



ГИДРОДИНАМИКА АППАРАТОВ СО СЛОЕМ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

Худойбердиева Н.Ш. – Ph.D., доцент. Навоийский государственный горно-технологический университет,

Аннотация: В данной статье авторами приведен экспериментальное исследование гидродинамики, структуры и внешнего теплообмена полидисперсного зернистого материала, состоящего из частиц неправильной формы частиц. Отмечено, одним из наиболее перспективных методов интенсификации теплообмена является использование в качестве промежуточного теплоносителя псевдооживленного слоя твердого зернистого материала. Интенсивность переноса тепла в псевдооживленных системах зависит от гидродинамики и структуры слоя, также гидравлическое сопротивление неподвижного и взвешенного слоев полидисперсного зернистого материала. Организация псевдооживления твердых частиц полидисперсного зернистого материала в теплообменном аппарате позволяет существенно интенсифицировать теплоперенос, вследствие разрушения и турбулизации пристенного слоя жидкостного потока. В инженерной практике особенно важно уметь заранее оценить скорость (расход) жидкости, необходимый для перевода неподвижного слоя частиц различного диаметра в псевдооживленное состояние.

Ключевые слова: интенсификация, теплообмен, аппарат, кипящий слой, поверхность, псевдооживленный слой, частиц неправильной формы, турбулизация, тепломассообмен.

Во многих отраслях техники, задача интенсификации процесса теплообмена и создания высокоэффективных теплообменных аппаратов весьма актуальна. Теплообменные аппараты широко применяются в энергетике, химической, нефтеперерабатывающей, пищевой промышленности, в холодильной и криогенной технике, в системах отопления и горячего водоснабжения, кондиционирования, в различных тепловых двигателях, авиационной и космической технике. С ростом энергетических мощностей и объема производства все более увеличиваются масса и габариты применяемых теплообменных аппаратов. На их производство расходуется огромное количество легированных и цветных металлов.

При конструировании большинства теплообменных аппаратов стоит задача: добиться минимальных габаритов и массы аппарата при заданном суммарном тепловом потоке, гидравлических потерях, температурах и расходах теплоносителей.

Выбор теплообменной поверхности - один из важнейших моментов создания любого теплообменного устройства. Лучшей будет та поверхность, которая при прочих равных условиях обеспечит наибольший тепловой поток с единицы поверхности теплообменного аппарата, то есть наибольший коэффициент теплоотдачи. Поэтому интенсификация теплообмена в каналах - реальный путь к уменьшению габаритов и массы теплообменного устройства и к снижению температуры стенок.

При создании эффективного теплообменного аппарата необходимо выдержать заданные значения по количеству передаваемой теплоты, гидравлическому сопротивлению, и, при этом, сделать его как можно более компактным и легким. Выполнить эти противоречивые требования, возможно только используя интенсификацию теплообмена [1,2]. Следует отметить, что увеличение скорости течения теплоносителя не является оптимальным решением, так как вместе с увеличением коэффициента теплоотдачи увеличивается и гидравлическое сопротивление аппарата, причем если теплоотдача растет пропорционально скорости в степени 0,8, то гидравлическое сопротивление - в степени 2,8, поэтому приходится тратить существенно больше мощности на прокачку теплоносителя, чем



при оптимально подобранном способе интенсификации, дающем рост теплоотдачи, при той же скорости течения теплоносителя и умеренном росте гидравлического сопротивления.

Необходимо отметить, что при выборе для практического применения того или иного, метода интенсификации теплообмена приходится учитывать не только эффективность самой поверхности, но и ее универсальность для одно и двухфазных теплоносителей, технологичность ее изготовления, технологичность сборки теплообменного аппарата, прочностные требования, загрязняемость поверхности, особенности эксплуатации и т.д. Все эти обстоятельства существенно снижают возможности выбора эффективных поверхностей.

При создании любых теплообменных аппаратов, с помощью оптимального для конкретных целей метода интенсификации теплообмена, можно добиться существенного улучшения характеристик этих устройств: уменьшение металлоемкости, габаритных размеров, температуры поверхностей, увеличение надежности, увеличение ресурса работы и пр. [3,4].

Проблема интенсификации работы кожухотрубчатых теплообменников связана главным образом с выравниванием термических сопротивлений на противоположных сторонах теплообменной поверхности. Этого достигают либо увеличением поверхности теплообмена F , например оребрением ее со стороны теплоносителя с меньшим коэффициентом теплоотдачи, либо увеличением коэффициента теплоотдачи рациональным подбором гидродинамики теплоносителя. Последнее должно приводить к выравниванию скоростей и температур по сечению потока теплоносителя и, следовательно, к уменьшению термического сопротивления его пограничного слоя. Результаты исследований показывают [5], что именно термическое сопротивление пограничного слоя является главным фактором, снижающим интенсивность теплопередачи.

Интенсивность тепломассообменных процессов в псевдооживленных системах зависит от гидродинамики и структуры слоя. Перепад давления в слое и значения критических скоростей (начала псевдооживления и уноса) относятся к важнейшим технологическим параметрам псевдооживления и они тесно связаны друг с другом.

Нами были проведены опыты по изучению гидродинамики и структуры неподвижного и взвешенного слоев полидисперсного материала с двенадцатью образцами различных зернистых материалов. С целью увеличения степени неоднородности слоя, характеризующейся отношением $\eta = d_{\max}/d_{\min}$, опыты проведены также с бинарными слоями, которые состояли из частиц различного материала и плотности, поскольку таких слоев примыкают к полидисперсным.

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 [6,7]:

$$d_3 = (d_1 \cdot d_2)^{0.5}, \text{ м} \quad (1)$$

Заметим, что для узкой фракции интервал дисперсности зерен $\eta = d_{\max}/d_{\min} < 2$ и среднегеометрической и среднеарифметической определяющие размеры весьма



близки. Дисперсность частиц неправильной формы при обычных методах рассева фактически колеблется вокруг номинального среднего размера $\pm 30\%$ [8].

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

$$d = 1 / \sum(x_i/d_i), \text{ м} \quad (2)$$

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

$$\varepsilon_0 = (V_{\text{сл}} - V_{\text{ч}}) / V_{\text{сл}} \quad (3)$$

где $V_{\text{сл}}$ – объем слоя зернистого материала, м^3 ;
 $V_{\text{ч}}$ – объем, занимаемый твердыми частицами, м^3 .

3. Фиктивную (отнесенная к полному поперечному сечению аппарата) скорость оживающего агента (воды) вычисляли из уравнения расхода [9]

$$w = V_c / S, \text{ м/с} \quad (4)$$

где V_c – объемный расход оживающего агента, $\text{м}^3/\text{с}$;
 S – площадь поперечного сечения аппарата (трубки), м^2 ;

4. Экспериментальное значение гидравлического сопротивления слоя [9]

$$\Delta p_{\text{э}} = 9,81 \cdot h_{\text{пз}}, \text{ Па} \quad (5)$$

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

5. Порозность псевдооживленного слоя полидисперсного зернистого материала

$$\varepsilon = 1 - (H_0/H)(1 - \varepsilon_0) \quad (6)$$

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

ε_0 - порозность неподвижного слоя зернистого материала.

6. Расчетное значение гидравлического сопротивления псевдооживленного слоя [1,8]

$$\Delta p = Hg (\rho_{\text{ч}} - \rho) (1 - \varepsilon) \quad (2.7)$$

где H - высота псевдооживленного слоя, м;
 $\rho_{\text{ч}}$ - плотность частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 ρ - плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 ε_0 - порозность слоя зернистого материала.

Анализ полученных результатов позволяла выявить наиболее характерные особенности полидисперсного слоя и его отличие от монодисперсного слоя:

а) существование переходного режима между областями фильтрации и псевдооживления (в монодисперсном слое такой области не существует;



б) наличие двух характерных скоростей: w_n - начальной скорости переходного режима и w_k - критической скорости псевдооживления.

Из анализа кривых сопротивления монодисперсного и полидисперсного слоев очевидно неподobie законов сопротивления в этих двух случаях.

В переходной области происходит последовательное оживление частиц от наиболее мелких в начальный момент движения до наиболее крупных в момент полного псевдооживления. Характер последовательного оживления отдельных зерен связан с составом слоя. Частицы получают начальный импульс движения от жидкости путем обмена с ней энергией в форме граничного эффекта трения (обмен количеством движения между массой жидкости и массой частиц). Последующий процесс возбуждения еще неподвижных частиц обусловлен обменом количеством движения между этими частичками и жидкостью в совокупности с движущимися частицами.

В слое с частицами непрерывного фракционного состава движение каждого последующего класса зерен начинается раньше полного оживления предыдущего класса, т. е. процесс последовательного оживления происходит непрерывно во всей области переходного режима.

В слое зерен, значительно отличающихся размером и массой, возбуждение и оживление частиц последующего класса начинается позднее полного оживления частиц предыдущего класса. В таком слое дискретного состава процесс оживления в переходной области происходит ступенями. Здесь обмен количеством движения между частичками не выводит крупные зерна из состояния покоя. В возбуждении частиц основную роль играет обмен между жидкостью и слоем.

При выделении в слое частиц по крупности каждый объем при оживлении ведет себя, по-видимому, почти независимо от смежного с ним. В этом случае явление псевдооживления частиц еще более усложняется: скорости оживления этих объемов различны, хотя в каждом из них частицы ведут себя так же, как и в слое непрерывного фракционного состава. В этом случае процесс постепенного псевдооживления в переходной области также происходит ступенями. Соответственно механизму последовательного оживления графическая зависимость $\Delta p = f(w)$ представляется плавной, монотонно возрастающей кривой или ступенчатой линией. Последняя в пределе дает кривую, отвечающую непрерывному процессу последовательного оживления в переходной области. В приведенных опытах в переходной области практически имеет место непрерывный процесс последовательного оживления. В конце переходного режима почти во всех опытах наблюдалась тенденция к дискретному оживлению.

Анализ связи коэффициента сопротивления с критерием Рейнольдса позволяет объяснить ряд гидродинамических явлений, свойственных переходной области псевдооживления.

1. Закономерность изменения гидродинамического сопротивления в слое идентична для любого гранулометрического состава ($f = CRe^{-n}$), что отражает общий процесс фильтрации жидкости в слое с постепенным и последовательным оживлением зерен.

2. Фильтрационному режиму в статическом слое отвечает величина $n \leq 1$, режиму движения жидкости в переходной области $n > 1$. Возрастание n , видимо, связано с раскрытием пор в слое.

3. Переход от фильтрации слоя мелких частиц к фильтрации слоя более крупных частиц изменяет численное значение n в сторону уменьшения, т. е. приводит к более сильной зависимости потери напора от скорости воды в слое крупных частиц. Такое количественное изменение закона сопротивления, по-



видимому, можно объяснить тем, что слой более однородных крупных зерен менее склонен к разбуханию при фильтрации жидкостью.

4. Все линии $f = CRe^{-n}$ располагаются строго последовательно в порядке изменения эквивалентного диаметра. В связи с этим, как уже отмечалось, можно только предположить, что этот определяющий размер хотя и не выражает правильно состав слоя, но в среднестатистическом значении отражает поведение частиц в силовом поле.

5. Интервал переходной области, оцениваемый числом полидисперсности $K_{пол} = w_n/w_k$, становится меньше по мере приближения состава слоя к монодисперсному.

Прежде всего, на классификацию влияет содержание наиболее крупных классов. Действительно, критическая скорость псевдооживления резко отлична для соседних по размерам классов зерен. Кроме того, у слоя из частиц с наименьшим размером сопротивление ниже, чем у слоя из более крупных частиц. По этим двум причинам в координатах $f - Re$ точки начала псевдооживления слоев, составленных из исходных смесей с узким составом зерен, не могут совпасть и располагаются со сдвигом вверх и влево по мере уменьшения размера зерен. Вторым фактором, влияющим на классификацию точек псевдооживленного состояния, является содержание в слое более мелких классов зерен. Добавление последних к крупным зернам приводит к увеличению сопротивления и снижению скорости псевдооживления.

Сопротивление гетерогенной системы возрастает из-за снижения порозности слоя, а скорость псевдооживления убывает из-за обмена количеством движения между частицами различного размера. Именно из-за обмена количеством движения между твердыми частицами различного размера скорость псевдооживления смеси меньше, чем скорость псевдооживления самого крупного класса в этой же смеси. Вместе с этим уменьшение доли мелочи в слое должно непрерывно вести к параметрам псевдооживления более крупного класса.

Использованные литературы:

- [1]. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. - М.: Химия, 1968. -664 с.
- [2]. Закиров С. Г., Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Туйбойов О.В. 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.
- [3]. 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.
- [4]. 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.
- [5]. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Интенсификация кипения жидкостей в вертикальной трубе // Химическая технология. Контроль и управление. -Ташкент, 2008. -№ 3, -С. 26-28.
- [6]. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Исследование интенсификации кипения воды в вертикальной трубе // Перспективы развития фундаментальных наук: Тез. докл. V Международной конф. -Томск, 2008. –С. 121-122.



[7]. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Высокоэффективные самоочищаемые теплообменники // «Истиклол»: Материалы Респ. науч.-техн. конф. - Москва-Навоий, 2007. -С. 153.

[8]. Бахронов Х.Ш.Худойбердиева Н.Ш., Нурмуродов Т. И. Интенсификация теплообмена в выпарных аппаратах с кипением в трубах. «Ўзбекский химический журнал». -Ташкент, 2004. -№ 6. -С. 56-60.

[9]. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Суярова Х.Х.Вывод уравнений гидродинамики дисперсных систем. Журнал «Горный вестник Узбекистана». -Навои, 2011. -№ 4. -С. 91-92.