

Г.А.Филиппов, Л.Э.Меламед, А.И.Тропкина

Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического машиностроения (ВНИИАМ), Москва, Россия

ГИДРОДИНАМИКА ОДНО- И ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ В ЗАСЫПКЕ С ШАРОВЫМИ ЧАСТИЦАМИ И ЕЕ ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ

АННОТАЦИЯ

Проведено экспериментальное исследование течения одно- и двухфазных потоков через засыпки, состоящие из шаровых частиц. Предложена формула для оценки суммарных потерь давления двухфазной среды в засыпках. Экспериментально исследован процесс псевдооживления засыпок. Исследовались как свободные засыпки, так и нагруженные сверху (с постоянной и переменной нагрузками). Получены результаты по критической скорости начала псевдооживления. Выявлено существенное различие между процессами псевдооживления однофазной и двухфазной средами. Предложена методика расчета двухфазных потоков, основанная на величине среднединамической скорости смеси. Для струйной подачи газа в засыпку, заполненную водой, проведено исследование угла раскрытия струи газа в зависимости от отношения скоростей фаз (газа и воды). Найдены величины сил трения о стенки для засыпок из стали и стекла в зависимости от нагрузок на засыпку, а также величины сил, необходимых для удержания засыпок от перемещения под воздействием гидродинамических сил.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование гидродинамических процессов при движении одно- и двухфазных потоков в пористых средах является актуальной задачей современной теплофизики. В атомной энергетике такие задачи требуется решать при разработке конструкций водоохлаждаемых и кипящих реакторов с использованием микротвэлов. Экспериментальных работ по гидродинамике двухфазных потоков в засыпках (например, [1,2]) немного и условия их проведения не полностью соответствуют условиям работы изучаемых агрегатов.

Кроме того, существуют задачи, которые до настоящего времени не ставились, так как не были востребованы практикой. К таким задачам относятся вопросы удержания слоя засыпки под воздействием одно- и двухфазных потоков от разбухания и перемещения. В настоящее время такие задачи являются актуальными в связи с использованием микротвэльного топлива. Существуют и специфические задачи, такие как струйный вдув одной из фаз в движущийся в засыпке поток.

2. АНАЛИЗ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ЗАСЫПКИ ОДНО- И ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ

Во ВНИИАМе проведено экспериментальное исследование гидродинамики двухфазных потоков в засыпках из шаровых частиц, а также процессов ее псевдооживления однофазной и двухфазной сре-

дами [3—5]. Разработаны методы описания процесса в форме усредненных гидродинамических характеристик двухфазных потоков, которые могут быть использованы в математическом моделировании двухфазных течений. Изучены вопросы предотвращения нежелательного псевдооживления и перемещения засыпок.

2.1. Гидравлическое сопротивление

Опыты [3, 4] проводились на экспериментальном стенде, состоящем из рабочего участка, питающего бака, циркуляционного насоса и связывающих их трубопроводов с запорно-регулирующей арматурой. В различных экспериментах заменялся лишь рабочий участок. В рабочий участок снизу вверх подавалась вода или газоводяная смесь. Подача воды осуществлялась или насосом, или самотеклом из напорного бака. Газ (аргон или азот) подавался через распределительное устройство, представляющее собой набор из 36 подводящих сопел. Шарообразная засыпка представляла собой металлические шарики диаметром 2,12 и 3,175 мм; высота засыпки менялась от 50 до 150 мм. Скорости, рассчитанные по площади поперечного сечения канала, составляли: скорость воды – до 1 м/с, скорость газа – до 0,55 м/с. Объемное расходное газосодержание варьировалось в пределах от 0 до 0,98, массовое расходное газосодержание от 0 до 0,2. В экспериментах измерялись расходы движущихся сред, давления, перепад давлений и температура.

По результатам экспериментов рассчитывался линейный коэффициент сопротивления по формуле

$$\lambda = \frac{\Delta p}{\frac{1.53}{\varepsilon^{4.2}} \frac{L}{d_3} \frac{\rho W_B^2}{2}} \quad (1)$$

Из этой величины была выделена добавка $\Delta\lambda_\Gamma$ (добавочный коэффициент сопротивления), возникающая из-за добавления газа, в соответствии с выражением $\lambda = \lambda_B + \Delta\lambda_\Gamma$, где λ_B — коэффициент сопротивления при отсутствии газа.

Для добавочного коэффициента сопротивления $\Delta\lambda_\Gamma$ получено аппроксимирующее экспериментальные результаты выражение

$$\Delta\lambda_\Gamma = (20 + 0.3 \frac{Re_\Gamma}{Re_B^{0.2}}) \frac{Re_\Gamma}{Re_B^{1.6}} \quad (2)$$

Здесь соответствующие числа Рейнольдса (модифицированные) вычисляются по формуле

$$Re = \frac{0.45}{(1-\varepsilon)\sqrt{\varepsilon}} \frac{Wd_3}{\nu} \quad (3)$$

по скоростям воды и газа, причем сами скорости рассчитываются по полному сечению канала. Итак, потери давления двухфазного потока вычисляются по формуле

$$\Delta p = (\lambda_v + \Delta\lambda_r) \frac{1.53}{\varepsilon^{4.2}} \frac{L}{d_3} \frac{\rho W_v^2}{2}, \quad (4)$$

где λ_v определяется по известным формулам для однофазной среды, а $\Delta\lambda_r$ — по формуле (2).

Эксперименты, аппроксимированные данной формулой, были проведены в диапазонах $0 < Re_v < 4000$, $0 < Re_r < 200$.

Эти же эксперименты были обработаны с помощью модифицированной нами методики Локкарта и Мартинелли. Результатом явилось выражение

$$\Delta p = \Delta p_v + \Delta p_r + C\sqrt{\Delta p_v \Delta p_r}, \quad (5)$$

где потери давления Δp_v и Δp_r находятся по известным формулам при условии, что по каналу текут только жидкость или только газ, а коэффициент C в общем случае является функцией параметров отдельных фаз. Исследования показывают, что для оценки потерь давления в рассматриваемой двухфазной среде можно принять постоянную величину коэффициента $C = 4.4$. При использовании формулы (5) в пределах изменения массового расходного газосодержания от 0 до 0.20 (исследуемый диапазон) среднеквадратичная погрешность составляет $\pm 18\%$.

С точки зрения пользователя — инженера-проектировщика или расчетчика — выбор той или иной формулы определяется только диапазоном применимости формулы и наличием данных для её вычисления.

Были проведены также эксперименты по потерям давления двухфазного потока при струйной подаче газа в поток. Сравнение результатов показало, что сопротивление засыпки при струйном течении газа приблизительно на 30...35 % больше, чем при перемешанном двухфазном потоке. Причиной этого являются большая скорость и динамический напор на участке расширения струи, причем высокие значения коэффициента сопротивления локализованы в зоне расширения струи. Этот результат согласуется с экспериментальными результатами работы [2], в которой было выявлено, что образующиеся струйки пара, имея большой динамический напор, раздвигают засыпку из стальных шариков диаметром до 1.6 мм и прокладывают каналы в засыпке. Естественно, по мере увеличения длины канала влияние начального участка на общее сопротивление канала будет уменьшаться.

2.2. Псевдооживление

Были проведены эксперименты по исследованию процесса псевдооживления шарообразных засыпок при различных условиях внешнего воздействия (свободная засыпка, воздействие сверху посто-

янной и переменной нагрузкой) [4]. Исследовалось поведение засыпок из стальных и стеклянных шариков в одно- и двухфазных потоках.

Для свободной засыпки (без нагрузки) в экспериментах получены следующие результаты: Для однофазной среды (воды) получены скорости начала псевдооживления для указанных материалов и размеров шаров засыпки. Эти значения полностью совпадают с известными литературными данными. Получены зависимости величины пористости при разбухании слоя (после начала псевдооживления) от параметров засыпки и параметров однофазной оживающей среды. Эти зависимости обобщены в виде формулы

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{0.7}{Ar^{0.44}} (Re - Re_{кр}) - \frac{4.4}{Ar} (Re - Re_{кр})^2, \quad (6)$$

где ε_0 и ε — пористости засыпки соответственно исходная и полученная в результате разбухания, критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d_3^3 g(\rho_T - \rho)}{\nu^2 \rho}, \quad (7)$$

$Re = Wd_3 / \nu$ — текущее значение критерия Рейнольдса, $Re_{кр}$ — значение критерия Re в момент начала псевдооживления при скорости $W = W_{кр}$.

Для свободной засыпки в двухфазной среде с одной неподвижной фазой (водой) и одной подвижной фазой (газом) получены новые результаты, состоящие в том, что даже малого расхода достаточно для быстрого подъема засыпки, величина которого (подъема) затем стабилизируется на определенном уровне, зависящем от параметров засыпки. Этот процесс происходит при параметрах, когда сила гидродинамического давления еще существенно меньше силы тяжести засыпки. Таким образом, в данном случае процесс существенно отличается от обычного псевдооживления. Это отличие вызвано тем, что в процессе участвует барботаж газа через воду и осуществляется динамическое воздействие пузырьков газа на засыпку, что приводит зерна слоя в колебательное движение, уменьшает силу трения зерен между собой и со стенками канала и увеличивает проходные сечения между зёрнами.

Для свободной засыпки и двухфазной среды с обеими подвижными фазами (при неодинаковых скоростях фаз) получены результаты, также свидетельствующие о влиянии барботажа газа на условия начала псевдооживления. Получены значения критического числа Рейнольдса для различных параметров засыпок.

Для обработки результатов по двухфазным средам предложена новая методика расчета основной расчетной характеристики — скорости смеси, в качестве которой предлагается использовать среднединамическую скорость смеси $W_{сд}$, получаемую из условного баланса кинетической энергии компонентов по формуле

$$\frac{\rho_{см} W_{сд}^2}{2} = \frac{\rho_v W_v^2}{2} + \frac{\rho_r W_r^2}{2}, \quad (8)$$

где плотность смеси $\rho_{см}$ рассчитывается исходя из весовых долей компонентов по формуле

$$\rho_{см} = \frac{W_B \rho_B + W_G \rho_G}{W_B + W_G} \quad (9)$$

При использовании в качестве скорости смеси величины среднелинейной скорости процесс разбухания засыпки при воздействии двухфазного потока описывается той же формулой (6), что и при однофазном потоке. При этом в критерии Архимеда и Рейнольдса подставляются величины $W_{сд}$ и $\rho_{см}$, а также кинематическая вязкость смеси

$$\nu_{см} = \nu_B + x(\nu_G - \nu_B), \quad (10)$$

где массовое расходное газосодержание равно

$$x = V_G / (V_G + V_B), \quad (11)$$

а V_B и V_G — массовые расходы воды и газа.

Критическое значение Re по результатам опытов с двухфазной средой равно

$$Re_{см,кр} = 6 \cdot 10^{-6} Ag_{см}, \quad (12)$$

где все параметры определены формулами (9)—(11). Полученная по (12) критическая скорость смеси является среднелинейной скоростью.

2.3. Струя газа в засыпке с водой

Была исследована картина распространения одиночной струи газа в засыпке, заполненной неподвижной или движущейся водой [3]. Эксперименты проводились со стеклянными шариками в рабочем участке (квадратного поперечного сечения) со стеклянными стенками. Струя газа подавалась через тонкую иглу, расположенную в центре основания столба засыпки и вдвинутую внутрь на 19 мм. Проводились фото- и видеосъемка экспериментов. Эти эксперименты позволили детально наблюдать процесс распространения струи газа, а также получить некоторые количественные и качественные оценки процесса перемешивания. Как и в предыдущих экспериментах, варьировались расходы воды и газа, а также измерялся угол раскрытия струи газа, связанный, как известно, со степенью турбулентности в струе, хотя данное течение не является струей в полном смысле этого слова. Полученные результаты были аппроксимированы кривой, которая соответствует формуле (угол α — в градусах)

$$\alpha = 2.87 \left(\frac{W_G}{W_B} \right)^{0.415}. \quad (13)$$

Процесс дувла можно описать следующим образом. Вдоль по потоку скорость газа быстро падает, а скорость воды слабо увеличивается. В некотором сечении, которое можно назвать сечением стабилизации, скорости воды и газа становятся равными и струя перестает расширяться за счет собственного динамического напора. Для заданных условий (размеров канала и начальных скоростей фаз) сечение стабилизации располагается на расстоянии $x/D = 1.4$

от начала струи, где D — гидравлический диаметр канала.

2.4. Нагруженная засыпка и ее удержание

Отдельно рассматривался вопрос о силах удержания засыпки от перемещения и псевдооживления. Исследовались различные способы удержания засыпки:

- а) свободная засыпка (отсутствие удержания);
- б) засыпка с постоянной нагрузкой (верхняя сетка утяжеляется грузами);
- в) засыпка с переменной нагрузкой (на сетку воздействуют пружины различной жесткости с первоначальным поджатием или без него и с дополнительными грузами или без них).

Использовались грузы в виде тонкостенных полых цилиндров весом от 15,9 до 47 г и пружины жесткостью 20 г/мм и 4,4 г/мм с весом соответственно 48 г и 16 г. Измерялись расход воды, расход и давление газа, высота поднятия засыпки, давление воды на входе и смеси воды и газа на выходе из рабочего участка.

Для нагруженной засыпки в экспериментах получены следующие результаты. Выявлено, что поведение нагруженной засыпки принципиально отличается от поведения свободной засыпки. Здесь не происходит равномерного разбухания (как при свободной засыпке), а засыпка расслаивается на 2—3 различных слоя. Верхний слой представляет собой неподвижную и плотную упаковку шаров, прижатую к верхней сетке. Ниже может быть слой свободной от шаров воды. И, наконец, внизу может находиться сильно разреженный слой подвижных шаров. Поведение и высота этих слоев зависят от режимных параметров потока и вида, и величины нагрузки. Получены зависимости для критической скорости $Re_{кр}$ при переменной нагрузке для однофазной и двухфазной сред в зависимости от удельной начальной нагрузки.

Был рассмотрен вопрос о предотвращении псевдооживления в засыпке. Засыпка рассматривалась как поршень, который может двигаться в цилиндре. Условием неподвижности засыпки-поршня является неравенство

$$F_{вн} \geq \Phi - G - F_{тр}, \quad (14)$$

где $F_{вн}$ — сила внешнего нагружения, Φ — гидродинамическая сила, G — сила тяжести засыпки (за вычетом подъемной силы).

В правой части неизвестна сила трения $F_{тр}$. В результате экспериментов для нее получена линейная зависимость:

$$F_{тр} = A(\Phi - G), \quad (15)$$

где коэффициент $A = 0.60$ для стальных шаров и $A = 0.13$ для стеклянных шаров.

Итак, необходимая внешняя нагрузка, сдерживающая псевдооживление, должна быть равна

$$F_{вн} = (1 - A)(\Phi - G). \quad (16)$$

Для стальных шаров она составляет 40 % «полной» силы $(\Phi - G)$, которая потребовалась бы, если

бы силы трения не было. Для стеклянных шаров эта величина составляет 87 %. Причиной этого является аномальное поведение засыпки с пористостью менее 0,4, состоящее в том, что при нагружении она не сжимается, а стремится расшириться [7]. Зависимость скорости начала псевдооживления от величины нагрузки и величина сдерживающей силы определяются внутренним давлением в засыпке и силой трения её о стенки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные эксперименты существенно дополняют представления о гидродинамике двухфазных течений в засыпках и поведении самой засыпки под их воздействием. Предложенная в работе среднединамическая скорость двухфазного потока является усредненной характеристикой динамического воздействия этого потока и позволяет использовать для расчета двухфазных течений закономерности, присущие однофазным потокам. Это относится не только к рассмотренным в данной работе процессам, но и, возможно, к другим задачам двухфазных течений. Впервые проведенный анализ условий предотвращения псевдооживления в засыпках найдет применение в конструировании соответствующих агрегатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проект № 05-02-16660).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

p — давление, Па;
 W — скорость, м/с;
 Re — критерий Рейнольдса;
 Ar — критерий Архимеда;
 ρ — плотность, кг/м³;
 ν — кинематическая вязкость, м²/с;
 x — массовое расходное газосодержание;
 α — угол, град;
 ε — пористость засыпки;
 L — высота столба засыпки, м;
 d_3 — диаметр зерна, м;

F — сила, кг;
 Φ — гидродинамическая сила воздействия потока на засыпку, кг;
 G — сила тяжести засыпки, кг;
 V — массовый расход, кг/с;
 D — гидравлический диаметр, м.

Индексы:

в — вода;
 г — газ;
 о — исходный;
 кр — критический;
 сд — среднединамический;
 см — смесь;
 вн — внешний;
 т — твердый;
 тр — трение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зейгарник Ю.А., Поляев В.М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных сред в условиях вынужденного движения в пористых структурах // Инженерно-физический журнал. 2000. Т. 73. № 6. С. 1125—1134.
2. Naik A.S and Dhir V.K. Forced Flow Evaporative Cooling of a Volumetrically Heated Porous Layer// Intern. J. Heat Mass Transfer. 1982. Vol. 25. № 4. P. 541—552.
3. Экспериментальное исследование гидродинамики двухфазных потоков (смеси и струи) в засыпках с шаровыми частицами / Г.А. Филиппов, Л.Э. Меламед, В.П. Мастюкин и др. // ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. С. 954—960.
4. Экспериментальное исследование псевдооживления шарообразных засыпок потоком одно- и двухфазной сред и условия его предотвращения / Г.А. Филиппов, Л.Э. Меламед, В.П. Мастюкин и др. // ТВТ. 2005. Т. 43. № 3. С. 452—458.
5. Гидродинамическое сопротивление при течении двухфазной смеси в шаровой засыпке / А.А. Авдеев, Б.Ф. Балунов, Р.А. Рыбин и др. // ТВТ. 2003. Т. 41. № 3. С. 432—438.
6. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1983. 448 с.
7. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. АН СССР. Сибирское отделение. Институт теплофизики. Новосибирск, 1984. 164 с.