ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ С ТВЕРДОЙ ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ

© 2021 г. Н. О. Усмонов^{а, *}, Х. С. Исаходжаев^{а, **}, М. А. Короли^{а, ***}

^а Ташкентский государственный технический университет, Университетская ул., Вузгородок, д. 2, г. Ташкент, 100095 Республика Узбекистан *e-mail: nizomiddin 1981@mail.ru **e-mail: x.isaxodjayev 1965@yandex.ru ***e-mail: mkoroly@list.ru Поступила в редакцию 15.01.2020 г. После доработки 01.07.2020 г. Принята к публикации 26.08.2020 г.

Рассмотрены вопросы гидродинамики трехфазного псевдоожиженного слоя. Основное внимание уделено экспериментальным исследованиям процесса охлаждения промышленной оборотной воды в трехфазном слое. Разработана и собрана экспериментальная установка, приведены ее краткое описание и принцип работы. Проведены наладочные эксперименты и опыты с двухфазным псевдоожиженным слоем, основной задачей которых являлось определение зависимости от скорости воздуха в аппарате гидравлического сопротивления сухой решетки без насадки. Описана серия опытов, позволивших установить оптимальный режим охлаждения оборотной воды в аппарате с трехфазным псевдоожиженным слоем. Эксперимент выполняли как при постоянной, так и при переменной плотности орошения, опыты повторяли при различных скоростях воздуха. Фиксировали следующие параметры трехфазного псевдоожиженного слоя: гидравлическое сопротивление, скорость начала псевдоожижения, скорость уноса, высота динамического слоя. Представлены результаты экспериментальных исследований скорости псевдоожижения и скорости уноса при различных шаровых насадках, а также зависимости динамической высоты трехфазного псевдоожиженного слоя от скорости и плотности орошения. Получены экспериментальные данные по перепаду давлений в трехфазном псевдоожиженном слое в зависимости от скорости воздуха, скорости начала псевдоожижения орошаемого слоя насадки, скорости захлебывания трехфазного псевдоожиженного слоя как функция плотности орошения. Выполнен анализ гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в трехфазном псевдоожиженном слое, получены основные технологические параметры оптимальной работы установок с указанным слоем применительно к решению задачи охлаждения оборотной воды. Исследована зависимость расширения трехфазного псевдоожиженного слоя от скорости воздуха, плотности орошения. На основе выполненных экспериментальных исследований выведены эмпирические формулы для расчетов.

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, трехфазный псевдоожиженный слой, шаровая полиэтиленовая насадка, плотность орошения, динамическая высота, охлаждение оборотной воды, критическая скорость воздуха, гидродинамическое сопротивление, начало псевдоожижения, захлебывание, скорость уноса

DOI: 10.1134/S0040363621030073

В настоящее время в Республике Узбекистан большое внимание уделяется одному из главных направлений экономики — созданию технологического оборудования для энергетической отрасли с учетом современных требований, в том числе модернизации систем охлаждения оборотной воды и кондиционирования воздуха. В Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан в 2017–2021 гг. [1] отмечена особая важность снижения энерго- и ресурсоемкости экономики путем широкого внедрения в производство энергосберегающих технологий. Данное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных постановлениями [2, 3].

На современном этапе развития техники и промышленности требуется создание аппаратов с высокой интенсивностью тепло- и массообмена. Благодаря очевидным достоинствам псевдоожиженных систем (развитие поверхности контакта фаз, интенсивный тепло- и массообмен, простота управления процессами) были разработаны аппараты с трехфазным псевдоожиженным слоем для химической, нефтехимической, пищевой, фармацевтической промышленности. Прогнозируется, что аппараты с псевдоожиженным слоем будут весьма эффективно использоваться и в энергетике [4–15].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование гидродинамики процессов в трехфазном псевдоожиженном слое весьма актуально, так как получение расчетных формул и разработка методики расчетов таких аппаратов позволят создать тепло- и массообменную аппаратуру высокой интенсивности для предприятий энергетических отраслей. Поэтому целью данной работы является анализ гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в трехфазном псевдоожиженном слое, а также определение основных технологических параметров оптимальной работы установок с указанным слоем для охлаждения оборотной воды. В связи с этим решались следующие задачи:

создать экспериментальный стенд для изучения гидродинамики псевдоожиженного слоя;

вывести эмпирические формулы для расчета гидродинамического сопротивления псевдоожиженного слоя;

определить и проанализировать скорость потока, обеспечивающую начало псевдоожижения или приводящую к захлебыванию в испарительном охладителе, расширение псевдоожиженного слоя.

Научная значимость полученных данных определяется усовершенствованной методикой расчета, основанной на использовании результатов экспериментальных и компьютерных исследований и применяемой при проектировании и эксплуатации испарительных охладителей с трехфазным псевдоожиженным слоем для охлаждения оборотной воды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Проведя анализ имеющихся литературных источников, авторы статьи сделали следующие выводы: во-первых, подходы к определению гидродинамических режимов аппаратов с трехфазным псевдоожиженным слоем существенно различаются, что, соответственно, приводит к значительной разнице в результатах, полученных некоторыми авторами; во-вторых, возможности использования трехфазного псевдоожиженного слоя для охлаждения оборотной воды практически не изучены; в-третьих, в существующей литературе отсутствуют практические рекомендации по проектированию и эксплуатации испарительных охладителей с трехфазным псевдоожиженным слоем для охлаждения оборотной воды.

В связи с этим в представленной работе основное внимание уделено экспериментальным исследованиям процесса охлаждения промышленной оборотной воды в трехфазном слое. С этой целью разработана и собрана экспериментальная установка для исследования гидродинамики трехфазного псевдоожиженного слоя (рис. 1), определены оптимальные условия устойчивого режима его работы и технологические показатели процесса охлаждения воды в трехфазном слое.

Схема специально сконструированной экспериментальной установки показана на рис. 1, б. Опытная установка состоит из колонны 1, системы подачи 2 и сброса 10 жидкости, системы подачи воздуха 5 и измерительных приборов. Основной элемент установки – это рабочий участок. Он выполнен из стекла, чтобы было можно визуально наблюдать процесс псевдоожижения. Диаметр рабочего участка 104 мм и высота 950 мм. В нижней его части установлена опорная решетка 11 живым сечением (отверстия решетки, через которые проходят воздух и вода) 40% с щелевыми отверстиями шириной 5 мм. На ней находится слой инертной насадки 17, представляющей собой полые шары. Диаметр шаров в процессе эксперимента варьировался (26 и 14 мм). Характеристики насадки в виде шаров из полипропилена приведены в таблице.

В целях предотвращения уноса рабочего тела в верхней части рабочего участка установлено сепарирующее устройство 8 – диск с отверстиями живым сечением 70%. В качестве ожижающего газа использовали атмосферный воздух, который вентилятором высокого давления 5 подавали в нижнюю часть рабочего участка под опорную решетку 11. На трубопроводе подачи воздуха установлена стандартная диафрагма 6, соединенная с лифференциальным манометром 7. Правильность измерений расхода воздуха подтверждается тарировкой диафрагмы 6, предварительно проведенной перед экспериментами. Расход воздуха регулируется числом оборотов вентилятора, снабженного двигателем постоянного тока. Для этого на трубопроводе подачи воздуха была установлена поворотная заслонка 15. По высоте рабочего участка раз-

Характеристики шаровидной насадки из полипропилена

Диаметр $d_{\rm m}$, мм	Плотность, кг/м ³	Насыпная масса, кг	Порозность слоя
14	1100	238.15	0.415
26	960	176.62	0.430





Рис. 1. Внешний вид (*a*) и схема (*б*) экспериментальной установки. *1* – колонна; *2* – система подачи жидкости; *3* – водяной насос; *4* – ротаметр; *5* – воздушный вентилятор; *6* – диафрагма; *7* – дифференциальные манометры; *8* – сепарирующее устройство; *9* – выход влажного воздуха; *10* – система сброса жидкости; *11* – опорная решетка; *12* – линейка; *13* – сливной бак; *14* – напорный бак; *15* – поворотная заслонка; *16* – уровень жидкости; *17* – инертная насадка

мещена мерная линейка 12 для измерения высоты статического h_0 и динамического h_{π} слоев насадки 17. В верхней части рабочего участка находится разбрызгивающее устройство. Вода в рабочий участок подается из напорного бака 14 с постоянным уровнем жидкости. На трубопроводе подачи воды установлен ротаметр 4, измеряющий расход жидкости. Вода из рабочего участка поступает в сливной бак 13. Подача воды в напорный бак осуществляется насосом 3. На рабочем участке установлены дифференциальные манометры 7 для измерения гидравлического сопротивления опорной решетки, слоя насадки в состоянии покоя и в псевдоожиженном состоянии, а также для измерения полного гидравлического сопротивления аппарата.

Температуру ожижающего агента измеряли лабораторным термометром с ценой деления 0.1°С, в ходе исследований производили также замеры температуры газа и воды на входе в аппарат и выходе из него. Строение динамического слоя при различных скоростях воздуха и плотности орошения определяли визуально.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первая серия опытов была посвящена тарировке приборов, измеряющих расходы воздуха и

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 3 2021

- 2

- 3

7

w, м/с

6

Рис. 2. Гидравлическое сопротивление двухфазного слоя (решетка вместе с насадкой) при $h_0 = 100$ мм, $d_{\rm m} = 14$ мм. Данные: I - [11]; 2 - [12]; 3 -авторов

3

4

5

2

воды. Были построены графики тарировки диафрагмы, измеряющей расход воздуха, и ротаметра, измеряющего расход воды.

Наладочные эксперименты с двухфазным псевдоожиженным слоем

Наладочные эксперименты проводили с двухфазным псевдоожиженным слоем для сопоставления полученных результатов с данными других авторов и определения гидравлического сопротивления сухой решетки. В этой серии опытов авторы преследовали цель — определить зависимость гидравлического сопротивления сухой решетки без насадки от скорости воздуха в аппарате. Диапазон изменений скорости составлял 0.5—8.0 м/с.

Максимальное гидравлическое сопротивление решетки достигало значения 372.78 Па. Было проведено его сравнение с расчетными формулами, имеющимися в справочной литературе [14].

Результаты определения гидравлического сопротивления двухфазного слоя (воздух, насадка) представлены на рис. 2. Диапазон изменения скоростей в этом эксперименте составил 1.0—7.0 м/с. Максимальное значение перепада давлений в двухфазном слое достигало 686.7 Па при скорости воздуха 7 м/с и высоте статического слоя $h_0 = 100$ мм.

В процессе экспериментов варьировалась высота статического слоя. На графике (см. рис. 2) четко прослеживается начало псевдоожижения слоя насадки. Унос наблюдался при скоростях 7 м/с и более. При сопоставлении с данными других авторов [11, 12] по кривой псевдоожижения двухфазного слоя получено хорошее совпадение с ними результатов проведенных экспериментов.



Рис. 3. Перепад давлений в трехфазном псевдоожиженном слое в зависимости от скорости воздуха при $h_0 = 100$ мм, $d_{\rm II} = 26$ мм (*I*) и 14 мм (*II*). Обозначения см. рис. 2

Определение оптимального режима охлаждения оборотной воды в annapame с трехфазным псевдоожиженным слоем

Последняя серия опытов позволила установить оптимальный режим охлаждения оборотной воды в аппарате с трехфазным псевдоожиженным слоем. В процессе экспериментов включали орошение насадки и при его постоянной плотности фиксировали параметры трехфазного псевдоожиженного слоя: гидравлическое сопротивление, скорость начала псевдоожижения, скорость уноса шаров насадки, высоту динамического слоя $h_{\rm A}$, задержку жидкости в слое. Затем изменяли плотность орошения и повторяли эксперименты при различных скоростях воздуха. Задержку жидкости в слое производили методом отсечки. Изменения высоты и структуры слоя фиксировали визуально.

Определение скоростей начала псевдоожижения и захлебывания трехфазного слоя — это одна из важнейших практических задач гидродинамики аппаратов с трехфазным псевдоожиженным слоем.

На рис. 3 приведена кривая псевдоожижения трехфазного слоя. Видно, что расширение слоя начинается при несколько большем перепаде давлений, чем сопротивление двухфазного псевдоожиженного слоя сухой насадки.

784.8

686.7

588.6 490.5 392.4

294.3

196.2 98.1

0

 Δp , Πa



Рис. 4. Скорость начала псевдоожижения орошаемого слоя насадки как функция плотности орошения при $h_0 = 100$ мм, $d_{\rm III} = 26$ мм (*I*) и 14 мм (*II*). Обозначения см. рис. 2

Наличие пика давления объясняется большой задержкой жидкости слоем насадки в момент перехода ее в псевдоожиженное состояние из-за действия капиллярных сил в точках соприкосновения элементов насадки между собой и со стенками аппарата. Скорость начала движения насадки принята авторами как нижняя предельная (критическая) скорость работы аппарата – $w'_{\rm kp}$. Перепад давлений в слое колеблется в зависимости от скорости воздуха в пределах 196.2–440.5 Па. Обработка экспериментальных данных показала, что гидравлическое сопротивление трехфазного псевдоожиженного слоя Δp пропорционально скорости воздуха $w^{0.65}$ с погрешностью ±9%.

Сопоставление результатов настоящей работы с данными других авторов [11, 12] показало их хорошее совпадение.

С увеличением плотности орошения скорость начала псевдоожижения смещается в сторону более низких значений. За верхнюю критическую скорость $w''_{\rm kp}$ принята скорость воздуха, при которой наблюдается унос шаров.

На рис. 4 представлен график изменения критических скоростей начала псевдоожижения в зависимости от плотности орошения. Вид кривых позволяет сделать вывод о том, что с увеличением плотности орошения первая критическая скорость уменьшается и составляет, например, $w'_{\rm kp} = 1.0$ м/с для шаров диаметром 14 и 26 мм при плотности орошения L = 30 м³/(м² · ч).



Рис. 5. Скорость захлебывания трехфазного псевдоожиженного слоя как функция плотности орошения при $h_0 = 100$ мм, $d_{\rm III} = 26$ мм (*I*) и 14 мм (*II*). Обозначения см. рис. 2

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Обработка экспериментальных данных показала, что скорость начала псевдоожижения пропорциональна плотности орошения:

$$w' = 0.25L^{-0.33}$$

На рис. 5 представлена зависимость скорости захлебывания от плотности орошения. Вид кривых в исследуемом диапазоне плотностей орошения позволяет сделать вывод о том, что с увеличением плотности орошения вторая критическая скорость уменьшается.

Скорость уноса насадки находится в пределах от 4.0 до 8.0 м/с, пропорциональна плотности орошения и выражается зависимостью

$$w'' = 0.664L^{-0.44}$$
.

Отклонение расчетных точек от опытных составляет $\pm 7.5\%$.

Когда начинается унос насадки, шары прилипают к верхней ограничительной решетке и затрудняют проход через нее жидкости и газа. Рабочая зона оказывается переполненной, резко возрастает перепад давления в аппарате и он перестает работать. Поэтому очень важно установить динамическую высоту слоя насадки $h_{\rm d}$, которая не только определяет расстояние между опорными решетками аппарата, но и влияет на интенсивность уноса жидкости из него воздухом. Анализ данных различных авторов показывает, что динамическая высота слоя зависит от статической высоты насадки h_0 , скорости газа, плотности орошения и характеристик самой насадки.



64

Рис. 6. Зависимость динамической высоты трехфазного псевдоожиженного слоя от скорости и плотности орошения при $h_0 = 50$ мм, $d_{\rm III} = 14$ мм.

L, м³/(м² · ч): I - 40; 2 - 20; 3 - 10; точки – экспериментальные данные



Рис. 7. Зависимость динамической высоты трехфазного псевдоожиженного слоя от скорости воздуха и плотности орошения при $h_0 = 100$ мм.

 $L, M^3/(M^2 \cdot q): 1 - 30; 2 - 10;$ точки – экспериментальные данные

Опыты по определению динамической высоты слоя были проведены с шаровой насадкой при различных режимах работы аппарата. На рис. 6–8 показаны зависимости динамической высоты



Рис. 8. Зависимость динамической высоты псевдоожиженного слоя от скорости воздуха и плотности орошения при $d_{\rm m} = 14$ мм. $1 - h_0 = 200$ мм, w = 2 м/с; $2 - h_0 = 100$ мм, w = 1 м/с; точки – экспериментальные данные

трехфазного псевдоожиженного слоя от скорости газа и плотности орошения. Как видно из графиков, степень расширения слоя $R = h_{\rm A}/h_0$ возрастает пропорционально увеличению нагрузки по воздуху и воде. Так, для слоя $h_0 = 50$ мм (см. рис. 6) расширение слоя $h_{\rm A}/h_0$ составляет от 1.5 до 5.0 в интервале скоростей от 2.5 до 3.5 м/с. А с увеличением плотности орошения от 10 до 40 м³/(м² · ч) динамическая высота трехфазного слоя увеличивается в 2.5 раза.

Графики зависимости динамической высоты трехфазного слоя от плотности орошения и скорости воздуха представлены для высоты статического слоя 100 мм (см. рис. 7) и 200 мм (см. рис. 8). Скорость в аппарате изменялась в пределах от 1 до 4 м/с, плотности орошения составляли 10– $30 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Из анализа результатов экспериментов следует, что с увеличением скорости и плотности орошения степень расширения псевдоожиженного слоя может достигнуть значения R = 5.

Авторами проведено сопоставление полученных результатов с расчетными данными по формуле Н. Крайнева [16]

$$h_{\rm m} = 0.13 h_0^{0.9} L^{0.35} w^2.$$

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 3 2021

Максимальное расхождение составило 14%, что находится в пределах погрешности эксперимента.

Обработка экспериментальных данных показала, что высота трехфазного псевдоожиженного слоя $h_{\rm A}$ находится в следующей зависимости от скорости воздуха *w*:

$$h_{\pi} = 0.1 w^{0.6}$$
.

Максимальное расхождение опытных и расчетных данных составляет 7.4%.

Авторами была также выведена зависимость динамической высоты слоя от скорости и плотности орошения:

$$h_{\pi} = 0.22L^{0.14}w^{0.6}.$$

При этом расхождение опытных и расчетных данных не превышает 10%.

Таким образом, в результате проведенной работы создан экспериментальный стенд для исследования процесса охлаждения оборотной воды в трехфазном псевдоожиженном слое и на нем получены данные по перепаду давлений в слое в зависимости от скоростей воздуха, начала псевдоожижения орошаемого слоя насадки, захлебывания трехфазного псевдоожиженного слоя как функции плотности орошения. На основе экспериментальных исследований выведены эмпирические формулы для расчета скорости начала псевдоожижения и динамической высоты трехфазного псевдоожиженного слоя.

выводы

1. Получены эмпирические формулы для определения скорости начала псевдоожижения, скорости уноса слоя насадки, динамической высоты трехфазного псевдоожиженного слоя, высоты слоя жидкости, задерживаемой псевдоожиженным слоем, и гидравлического сопротивления аппарата с трехфазным слоем.

2. Результаты расчетных исследований подтверждены экспериментами. Расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 6.7%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 07.02.2017 "О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан". https://lex.uz/docs/3107042?ONDATE=22.05.2017
- 2. Постановление Президента Республики Узбекистан № ПК-2343 от 05.05.2015 "О программе мер по сокращению энергоемкости, внедрению энер-

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 3 2021

госберегающих технологий в отраслях экономики и социальной сфере на 2015–2019 годы".

- 3. Постановление Президента Республики Узбекистан № ПП-3379 от 08.11.2017 "О мерах по обеспечению рационального использования энергоресурсов".
- Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдоожижения / под ред. Гельперина Н.И. М.: Химия, 1967.
- 5. Усмонов Н.О., Исаходжаев Х.С. Повышение эффективности охлаждения оборотной воды в испарительных охладителях с псевдоожиженным слоем // Вестник МЭИ. 2019. № 2. С. 37–42. https://doi.org/10.24160/1993-6982-2019-2-37-42
- Козак Ф.В. Исследование гидродинамики и массообмена в аппарате с псевдоожиженным слоем орошаемой насадки: дис. ... канд. техн. наук. Одесса: Одесский политехн. ин-т, 1979.
- Бараков А.В. Моделирование гидродинамики и теплообмена в перемещающемся псевдоожиженном слое: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВорГТУ, 2005.
- Левш И.П., Убайдуллаев А.К. Тарельчатые абсорберы и скрубберы с псевдоожиженным (подвижным) слоем. Ташкент: Узбекистан, 1981.
- 9. Медведев Д.И. Тепломассообмен в аппарате с трехфазным центробежным псевдоожиженным слоем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВорГТУ, 2005.
- Колесников С.В. Разработка способов повышения эффективности оборотных систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново: ИЭИ, 2004.
- Новиков В.И. Исследование гидравлических закономерностей аппарата с трехфазным псевдоожиженным слоем инертной орошаемой насадки: дис. ... канд. техн. наук. Казань: КНИТУ, 1972.
- Бляхер Н.Г., Живайкин Л.Я., Юровская Н.А. Исследование гидродинамики и массообмена в аппаратах с подвижной насадкой // Химическое и нефтяное машиностроение. 1967. № 2. С. 18–22.
- Ляшук А. Гидродинамика и теплообмен в абсорбере с трехфазным псевдоожиженным слоем: дис. ... докт. техн. наук. М., 2001.
- 14. Исаходжаев Х.С. Охлаждение оборотной воды промышленных предприятий в псевдоожиженном слое с твердой подвижной насадкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ташкент: ТашГТУ, 2018.
- Коваль Ж.А., Беспалов А.В., Кушелов О.Г. О некоторых гидродинамических закономерностях работы аппарата с подвижной шаровой насадкой // Труды Моск. хим.-технол. ин-та. 1972. Вып. 68. С. 313–314.
- 16. Крайнев Н.И. Исследование гидродинамики и массообмена в абсорбере с псевдоожиженным слоем кольцевой насадки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ташкент: ТашГТУ, 1968. С. 18.

Determining the Parameters of the Fluid Layer with a Rigid Mobile Nozzle

N. O. Usmonov^{*a*, *}, Kh. S. Isakhodzhaev^{*a*, **}, and M. A. Koroli^{*a*, ***}

^aTashkent State Technical University, Tashkent, 100095 Republic of Uzbekistan *e-mail: nizomiddin1981@mail.ru **e-mail: x.isaxodjayev1965@yandex.ru ***e-mail: mkoroly@list.ru

Abstract—Hydrodynamic problems of a three-phase fluidized bed are considered. The main attention is paid to experimental studies into the process of cooling industrial circulating water in a three-phase layer. An experimental setup was developed and assembled, and its brief description and operating principle are given. Adjustment experiments and experiments with a two-phase fluidized bed were carried out, the main task of which was to determine the dependence on the air velocity in the apparatus of the hydraulic resistance of a dry grate without a nozzle. A series of experiments is described that made it possible to establish the optimal cooling mode for circulating water in an apparatus with a three-phase fluidized bed. The experiment was carried out at both constant and variable irrigation density, and the experiments were repeated at different air velocities. The following parameters of the three-phase fluidized bed were recorded: hydraulic resistance, the rate of onset of fluidization, the rate of entrainment, and the height of the dynamic bed. The results of experimental studies into the fluidization rate and entrainment rate at various ball nozzles and the dependence of the dynamic height of a three-phase fluidized bed on the rate and density of irrigation are presented. Experimental data have been obtained on the pressure drop in a three-phase fluidized bed depending on the air velocity, the rate of the beginning of fluidization of the irrigated bed of the packing, and the rate of flooding of the three-phase fluidized bed as a function of the irrigation density. The analysis of hydrodynamic and thermal processes occurring in a three-phase fluidized bed is carried out, and the main technological parameters for the optimal operation of installations with the specified bed are obtained in relation to solving the problem of cooling the circulating water. The dependence of the expansion of a three-phase fluidized bed on air velocity and irrigation density has been investigated. On the basis of the performed experimental studies, empirical formulas for calculations are derived.

Keywords: hydraulic resistance, three-phase fluidized bed, spherical polyethylene packing, irrigation density, dynamic height, cooling of circulating water, critical air velocity, hydrodynamic resistance, onset of fluidization, flooding, entrainment rate