

## ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ

Худойбердиева Н.Ш.

Навоийский государственный горный и  
технологический университет, PhD, доц.  
[knazora@mail.ru](mailto:knazora@mail.ru)

### Аннотация

Mavhum qaynash qatlamini qo`llash ayniqsa issiqlik va massa uzatish jarayonlarini o'tkazish uchun juda katta ahamiyat ega, chunki u termik yoki diffuziya qarshiligini donador materialning qo`zg`almas mavhum qaynash holatida sodir bo'ladigan jarayonlarga nisbatan o'nlab va ba'zan yuzlab marta kamaytiradi. Biroq, statsionar va mavhum qaynovchi suyuq donador qatlamli apparatlarda gidrodinamika va issiqlik va massa almashinuvini hisoblashning aniq usulining yo'qligi sanoatda mavhum qaynash jarayonidan foydalanishni cheklaydi.

Mavhum qaynash sistemasidagi issiqlik uzatish jadalligi qatlamning gidrodinamikasi va tuzilishiga bog'liq bo'lganligi tufayli, qo'zg`almas va mavhum qaynayotgan polidispers donador material qatlamlarining gidravlik qarshiligi, mavhum qaynashning boshlanish tezligi, qatlamning kengayishi va qattiq zarrachalarning uchib apparatdan chiqib ketish tezliklari kabi asosiy texnologik parametrlarga bag'ishlangan tadqiqotlar natijalari ham keltirilgan.

Polidispers donador materiallarning suyuqlikka aralashish nuqtasi bilan emas, balki suyuqlik qaynashining boshlanish tezligi diapazoni bilan tavsiflanadi. Qatlam asta-sekin qaynash holatiga o'tadi - avval kichik, keyin esa kattaroq zarralar qaynay boshlaydi. Bunday holda, ko'pincha mavhum qaynash egri chizig'ida aniq belgilangan bosim cho'qqisi yo'q.

Polidispers donador materiallarning mavhum qaynash qatlami gidrodinamikasini o'rganish monodispers sistemalarning mavhum qaynash qatlamidan farq qiladi va shu bilan birga, mavhum qaynash qatlami gidrodinamikasining qiymati hisob-kitoblar natijalariga mos keladi.

**Tayanch so'zlar:** gidrodinamika, mavhum qaynash qatlami, polidispers donador materiallar, qaynovchi qatlam, monodispers sistema, g'ovaklik, tenglama, jadallashtirish, issiqlik uzatish, truba, bosimning o'zgarishi, qattiq zarrachalar,



o‘zgaruvchi oqim, issiqlik tashuvchi, issiqlik o‘tkazish, gaz oqimi, qo‘zg‘almas, issiqlik almashinish, devorlar, koeffitsient, issiqlik berish, apparat, yuza, mavhum.

### Аннотация

Значение метода псевдооживления особенно велико проведения тепломассообменных процессов, так как в десятки, а иногда и в сотни раз уменьшает термическое или диффузионное сопротивление по сравнению с процессами, протекающими в условиях неподвижного состояния зернистого материала. Однако, отсутствие точной методики расчёта гидродинамики и тепломассообмена в аппаратах со стационарным и кипящим зернистым слоем ограничивает применения псевдооживления в промышленности.

Интенсивность переноса тепла в псевдооживленных системах зависит от гидродинамики и структуры слоя, проведены также исследования основных технологических параметров, такие как гидравлическое сопротивление неподвижного и взвешенного слоев полидисперсного зернистого материала, критические скорости псевдооживления, расширение слоя и унос твердых частиц из аппарата.

Для псевдооживления полидисперсных материалов характерна не точка, а некоторый диапазон скоростей начала псевдооживления. Слой постепенно переходит в состояние псевдооживления - сначала мелкие, а затем более крупные частицы. При этом на кривой псевдооживления нередко отсутствует четко выраженный пик давления.

Отмечено, что изучения гидродинамика псевдооживленного слоя полидисперсных зернистых материалов отличается от псевдооживленного слоя монодисперсных систем, и вместе с этим величина гидродинамика псевдооживленного слоя соответствует с результатами расчетов по уравнениям имеющейся в литературе.

**Ключевые слова:** гидродинамика, псевдооживленный слой, полидисперсные зернистые материалы, кипящий слой, монодисперсных систем, порозность, уравнения, интенсификация, теплообмен, труба, перепад давления, твердые частицы, восходящий поток, теплоноситель, перенос тепла, газовый поток, неподвижный, теплообмен, стенки, коэффициент, теплоотдача, аппарат, поверхность, взвешенный.



## Annotation

The value of the fluidization method is especially great for conducting heat and mass transfer processes, since it reduces thermal or diffusion resistance by tens and sometimes hundreds of times compared to processes occurring in a stationary state of a granular material. However, the lack of an accurate method for calculating hydrodynamics and heat and mass transfer in apparatuses with a stationary and fluidized granular bed limits the use of fluidization in industry.

The intensity of heat transfer in fluidized systems depends on the hydrodynamics and structure of the layer, and research has also been carried out on the main technological parameters, such as the hydraulic resistance of the fixed and suspended layers of polydisperse granular material, critical fluidization rates, expansion of the layer and entrainment of solid particles from the apparatus.

The fluidization of polydisperse materials is characterized not by a point, but by a certain range of fluidization start rates. The layer gradually passes into a state of fluidization - first small, and then larger particles. In this case, there is often no clearly defined pressure peak on the fluidization curve.

It is noted that the study of the hydrodynamics of the fluidized bed of polydisperse granular materials differs from the fluidized bed of monodisperse systems, and at the same time, the value of the hydrodynamics of the fluidized bed corresponds to the results of calculations using the equations available in the literature.

**Key words:** hydrodynamics, fluidized bed, polydisperse granular materials, fluidized bed, monodisperse systems, porosity, equations, intensification, heat transfer, pipe, pressure drop, fluidization, ascending flow, coolant, heat transfer, gas flow, stationary, heat transfer, walls, coefficient, heat transfer, apparatus, surface, weighted.

## Введение

В промышленности теплопередача при непосредственном соприкосновении теплоносителей применяется реже, чем через разделяющую их стенку, и соответственно этот процесс исследован значительно меньше. Однако в ряде случаев теплоперенос при непосредственном контакте газовых и жидких, газовых и твердых теплоносителей позволяет с большей эффективностью проводить процессы теплообмена и существенно упрощать их аппаратное оформление. Змеевиковые теплообменники характеризуются высокими коэффициентами теплопередачи и большой производительностью, а также



незначительным гидравлическим сопротивлением. *Эти аппараты* используются для конденсации паров, охлаждения или нагрева газов, твердого зернистого материала и нагрева агрессивных жидкостей.

В настоящее время во многих отраслях промышленности имеются возможности заменить поверхностные теплообменники на более эффективные аппараты с непосредственным контактом теплоносителей. Изучение работы цехов АО «Навоизот» показали, что во многих технологиях имеется необходимость перевода технологических систем, включающих поверхностные теплообменники, на использование (там, где это возможно) более эффективных контактных теплообменных аппаратов.

Одним из существенных недостатков поверхностных теплообменников является чувствительность к отложениям, что связано с резким снижением интенсивности теплообмена, увеличением гидравлического сопротивления аппарата, скорости коррозии и расхода теплоносителя. Периодическая остановка теплообменного оборудования для её очистки приводит к увеличению эксплуатационных затрат и снижению производительности. Предотвращение или уменьшение скорости солеотложения позволит увеличить интенсивность теплопередачи, снизить расход теплоносителя и электроэнергии на её перекачку.

Следует отметить, что необходимость перевода технологических систем, включающих поверхностные теплообменники, на использование (там, где это возможно) более эффективных контактных теплообменных аппаратов связана не только с проблемами солеотложения, но и многими другими обстоятельствами. Например, созданием теплообменников для утилизации вторичных энергоресурсов, нагревом и охлаждением агрессивных и коррозионно-активных сред, для высоко- и низкотемпературной техники, для максимального использования температурного потенциала горячего или холодного источника [1,4].

Интенсификация теплообмена и предотвращение отложений в поверхностной теплообменной аппаратуре является актуальной проблемой, решение которой поможет реализовать существенную экономию топливно-энергетических ресурсов, сократить затраты на восстановление и очистку трубных пучков, увеличить срок службы аппаратов и улучшить технико-экономические показатели работы энергетических установок. Связанные с низкой интенсивностью теплообмена в поверхностных теплообменниках, особенно связанные с охлаждением или нагреванием газов, а также с отложениями,



большие потери материальных и трудовых ресурсов требуют интенсификации работ по улучшению эксплуатационных характеристик аппаратов.

Считающимися в настоящее время конструкционные методы увеличения интенсивности теплопереноса и снижения солеотложения включают использование различных покрытий теплопередающих поверхностей, применение турбулизаторов различных конструкций и добавку твердых частиц в поток газа или жидкости.

Нами известно, что наиболее перспективным путем решения проблемы уменьшения массы и габаритов, или увеличения теплопроизводительности при одном и том же размерах теплообменных аппаратов является интенсификация теплообмена.

Наибольший интерес представляют такие методы интенсификации, которые значительно увеличивают теплосъем при умеренном росте гидравлического сопротивления. Из условия аддитивности термических сопротивлений следует, что для интенсификации процесса теплопередачи необходимо увеличить коэффициент теплоотдачи с той стороны, с которой она является наименьшим. Так как коэффициент теплопередачи всегда меньше любого из коэффициентов теплоотдачи. Выбранный интенсификатор должен воздействовать на пограничный слой, обладающий наибольшим термическим сопротивлением, разрушая его с последующей турбулизацией потока в пристенном слое. Воздействие только на пристенный слой не вызывает существенного роста гидравлического сопротивления. Существенно увеличивается эффективность метода интенсификации теплообмена, если он способствует также уменьшению загрязнения поверхности [2, 3].

Данная работа посвящена интенсификации внешнего теплообмена в жидкостном псевдооживленном слое полидисперсного зернистого материала. Учитывая, что интенсивность переноса тепла в псевдооживленных системах зависит от гидродинамики и структуры слоя, проведены также исследования основных технологических параметров, такие как гидравлическое сопротивление неподвижного и взвешенного слоев полидисперсного зернистого материала, скорость начала псевдооживления, расширение слоя и унос твердых частиц из аппарата [6,8, 9].

При применении псевдооживленного слоя в качестве промежуточного теплоносителя высокую степень интенсификации можно быть достигнута, только когда, тогда теплообменная труба полностью заполнена зернистым материалом. При расчёте таких аппаратов необходимо знать высоту



взвешенного слоя в рабочем, т.е. расширенном состоянии. Расширение слоя является одной из важнейших характеристик состояния псевдооживленной системе, поэтому его изучение является необходимым.

При проектировании аппаратов с кипящим слоем важно знать степень расширения  $R$  псевдооживленного слоя при разных скоростях оживляющего агента, которая равна

$$R = H/H_0 = (1 - \varepsilon_0)/(1 - \varepsilon) \quad (1)$$

Величина  $R$  не только диктует рабочую высоту аппаратов, но является также одной из важнейших характеристик состояния псевдооживленных систем. Так, она характеризует интенсивность перемешивания в псевдооживленном слое и эффективность выравнивания свойств по объему слоя в результате этого перемешивания. Степень расширения и порозность, будучи связаны со структурой слоя, оказывают существенное, а часто и определяющее влияние на протекание тепло- и массообменных процессов, на ход химических превращений в псевдооживленном слое.

Расширение однородных псевдооживленных систем с погрешностью 10-15% можно определить по интерполяционной формуле [9, 10]:

$$\varepsilon = (18 \cdot Re + 0,36 \cdot Re_2 / Ar)^{0,21} \quad (2)$$

Считая соотношение (2) приближенно справедливым в предельном случае начала псевдооживления, когда  $\varepsilon = \varepsilon_0$  и  $Re = Re_1$  можно привести закон расширения однородного слоя к виду [5, 1]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 [(Re + 0,02Re_2) / (Re_1 + 0,02Re_1^2)]^{0,21} \quad (3)$$

Расширение неоднородного слоя можно приближенно оценивать по соотношению [7]:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 [(Re + 0,02Re_2) / (Re_1 + 0,02Re_1^2)]^{0,1} \quad (4)$$



## Экспериментальная часть

Проведен теоретический анализ работ по исследованию гидродинамики и теплообмена в аппаратах с псевдооживленным слоем зернистого материала. Рассмотрена методика расчета перепада давления в неподвижном слое зернистого материала и скорости начала псевдооживления, которые относятся к важнейшим технологическим параметрам псевдооживления.

Экспериментальные исследования гидродинамики неподвижного слоя полидисперсных твёрдых частиц, восходящим потоком жидкости были проведены на опытной установке (Рис.1). Основным элементом установки, т. е. рабочим аппаратом являются цилиндрические, стеклянные трубки с внутренним диаметром 20, 22; 36; и 45,1 мм и высотой 1,2 м. Диаметр стеклянных трубок проверяли по объему воды в мерном цилиндре.

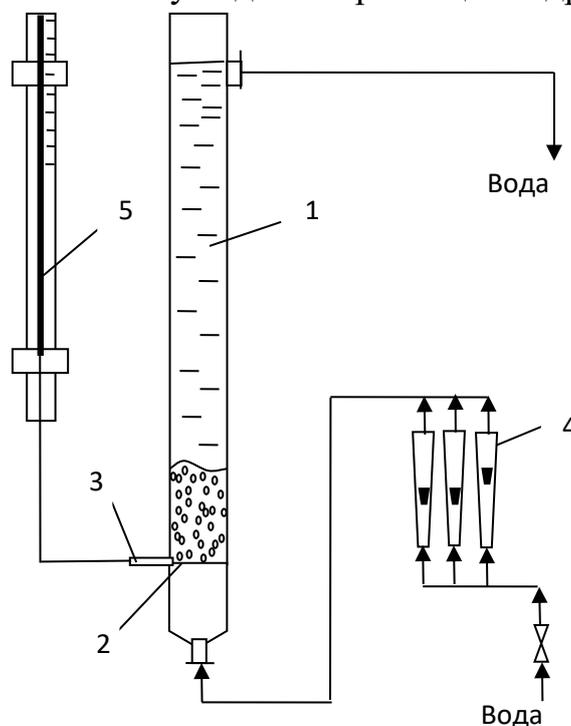


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

1 – аппарат; 2 – распределительная решетка; 3 – импульсная трубка отбора давления; 4 - ротаметры; 5 – пьезометр.

В качестве рабочей жидкости использовалась вода. В качестве твердых частиц использовались округлые стеклянные частицы, катионита КУ-2-8, и свинцовую дробь. Объем занимаемой твердыми частицами слоя зернистого материала определяли вытесненной в мерном цилиндре воды.

Плотность частиц находили взвешиванием отсчитанных количеств зерен определенного объема и размера.



Распределительная решетка основного аппарата имела щели длиной 4 и шириной 0,2 мм и свободное сечение 5 %. Исследования проведены при фильтрации через слой сыпучего материала водопроводной воды, с температурой 20-25°C. Температуру воды на выходе из аппарата измеряли стеклянным термометром с ценой деления 0,1°C.

Высоту слоя полидисперсных твёрдых частиц измеряли с помощью шкалы с делением в 1 мм, закрепленной на рабочей трубке. При проведении опытов расход жидкости измеряли ротаметрами, а перепад давления в слое – пьезометрической трубкой и микроманометром. Ротаметров отгарили измерением количества жидкости, вытекающей из верхнего конца аппарата в мерный сосуд известной емкости с отсчетом по секундомеру времени, необходимой для заполнения последнего. Импульсная трубка для измерения перепада давления в слое располагалась на уровне распределительной решетки под слоем сыпучего материала.

### **Обработка опытных данных и определение необходимых параметров проведены в следующей порядке**

Обработка опытных данных и определение необходимых параметров проведены в следующей порядке.

1. Эквивалентный диаметр частиц определяли по данным рассева материалов на фракции следующим образом. Если смесь сыпучего материала представляет собой узкую фракцию (например, проходящую через сито с размером ячейки  $d_1$ , но остающуюся на сите с ячейкой  $d_2$ , близкой по величине к  $d_1$ ), то определяющий размер частиц – их эквивалентный диаметр  $d_3$  (равный в данном случае, диаметру узкой фракции смеси  $d_1$ ), приняли равным среднему геометрическому из размеров ячеек смежных сит:

$$d_3 = (d_1 \cdot d_2)^{0,5}, \text{ м} \quad (5)$$

Заметим, что для узкой фракции интервал дисперсности зерен  $\eta = d_{\text{макс}}/d_{\text{мин}} < 2$  и среднегеометрической и среднеарифметической определяющие размеры весьма близки. Дисперсность частиц неправильной формы при обычных методах рассева фактически колеблется вокруг номинального среднего размера  $\pm 30\%$  [10,11].

При использовании широких фракций величину эквивалентного диаметра, т.е. определяющего размера частиц вычисляли по формуле:



$$d = 1 / \sum(x_i/d_i), \text{ м} \quad (6)$$

где  $x_i$  - объемная доля частиц данной фракции с диаметром  $d_i = 0,5(d_1 + d_2)$ ;  
 $d_1$  и  $d_2$  - соответственно, меньший и больший размеры частиц данной фракции, м.

2. Порозность (доля свободного объема) неподвижного слоя полидисперсного зернистого материала определяли по формуле [12,13]

$$\varepsilon_0 = (V_{\text{сл}} - V_{\text{ч}})/V_{\text{сл}} \quad (7)$$

где  $V_{\text{сл}}$  - объем слоя зернистого материала, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ч}}$  - объем, занимаемый твердыми частицами, м<sup>3</sup>.

3. Фиктивную (отнесенная к полному поперечному сечению аппарата) скорость оживающего агента (воды) вычисляли из уравнения расхода

$$w = V_c/S, \text{ м/с} \quad (8)$$

где  $V_c$  - объемный расход оживающего агента, м<sup>3</sup>/с;

$S$  - площадь поперечного сечения аппарата (трубки), м<sup>2</sup>;

4. Экспериментальное значение гидравлического сопротивления слоя

$$\Delta p_э = 9,81 \cdot h_{\text{пз}}, \text{ Па} \quad (9)$$

где  $h_{\text{пз}}$  уровень оживающего агента в пьезометрической трубке, м.

5. Порозность псевдооживленного слоя полидисперсного зернистого материала

$$\varepsilon = 1 - (H_0/H)(1 - \varepsilon_0) \quad (10)$$

где  $H_0$  и  $H$  - соответственно, высота неподвижного и псевдооживленного слоев, м;

$\varepsilon_0$  - порозность неподвижного слоя зернистого материала.

6. Расчетное значение гидравлического сопротивления псевдооживленного слоя [14,15]:

$$\Delta p = Hg(\rho_{\text{ч}} - \rho)(1 - \varepsilon) \quad (11)$$



где  $H$  - высота псевдооживленного слоя, м;

$\rho_{\text{ч}}$  - плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho$  - плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\varepsilon_0$  - порозность слоя зернистого материала.

## Заключение

Данные по гидравлическому сопротивлению слоя зернистого материала позволяют определить скорость потока, при которой слой приходит в псевдооживленное состояние. В связи с этим, исследование перепада давления в неподвижном слое зернистого материала имеет важное практическое значение.

Также обработка опытных данных по гидравлическому сопротивлению слоя в логарифмической системе координат позволяла четко выявить особенности поведения полидисперсного слоя при его оживлении жидкостью.

Опыты борьбы с отложениями показали, что путем грамотного применения известных и доступных методов предупреждения отложений можно значительно сократить потери энергоматериальных ресурсов и увеличить межремонтный пробег оборудования.

## Литература

1. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. - Л.: Химия, 1968. - 512 с.
2. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Туйбойов О.В. Enhancement of Heat exchange from the Gas to the Pipe surface of a Helical coil. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 1, January-2017, ISSN 2229-55181204-1208 pages.
3. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Туйбойов О.В. Intensification of heat and mass exchange in the apparatuses with pellicle by using twisting flow. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 1, January-2017, ISSN 2229-55181178-1180 pages.
4. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Туйбойов О.В. Improving The Efficiency Of Evaporative Cooling Water. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 1, January-2017, ISSN 2229-5518890-895 pages.



5. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. и др. Research of chemisorption process of gathering hydrogen cyanide of gold-extraction production. Palarch`s Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology 17(6), ISSN: 1567-214x. <https://archives.palarch.n1/index.php/article/view/4187>.
6. Интенсивность теплообмена в вихревой сушилке. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Суярова Х.Х., Файзуллоева С.С. Журнал «Universum: технические науки» 6(87)-г. Москва, 2021г., июнь.
7. Закиров С. Г., Бахронов Х.Ш., Туйбойов О.В., Худойбердиева Н.Ш., Исследование теплоотдачи от внутренней стенки трубы к слою полидисперсного зернистого материала псевдооживленному водой. Журнал «Химическая технология. Контроль и управление». -Ташкент, 2016. -№ 4, -С. 15–18.
8. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Intensity of Heat Transfer in a tube with a Fluidized layer of a Polydisperse Granular material. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 1, January-2017, ISSN 2229-55181482-1485 pages.
9. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Юнусова С.Т. Liguination of solid particlis of polyadispersed grained material. International Journal of integrated education ISSN:2620-3502 (E)/2615-3785(P). Vol.3 №10, Oct. 2020, Indonezia.
10. Нурмухамедов Х.С., Худойбердиева Н.Ш. и др. Влияние режимных параметров на гранулирование сыпучих материалов в турбулентном аппарате. VIII international Scientific and Practical Conferense INTERNATIONAL FORUM PROBLEMS AND SCIENTIFIC SOLUTIONS. September 6-8. 2021 in Melbourne. Avstraliya.
11. Худойбердиева Н.Ш., Ҳамидова Г.О., Курбонова С.О. Исциклик алмашинишни жадаллаштиришда донадор материал мавҳум кайнаш қатлами гидродинамикаси. Journal of Advances in Engineering Technology, Vol. 2(6) 2022, str.28-29.
12. Бахронов Х. Ш., Худойбердиева Н.Ш., Ахматов А.А.Промышленные испытания десорбционно-абсорбционной установки на основе вихревых аппаратов для регенерационного извлечения цианистого натрия из отработанных растворов Журнал «Universum: технические науки» 8(89)-г. Москва, 2021г., августь.



13. Худойбердиева Н.Ш., Худойкулова С.В., Худойкулова Г.В. Изучение расширения псевдоожигеенного слоя полидисперсного зернистого материала Central Azian Jurnal of Theoretical and applied sciences. Vol. 02 Issue: 11/Nov 2021 ISSN: 2660-5317, [htt://cajotas.centralasianstudies.org/index.php/CALOTAS](http://cajotas.centralasianstudies.org/index.php/CALOTAS), 15.11.2021г., 8 стр.

14. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Туйбойов О.В. Investigation of Heat Exchange between Fluidized Bed and a Surface Immersed in it in the form of Coil Pipes. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 1, January-2017, ISSN 2229-5518896-899 pages.

