

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2025)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/TPDW7598>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/WJKE2565>

**А. А. Поддубный¹, Н. А. *Какабаев², А. Т. Кабдулина³,
Ж. Ж. Байжолова⁴, Р. А. Поддубный⁵**

^{1,2,3,4,5} Кокшетауский университет имени Ш. Уалиханова,

Республика Казахстан, г. Кокшетау.

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0096-1891>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3892-9590>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5077-4062>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9535-1626>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2008-4377>

*e-mail: nurbol.ka@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ ПРИ ДВИЖЕНИИ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

В статье рассматривается задача переноса теплоты в газожидкостных (пенных) системах, в широком диапазоне изменения газосодержаний вплоть до 0,7 (70 % газа), при нисходящем движении устойчивых газожидкостных (пенных) потоков в вертикальных трубах в различных тепловых установках. В данной работе также рассматривается вопрос определения коэффициента теплоотдачи от стенки теплообменных элементов к нисходящему газожидкостному потоку или наоборот от рассматриваемого потока к стенке.

Исследуемый пенный поток имеет эмульсионную (капельную) мелкодисперсную структуру, движущийся со скоростью $0,4 \div 1,4$ м/с. Газосодержание такого потока постоянно по сечению. С целью получения уравнений для расчёта коэффициентов теплообмена при движении данного потока используются полумпирический метод. Предложена физическая модель процесса переноса теплоты для данного случая. Получены уравнения для расчёта коэффициента теплоотдачи. В них внесены соответствующие экспериментальные коэффициенты. Полученные расчётные зависимости подтверждены экспериментальными исследованиями авторов и другими независимыми исследованиями.

В результате исследований установлено что коэффициент теплоотдачи при нисходящем движении устойчивых пенных систем, при газосодержании от 0,2 до 0,7, уменьшается с увеличением объёмного содержания газа, достигая самых низких значений при $\varphi_{гж} = 0,7$. Процесс теплоотдачи зависит от теплопроводности пенной смеси, особенно в пристенном слое. Относительное движение фаз оказывает пренебрежимо малое влияние на процесс переноса теплоты.

Данные теоретические исследования и полученные уравнения могут быть использованы для расчёта теплообменных аппаратов, теплового расчёта химических, биологических реакторов и другой аппаратуры.

Ключевые слова: газожидкостной поток, турбулентный, теплоперенос, коэффициент теплоотдачи, газосодержание, диссипация энергии, пенный поток.

Введение

Перенос теплоты при движении устойчивых газожидкостных (пенных) потоков с газосодержанием до 0,7 (70 %) изучен не достаточно полно. Основной задачей, в данном случае, является теоретическое определение коэффициента теплоотдачи α от пенных потоков, при их нисходящем движении в вертикальных трубах. Решение поставленной проблемы рассматривалось в работах [1, с.27]; [2, с.24, с.71]; [3, с.158]; [4, с.71]. Однако, проблема переноса теплоты в рассматриваемых системах достаточно сложна и требует продолжения исследований и получения простейших расчётных зависимостей для инженерной практики.

Цель исследования: получение расчётных зависимостей для определения коэффициента теплоотдачи от устойчивой газожидкостной смеси, с газосодержанием – $\varphi_{гж} = 0,2 \div 0,7$, при её нисходящем движении в вертикальных трубах к стенке трубы или для теплообменной поверхности, или наоборот от стенки трубы к пенной смеси.

Задачи:

- 1 Создание физической модели процесса теплоотдачи.
- 2 Получение наиболее простых расчётных зависимостей для инженерной практики.
- 3 Выявить основные факторы влияющие на процесс теплообмена и оценить их значение.
- 4 Сравнить полученные результаты с имеющимися экспериментальными данными и данными других исследований.

Материалы и методы

Для решения рассматриваемых задач применим полуэмпирический метод, основанный на физической модели процесса, с дальнейшим её математическим описанием. Сформируем физическую модель процесса переноса теплоты от стенки аппарата к движущейся пенной смеси. Движение такой смеси в трубе считаем турбулентным. Ламинарный режим маловероятен, так как в водной пенной смеси практически всегда будут происходить пульсации из-за взаимодействия фаз жидкость-газовые пузырьки.

Для дальнейшего рассмотрения процесса переноса теплоты воспользуемся моделями и методами расчёта турбулентного пограничного слоя в однофазных и многофазных потоках [1, с. 20]; [3, с. 62, с. 136]; [5, с. 7]; 6, с. 520].

Предположим, что устойчивый газожидкостный поток, состоит из мелких газовых пузырьков и прослоек жидкости между ними. Распределение фаз в таком потоке равномерное. Диаметры шаровых пузырьков близки. Газосодержание фгж рассматриваемого потока постоянно по сечению трубопровода [3, с. 77] и по высоте. По высоте потока свойства пенной среды однородны и изотропны.

При движении в трубах (каналах) структура по сечению трубы (канала), рассматриваемого газожидкостного потока будет включать: пристенный пограничный слой и турбулентное ядро. Пограничный слой состоит из вязкого ламинарного подслоя и буферного слоя, которые также, как и основной поток, состоят из прослоек жидкости и пузырьков газа. Основное термическое сопротивление сосредоточено в вязком ламинарном подслое и зависит от теплофизических свойств пенной смеси (коэффициента теплопроводности, теплоёмкости, плотности). Турбулентное ядро представляет собой совокупность турбулентных вихрей разного размера, состоящих из жидкости и пузырьков газа.

Данная структура не является статической. Постоянно идёт обмен турбулентными пульсациями. В вязком ламинарном подслое сочетается молекулярный перенос с затухающей турбулентной диффузией [7, с.139]. В буферном слое перенос теплоты осуществляется за счёт молекулярной и молярной теплопроводности. Турбулентные пульсации, возникающие, в ядре потока, приводят к интенсивному перемешиванию среды в самом ядре, будоражат буферный слой, проникают в ламинарный подслой вплоть до стенки [3, с.137; 6, с.710] и приводят к образованию в нем возмущений (вихрей), что существенно интенсифицирует процесс переноса теплоты. В пенном турбулентном потоке происходит проскальзывание фаз с относительной скоростью [4, с.79], которое приводит к дополнительному вихреобразованию во всём объёме. Пульсации в потоке передаются частицами пенной смеси, состоящими из жидкости и пузырьков газа, и имеющих плотность $\rho_{гж}$.

Пузырьки газа в жидкости мелко диспергированные, являются жёсткими, и предполагаем (гипотеза), что они активно участвуют в передаче энергии турбулентных пульсаций. Однако в буферном слое возможно скопление части пузырьков, вдоль которых происходит проскальзывание потока смеси. Они также могут играть роль демпферов, гася турбулентные пульсации. Эти процессы опосредованно уменьшают касательные напряжения на стенке. Учтём данный эффект (гипотеза) коэффициентом в котором значение показателя n определим при сравнении данной модели с экспериментальными данными.

Для описания предложенной модели и получения расчётных зависимостей воспользуемся подходом и уравнениями исследователей [1, с.28]; [3, с.143, с.156]; [5, с.7; 6, с.710]. Учёными [3, с.147] для расчёта теплообменных процессов, как для однофазных, так и многофазных потоков в любых аппаратах предложено уравнение:

$$Nu = 0,18 \eta_m^{0,95} \cdot Pr^{0,33} \quad (1)$$

В формуле (1) η_m – безразмерный максимальный масштаб турбулентности, пропорциональный радиусу аппарата, $Pr_{гж}$ – критерий Прандтля для пенного потока, учитывает влияние теплофизических свойств на теплообмен, Nu – критерий Нуссельта, служит для определения коэффициента теплоотдачи α .

$$\eta_m = \frac{u_* d_{тр} \rho_{гж}}{2 \mu_{ж}} \quad (2)$$

$$Pr_{гж} = \frac{c_{гж} \mu_{ж}}{\lambda_{гж}} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{\alpha d_{тр}}{\lambda_{гж}} \quad (4)$$

В формулах (2), (3), (4) u_* – динамическая скорость, $d_{тр}$ – диаметр трубы (аппарата), $\rho_{гж}, \mu_{ж}$ – соответственно, плотность газожидкостной смеси и вязкость жидкости, $c_{гж}$ – теплоёмкость газожидкостной смеси, $\lambda_{гж}$ – коэффициент теплопроводности газожидкостной смеси.

Динамическая скорость равна [1, с.23]:

$$u_* = \sqrt[4]{\frac{v_{гж} E_0}{\rho_{гж}}} \quad (5)$$

В формуле (5) $v_{гж}$ – кинематическая вязкость пенного потока, – диссипация энергии в газожидкостной смеси, вызванная турбулентными пульсациями.

В рассматриваемой модели источником турбулизации являются: касательные напряжения на стенке и относительное движение фаз [3, с.158]. Учитывая эти факторы, суммарную диссипацию энергии E_0 , определим по уравнению

$$E_0 = E_{01} + E_{02} \quad (6)$$

E_{01} – диссипация энергии, вызванная касательными напряжениями на стенке. диссипация энергии в жидкости, обусловленная проскальзыванием фаз относительно друг друга. E_{02} Диссипацию энергии в жидкости, в пограничном слое E_{01} найдём, пользуясь формулой [1, с.23]

$$E_{01} = \frac{\tau_{гж}^2}{\rho_{гж}}, \quad (7)$$

где $\tau_{гж}$ – касательные напряжения, возникающие при движении устойчивого пенного потока.

Диссипацию энергии в жидкости, обусловленную относительным движением газа, E_{02} найдем пользуясь рекомендациями [1, с.90; 3, с.156], по уравнению

$$E_{02} = \kappa^4 \rho_{гж} g u_{г.от} \quad (8)$$

В формуле (8) κ – коэффициент пропорциональности, учитывает изотропность турбулентности, $u_{г.от}$ – относительная скорость мелкодисперсных пузырьков газа.

В рассматриваемом турбулентном потоке будем считать давление, скорость и газосодержание осреднёнными по времени. Газосодержание также будем считать осреднённым по давлению.

В этом случае, пользуясь предложенной выше нами моделью, а также известными в гидродинамике моделями Рейнольдса-Буссинеска и Прандтля [6, с.623] и их решениями, и решениями исследователей [1, с.89–91]; [3, с.148]; [5, с.9]; [8, с.47–53], касательные напряжения предлагаем определять по уравнению

$$\tau_{гж} = \frac{0,3164}{(v_{гж} a_{тр} \rho_{гж} / \mu_{гж})^{0,25}} \cdot \left(\frac{1+2\varphi_{гж}}{1-\varphi_{гж}} \right) \cdot (1 - \varphi_{гж})^n \cdot \kappa_1 \frac{\rho_{гж} w_{гж}^2}{8}, \quad (9)$$

где k_1 – коэффициент извилистости каналов в элементарной струйке
 $w_{гж}$ – средняя скорость движения газожидкостной смеси,
 $\rho_{гж} = \rho_ж(1 - \varphi_{гж}) + \rho_г\varphi_{гж}$ – плотность газожидкостной смеси.

Коэффициент извилистости k_1 очевидно зависит от газосодержания пенной смеси. Детальное исследование его значения проведено в работе [9, с.23]. Авторами предложена следующая формула для определения коэффициента извилистости.

$$k_1 = 1 + \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \cdot \varphi_{гж}^{2/3}, \quad (10)$$

Анализируя данную формулу, с учётом исследований [10, с.44] и самих авторов статьи, необходимо отметить, что формула работает при газосодержании от 0,5 до 0,7. После корректировки рекомендуем принимать коэффициент извилистости: при содержании газа $\varphi_{гж} = 0,4$ $k_1 = 1,175$, $\varphi_{гж} = 0,3$ $k_1 = 1,61$ при $\varphi_{гж} = 0,2$ $k_1 = 1$.

Пользуясь рекомендациями [4, с.79], относительную скорость скольжения фаз для устойчивой пенной смеси определим по формуле

$$u_{г.от} = \left[\frac{3(1 - 1,5\sqrt[3]{\varphi} + 1,5\sqrt[3]{\varphi^5} - \varphi^2)}{3 + 2\sqrt[3]{\varphi^5}} \cdot \frac{d_{п}^2}{2g\mu_{ж\varphi}} \right] \cdot \frac{dp}{d\ell} \quad (11)$$

В формуле (11) $d_{п}$ – средний диаметр пузырьков газа. Для пенных смесей движущихся в нисходящем потоке надёжных зависимостей для определения среднего диаметра пузырька нет, поэтому следует его брать из опыта эксплуатации. Для устойчивой пенной смеси его размеры варьируются в районе 2-4 мм.

Анализ структуры пенной смеси позволяет предположить, что при $\varphi_{гж} \geq 0,74$ начнёт формироваться сферическая ячеистая пена, и естественно в данном случае говорить о наличии относительной скорости не имеет смысла.

Величину $\frac{dp}{d\ell}$ можно найти через касательные напряжения, определяемые по формуле (9), учитывая что $\Delta P/\ell = 4\tau/d_{тр}$. Значение E_0 , с учётом выражений для E_{01} и E_{02} будет равно

$$E_0 = \frac{\tau_{гж}^2}{\mu_{ж}} + \kappa^4 \rho_{ж} g u_{г.от} \varphi_{гж} \quad (12)$$

Подставляя формулу (12) в уравнение (5) найдём выражение для расчёта динамической скорости

$$u_* = \sqrt[4]{\frac{u_{гж}^2}{\rho_{гж}^2} + \frac{\chi^4 g v_{гж} u_{г.от} \varphi_{гж}}{(1 - \varphi_{гж})}} \quad (13)$$

Рассчитывая динамическую скорость (13), с учётом формул (9), (11), по формуле (2) определим безразмерный максимальный масштаб турбулентности η_m . Подставляя полученное значение в уравнение (1), определим критерий Нуссельта и коэффициент теплоотдачи α от устойчивой газожидкостной смеси.

Параметры, входящие в расчётные формулы, определим следующим образом. Коэффициент теплопроводности газожидкостного потока можно определить по формуле Максвелла, приведённой в литературе [8, с.70], которая записывается в виде

$$\lambda_{гж} = \lambda_{ж} \left[1 + \frac{\varphi_{гж}}{\frac{1 - \varphi_{гж}}{3} + \lambda_{ж}/(\lambda_{г} - \lambda_{ж})} \right]$$

Теплоёмкость газожидкостной смеси при $\varphi_{гж} < 0,99$ равна теплоёмкости жидкости. Значение коэффициента χ можно принять равным 1, так как турбулентность мелкодисперсной пенной системы близка к изотропной. Определяющей температурой будем считать температуру ламинарного подслоя. Определяющий размер – диаметр трубы.

Результаты и обсуждение

С целью анализа уравнения (1) и его составляющих сделаны расчёты для определения коэффициента теплоотдачи от стенки трубы диаметром 50 мм к нисходящему пенному потоку в вертикальной трубе. Теоретические исследования были проведены для пенной системы, которая была получена на водной среде с добавлением ПАВ. Температура принималась 3100К. Газосодержание пенной смеси варьировалось от 0,2 до 0,7. Скорость движения пенной смеси принималась равной от 0,5 м/с до 1,3 м/с. Результаты исследований представлены на Рис.3. Полученные результаты также сравнивались с данными уравнения по определению коэффициента теплоотдачи для пенных систем, полученного экспериментальным путём, и в книге [2, с.78]:

$$\alpha = 5,5 \cdot 10^3 [(1 - \varphi_{гж}) w_{гж}^m + 1,63 \varphi_{г}], \quad (14)$$

Показатель степени $m = \varphi_{гж}^{-1,43}$. Уравнение (14) действительно при газосодержании пенной смеси от 0,4 до 0,7, при скорости движения $w_{гж} = 0,2 \div 1$ м/с. Для пеной смеси содержание барботирующего газа $\varphi_{г} = 0$.

Полученные зависимости для определения коэффициента теплоотдачи α (1,4), с учётом уравнений (2), (3), (9), (11), (13) и принятым показателем $n = 0,45$ в уравнении (9), подтверждены экспериментально исследованиями [8, с.119], и результатами, полученными по уравнению (14), рис.1, рис.2. Погрешность между экспериментальными и теоретическими данными, в основном, не превышает 20 %.

Подтверждено применение уравнения (1) для расчёта коэффициента теплоотдачи α от пенных нисходящих потоков с газосодержанием $\varphi_{ГЖ}$ от 0,2 до 0,7.

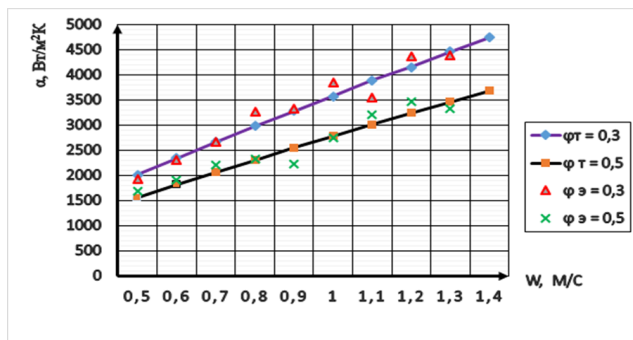


Рисунок 1 – Сравнение результатов, полученных по уравнению (1) [3], с учётом зависимостей (2), (3), (8), (11), (13) с экспериментальными данными [2, с.78]; [8, с.119] для газосодержаний $\varphi_{ГЖ} = 0,3$, $\varphi_{ГЖ} = 0,5$

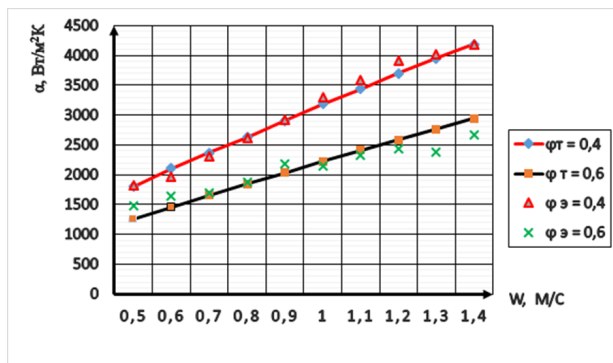


Рисунок 2 – Сравнение результатов, полученных по уравнению (1) [3, с.147], с учётом зависимостей (2), (3),(4) (9), (11), (13) с экспериментальными данными [2, с.78; 8, с.119] для газосодержаний $\varphi_{ГЖ} = 0,4$, $\varphi_{ГЖ} = 0,6$

Проведённые исследования показывают, что коэффициент теплоотдачи при нисходящем движении устойчивых пенных систем, при газосодержании от 0,2 до 0,7, уменьшается с увеличением объёмного содержания газа, достигая самих низких значений при $\varphi_{гж} = 0,7$, рис.3. С нашей точки зрения уменьшение коэффициента теплоотдачи объясняется значительным влиянием теплофизических свойств рассматриваемой среды на теплообмен. Турбулентные пульсации передаются частицами пенной смеси, имеющей плотность $\rho_{гж}$, которая уменьшается с увеличением газосодержания, соответственно уменьшается и величина пульсаций. Процесс теплоотдачи зависит от теплопроводности пенной смеси, особенно в пристенном слое. Расчёты показывают значительное её понижение в зависимости от содержания газа в пенной смеси. Проведённый анализ показал пренебрежимо малое влияние относительного проскальзывания фаз на коэффициент теплоотдачи. Это объясняется устойчивостью полученной газожидкостной смеси, содержащей мелко диспергированные пузырьки газа, движущиеся практически со скоростью такой же, как и прослойки жидкости. Наши исследования показали возможность применения полуэмпирического метода решения рассматриваемой задачи, для инженерных расчётов процессов переноса теплоты в пенных системах.

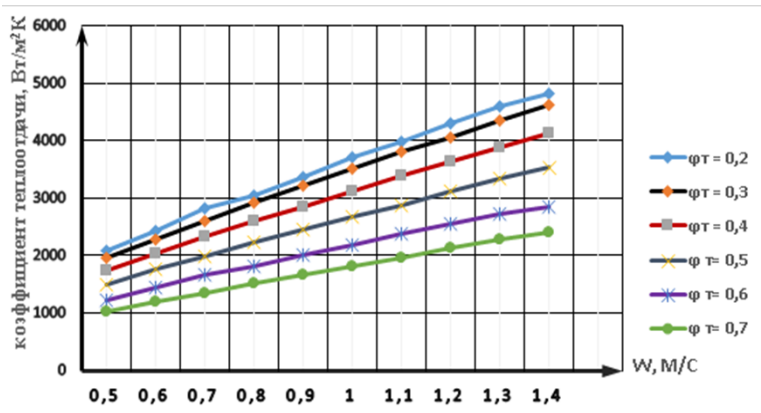


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости движения пенной смеси $w_{гж}$ при газосодержании $\varphi_{гж} = 0,2 \div 0,7$.

Выводы

В результате исследований предложена физическая модель процесса теплоотдачи от сложной пенной смеси с газосодержанием от 0,2 до 0,7. Для её описания применён полуэмпирический метод, основанный на

уравнении (1) и применении диссипации энергии для определения основных параметров потока и коэффициента теплоотдачи. Получены расчётные зависимости для определения касательных напряжений (9), динамической скорости (13), позволяющие по уравнениям (1,4) определить коэффициент теплоотдачи для рассматриваемых систем. Данные зависимости являются достаточно простыми для инженерной практики. В некоторых исследованиях подтверждаются выше приведенная модель и выводы [11, 12]. Показано, что основными факторами влияющими на процесс теплообмена являются газосодержание пенной смеси, скорость движения и теплофизические свойства газожидкостной смеси. Полученные результаты теоретических исследований подтверждаются экспериментальными данными, в том числе проведённые другими авторами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Соколов, В. Н., Доманский, И. В.** Газожидкостные реакторы [Текст]. – Л. : Машиностроение, 1976. – 216 с.
- 2 **Соколов, В. Н., Яблокова, М. М.** Аппаратура микробиологической промышленности [Текст]. – Л. : Машиностроение, 1988. – 278 с.
- 3 **Тишин, В. Б., Новосёлов, А. Г., Головинская, О. В.** Процессы переноса в технологических аппаратах пищевых и микробиологических производств: учеб. пособие [Текст]. – СПб. : Университет ИТМО, 2016.– 195 с.
- 4 **Ветошкин, А. Г.** Физические основы и техника процессов сепарации пен [Текст]. – М.: инфа-инженерия, 2016.–404 с.
- 5 **Петров, Н. А.** Теплообмен и поверхность контакта фаз в струйно-инжекционных аппаратах пищевой и микробиологической промышленности: автореф...дис. кан. техн. наук/ Н. А. Петров.– Санкт-Петербург, 2004.– 16 с.
- 6 **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа [Текст]. – М. : Дрофа, 2003.– 841 с.
- 7 **Лаптева, Е. А., Лаптев, А. Г.** Прикладные аспекты явлений переноса в аппаратах химической технологии и теплоэнергетики (гидромеханика и тепломассообмен) [Текст]. – Казань : Издательство «Печать-Сервис XXI век», 2015. – 236 с.
- 8 **Поддубный, А. А.** Исследование гидродинамики и теплообмена при движении пен в каналах: дис. ... канд. техн. наук /А. А. Поддубный. – Л., 1980. –127 с.
- 9 **Островский, Г. М.** Пневматический транспорт сыпучих материалов в химической промышленности [Текст].– Л. : Химия, 1984. –104 с.

10 **Аэров, М. Э., Тодес, О. М.** Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем [Текст]. – Л.: Химия, 1986. – 510с.

11 **Usman, Xia Zhipeng, Wang Jianhong, Memon Abid Ali, Muhammad Taseer.** Numerical study of heat transfer in a 3D triangular prism with a rotating cylinder using ternary hybrid nanofluids and a new regression model [Текст]. // Nonlinear Dynamics. – Volume 113. – Issue 8. – April 2025. – P. 8161–8192 [Electronic resource]. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-024-10559-1>

12 **Piradi Morteza, Pesteei, Seyed Mehdi.** Numerical investigation of convective heat transfer and friction factor of laminar air ow in a perforated trapezoid-shaped plate-n channel in 3 dimensions with geometric analysis (A new achievement) [Текст]. // Scientia Iranica.– Volume 31. – Issue 20. – P. 1889 – 1905 November and December 2024. – <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0 105001015219&origin=reflist>

REFERENCES

1 **Sokolov, V. N., Domanskij, I. V.** Gazozhidkostnye reaktory [Gas-liquid reactors] [Text] – L. : Mashinostroenie, 1976. – 216 p.

2 **Sokolov, V. N., Yablokova, M. M.** Apparatura mikrobiologicheskoy promyshlennosti [Equipment for the microbiological industry] [Text]. –L. : Mashinostroenie, 1988. – 278 p.

3 **Tishin, V. B., Novosëlov, A. G., Golovinskaya, O. V.** Processy perenosa v tekhnologicheskikh apparatah pishchevyyh i mikrobiologicheskikh proizvodstv: ucheb. posobie [Transfer processes in technological devices of food and microbiological production: textbook. [Text]. – SPb. : Universitet ITMO, 2016–195 p.

Vetoshkin, A. G. Fizicheskie osnovy i tekhnika processov separatsii pen [Physical foundations and technology of foam separation processes [Text]. – M. : infa-inzheneriya. – 2016.– 404 p.

5 **Petrov, N. A.** Teploobmen i poverhnost' kontakta faz v strujno-inzhekcionnykh apparatah pishchevoj i mikrobiologicheskoy promyshlennosti: avtoref...dis. kan. tekhn. nauk [Heat transfer and phase contact surface in jet injection devices of the food and microbiological industry: abstract of thesis. can. tech. sciences]/ N. A. Petrov.– Sankt-Peterburg, 2004.– 16 p.

6 **Lojcyanskij, L. G.** Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas] [Text] – M.: Drofa. – 2003.– 841 p.

7 **Lapteva E. A., Laptev A. G.** Prikladnye aspekty yavlenij perenosa v apparatah himicheskoy tekhnologii i teploenergetiki (gidromekhanika i

teplomassoobmen) [Applied aspects of transfer phenomena in chemical technology and heat power engineering devices (hydromechanics and heat and mass transfer)] [Text]. – Kazan': Izdatel'stvo «Pechat'-Servis XXI vek», 2015. – 236 p.

8 **Poddubnyj, A. A.** Issledovanie gidrodinamiki i teploobmena pri dvizhenii pen v kanalah: dis. ... kand. tekhn. nauk [Research of hydrodynamics and heat transfer during the movement of foams in channels: dis. ...cand. tech. sciences] /A. A. Poddubnyj. – L., 1980. – 127 p.

9 **Ostrovskij, G. M.** Pnevmaticheskij transport sypuchih materialov v himicheskoj promyshlennosti [Pneumatic transport of bulk materials in the chemical industry] [Text]. – L. : Himiya, 1984. – 104 p.

10 **Aerov, M. E., Todes, O.M.** Gidravlicheskie i teplovye osnovy raboty apparatov so stacionarnym i kipyashchim zernistym sloem [Hydraulic and thermal principles of operation of devices with a stationary and fluidized granular bed] [Text]. – L. : Himiya, 1986. – 510 p.

11 **Usman, Xia Zhipeng, Wang Jianhong, Memon Abid Ali, Muhammad Taseer.** Numerical study of heat transfer in a 3D triangular prism with a rotating cylinder using ternary hybrid nanofluids and a new regression model [Text]. // Nonlinear Dynamics. Volume 113, Issue 8. – April. – 2025. – P. 8161–8192 – [Electronic resource]. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-024-10559-1>

12 **Piradi Morteza, Pesteei, Seyed Mehdi.** Numerical investigation of convective heat transfer and friction factor of laminar air flow in a perforated trapezoid-shaped plate-n channel in 3 dimensions with geometric analysis (A new achievement) [Text]. // Scientia Iranica.– Volume 31. – Issue 20. – P. 1889– 1905 November and December 2024. [Electronic resource]. – <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0 105001015219&origin=relist>

Поступило в редакцию 10.01.25.

Поступило с исправлениями 03.07.25.

Принято в печать 05.09.25.

*А. А. Поддубный¹, *Н. А. Какабаев², А. Т. Кабдулина³,*

Ж. Ж. Байжолова⁴, Р. А. Поддубный⁵

^{1,2,3,4,5}Ш. Уәлиханова атындағы Көкшетау университеті,

Қазақстан Республикасы, Көкшетау қ.;

10.01.25 ж. баспаға түсті.

03.07.25 ж. түзетулерімен түсті.

05.09.25 ж. басып шығаруға қабылданды.

ТІК ҚҰБЫРЛАРДАҒЫ ГАЗ-СҰЙЫҚТЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ҚОЗҒАЛЫСЫ КЕЗІНДЕ ЖЫЛУДЫ ТАСЫМАДАУ ПРОЦЕССИН ЗЕРТТЕУ

Мақалада әртүрлі жылу қондырғыларындағы тік құбырлардағы тұрақты газ-сұйықтық (көбік) ағындарының төмен қарай қозғалысы кезінде газ құрамының кең диапазонында 0,7 (70 % газ) дейін өзгертін газ-сұйықтық (көбік) жүйелеріндегі жылу беру мәселесі қарастырылады. Бұл жұмыста сонымен қатар жылу алмасу элементтерінің қабырғасынан төмен түсетін газ-сұйықтық ағынына немесе қарастырылып отырған ағыннан қабырғаға керісінше жылу беру коэффициентін анықтау мәселесі қарастырылады.

Зерттелетін көбік ағыны $0,4 \div 1,4$ м/с жылдамдықпен қозғалатын эмульсиялық (тамиш) ұсақ дисперсті құрылымға ие. Мұндай ағынның газ мөлшері көлденең қимада тұрақты болады. Берілген ағынның қозғалысы кезінде жылу беру коэффициенттерін есептеу теңдеулерін алу үшін жартылай эмпирикалық әдіс қолданылады. Бұл жағдайда жылу алмасу процесінің физикалық моделі ұсынылған. Жылу беру коэффициентін есептеуге арналған теңдеулер алынды. Оларға сәйкес эксперименттік коэффициенттер енгізіледі. Алынған есептелген тәуелділіктер авторлардың эксперименталды зерттеулерімен және басқа тәуелсіз зерттеулермен расталады.

Зерттеу нәтижесінде газдылығы 0,2-ден 0,7-ге дейінгі тұрақты көбік жүйелерінің төмен қарай жылжу кезінде жылу беру коэффициенті көлемдік газ мөлшерінің жоғарылауымен төмендейтіні, фгж кезінде ең төменгі мәндерге жететіні анықталды. $\varphi_{\text{жж}} = 0,7$. Жылу беру процесі көбік қоспасының жылу өткізгіштігіне байланысты, әсіресе қабырға қабатында. Фазалардың салыстырмалы қозғалысы жылу алмасу процесіне елусіз әсер етеді.

Бұл теориялық зерттеулер мен алынған теңдеулерді жылу алмасу құрылғыларын есептеу, химиялық, биологиялық реакторлардың жылулық есептеулері және басқа да жабдықтар үшін пайдалануға болады.

Кілтті сөздер: газ-сұйықтық ағыны, турбулентті, жылу тасымалдау, жылу беру коэффициенті, газ мөлшері, энергияның диссипациясы, көбік ағыны.

*A. A. Poddubnyy¹, *N. A. Kakabayev², A. T. Kabdulina³,*

Zh. Zh. Baizholova⁴, R. A. Poddubnyy⁵

^{1,2,3,4,5}Kokshetau University named after Sh. Ualikhanov,

Republic of Kazakhstan, Kokshetau.

Received 10.01.25.

Received in revised form 03.07.25.

Accepted for publication 05.09.25.

RESEARCH OF THE HEAT TRANSFER PROCESS DURING THE MOTION OF GAS-LIQUID SYSTEMS IN VERTICAL PIPES

The article considers the problem of heat transfer in gas-liquid (foam) systems, in a wide range of gas content changes down to 0.7 (70 % gas), with a downward motion of stable gas-liquid (foam) flows in vertical pipes in various heating units. This work also considers the issue of determining the heat transfer coefficient from the wall of heat exchange elements to the descending gas-liquid flow or vice versa from the flow under consideration to the wall. The foam flow under study has an emulsion (droplet) finely dispersed structure moving at a speed of $0.4 \div 1.4$ m/s. The gas content of such a flow is constant over the cross section. In order to obtain equations for calculating heat exchange coefficients during the movement of this flow, a semi-empirical method is used. A physical model of the heat transfer process for this case is proposed. Equations for calculating the heat transfer coefficient are obtained. The corresponding experimental coefficients are introduced into them. The obtained calculated dependencies are confirmed by the authors' experimental studies and other independent studies.

As a result of the studies, it was established that the heat transfer coefficient for the downward movement of stable foam systems, with a gas content of 0.2 to 0.7, decreases with an increase in the volumetric gas content, reaching the lowest values at $\varphi_{\text{зак}} = 0.7$. The heat transfer process depends on the thermal conductivity of the foam mixture, especially in the near-wall layer. The relative movement of the phases has a negligible effect on the heat transfer process.

These theoretical studies and the obtained equations can be used to calculate heat exchangers, thermal calculations of chemical, biological reactors and other equipment.

Keywords: gas-liquid flow, turbulent, heat transfer, heat transfer coefficient, gas content, energy dissipation, foam flow.

Теруге 09.09.2025 ж. жіберілді. Басуға 30.09.2025 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4447

Сдано в набор 09.09.2025 г. Подписано в печать 30.09.2025 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4447

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz