УДК 665.6/7

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНДЕНСАЦИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ПАРОВ

Шарипов Козимжон Комилжонович
младший научный сотрудник,
младший научный сотрудник лаборатории
«Процессы и аппараты химической технологии»,
Институт общей неорганической химии
Академии наук Республики Узбекистан
kozim2481@mail.ru

Sharipov Kozimjon Komiljonovich
Junior Researcher,
Institute of General Inorganic Chemistry of
the Academy of Sciences of
the Republic of Uzbekistan
kozim2481@mail.ru

Аннотация. Приведён анализ основных результатов расчётно-экспериментальных исследований коэффициента теплопередачи в модельных конденсаторах горизонтального и вертикального исполнения. Выявлено, что при средней температуре теплоносителей $t_{ср}$ = 58–76 °С эффективность теплообмена при конденсации паров углеводородного сырья в горизонтальном кожухотрубчатом конденсаторе в 1,5 раза выше, чем в вертикальном аппарате аналогичной конструкции.

Ключевые слова: газовый конденсат, пары углеводородного сырья, конденсация пара, конденсат, охлаждение, охлаждающий агент, коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплопередачи, кожухотрубчатый теплообменник, трубчатый конденсатор, тепловая эффективность процесса.

Annotation. The analysis of the main results of settlement pilot studies of coefficient of heat transfer is revealed in laboratory model condensers of horizontal and vertical situation. It is determined that at an average temperature of the heat carriers t_{av} = 58–76 °C efficiency of heat exchange at condensation of vapors of hydrocarbonic raw materials in horizontal the tubular condenser is 1,5 times higher, than in the vertical apparatus with the same design.

Keywords: gas condensate, couples of hydrocarbonic raw materials, vapor condensation, condensate, cooling, cooler, heat exchange coefficient, heat transfer coefficient, tubular devices with heat exchanger, tubular condenser, thermal efficiency of process.

Как известно, величина коэффициента теплопередачи в теплообменном аппарате служит мерой тепловой эффективности проводимых в нём процессов. Исходя из этого, авторами выполнен анализ эффективности теплообмена при конденсации паров углеводородного сырья (газового конденсата) путём расчёта коэффициента теплопередачи в трубчатых аппаратах горизонтального и вертикального исполнения.

Для расчёта коэффициента теплопередачи в трубчатых конденсаторах использованы основные результаты проведенных опытов по изучению данного процесса на модельной установке [4]. Кожухотрубчатый конденсатор этой установки имеет следующие геометрические параметры, мм: диаметр кожуха – 50/55, диаметр теплопередающих труб – 10/13, рабочая длина труб – 1000 и общее число труб – 7 шт. Опыты были проведены в параллельном и противоточном направлениях движения потоков теплоносителей. Пар подавался в межтрубное пространство конденсатора, а охлаждающая вода – во внутрь теплопередающих труб.

В модельной установке изучен характер распределения температуры конденсации паров газового конденсата и охлаждающего агента по времени и длине труб опытного конденсатора [5] при следующих условиях: давление паров в кожухе аппарата P = 200–250 кПа, массовый расход паров G = 0,00122–0,00367 кг/с, плотность газового конденсата ρ_{20} = 728–732 кг/м^3, а коэффициент его динамической вязкости μ_{20} = (0,32–0,4)$\cdot 10^{-3}$ м^2/с. Объёмный расход холодной воды в ходе опытов составил V = 5 л/мин. Показатели свойств воды, в зависимости от её температуры, взяты из справочной литературы [6].

Используя результаты экспериментов определены основные теплофизические свойства теплоносителей (газового конденсата и охлаждающей воды), такие как плотность $\rho_{кн}$ (кг/м^3), коэффициент динамической вязкости $\mu_{кн}$ (м^2/с) и коэффициент теплопроводности $\lambda_{кн}$ (Вт/(м·К)) при средней температуре: газового конденсата $t_{кн.ср}$ и охлаждающей воды $t_{в.ср}$.

Критериальное уравнение для расчёта коэффициента теплоотдачи α_2 от стенки теплопередающих труб к охлаждающей воде выбрано с учётом значения числа Рейнольдса [6–8]:

$$\mathrm{Re} = u \cdot d_{вн}\, \rho / \mu, \qquad (1)$$

где $u = 4V / (\pi \cdot d^2_{вн} \cdot n)$ – средняя скорость потока воды в трубном пространстве аппарата, м/с;

V – объёмный расход воды, м^3/с; $d_{вн}$ – внутренний диаметр труб конденсатора, м; n – число теплопередающих труб в аппарате, шт; ρ и μ – плотность (кг/м^3) и коэффициент динамической вязкости (Па·с) воды соответственно.

Установлено, что в указанном диапазоне изменения расхода воды режим её движения в трубках опытного конденсатора является переходным, так как расчётное значение числа Re находится в пределе 8378–8426. Для переходного режима вынужденного движения воды в трубках рекомендовано воспользоваться критериальным уравнением [6–8]

$$Nu = 0{,}008 \cdot Re^{0{,}9} \cdot Pr^{0{,}43}. \quad (2)$$

По рассчитанному значению критерия Nu определяли величину коэффициента теплоотдачи со стороны охлаждающей воды α_2 (Вт/(м^2·К) [6–8]:

$$\alpha_2 = (Nu \cdot \lambda_в) / d_{вн}. \quad (3)$$

Для расчёта коэффициента теплоотдачи от конденсирующихся паров газового конденсата к стенкам теплопередающих труб α_1 (Вт/м^2·К), в зависимости от положения конденсатора в пространстве, выбраны следующие уравнения [6–8]:

– для конденсатора с пучком вертикальных труб

$$\alpha_1 = 3{,}78 \cdot \lambda_{кн} \cdot (\rho_{кн}^2 \cdot d_{нр} \cdot n_m / \mu_{кн} \cdot G_п)^{0{,}33}; \quad (4)$$

– для конденсатора с пучком горизонтальных труб

$$\alpha_1 = 2{,}02 \cdot \varepsilon_p \cdot \lambda_{кн} \cdot (\rho_{кн}^2 \cdot L_m \cdot n_m / \mu_{кн} \cdot G_п)^{0{,}33}, \quad (5)$$

где $d_{нр}$ – наружный диаметр трубы, м; L_m – длина трубы, м; n – число труб в аппарате, шт; ε_p – усреднённый для всего пучка труб коэффициент рядности, учитывающий относительное уменьшение коэффициента теплоотдачи α_1 в зависимости от расположения труб и их количества в рядах трубного пучка аппарата; $G_п$ – массовый расход паров газового конденсата, кг/с.

При известных численных значениях коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 коэффициент теплопередачи в опытном конденсаторе K (Вт/(м^2·К)) рассчитан с использованием известного уравнения [2]:

$$K = \alpha_1 \cdot \alpha_2 / (\alpha_1 + \alpha_2). \quad (6)$$

При расчётах коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в вертикальном трубчатом конденсаторе учтены температурные режимы проведения процесса по одному из вариантов опытов на модельной установке: температура конденсация паров газоконденсата $t_{н1}$ = 174–198 °С, температура охлажденного технологического конденсата (жидкости) на выходе из аппарата $t_{к1}$ = 24 °С; температура поступающей в конденсатор воды $t_{н2}$ = 18 °С и температура отработанной воды на выходе из аппарата $t_{к2}$ = 24–34 °С.

Результаты расчётов по определению коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в опытном вертикальном трубчатом конденсаторе при различных температурных режимах его функционирования приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчётов коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в опытном вертикальном трубчатом конденсаторе

Температура газового конденсата, °С		Коэффициент теплоотдачи α_1, Вт/(м^2·К)	Температура охлаждающей воды, °С		Коэффициент теплоотдачи α_2, Вт/(м^2·К)	Коэффициент теплопередачи в аппарате K, Вт/(м^2·К)
$t_{н1}$	$t_{к1}$		$t_{н2}$	$t_{к2}$		
174	24	2146	18	34	293	257
180	24	2155	18	25	302	264
186	24	2163	18	27	311	271
192	24	2172	18	24	319	278
198	24	2238	18	24	335	291

Данные таблица 1показывают, что при температурных режимах конденсации паров газового конденсата $t_{н1}$ = 174–198 °С предельные значения тепловых коэффициентов (Вт/(м^2·К)) в опытном вертикальном трубчатом конденсаторе изменяются в следующих пределах: α_1 = 2146–2238, α_2 = 293–335 и К = 257–291.

При определении значения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в горизонтальном трубчатом конденсаторе учтены температурные режимы проведения одного из зимних вариантов опытов, когда температура конденсация паров газового конденсата находилась в пределах

$t_{н1}$ = 158–172 °С и температура конденсата (жидкости) на выходе из аппарата поддерживалась в диапазоне $t_{к1}$ = 14–19 °С. При этом охлаждающая вода поступала в конденсатор с температурой $t_{н2}$ = 20 °С, где она в ходе процесса подогревалась до предела $t_{к2}$ = 50 ÷ 66 °С.

Результаты расчётов по определению коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в горизонтальном конденсаторе приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчётов коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в опытном горизонтальном трубчатом конденсаторе

Температура газового конденсата, °С		Коэффициент теплоотдачи α_1, Вт/(м^2·К)	Температура охлаждающей воды, °С		Коэффициент теплоотдачи α_2, Вт/(м^2·К)	Коэффициент теплопередачи в аппарате K, Вт/(м^2·К)
$t_{н1}$	$t_{к1}$		$t_{н2}$	$t_{к2}$		
158	17	7820	20	66	428	405
160	19	8931	20	63	450	428
165	15	9460	20	61	459	437
168	14	9519	20	56	462	440
172	14	9687	20	50	468	446

Как видно из данных таблица 2, при температурных режимах конденсации паров газового конденсата 158–172 °С значения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи (Вт/(м^2·К) в опытном горизонтальном трубчатом конденсаторе находятся в диапазоне α_1 = 7820–9687, α_2 = 428–468 и K = 405–446.

Сравнение данных таблица 1 и 2 свидетельствует о том, что по мере роста разности между температурой теплоносителей на входе в аппарат и выходе из него значения коэффициентов теплоотдачи в его межтрубном и трубном пространствах повышаются, соответственно и повышаются значения коэффициентов теплопередачи в аппарате.

Теплопередачи K от средней температуры теплоносителей $t_{ср}$ при конденсации паров газового конденсата в трубчатых аппаратах горизонтального и вертикального исполнения, построенные по данным вышеприведённых таблица 1 и 2.

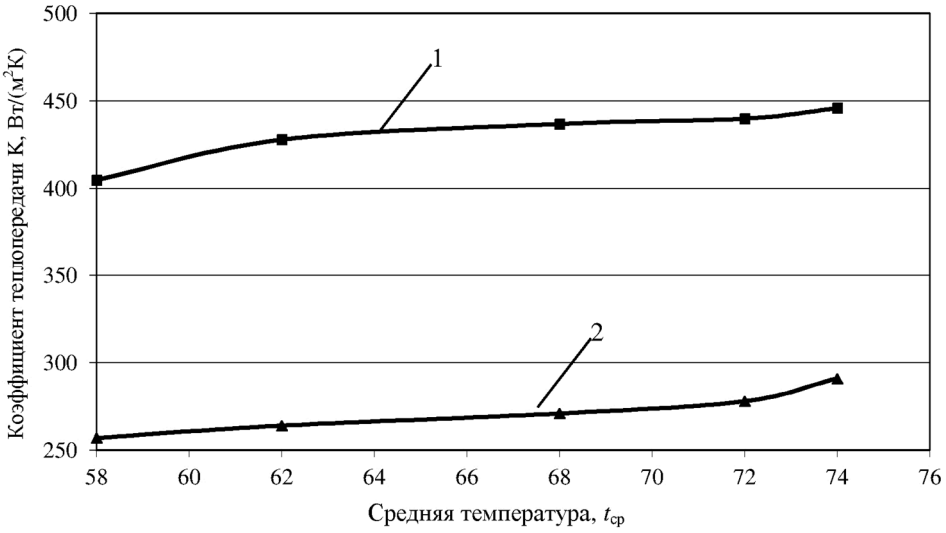

Рисунок 1 – Зависимость коэффициента теплопередачи К от средней температуры теплоносителей $t_{ср}$ при конденсации паров газоконденсата в трубчатых конденсаторах горизонтального (1) и вертикального (2) исполнения

Как видно из рисунка, кривые зависимости изменения коэффициента теплопередачи K от величины средней температуры теплоносителей $t_{ср}$ в конденсаторах горизонтального (кривая 1) и вертикального (кривая 2) исполнения характеризуются плавным и постепенным ростом. Очевидно, что с ростом температуры $t_{ср}$ от 58 до 74°С значения коэффициента теплопередачи в горизонтальном конденсаторе повышаются на 41 Вт/(м^2·К), а в вертикально расположенном конденсаторе – на 34 Вт/(м^2·К).

Таким образом, сравнение результатов определения значений коэффициента теплопередачи в опытных аппаратах показывает, что эффективность теплообмена при конденсации паров углеводородного сырья в горизонтальных кожухотрубчатых конденсаторах в среднем в 1,5 раза выше, чем в вертикальных конденсаторах аналогичной конструкции. Поэтому использование горизонтальных ко-

жухотрубчатых теплообменных аппаратов для конденсации паров фракций углеводородного сырья является целесообразным в аспекте эффективного использования тепловой энергии на нефтеперегонных установках.

Литература:

1. Шарипов К.К., Худайбердиев А.А. Установка для изучения процесса конденсации углеводородных паров // Сборник трудов республиканской НТК: Актуальные проблемы очистки нефти и газа от примесей различными физико-химическими методами. – Карши : КГУ, 20–21 мая 2011. – С. 54–55.
2. Изучение процесса конденсации углеводородных паров в кожухотрубчатых конденсаторах / К.К. Шарипов [и др.] // Материалы республиканской НТК: Актуальные проблемы переработки нефти и газа Узбекистана. – Ташкент, ИОНХ РУз, 8–9 ноября 2012. – С. 218–222.
3. 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. – С. 161, 514, 537.
4. Барулин Е.П., Кувшинова А.С., Кириллов Д.В. и др. Лабораторный практикум по тепловым процессам : учебное пособие. – Иваново : ИГХТУ, 2009. – С. 9, 19.
5. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической техно-логии : учебник для вузов. 8-е изд., перераб. – М. : Химия, 1971. – С. 42, 292, 299.

References:

1. Sharipov K.K., Khudayberdiev A.A. Installation for studying the process of condensation of hydrocarbon fumes. Collected Works of the Republican STC: Actual problems of cleaning oil and gas from impurities by various physical and chemical methods. – Karshi : KSU, May 20–21, 2011. – P. 54–55.
2. Study of the process of condensation of hydrocarbon vapors in shell-cracks capacitors / K.K. Sharipov [etc.] // Materials of the Republican STC: Actual problems of oil and gas processing in Uzbekistan. – Tashkent, IGIC RUz, 8–9 November 2012. – P. 218–222.
3. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Examples and tasks on the course of processes and devices of chemical technology : A manual for higher education / Ed. P.G. Romankova. 10 th ed., retr. and additional. – L. : Chemistry, 1987. – P. 161, 514, 537.
4. Barulin E.P., Kuvshinova A.S., Kirillov D.V. Laboratory practice on thermal processes : Textbook. – Ivanovo : IGCTU, 2009. – P. 9, 19.
5. Kasatkin A.G. The main processes and apparatus of chemical technology : Textbook for high schools. 8 th ed., Revised. – M. : Chemistry, 1971. – P. 42, 292, 299.