DOI: 10.67889/2181-144X-2026-3-48-53

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ ПРИ ПСЕВДООЖИЖЕНИИ ЗЕРНИСТОЙ ФАЗЫ ЖИДКОСТЬЮ

Назора Худойбердиева *[0009-0001-6417-6318]*
Навоийский государственный горно-технологический университет, (PhD) доцент кафедры «Химической технологии», E_mail: hudojberdievanazora@gmail.com

Аннотация: В работе приведены результаты экспериментального исследованияи процессов конвективного теплообмена внутри вертикальной теплообменной трубы при псевдоожижении различных видов полидисперсных и монодисперсных зернистых материалов капельной жидкостью (водой).

Описана экспериментальная установка с двухсекционным обогреваемым рабочим участком и измерительным комплексом. Получены расчетные зависимости для определения коэффициентов теплоотдачи от внутренней поверхности стенки к двухфазному потоку. Установлено влияние геометрической формы, плотности частиц и скорости фильтрации на степень турбулизации пристенного пограничного слоя. Определены оптимальные значения чисел псевдоожижения для гравия и свинцовой дроби, обеспечивающие максималь-ную интенсификацию теплообмена и предотвращение накипеобразования.

Ключевые слова: конвективный теплообмен, псевдоожиженный слой, коэф-фициент теплоотдачи, зернистый материал, критерий Нуссельта, критерий, Рейнольдса, турбулизация пограничного слоя, интенсификация.

Аннотация: Мақолада вертикал иссиқлик алмашиниш қувури ичида турли хилдаги полидисперс ва монодисперс донадор материалларни суюқлик (сув) ёрдамида мавҳум қайнаш қатламини ҳосил қилиш шароитида конвектив иссиқлик алмашинуви жараёнларини тажрибавий тадқиқ этиш натижалари келтирилган. Икки секцияли иситиладиган ишчи қисм ва ўлчов мажмуасига эга тажриба қурилмаси баён этилган. Ички девор юзасидан икки фазали оқимга иссиқлик бериш коэффициентларини аниқлаш учун ҳисоблаш боғлиқликлари олинган. Заррачаларнинг геометрик шакли, зичлиги ва суюқлик тезлигининг девор олди чегаравий қатлами турбулизациясига таъсири аниқланган. Иссиқлик алмашинувини максимал жадаллаштиришни ва чўкма ҳосил бўлишининг олдини олувчи гравий ва қўрғошин сочмаси учун мавҳум қфйнаш сони аниқланган.

Калит сўзлар: конвектив иссиқлик алмашинуви, мавҳум қайнаш қатлами, иссиқлик бериш коэффициенти, донадор материал, Нуссельт мезони, Рейнольдс мезони, чегаравий қатлам турбулизацияси, жадаллаштириш.

Abstract: The paper presents the results of an experimental study on convective heat transfer processes inside a vertical heat-exchange tube during the fluidization of various poly- and monodisperse granular materials by a liquid (water). The experimental setup, consisting of a two-section heated working zone and an advanced measuring system, is described. Empirical relations were derived to calculate heat transfer coefficients from the inner wall surface to a two-phase flow. The influence of particle shape, density, and liquid velocity on the degree of boundary layer turbulence was determined. Optimal fluidization numbers were identified for gravel and lead shot, offering maximum heat transfer intensification and prevention of scale formation.

Keywords: convective heat transfer, fluidized bed, heat transfer coefficient, granular material, Nusselt number, Reynolds number, boundary layer turbulence, intensification.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях глобального энергосбережения и ресурсосбережения важнейшей задачей химической, нефтеперерабатывающей, нефтехимической и пищевой отраслей промышленности является разработка высокоэффективных теплообменных аппаратов. Традиционные кожухотрубчатые теплообменники,

работающие с однофазными жидкими средами при ламинарном или слаботурбулентном режимах течения, характеризуются относительно низкими коэффициентами теплоотдачи. Основное термическое сопротивление переносу тепла сосредоточено в узком пристенном ламинарном подслое жидкости, формирующемся у внутренней поверхности труб. Кроме того, серьезной проблемой при эксплуатации такого оборудования является интенсивное образование отложений (накипи, продуктов полимеризации, механических загрязнений) на поверхностях нагрева, что приводит к резкому падению производительности и необходимости частых остановок на очистку.

Одним из наиболее перспективных методов преодоления указанных недостатков является применение псевдоожиженного (взвешенного) слоя твердых зернистых частиц в качестве динамического интенсификатора конвективного теплообмена. Принимая участие в интенсивном хаотическом движении под действием восходящего потока жидкости, твердые частицы непрерывно очистит пристенный пограничный слой, разрушают его структуру и генерируют микровихри непосредственной близости от стенки. В результате термическое сопротивление жидкостной пленки резко снижается, а коэффициент теплоотдачи возрастает в несколько раз. Дополнительным технологическим преимуществом метода является постоянный автомеханический самоочистка поверхности трубы твердой фазой, предотвращающий зарождение и рост накипных отложений.[1]Интенсивность гидродинамических и тепловых процессов во взвешенном слое определяется комплексом факторов: начальной высотой неподвижного слоя H_0, фиктивной скоростью жидкости, гранулометрическим составом, формой и плотностью частиц. Целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование коэффициентов теплоотдачи от внутренней стенки трубки к жидкостному псевдоожиженному слою с широким варьированием физико-механических характеристик дисперсной фазы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования внешнего и внутреннего теплообмена проводились на специализированном лабораторном стенде, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

Главным рабочим элементом установки является вертикальная теплообменная труба из коррозионностойкой нержавеющей стали с внутренним диаметром D=34 мм и толщиной стенки, обеспечивающей усредненный диаметр $D_{ср}$=36 мм. Труба состоит из двух изолированных по нагреву секций (А и Б) высотой по 0,5 м каждая (общая рабочая длина L=1,0м). Секции оснащены индивидуальными электрическими нагревателями сопротивления, позволяющими задавать и регулировать плотность теплового потока.

Для визуального мониторинга гидродинамического поведения взвешенного слоя (фиксации момента закипания слоя, высоты расширения H, поршнеобразования и уноса) вдоль рабочей зоны выполнены три герметичных смотровых окна из термостойкого стекла, снабженные подсветкой.

В качестве ожижающего агента применялась водопроводная вода с начальной температурой 20÷25°C. В качестве твердой фазы использовался широкий спектр материалов различной плотности и геометрии:

1. Стальные шарики: сферическая форма, диаметры d = 2,0; 4,0; 5,0 мм;
2. Полихлорвиниловые (ПХВ) шарики: сферическая форма, плотность $\rho_т$=1700 кг/м^3, диаметры d=3,0; 6,0 мм;
3. Свинцовая дробь: сферическая форма, высокая плотность ($\rho_т$≈11300 кг/м^3), средний диаметр d = 1,6; 2,4 мм;

4. Полидисперсный гравий: неправильная форма частиц, средний диаметр d=2,6; 3,8 мм.

Подача воды регулировалась игольчатым вентилем, а расход контролировался поплавковыми ротаметрами. Для калибровки ротаметров в ходе опытов регулярно применялся объемно-хронометрический метод с использованием мерного цилиндра и секундомера.

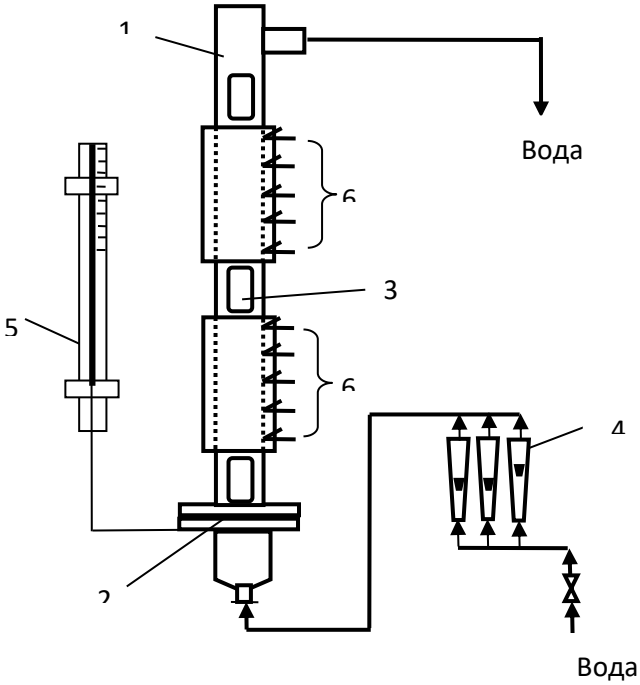


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.
1 - рабочий аппарат; 2 - распределительная решетка; 3 - смотровые окна;4 - ротаметры; 5 - пьезометр; 6-термопары.

Температура воды на входе и выходе каждой секции измерялась стеклянными лабораторными термометрами ТЛ-4 с ценой деления 0,1°С, установленными под наклоном в центре потока. Температурное поле стенки по высоте трубы фиксировалось восемью хромель-копелевыми термопарами (диаметр проволоки 0,2 мм), заделанными в выфрезерованные продольные пазы стенки через равные промежутки. Первая точка замера отстояла на 24 мм от распределительной решетки. Все термопары были предварительно протарированы по образцовому термометру (отклонение не превышало 0,1°С) и подключены через многоточечный переключатель к потенциометру КСП-4 (класс точности 0,25).

Порядок проведения опытов:

В трубу на распределительную решетку засыпалась порция частиц до фиксированной высоты неподвижного слоя H_0.

Включался проток воды, устанавливалась заданная скорость, после чего подавалось напряжение на электронагреватели. Измерения начинались после достижения стационарного теплового режима, критерием которого служила неизменность температурных показателей в течение 1 часа. При каждой фиксированной плотности теплового потока проводилось не менее 20 опытов с последовательным увеличением скорости воды от нуля до значения, соответствующего уносу твердой фазы.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Количество переданного тепла Q рассчитывалось по электрической мощности нагревателя с учетом тепловых потерь в окружающую среду и дублировалось по тепловому балансу протекающей воды: [2]

$$Q = I \cdot U - Q\text{пот} \quad (1)$$

$$Q = G \cdot c \cdot (t2 - t1) \quad (2)$$

где: I, U-ток и напряжение в нагревательной цепи; $Q_{пот}$-градуировочные теплопотери; G-массовый расход воды, кг/с; c-удельная изобарная теплоемкость воды, Дж/(кг·К); t_1, t_2 - температура воды на входе и выходе из секции, °С.

Плотность теплового потока q (Вт/м^2) определялась по формуле: [3]

$$q = Q/F = Q/\pi \cdot D_{ср} \cdot L \quad (3)$$

где: $D_{ср}$-средний диаметр аппарата, $D_{ср}$=0,036 м, L - высота рабочей зоны, м.

Падение температуры в металлической стенке трубы $\Delta T_{ст}$ (°С) учитывалось по уравнению теплопроводности через плоскую стенку с пазом:

$$\Delta T_{ст} = T_н - T_в = q \cdot \delta_{ст}/\lambda_{ст} \quad (4)$$

где $T_н$ - среднеарифметическая температура наружной поверхности стенки по показаниям термопар, °С; $\delta_{ст}$ - эквивалентная толщина стенки трубы, м; $\lambda_{ст}$ - коэффициент теплопроводности нержавеющей стали, Вт/(м·К).

Среднеарифметическая температура внутренней поверхности стенки $T_в$ (°С): [4]

$$T_в = T_н - \Delta T_{ст} \quad (5)$$

Температурный напор со стороны жидкой среды ΔT (°С):

$$\Delta T = T_в - t \quad (6)$$

Среднемассовая температура воды t (°С) ввиду малого нагрева принималась как:

$$t = 0{,}5 \cdot (t_1 + t_2) \quad (7)$$

Средний коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки трубы к псевдоожиженному слою $\alpha_{ср}$ [Вт/(м²·К)]:

$$\alpha_{ср} = q/\Delta T \quad (8)$$

Безразмерные критерии подобия рассчитывались по следующим выражениям:

Критерий Нуссельта:

$$Nu = \alpha_{ср} \cdot D/\lambda \quad (9)$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re = w \cdot D \cdot \rho/\mu \quad (10)$$

Критерий Прандтля:

$$Pr = c \cdot \mu/\lambda \quad (11)$$

где D=0,034 м-внутренний диаметр трубы; w-фиктивная скорость воды в трубе (рассчитанная на полное сечение пустой трубы), м/с; ρ, μ, λ, c-теплофизические свойства воды при определяющей температуре t.

Для автоматизации обработки опытных данных авторами были изучены табличные справочные данные теплофизических свойств воды в интервале T=20÷100°С в виде удобных полиномиальных варьируемых зависимостей [3, 4]:

1. Плотность воды (кг/м^3):

$$\rho = 1010 - 0{,}45 \cdot T \quad (12)$$

2. Динамический коэффициент вязкости (Па·с):

$$\text{при } t < 30°C: \quad \mu = 0{,}00143 \cdot e^{0{,}0175} \cdot T \quad (13)$$

$$\text{при } t \geq 30°C: \quad \mu = 0{,}00120 \cdot e^{0{,}0150} \cdot T \quad (14)$$

3. Удельная теплоемкость [Дж/(кг·К)]:

$$c = 4165 + 0{,}36 \cdot T \quad (15)$$

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К): [5]

$$\lambda = 0{,}42 + 0{,}087 \cdot T^{0{,}24} \quad (16)$$

Оценка погрешностей измерений:

На основе теории ошибок метрологии были рассчитаны максимально возможные относительные погрешности экспериментальных величин: расход воды: 1,5%; плотность теплового потока: 3,0%; температура внутренней поверхности трубы: 4,5%; коэффициент гидравлического сопротивления: 1,8%; коэффициент теплоотдачи 7,0%; коэффициент теплопередачи 10,0%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведенных опытов установлены основные гидродинамические и тепловые закономерности поведения псевдоожиженного слоя.

При малых скоростях фильтрации ($w<w_{кр1}$), когда слой остается неподвижным (стационарным), коэффициент теплоотдачи незначительно отличается от показателей однофазного потока. Однако как только скорость достигает первого критического значения $w_{кр1}$ (точка перехода в псевдоожиженное состояние), происходит резкий скачок интенсивности теплообмена.

При дальнейшем увеличении скорости жидкости напорное перемешивание частиц усиливается, истончая пристенный ламинарный слой, и кривая α=f(w) выходит на достаточно пологий максимум. График, построенный на основе полученных экспериментальных данных, приведен на рис. 2.

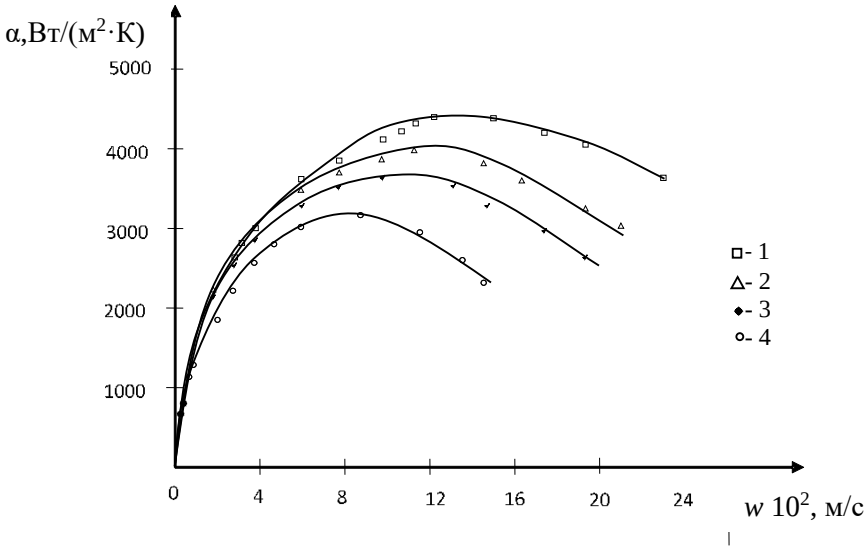


Рис. 2. Характерная зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости жидкости. Гравия 1-3,04 мм; 2-2,54 мм; 3-1,98 мм; 4-1,3 мм.

Наличие этого максимума объясняется конкуренцией двух противоположных факторов:

1. Ростом турбулизации и частоты ударов частиц о стенку (положительный фактор).
2. Увеличением порозности слоя ε и вытеснением частиц из пристенной зоны из-за расширения слоя (отрицательный фактор).

Важнейшим научным результатом исследования является установление влияния формы зернистого материала на тепловую эффективность:

Частицы неправильной формы (гравий) обеспечивают более высокую интенсификацию теплообмена по сравнению со сферическими частицами (стальными

и ПХВ шариками). Грани и острые кромки гравия генерируют микровихри дополнительной мощности в пристенном пограничном слое, приводя к его глубокой деструкции.

Плотность материала: Более тяжелые частицы (свинцовая дробь, сталь) требуют для взвешивания больших скоростей потока, что смещает область максимума α_{max} в сторону более высоких значений критерия Рейнольдса Re. Оптимальные значения числа псевдоожижения ($K=w/w_{кр1}$) составили K=4 ÷6 для гравия и K=8÷12 для тяжелой свинцовой дроби.

Кроме того, во всех опытах со взвешенным слоем зафиксировано полное отсутствие микроотложений и накипи на внутренней поверхности нержавеющей трубы, что подтверждает автомеханический очищающий эффект твердой фазы.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и апробирована экспериментальная методика исследования конвективного теплообмена при псевдоожижении зернистых материалов жидкостью в вертикальной трубе с погрешностью определения коэффициента теплоотдачи, не превышающей ±7%.
2. Доказано, что введение твердой дисперсной фазы в поток жидкости позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи от стенки трубы в 2,5 ÷4,5 раза по сравнению со сплошным однофазным потоком при аналогичных расходах.
3. Установлено, что частицы неправильной формы (гравий) обладают большей интенсифицирующей способностью по сравнению со сферическими гранулами за счет дополнительной турбулизации ламинарного подслоя микрогранями.
4. Определены оптимальные технологические режимы: наибольшие коэффициенты теплоотдачи достигаются в интервале чисел псевдоожижения K=4÷6 для гравия и K=8÷12 для свинцовой дроби.
5. Подтверждена высокая практическая эффективность псевдоожиженного слоя как метода предотвращения накипеобразования в теплообменных трубах, что позволяет рекомендовать данную технологию для внедрения в испарительных и выпарных аппаратах химических производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. Основы техники псевдоожижения. - М.: Химия, 1967. - 664 с.

[2] Бахронов Х. Ш., Худойбердиева Н. Ш. Гидравлическое сопротивление зернистого слоя при восходящем потоке жидкости // Химическое и нефтегазовое машиностроение. - Москва, 2007. - № 12. - С. 12-13.

[3] Тодес О. М., Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы. - Л.: Химия, 1981. - 296 с.

[4] Псевдоожижение / Под ред. И. Ф. Дэвидсона и Д. Харрисона; пер. с англ. В. Г. Айнштейна, Н. И. Гельперина, В. Л. Новобратского. - М.: Химия, 1974. - 782 с.

[5] Bakhronov Kh. Sh., Khudoiberdieva N. Sh. Hydraulic resistance of a granular bed in a rising liquid flow // Chemical and Petroleum Engineering. - 2007. - Vol. 43, No. 11-12. - P. 716-719.