

К ОЦЕНКЕ ОСНОВНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЛОЯ ГРАНУЛИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.С. Василишин, А.Н. Атясов, О.С. Иванов, Д.Б. Иванова

Приведено описание экспериментальной установки и методика проведения опытов по оценке гидродинамических характеристик пульсирующего слоя некоторых гранулированных материалов. Исследовано влияние режимов импульсного псевдооживления слоёв технического силикагеля, полиэтилена низкого давления и полистирола на их основные гидродинамические характеристики (расширение и гидравлическое сопротивление слоя).

Установлено, что максимальные значения расширения слоя соответствуют диапазону частот пульсации 0,5–1,0 Гц, после чего происходит его значительное снижение. При частотах более 5,0 Гц расширение слоя стабилизировалось на достигнутом уровне. Увеличение пульсационной скорости воздуха приводило к росту расширения слоя. Начальная высота слоя не оказывала заметного влияния на его расширение. Получена эмпирическая зависимость для расчёта расширения слоя, описывающая экспериментальные данные с погрешностью $\pm 25\%$.

Выяснено, что при увеличении пульсационной скорости воздуха имеет место возрастание гидравлического сопротивления слоя. При этом, в области частот пульсации 0,5–1,0 Гц при увеличении скорости от 0,8 до 1,2 м/с сопротивление слоя увеличивается, в среднем, на 40–50%. В диапазоне частот от 2,0 до 5,0 Гц рост сопротивления не превышает 10%. С увеличением первоначальной высоты слоя его сопротивление также возрастает. Получена эмпирическая зависимость для расчёта гидравлического сопротивления слоя, описывающая экспериментальные данные с погрешностью $\pm 22\%$.

Ключевые слова: гранулированные материалы, пульсирующий слой, расширение слоя, гидравлическое сопротивление, влияние режимных параметров.

ВВЕДЕНИЕ

Важным моментом при проектировании аппаратуры с псевдооживленным слоем является наличие объективной информации о характере влияния технологических режимов на его основные гидродинамические характеристики – расширение и гидравлическое сопротивление. Этим, в значительной степени, определяются геометрические размеры рабочих камер оборудования, тип и параметры газодувок, а также эффективность реализуемых технологических процессов. Изучению указанных вопросов посвящено достаточно большое число работ [1–5].

Вместе с тем, известно [6,7], что псевдооживленный слой обладает существенными недостатками, главными из которых являются его низкая гидродинамическая устойчивость, проявляющаяся в неравномерности оживления, каналообразовании и залегании части обрабатываемого материала на газораспределительной решетке. Улучшение перемешивания и стабилизация режима псевдооживления могут быть достигнуты за счёт исполь-

зования новых методов контактирования газовой и твёрдой фаз, в том числе режимов пульсирующего слоя [8–10].

К сожалению, имеющиеся литературные данные по влиянию режимов обработки на основные гидродинамические характеристики пульсирующего слоя дисперсных материалов немногочисленны [8,9,11,12] и, во многом, противоречивы.

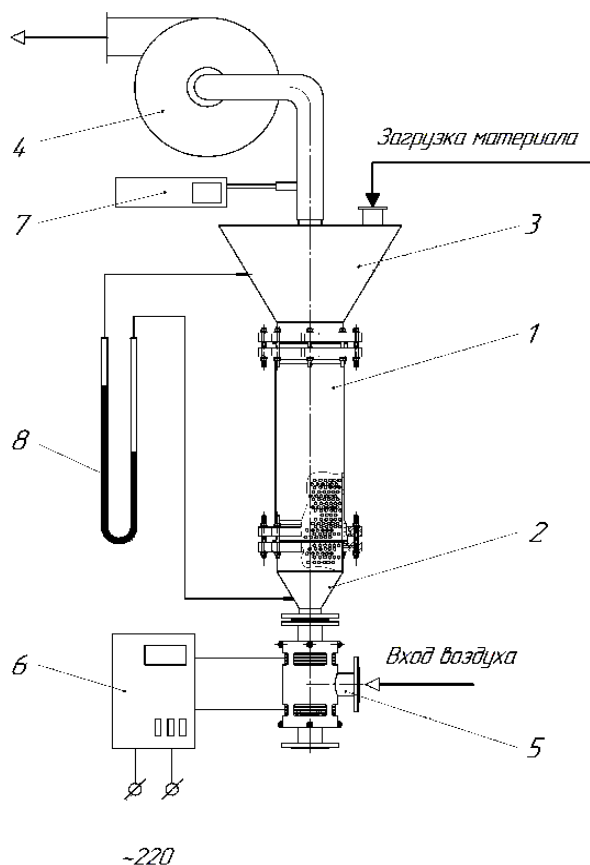
В связи с этим, целью работы является изучение влияния частоты пульсации, скорости оживляющего агента и высоты слоя на его расширение и гидравлическое сопротивление.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследование гидродинамики пульсирующего слоя проводили на установке, схема которой представлена на рисунке 1. В состав установки входила стеклянная цилиндрическая камера 1 с внутренним диаметром $D=0,156$ м и высотой $H=0,5$ м, а также подключенный к ней газоподводящий узел 2. Камера 1 снабжалась набором беспровальных газораспределительных решеток с долей

«живого» сечения $\varphi=5, 10$ и 15% , соответственно. В верхней части камеры располагался расширяющийся кверху сепарационный узел 3, непосредственно к которому подключался хвостовой вентилятор 4.

В атмосферу



1 – цилиндрическая камера; 2 – газоподводящий узел; 3 – сепарационный узел; 4 – хвостовой вентилятор; 5 – электромагнитный клапан; 6 – электронный блок управления; 7 – термоанемометр; 8 – дифференциальный манометр

Рисунок 1 – Схема лабораторной установки

Пульсирующая подача воздуха в камеру 1 обеспечивалась электромагнитным клапаном

Таблица – Физико-химические и структурно-механические характеристики исследуемых материалов

Материал	Истинная плотность $\rho_{и}, \text{кг/м}^3$	Насыпная плотность $\rho_{н}, \text{кг/м}^3$	Эквивалентный размер частиц $d_{ч} \cdot 10^3, \text{м}$	Угол естественного откоса $\gamma, ^\circ$
Силикагель технический ГОСТ 3956–76	1251,0	695,0	3,25	24,0
Полиэтилен низкого давления ГОСТ 16338–85	961,0	528,0	3,50	28,0
Полистирол общего назначения ГОСТ 20282–86	1065,0	560,0	2,68	37,0

ном 5 щелевого типа. Управление работой клапана осуществлялось с помощью электронного блока 6, позволяющего изменять частоту пульсации в диапазоне $f=0,5-5,0$ Гц при скважности импульса $\psi=0,25-0,75$. Блок работал от сети переменного тока напряжением 220 В.

Расход воздуха на псевдооживление регулировали набором сменных диафрагм, размещаемых во входном патрубке клапана. Установка снабжалась приборами, контролирующими основные технологические параметры изучаемого процесса. Скорость воздуха измеряли термоанемометром 7 (TESTO-425, Германия) непосредственно перед входом в хвостовой вентилятор. Гидравлическое сопротивление слоя материала измеряли при помощи дифференциального манометра 8, заборные трубки которого соединялись с соответствующими штуцерами на газоподводящем и сепарационном узлах установки. Расширение слоя материала оценивали визуально по градуировочной шкале, нанесённой на стенку цилиндрической камеры.

В экспериментах по импульсному псевдооживлению использовались гранулированные материалы, некоторые физико-химические и структурно-механические характеристики которых представлены в таблице.

Исследуемые материалы находились в воздушно-сухом состоянии, при этом температура окружающего воздуха составляла $t=20 \pm 2$ °С. Изучали влияние частоты пульсации f , скорости пульсирующей подачи воздуха w_n , высоты неподвижного слоя материала H_0 на величину его расширения $H_{сл}-H_0$ и гидравлическое сопротивление $\Delta P_{сл}$.

Варьируемые параметры находились в следующих пределах: $f=0,5-5,0$ Гц; $w_n=0,8-1,2$ м/с; $H_0=0,05-0,20$ м. Скважность импульса во всех экспериментах составляла $\psi=0,5$.

Визуальными наблюдениями установлено, что импульсный режим псевдооживления в исследованном частотном и скоростном диапазонах делает структуру слоя более однородной, при этом в нём отсутствуют крупные пузыри и струйный прорыв воздуха. На рисунке 2 представлены зависимости расширения слоя от частоты пульсации воздуха.

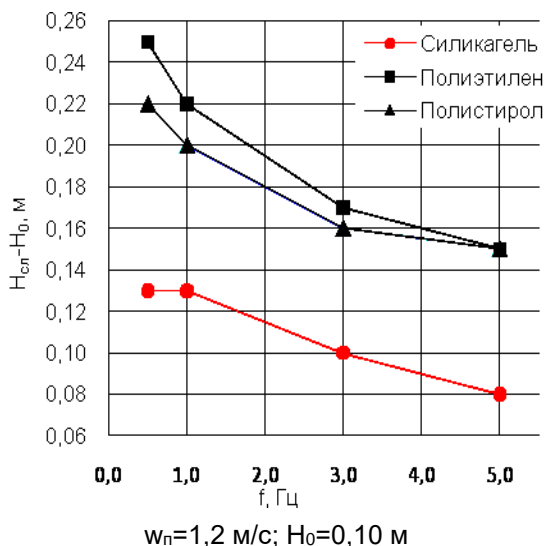


Рисунок 2 – Зависимости расширения слоя от частоты пульсации воздуха

Как видно из графиков, максимальные значения расширения слоя соответствуют частотам $f=0,5-1,0$ Гц, после чего происходит его значительное снижение. Отметим, что в указанном диапазоне период пульсации T изменяется от 2 до 1 с, а время открытого состояния клапана $T_{отк}$ при $\psi=0,5$, соответственно, от 1 до 0,5 с. За один цикл пульсации при прочих равных условиях ($w_n=const$; $\psi=const$) под слой материала поступает меньшее количество воздуха, чем, очевидно, и объясняется снижение его расширения. При $f \geq 5,0$ Гц наблюдалась стабилизация расширения слоя на достигнутом уровне, причём эта тенденция характерна для всех исследованных материалов.

Как и следовало ожидать, увеличение пульсационной скорости воздуха приводило к росту расширения слоя (см. рисунок 3).

Однако, если для силикагеля эта зависимость имеет монотонный характер во всём исследованном диапазоне скоростей воздуха, то для гранул полиэтилена и полистирола при $w_n > 1,0$ м/с изменяется характер их псевдооживления. При этом слой становится неоднородным по своей структуре и в нём уве-

личивается количество пузырей, в результате чего резко возрастает расширение.

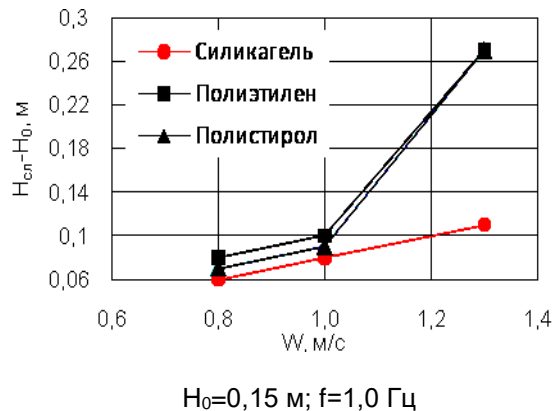


Рисунок 3 – Зависимости расширения слоя от пульсационной скорости воздуха

Начальная высота слоя H_0 не оказывала заметного влияния на его расширение во всём диапазоне изменения режимных параметров.

Экспериментальные данные по расширению пульсирующего слоя исследуемых материалов обработаны в виде зависимости:

$$H_{ср} - H_0 = 0,068(w_n - w_n^{\min})^{0,12} \exp(-0,15f), \quad (1)$$

где w_n – рабочее значение скорости пульсационного псевдооживления материала, м/с;

w_n^{\min} – минимальное значение скорости начала пульсационного псевдооживления материала, м/с.

Согласно [13], w_n^{\min} определяется размером и плотностью частиц обрабатываемого материала, а также скважностью импульса и может быть рассчитана по зависимости:

$$w_n^{\min} = w_{по}(0,85\psi + 0,15), \quad (2)$$

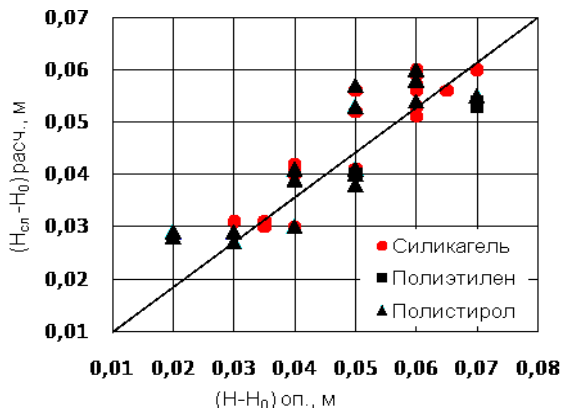
где $w_{по}$ – скорость начала псевдооживления материала в кипящем слое, м/с.

Последняя определяется по критерию Рейнольдса, в соответствии с известной формулой О.М. Тодеса [1]:

$$Re_{кр} = Ar / (1400 + 5,22Ar^{1/2}), \quad (3)$$

где $Ar = d_c^3 \rho_v (\rho_w - \rho_v) g / \mu^2$ – критерий Архимеда.

Отметим, что область применения (1) ограничивается диапазоном измерения рабочих параметров в выполненных экспериментах. На рисунке 4 представлен корреляционный график экспериментальных и рассчитанных по уравнению (1) значений расширения пульсирующего слоя исследуемых материалов. Погрешность вычислений не превышала $\pm 25\%$.



$w_n=0,8-1,2$ м/с; $H_0=0,05-0,2$ м; $f=0,5-5,0$ Гц

Рисунок 4 – Корреляция данных по расширению пульсирующего слоя

в соответствии с зависимостью (1)
Известно, что характерной особенностью псевдооживленного слоя является независимость величины его гидравлического сопротивления от скорости оживающего агента [6,13]. Установлено, что для пульсирующего слоя исследуемых материалов эта закономерность не соблюдается. На рисунке 5 представлена зависимость сопротивления слоя от пульсационной скорости воздуха.

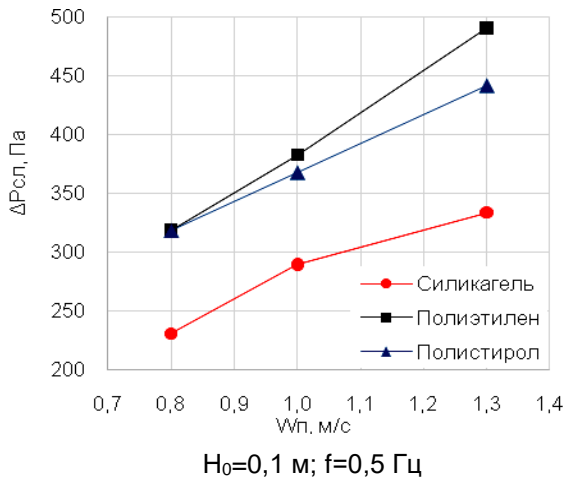


Рисунок 5 – Зависимость гидравлического сопротивления слоя от пульсационной скорости воздуха

Как следует из экспериментальных данных, в области относительно низких частот пульсации ($f=0,5-1,0$ Гц) при увеличении w_n от 0,8 до 1,2 м/с $\Delta P_{сл}$ возрастает в среднем на 40–50%. При более высоких значениях частоты ($f=2,0-5,0$ Гц) рост сопротивления слоя замедляется и не превышает 10% (см. рисунок 6).

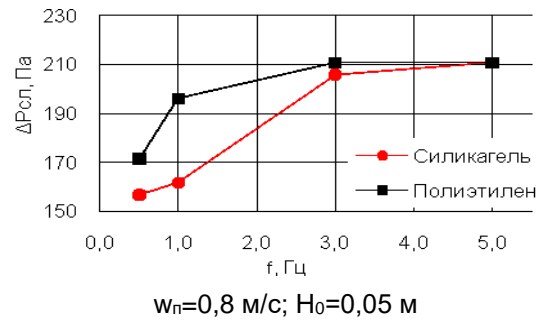


Рисунок 6 – Зависимость сопротивления слоя от частоты пульсации

Визуальными наблюдениями установлено, что при указанных значениях частоты пульсации слой заметно уплотняется и его расширение, как это видно из рисунка 2, принимает минимальные значения.

С увеличением первоначальной высоты слоя его сопротивление в исследованном диапазоне изменения режимных параметров также возрастало.

Экспериментальные данные по гидравлическому сопротивлению слоя обработаны в виде зависимости:

$$\Delta P_{сл} = 9,49 \cdot 10^2 f^{0,18} w_n^{1,3} H_0^{0,45} \quad (4)$$

Область применения уравнения (4) также ограничена диапазоном изменения рабочих параметров в выполненных экспериментах. На рисунке 7 представлен корреляционный график экспериментальных и рассчитанных по уравнению (4) значений гидравлического сопротивления слоя исследованных материалов. Погрешность вычислений не превышает $\pm 22\%$.

Работа выполнена с использованием оборудования БиЦКП (г. Бийск, ИПХЭТ СО РАН).

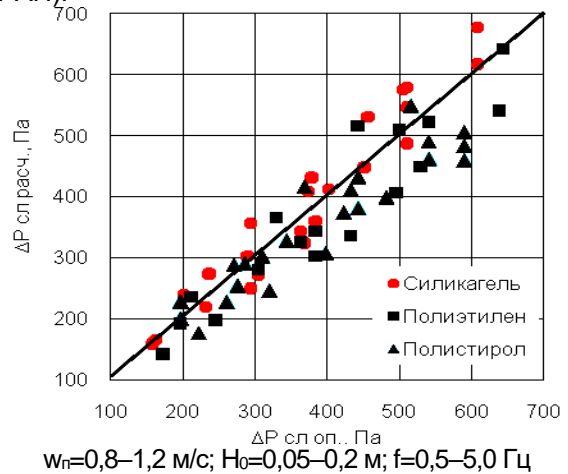


Рисунок 7 – Корреляция данных по гидравлическому сопротивлению пульсирующего слоя в соответствии с зависимостью (4)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние режимов импульсного псевдооживления слоя некоторых гранулированных материалов (силикагель технический, полиэтилен низкого давления, полистирол общего назначения) на его расширение и гидравлическое сопротивление. Получены эмпирические зависимости, необходимые для инженерного расчёта указанных величин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азров, М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М.Э. Азров, О.М. Тодес.– Л.: Химия, 1968.– 512 с.
2. Гельперин, Н.И. Псевдооживление / Под ред. И.Ф. Дэвидсона и Д. Харрисона: пер. с англ. под ред. Н.И. Гельперина.– М.: Химия, 1974.– 725 с.
3. Кунии, Д. Промышленное псевдооживление / Д. Кунии, О. Левеншпиль. Пер. с англ. под ред. М.Г. Слинько.– М.: Химия, 1976.– 447 с.
4. Расчёты аппаратов кипящего слоя: Справочник / под ред. И.П. Мухлёнова и др.– Л.: Химия, 1968.– 352 с.
5. Баскаков, А.П. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, А.Ф. Рыжков и др.– М.: Металлургия, 1978.– 247 с.
6. Романков, П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П.Г. Романков, Н.Б. Рашковская.– Л.: Химия, 1979.– 272 с.
7. Сажин, Б.С. Основы техники сушки.– М.: Химия, 1984.– 319 с.
8. Бокун, И.А. Исследование гидродинамики и теплообмена пульсирующего слоя: автореф. дис. ... канд. техн. наук.– Минск, 1967.– 15 с.
9. Локшин, Ю.Х. Исследование импульсного псевдооживления и определение рациональных

режимов работы аппаратов: автореф. дис. ... канд. техн. наук.– Л.: 1977.– 19 с.

10. Василишин, М.С. Разработка аппаратуры с пульсирующим слоем для интенсификации процесса сушки фармацевтических продуктов / М.С. Василишин, Ф.В. Гусс, З.Б. Подсевалова и др. // Фундаментальные и прикладные проблемы технической химии: к 10-летию Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН: сборник научных трудов.– Новосибирск: Наука, 2011.– с. 326–331.

11. Alfredson, P.G. Behavior of pulsed fluidized beds.– Part 1: Bed expansion / P.G. Alfredson, I.D. Doig // Trans. Inst. Chem. Eng.– 1973.– v.51.– p.232–241.

12. Kobayashi, M. Pulsed bed approach to fluidization / M. Kobayashi, D. Ramaswami, W.T. Brazelton // Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.– 1970.– v.66.– №105.– p.47–57.

13. Айнштейн, В.Г. Псевдооживление / В.Г. Айнштейн, А.П. Баскаков, Б.В. Берг и др.– М.: Химия, 1991.– 400 с.

Василишин Михаил Степанович – д.т.н., доцент, заведующий лабораторией ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, E-mail: ipcet@mail.ru

Атясов Алексей Николаевич – ведущий инженер-конструктор, руководитель группы АО «ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, E-mail: post@fnpc.secna.ru

Иванов Олег Сергеевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, E-mail: ipcet@mail.ru

Иванова Дарья Борисовна – к.т.н., научный сотрудник лаборатории ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, 659322, E-mail: ipcet@mail.ru