**МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ГРЕЮЩЕГО ЗМЕЕВИКА
ВЕРТИКАЛЬНОГО НЕФТЕГАЗОВОГО СЕПАРАТОРА****MODERNIZATION OF THE DESIGN OF THE HEATING COIL
OF THE VERTICAL OIL AND GAS SEPARATOR****Д. А. Котельников**
Dmitry A. KotelnikovУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation**С. Ю. Устюжанина**
Svetlana Ju. UstyuzhaninaУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation**А. Ю. Устюжанина**
Anastasia Ju. UstyuzhaninaУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

В статье рассмотрены вопросы усовершенствования теплообменного устройства нефтегазового вертикального сепаратора с помощью расчета минимальной площади поверхности теплообмена и подбора более устойчивой к коррозии марки стали.

Нефтегазовым сепаратором называют аппарат, предназначенный для сепарации попутного газа от нефти или нефтяных эмульсий за счёт разности их плотностей. С помощью такого оборудования производится сброс свободной пластовой воды, сепарация газа от нефти, а также разделение потока продукции (частично обводнённой нефти) перед подачей ее на установки подготовки нефти.

Целью исследования является модернизация конструкции вертикального нефтегазового сепаратора путем замены греющего элемента.

Для реализации поставленной цели в исследовательской работе необходимо провести технологический расчет аппарата и осуществить подбор материального исполнения заменяемого элемента. Предполагается использовать такое теплообменное устройство для поддержания требуемой температуры рабочей жидкости и предотвращения её охлаждения до температуры кристаллизации.

Решение данных задач повлияет на увеличение надежности и срока эксплуатации аппарата, а также улучшит его теплотехнические свойства.

Для проведения расчетов по модернизации использовались государственные стандарты, альбомы типовых конструкций и рабочие технические материалы, представленные в списке использованных источников.

The article considers the issues of modernization the heat-exchanging device of an oil and gas vertical separator by calculating the minimum surface area of heat exchange and selecting a steel grade more resistant to corrosion.

An oil and gas separator is an apparatus designed to separate associated gas from oil or oil emulsions due to the difference in their densities. With the help of such equipment, the discharge of free produced water, the separation of gas from oil, as well as the separation of product flow (partially flooded oil) are made before it is supplied to oil treatment plants.

The aim of the study is to improve the design of a vertical oil and gas separator by replacing the heating element.

To achieve this aim in research work it is necessary to carry out the technological calculation of the apparatus and to carry out the selection of the material performance of the replaced element. It is supposed to use such a heat exchanger to maintain the required temperature of the working fluid and prevent its cooling to the crystallization temperature.

Ключевые словавертикальный
нефтегазовый сепаратор,
теплообменное устройство,
греющий змеевик,
трубчатый подогреватель,
оборудование, переработка**Key words**vertical oil and gas separator,
heat exchange device,
tube heater, equipment,
processing

The solution of these problems will affect the increase in reliability and service life of the device, as well as improve its thermal performance. For calculations on modernization, state standards, albums of typical structures and working technical materials presented in the list of references were used.

Нефтегазовым сепаратором (НГС) называют аппарат, предназначенный для сепарации попутного газа от нефти или нефтяных эмульсий за счёт разности их плотностей. Он применяется для сброса свободной пластовой воды, сепарации газа от нефти, а также для разделения потока продукции (частично обводненной нефти) перед подачей ее на установку подготовки нефти [1].

Нефтегазовый сепаратор представляет собой горизонтальную цилиндрическую металлическую емкость с эллиптическими днищами и функциональными патрубками (штуцерами).

Основными конструктивными элементами данного типа сепараторов являются (рисунок 1):

- отбойник (для первичного разделения входящей жидкости);
- пеногасительная насадка (если она предусмотрена в данном виде емкости);

- каплеуловитель (сетка) для очистки газа;
- штуцеры для входа и выхода продуктов разделения;
- контрольно-измерительные приборы;
- люк-лаз;
- змеевик подогревателя (поставляется в регионы с холодным климатом — ХЛ по ГОСТ 15150-69).

Наиболее часто применяемый на данный момент способ разогрева или поддержания необходимой температуры в аппаратах и емкостях различного назначения и объёма — использование встроенного подогревателя [2].

От состояния и долговечности трубчатых подогревателей зависит продолжительность непрерывной работы аппарата, а в большинстве случаев и технологической установки в целом. Поэтому выявлению причин износа трубчатых змеевиков следует уделять особенно большое внимание [1, 3].

Рисунок 1. Основные элементы нефтегазового сепаратора сетчатого типа

Этапы, необходимые для повышения надежности подогревателя:

- подбор качественного материала;
- снижение количества деталей;
- выбор правильных размеров;
- тщательный контроль при изготовлении и эксплуатации.

Для выполнения цели и задач исследовательской работы предлагается подобрать теплообменное устройство для вертикальных аппаратов по АТК-24.218.07-90 [4] с оптимальными габаритами и требуемой поверхностью теплообмена, что позволит повысить

удобство его замены при ремонте. Предполагается использовать данное теплообменное устройство для поддержания требуемой температуры рабочей жидкости и предотвращения её охлаждения до температуры кристаллизации. Для теплового расчета выбран следующий аппарат, конструктивные параметры которого приведены в таблице 1, исходные данные, в том числе теплотехнические свойства среды, представлены в таблице 2. Эскиз выполнен в системе автоматизированного проектирования (САПР) КОМПАС-График и приведен на рисунке 2.

Таблица 1. Конструктивные параметры теплообменного аппарата

Наименование параметра	Обозначение, размерность	Значение
Внутренний диаметр аппарата	$D_{\text{вн}}$, м	1,8
Высота цилиндрической части аппарата	$H_{\text{ц}}$, м	3,2
Высота днища аппарата	$H_{\text{д}}$, м	0,53
Высота налива рабочей жидкости	$h_{\text{н}}$, м	0,75
Диаметр входного штуцера	$d_{\text{шт}}$, м	0,3
Внутренний диаметр трубы змеевика	$d_{\text{вн}}$, м	0,026
Толщина стенки трубы змеевика	$S_{\text{тр}}$, м	0,003
Площадь проходного сечения по трубному пространству змеевика	$f_{\text{тр}}$, м ²	0,000531

Таблица 2. Исходные данные и теплотехнические свойства среды

Наименование	Обозначение, размерность	Газ (метан)	Нефть	Вода в подогревателе
Рабочее давление	$P_{\text{раб}}$, МПа	2,0		
Расчетное давление	$P_{\text{р}}$, МПа	2,2		
Давление испытаний	$P_{\text{исп}}$, МПа	2,77		
Расход	G , кг/ч	38083,5	8	330
Расчетная температура	$t_{\text{р}}$, °C	100	—	—
Минимальная температура рабочей среды	t_{min} , °C	—	5	90
Максимальная температура рабочей среды	t_{max} , °C	—	40	115
Плотность, при рабочей температуре	ρ , кг/м ³	0,525	800	958
Изобарная теплоемкость	C_p , Дж/(кг·°C)	2448,4	2090	4217
Теплопроводность	λ , Вт/(м·°C)	46,5	0,120	0,683
Динамическая вязкость	μ , Па·с	$1,332 \cdot 10^{-5}$	0,005	0,000283
Кинематическая вязкость	ν , м ² /с	—	$6,25 \cdot 10^{-5}$	—

С помощью теплового расчета определено полное количество теплоты, коэффициент теплоотдачи и теплопередачи, температура потоков на выходе из аппарата и минимальная площадь поверхности теплообмена.

Полное количество теплоты, получаемое (отдаваемое) телом в процессе нагревания, рассчитывается по формуле

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м·K);

F — площадь теплообменной поверхности, м²;

Δt — температурный напор, °C.

Температурный напор вычисляется по формуле

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \left(\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \right)}, \quad (2)$$

где $\Delta t_{\text{б}}$ — большая разность температур, $\Delta t_{\text{б}} = t_{\text{max в}} - t_{\text{min н}} = 115 - 5 = 110$ °C;

$\Delta t_{\text{м}}$ — меньшая разность температур, $\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{min в}} - t_{\text{max н}} = 90 - 40 = 50$ °C.

$$\Delta t = \frac{110 - 50}{\ln \left(\frac{110}{50} \right)} = 76,1 \text{ °C.}$$

Рисунок 2. Эскиз аппарата

Количество теплоты, которое тело теряет или получает в результате теплообмена, вычисляется по формуле

$$Q = C_p \cdot V_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{н}} \cdot (t_{\text{н}} - t_{\text{к}}), \quad (3)$$

где C_p — удельная теплоемкость нефти, $C_p = 2090$ Дж/(кг·К);

$V_{\text{ж}}$ — объем рабочей жидкости, м^3 ;
 $\rho_{\text{н}}$ — плотность нефти, $\rho_{\text{н}} = 800$ кг/м 3 ;
 $t_{\text{н}}$ — начальная температура нефти, $t_{\text{н}} = 5$ °C;
 $t_{\text{к}}$ — конечная температура нефти, $t_{\text{к}} = 40$ °C.

Объем рабочей жидкости рассчитывается по формуле

$$V_{\text{ж}} = V_{\text{цил}} + V_{\text{дн}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{дн}}$ — объем жидкости в днище аппарата, по ГОСТ 6533-78

$$V_{\text{дн}} = 0,9126 \text{ м}^3;$$

$V_{\text{цил}}$ — объем рабочей жидкости в цилиндрической части аппарата, м^3 .

Тогда объем рабочей жидкости вычисляется по формуле

$$V_{\text{цил}} = 0,25 \cdot \pi \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot h_{\text{н}}, \quad (5)$$

где $D_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр аппарата, $D_{\text{вн}} = 1,8$ м;

$h_{\text{н}}$ — высота налива рабочей жидкости в цилиндрической части аппарата, $h_{\text{н}} = 0,75$ м.

$$V_{\text{цил}} = 0,25 \cdot 3,14 \cdot 1,8^2 \cdot 0,75 = 1,91 \text{ м}^3.$$

$$V_{\text{ж}} = 1,91 + 0,9126 = 2,88226 \text{ м}^3.$$

Вычислим количество теплоты, получаемое нефтью, по формуле (3):

$$Q = 2090 \cdot 2,88226 \cdot 800 \cdot (5 - 40) = 168700 \text{ Дж} = 168,7 \text{ МДж}.$$

В таблице 3 приведены формулы и расчеты термодинамических параметров воды и нефти и их коэффициентов теплоотдачи.

Таблица 3. Термодинамический расчет коэффициента теплоотдачи для воды и для нефти

Параметр	Результат расчета
Скорость движения потока воды в змеевике (6): $U_{\text{в}} = \frac{G_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} \cdot f_{\text{тр}}}$	$U_{\text{в}} = \frac{330}{958 \cdot 0,000531} = 648 \text{ м/ч} = 0,18 \text{ м/с}$
Число Рейнольдса для потока воды (7): $Re_{\text{в}} = \frac{U_{\text{в}} \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}}$	$Re_{\text{в}} = \frac{0,18 \cdot 0,026 \cdot 958}{0,000283} = 15842,5$ Так как $Re_{\text{в}} > 10^4$, режим течения жидкости — турбулентный
Критерий Нуссельта для потока воды (8): $Nu_{\text{в}} = 0,021 \cdot Re_{\text{в}}^{0,8} \cdot Pr_{\text{в}}^{0,43}$	$Nu_{\text{в}} = 0,021 \cdot 15842,5^{0,8} \cdot 1,75^{0,43} = 61,2$
Число Прандтля для потока воды (9): $Pr_{\text{в}} = \frac{\mu_{\text{в}} \cdot C_{\text{рв}}}{\lambda_{\text{в}}}$	$Pr_{\text{в}} = \frac{2,838 \cdot 10^{-4} \cdot 4217}{0,683} = 1,75$
Коэффициент теплоотдачи воды (10): $\alpha_{\text{в}} = \frac{Nu_{\text{в}} \cdot \lambda_{\text{в}}}{d_{\text{вн}}}$	$\alpha_{\text{в}} = \frac{61,2 \cdot 0,683}{0,026} = 1607,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$
Критерий Нуссельта для потока нефти (11): $Nu_{\text{н}} = 0,5 \cdot (Gr_{\text{н}} \cdot Pr_{\text{н}})^{0,25}$	$Nu_{\text{н}} = 0,5 \cdot (10^{10} \cdot 36,7)^{0,25} = 389$
Число Прандтля для потока нефти (12): $Pr_{\text{н}} = \frac{C_{\text{рн}} \cdot \mu_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}}}$	$Pr_{\text{н}} = \frac{880 \cdot 0,005}{0,12} = 36,7$
Критерий Грасгофа для нефти (13): $Gr_{\text{н}} = \frac{\rho_{\text{н}} \cdot \beta_{\text{н}} \cdot d_{\text{нар}}^3 \cdot \Delta t_{\text{н}}}{\nu_{\text{н}}^2}$	$Gr_{\text{н}} = \frac{800 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,038^3}{(6,25 \cdot 10^{-5})^2} \cdot 35 = 10^{10}$
Коэффициент теплоотдачи нефти (14): $\alpha_{\text{н}} = \frac{Nu_{\text{н}} \cdot \lambda_{\text{н}}}{d_{\text{н}}}$	$\alpha_{\text{н}} = \frac{389 \cdot 0,12}{0,038} = 1228,4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$

Для расчета поверхности теплообмена производится расчет коэффициента теплопередачи.

Коэффициент теплопередачи для трубного и межтрубного пространства определяется по формуле [3, 5].

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{S_{\text{тр}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}, \quad (15)$$

где $S_{\text{тр}}$ — толщина стенки трубы, $S_{\text{тр}} = 0,003$ м;
 $\lambda_{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности стали марки 12X18H10T, $\lambda_{\text{ст}} = 16$ Вт/(м·К) [5, 6].

$$k = \frac{1}{\frac{1}{1607,7} + \frac{0,003}{16} + \frac{1}{1228,4}} = 615,93 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Преобразовав формулу (1), вычислим площадь поверхности теплообмена:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t},$$

$$F = \frac{168,7 \cdot 10^3}{615,93 \cdot 76,1} = 3,6 \text{ м}^2.$$

Следовательно, по результатам расчетов выбрано теплообменное устройство для вертикальных аппаратов 3-775-4,0-1 по АТК [4], эскиз которого приведён на рисунке 3. В таблице 4 приведены его основные размеры.

Таблица 4. Размеры теплообменного устройства, мм

R	r	h	l	t	t ₁	F, м ²
775	150	600	1100	50	25	4,0

Рисунок 3. Теплообменное устройство 3-775-4,0-1

Выводы

В результате проведенного технологического расчета вычислена площадь теплообмена, равная 3,84 м², необходимая для поддержания требуемой температуры рабочей жидкости и предотвращения кристаллизации в аппарате.

По вычисленной площади теплообмена и внутреннему диаметру аппарата подобрано

теплообменное устройство по Альбому Типовых Конструкций.

Руководствуясь общими принципами выбора материала и учитывая максимальную рабочую температуру 100 °С, давление 2,0 МПа, среднюю коррозионность среды, а также возможность работы оборудования в условиях крайнего севера, выбрана низколегированная сталь марки 12X18H10T [7].

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Котельников Д.А. Модернизация теплообменного устройства вертикального нефтегазового сепаратора // Молодежь в науке: Новые аргументы: сб. науч. работ VIII Междунар. молодежного конкурса. Липецк, 2018. Ч. II. С. 58–58.
2. Fakhru'l-Razi A., Pendashteh A., Abdullah L.C., Biak D.R.A., Madaeni S.S., Abidin Z.Z. Review of Technologies for Oil and Gas Produced Water Treatment // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. No. 170 (2–3). P. 530–551.
3. Ignatowitz E. *Chemietechnik*. 7th Edition. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2003. 615 p.
4. АТК 24.218.07-90. Устройства теплообменные наружные и внутренние сосудов и аппаратов. Конструкция, размеры и общие технические требования. М.: АО «ЦКБН», 1990. 77 с.
5. Бухмиров В.В. Расчет коэффициента теплоотдачи. Иваново, 2007. 39 с.
6. Казанцев Е.И. Промышленные печи: справ. руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Металлургия, 1975. 368 с.
7. ГОСТ Р 52857.1-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2008. 23 с.
8. *molodezhnogo konkursa «Molodezh' v nauke: Novye argumenty»* [Collection of Scientific Works of the VIII International Youth Competition «Youth in Science: New Arguments»]. Lipetsk, 2018, Part II, pp. 58-58. [in Russian].
9. Fakhru'l-Razi A., Pendashteh A., Abdullah L.C., Biak D.R.A., Madaeni S.S., Abidin Z.Z. Review of Technologies for Oil and Gas Produced Water Treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, No. 170 (2-3), pp. 530-551.
10. Ignatowitz E. *Chemietechnik*. 7th edition, Haan-Gruiten, Verlag Europa-Lehrmittel, 2003. 615 p.
11. АТК 24.218.07-90. Устройства теплообменные наружные и внутренние сосудов и аппаратов. Конструкция, размеры и общие технические требования. М.: АО «ЦКБН», 1990. 77 p. [in Russian].
12. Bukhmirov V.V. *Raschet koeffitsienta teplootdachi* [Calculation of Heat Transfer Coefficient]. Ivanovo, 2007. 39 p. [in Russian].
13. Kazantsev E.I. *Promyshlennyye pechi. Spravochnoe rukovodstvo dlya raschetov i proektirovaniya* [Industrial Furnace. Reference Guide for Calculations and Design]. 2nd Edition, Supplemented and Revised. Moscow, Metallurgiya Publ., 1975. 368 p. [in Russian].
14. GOST R 52857.1-2007. *Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Obshchie trebovaniya* [State Standard R 52857.1-2007. Vessels and Apparatus. Norms and Methods of Strength Calculation. General Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 23 p. [in Russian].

REFERENCES

1. Kotel'nikov D.A. Modernizatsiya teploobmennogo ustroystva vertikal'nogo neftegazovogo separatora [Modernization of the Heat Exchange Unit Vertical Oil and Gas Separator]. *Sbornik nauchnykh rabot VIII Mezhdunar.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
ABOUT THE AUTHORS

Котельников Дмитрий Алексеевич, магистрант кафедры газохимии и моделирования химико-технологических процессов, УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Dmitry A. Kotelnikov, Undergraduate Student of Gas Chemistry and Modeling of Chemical and Technological Processes Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: dkotel@outlook.com

Устюжанина Светлана Юрьевна, доцент кафедры «Комплексный инжиниринг и компьютерная графика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Svetlana Ju. Ustyuzhanina, Assistant Professor of Integrated Engineering and Computer Graphics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: swetaust_1@mail.ru

Устюжанина Анастасия Юрьевна, ассистент кафедры «Комплексный инжиниринг и компьютерная графика», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Anastasia Ju. Ustyuzhanina, Assistant of Integrated Engineering and Computer Graphics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: anastasfudo@mail.ru