштиргич, самарадорлик, иссиқлик узатиш коэффициенти, иссиқлик узатиш коэффициенти, оқим тезлиги, Reynolds мезони, Нусселт мезони, нефт, газ конденсати, аралашма, кинематик ва динамик қовушқоқлик.

## THE DEPENDENCE OF THE THERMAL EFFICIENCY OF TWO TUBULAR APPARATUSES ON THE FLOW MODE

### ANNOTATION

The article presents the results of a study of experimental data on the effect of mass consumption of oil and gas condensate on the heat transfer coefficient in a two-tube heat exchanger. With an increase in the mass flow rate from 2 to 14 m/s, the gas condensate velocity increases by 7 times, which leads to an increase in the heat transfer coefficient  $a_2$  from 194 to 921 W/(m<sup>2</sup>·K) and a variation in the heat transfer coefficient K from 179 to 653 W/(m<sup>2</sup>·K). When the gas condensate is heated, the heat transfer coefficient  $a_2$ , W/(m<sup>2</sup>·K) increases 4.7 times. The heat transfer coefficient K, W/(m<sup>2</sup>·K) is 4.46 times.

**Keywords:** heat exchanger, effectiveness, heat transfer coefficient, oil heat transfer coefficient, flow rate, Reynolds Criterion, Nusselt Criterion, oil, gas condensate, mixture, kinematic and dynamic viscosity.

Увеличение процессов теплопередачи тесно связано с вопросом создания высокоэффективных теплообменных элементов. Теплообмен всегда происходит в определенном направлении: от более высокой °С температуры к более низкой °С. С выравниванием температуры тел теплообмен прекращается.

На сегодняшний день нехватка сырья негативно влияет для полноценное функционирование многих нефтеперерабатывающих заводов. Это приводит к использованию тепловых ресурсов завода в не полном объеме и к повышению энергетических расходов при первичной переработке углеводородного сырья.

Основным решением этих проблем является полноценное использование тепловых поверхностей аппаратов с улучшением гидродинамических режимов потока сырья. Для этого нами использованы стержни для труб теплообменника. Эти стержни повышают активность теплообмена внутренней поверхности трубопровода в трубчатом теплообменнике. Это позволяет повышению температуры сырья на выходе из аппарата.

Согласно источникам [1, 2], интенсивность теплообмена определяется такими факторами, как скорость потока, физические свойства жидкости, конструктивные параметры устройства и температуры теплоносителей, при этом коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  рассчитывались с учетом физико-химических и теплофизических характеристик теплоносителей, для вычисления коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$  была произведена оценка скорости потока и числа Рейнольдса горячего теплоносителя.

В ходе экспериментов жидкие углеводороды нагревались парами газоконденсата. Эксперименты проводились при расходах сырья экспериментальной установки 2; 6; 10; 14 кг/мин. Данные пределы расхода сырья обеспечивает установление различных режимов в теплообменниках [4, 5].

Для определения скорости углеводородного потока в трубе теплообменника используется следующее уравнение [1]:

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

Согласно источнику [1], средняя скорость углеводородного потока между трубой и стержнем рассчитывается по формуле:

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

где  $\omega$  — средняя скорость потока, G — расход сырья в кг/мин,  $d_{\text{вн}}$  —внутренний диаметр трубы теплообменника в мм, и  $d_{\text{ст}}$  — наружный диаметр стержня из нержавеющей стали в мм.

Скорость потока в трубе изменяется посредством регулировки расхода сырья, а число Рейнольдса ( $Re$ ), определяющее скорость потока, рассчитывается по уравнению [1,5]:

$$Re = \omega d_{вн} / \nu, \quad (3)$$

где  $\nu$  — кинематическая вязкость углеводорода в  $m^2/c$ .

При установке стержня число Рейнольдса рассчитывается следующим образом:

$$Re = \omega (d_{вн} - d_{ст}) / \nu, \quad (4)$$

Эквивалентный диаметр трубопровода со стержнем определяется по:

$$d_{эк} = d_{вн} - d_{ст} \quad (5)$$

Если массовый расход сырья остаётся неизменным, скорость потока, определённая по формулам 3.1 и 3.2, может быть преобразована:

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = 1 - \left(\frac{d_{ст}}{d_{вн}}\right)^2 \quad (6)$$

Для определения числа Рейнольдса при течении сырья в трубе после установки стержня используется формула:

$$\frac{Re_1}{Re_2} = 1 + \frac{d_{ст}}{d_{вн}} \quad (7)$$

Зависимости скорости потока нефти и газового конденсата от массового расхода приведены в таблице 3.5.

Используя формулы (2) и (4), а в исследуемом теплообменнике установлен режим турбулентного движения паров газового конденсата, при этом использовалось следующее уравнение Нуссельта:

$$Nu = 0023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot \left(\frac{D_{вн}}{d_{тр}}\right)^{0.45}, \quad (8)$$

где  $Pr$  — число Прандтля,  $C$  — удельная теплоемкость (Дж/кг), и  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности теплоносителя (Вт/м•К).

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  от пара газового конденсата к стенке трубы теплообменника был определен на основе значения числа Нуссельта ( $Nu$ ) [1, 2, 6, 7].

$$\alpha_1 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{экв}}, \quad (9)$$

где  $d_{экв}$  — эквивалентный диаметр сечения межтрубного пространства двухтрубчатого теплообменника, м.

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  в зависимости от режима движения в трубе был спроектирован кожух трубчатого теплообменника, учитывающий особенности потока [1; 2].

$$Re_{ж} = \frac{\omega_n \cdot d_{вн}}{\nu_n}, \quad (10)$$

где  $\omega_n$  — скорость углеводородного сырья (м/с);  $\nu_n$  — кинематическая вязкость ( $mm^2/c$ ).

С помощью нижеследующего уравнения рассчитан критерий Нуссельта для ламинарного движения жидкости [1, 8, 9]:

$$Nu_{ж} = 0,17 Re_{ж}^{0,33} Pr_{ж}^{0,43} Gr_{ж}^{0,1} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_t. \quad (11)$$

Для переходного режима движения углеводородного сырья расчет числа Нуссельта ( $Nu_{ж}$ ) производился по уравнению [1, 10, 11]:

$$Nu_{ж} = 0,008 Re_{ж}^{0,9} Pr_{ж}^{0,43}. \quad (12)$$

Для турбулентного режима движения жидкости в теплообменном аппарате критериальное уравнение Нуссельта рассчитывается по уравнению [1, 11]:

$$Nu_{ж} = 0,021 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_t, \quad (13)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  вычислен с помощью уравнения [1, 12]:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{ж} \cdot \lambda}{d_{вн}}. \quad (14)$$

Коэффициент теплопередачи  $K$  определялся по расчету [1, 13]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (15)$$

Количество переносимого тепла определено по уравнению [13, 14]:

$$Q = KF\Delta t_{cp}, \quad (16)$$

где  $\Delta t_{cp}$  - средняя температура среды, °С; F - поверхность трубы, м.

Результаты исследования влияния скорости потока и числа Рейнольдса на коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи при течении жидких углеводородов через горизонтальную трубу с диаметром 20 мм в двухтрубчатом теплообменнике представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

*Динамика изменение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в зависимости от расхода нефти*

Показатели	Горячий теплоноситель			
	Скорость пара $\omega$ , м/с	2,91	2,78	2,58
Критерий Рейнольдса Re	141698	140257	138471	132692
Критерий Нуссельта Nu	362	357	351	345
Коэффициент теплоотдачи $\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	2523	2501	2485	2436
	Массовый расход нефти G, кг/мин			
	2	6	10	14
Скорость нагреваемого потока $\omega$ , м/с	0,12	0,37	0,62	0,87
Критерий Рейнольдса Re	641	1924	2566	4490
Критерий Нуссельта Nu	6	11	14	22
Коэффициент теплоотдачи $\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	40	95	120	188
Коэффициент теплопередачи K, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	39	92	114	174

Из данных, приведённых в таблице 1 можно сделать вывод, что при средней температуре горячего теплоносителя  $\Delta t_{cp} = 95^\circ\text{C}$  скорость потока паров газового конденсата колеблется от 2,47 до 2,91 м/с, при этом критерий Рейнольдса изменяется в пределах 140257 (развитый турбулентный), а критерий Нуссельта составляет в среднем 350. Коэффициент  $\alpha_1$ , составляет в среднем 2500 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Скорость нагреваемой нефти повышается от 0,12 до 0,87 м/с в зависимости от объёмного расхода сырья. С повышением скорости число Рейнольдса повышается в 7 раз. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) повышается в 4,7 раз. Коэффициент теплоотдачи K, Вт/(м<sup>2</sup>·К) в 4,46 раз.

Согласно источникам [1, 5], в процессе нагревания газового конденсата параметры горячего теплоносителя изменяются аналогично параметрам при нагревании нефти: с увеличением массового расхода нефти от 2 до 14 м/с скорость газового конденсата возрастает в 7 раз, что приводит к увеличению числа Рейнольдса с 4662 до 32625, увеличению числа Нуссельта с 22 до 105, изменению коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  от 194 до 921 Вт/(м<sup>2</sup>·К) и варьированию коэффициента теплопередачи K от 179 до 653 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Таблица 2

Изменение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в зависимости от расхода газового конденсата

Показатели	Горячий теплоноситель			
	2	6	10	14
Скорость пара $\omega$ , м/с	2,95	2,81	2,64	2,47
Критерий Рейнольдса Re	141589	141123	141004	140571
Критерий Нуссельта Nu	361	358	349	335
Коэффициент теплоотдачи $\alpha_1$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	2517	2500	2488	2417
	Массовый расход газоконденсата G, кг/мин			
	2	6	10	14
Скорость нагреваемого потока $\omega$ , м/с	0,14	0,42	0,7	0,98
Критерий Рейнольдса Re	4662	13986	23310	32625
Критерий Нуссельта Nu	22	54	81	105
Коэффициент теплоотдачи $\alpha_2$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	194	468	704	921
Коэффициент теплопередачи K, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	179	387	535	653

Экспериментальные параметры по определению тепловых показателей процесса нагревания нефти и газового конденсата в двухтрубчатом аппарате, представленные в двух таблицах, показывают, что различия в физических и теплофизических свойствах жидких углеводородов существенно влияют на процесс тепловой обработки сырья, при этом скорость потока газового конденсата при диаметре трубы  $d = 20$  мм в 1,12 раза выше скорости потока нефти, а критерий Рейнольдса для потока газового конденсата превышает аналогичный показатель для нефти в 7,2 раза, коэффициент теплоотдачи выше в 4,9 раза и коэффициент теплопередачи - в 3,75 раза.

Сравнительный анализ коэффициентов теплопередачи в зависимости от массового расхода нефти и газового конденсата приведено в рисунке.

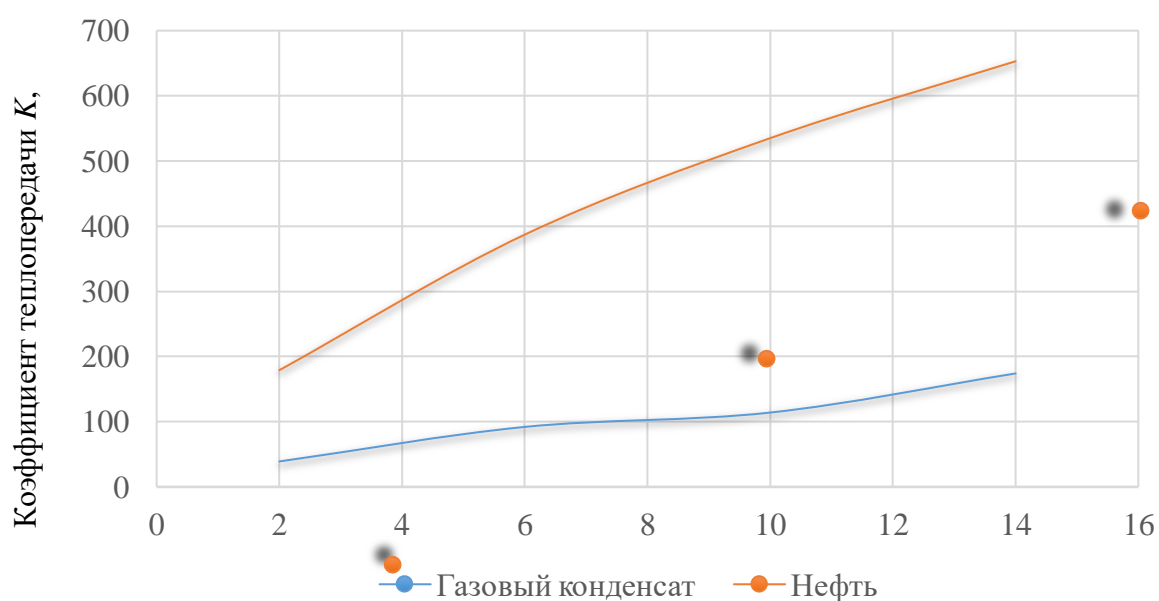


Рис. Динамика изменение коэффициента теплопередачи K от массового расхода сырья.

Кривые изменения диаграммы из рисунка показывают, что, с повышением массового расхода сырья  $G$ , от 2 до 14 кг/мин в двухтрубчатом теплообменника коэффициент теплопередачи  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) нефти и газового конденсата, повышается с плавными темпами роста. За счет высокой разницы теплофизических свойств при одинаковых расходах газового конденсата и нефти по теплообменным трубам теплообменника коэффициента теплопередачи повышается по разным темпами.

С повышением массового расхода нефти от 2 до 14 кг/мин коэффициент теплопередачи изменяется в 4,46 раза. Изменением расхода газового конденсата в идентичном порядке коэффициент теплопередачи повышается в 3,64 раза. Это показывает, что двухтрубные теплообменник обладают хорошими статическими характеристиками при нагревании жидких углеводородов.

**ИҚТИБОСЛАР. СНОСКИ. REFERENCES.**

1. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов/Под ред. П.Г. Романкова. - 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 578 с.

2. Ismailov O. Yu., Khurmamatov A. M., Yusupov R. A., Isamatova D. N. “Қобик қувурли курималарда конденсация жараёни самарадорлигини ошириш (Increasing the efficiency of the condensation process in shell-pipe plants)”, Science and innovation international scientific journal Volume 2 ISSUE 6 JUNE 2023 UIF-2022: 8.2 | ISSN: 2181-3337 | SCIENTISTS.UZ <https://doi.org/10.5281/zenodo.8033657>.

3. Исмаилов О.Ю., Хурмаматов А.М., Исаматова Д.Н. Исследование коэффициента теплопередачи при нагревании нефти и газового конденсата парами бензина. Узбекский научно-технический и производственный журнал. Композиционные материалы №3, -2023. -С. 127-131.

4. Исмаилов О.Ю., Хурмаматов А.М., Худайбердиев А.А. Влияние рециркуляции потока на интенсивность теплообмена в двухтрубчатом аппарате// Научно-технический журнал «Нефтепереработка и нефтехимия». Москва. – 2018. – №5. –С. 39-42.

5. Salimov Z., Ismailov. O.Yu., Saydahmedov Sh. M. Influence of hydrodynamic regimes of oil and gas mixtures on the efficiency of heat exchange// Вестник Волгоградского государственного университета. – г. Волгоград, –2015. – №2. – С. 25-33.

6. Исмаилов О. Ю. Влияние гидродинамических режимов на эффективность нагревания жидких углеводородных потоков в трубчатых аппаратах: Диссертация на соискание ученой степени доктора философии (Doctor of Philosophy) по техническим наукам. -Ташкент: ТКТИ, 2018. -109 с.

7. Салимов З., Исмаилов О.Ю., Ашурув Э.Б. Влияние числа Рейнольдса на эффективность теплообмена при нагревании нефтегазоконденсатных смесей. Доклады АН РУз. – Ташкент, – 2015. – №4. – С. 45-47.

8. О.Ю.Исмаилов. Разработка номограмм для определения основных свойств нефтегазоконденсатного сырья. Научно-технический журнал, «Химическая промышленность». г. Санкт-Петербург, – 2016. –№6 – С. 140-143.

9. Интенсификация тепло- и массообмена в энергетике// Дзюбенко Б.В., Кузма-Кичта Ю.А., Кутепов А.М. и др. - М.: Торус Пресс, 2002. - 200 с.

10. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие. - М.: «Теплотехник», – 2011. – 335 с.

11. Исмаилов О.Ю., Хурмаматов А.М., Исаматова. Влияние толщины накипи на коэффициент теплопередачи в горизонтальной трубе. Материалы международной конференции “Инновационные подходы к Локализацию”. 14 октября 2023 г. г.Карши. –С. 237-238.

12. Альтшуль А.Д., Калицин В.И., Майрановский Ф.Г., Польгунов П.П. Примеры расчетов по гидравлике// Учебное пособие для вузов. «Альянс», – 2013. – 255 с.

13. Хурмаматов А.М., Исмаилов О.Ю., Худайбердиев А.А. Гидродинамика нагревания углеводородного сырья в трубчатых теплообменниках. Монография. ИОНХ АН РУз. - Ташкент: Navroz, 2019. - 110 с.

14. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.