

УДК 620.173.251.1

ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА В ЗАСЫПКАХ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ГЕОМЕТРИИ

В.И. ВОЛКОВ

Алтайский государственный университет, Барнаул

Проведено экспериментальное исследование гидродинамики в засыпках. Измерены профили скорости за растворимой и нерастворимой засыпками и распределение давления по длине растворимой засыпки. Сделан вывод о возможных причинах неоднородности профиля скорости за засыпкой.

Рациональное и безопасное использование большого количества накопленных пороховых зарядов представляет собой важную, возникшую сравнительно недавно, проблему. Один из вариантов этого использования состоит в сжигании пороховых зарядов с последующим пропуском полученных газов через охладитель, представляющий собой упакованные слои различных химических реагентов. Роль последних заключается как в связывании активных вредных примесей, так и в охлаждении газа до температуры, приемлемой для его безопасного использования, например, для тушения пожаров, заполнения овощных и зерновых хранилищ или приведения в действие быстродействующих клапанов при аварийных ситуациях на нефтепроводах.

Исследование физической картины разрушения охладителя, который может выполняться в виде насыпных слоев упаковок из таблеток, разрушающихся при эндотермической реакции высокотемпературного потока с материалом таблеток, является сложной технической задачей. Это приводит к поиску альтернативных гидродинамических процессов, происходящих при разрушении упакованных слоев реагентов в более безопасных условиях. Следует отметить, что полное физическое моделирование высокотемпературного потока достаточно сложно, но характерные для него особенности можно уловить, например, в процессе растворения упаковки в воде. Поэтому задачей предлагаемого исследования было изучение гидродинамической структуры потока в процессе растворения упаковки в воде, который проходит в течение достаточно длительного интервала времени.

Измерения давления и профиля скорости в упаковке, растворяющейся в воде, были проведены при неизменном значении числа Рейнольдса и одинаковой геометрии упакованных слоев в начальный момент времени. Начальный диаметр растворимых в воде таблеток составлял 0,5 – 1,5 см. На рис. 1 – 4 приведены профили скорости за хаотичными засыпками из шариков и таблеток. На рис. 1 для сравнения показан профиль скорости, полученный с помощью лазерного анемометра на расстоянии 16 см за хаотичной засыпкой из нерастворимых шариков диаметром $d = 1,8$ см при отношении диаметра опытного участка к диаметру шарика $D/d = 7,5$ [1]. Из приведенных данных видны существенные неоднородности профиля скорости при времени усред-

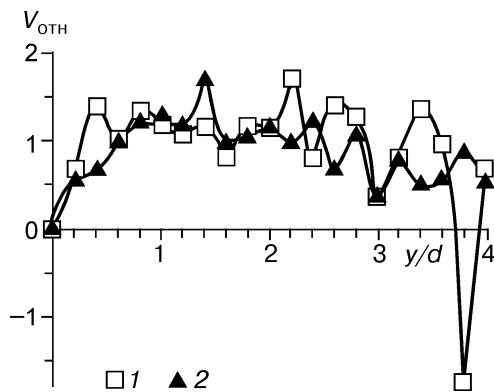


Рис. 1. Распределение продольной скорости в поперечном сечении канала за засыпкой.

$Re = 54$ (1), 100 (2).

нения, не превышающем 30 с, особенно для числа $Re = 54$, при котором скорость в центре канала была отрицательна. (За эквивалентное число Рейнольдса принималась величина $Re = 4ul/(va)$, где u — среднерасходная скорость, v — кинематическая вязкость, $a = a_0(1 - \varepsilon) + 3/D$, ε — пористость, $a_0 = 6[2/3 +$

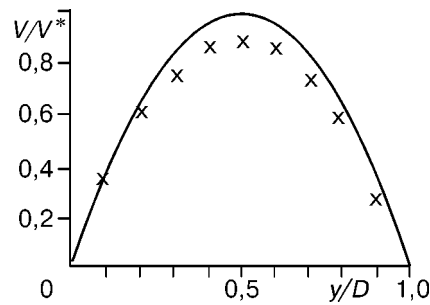
$+ dl(3H)]/d$ — удельная поверхность таблетки, d — диаметр, H — высота таблетки. Для шариков в хаотичной засыпке эквивалентное число Re мало отличается от значения Re , полученного по среднерасходной скорости и известному диаметру шарика, поэтому в предлагаемом сообщении без специальной оговорки число Re может быть и тем и другим [2].)

Время усреднения скорости в процессе эксперимента варьировалось от нескольких секунд до нескольких минут, что позволяло наблюдать весь спектр значений средней скорости, которая зависела от времени усреднения. Визуальные наблюдения показали, что за засыпкой формировался крупномасштабный торообразный вихрь. Последний мог появляться и исчезать достаточно случайным образом. Это приводило к тому, что при увеличении времени усреднения до нескольких минут среднее значение скорости в центре канала после засыпки становилось положительным. Аналогичного эффекта можно добиться, проводя пространственное усреднение скоростей в двух соседних точках, так как область, занятая возвратными течениями, была сравнительно невелика. Температура во всем контуре поддерживалась постоянной с точностью до $0,1$ °C, так как иначе невозможно было проводить доплеровские измерения скорости внутри засыпки из-за температурной зависимости показателя преломления жидкости [3]. Высота вертикального опытного участка с засыпкой составляла примерно 1 м. Вверху и внизу опытного участка устанавливались термодатчики, разность температур по длине участка не превышала $0,1$ °C, поэтому перепад температур, приходящийся на расстояние за засыпкой в 20 см, составлял $\sim 0,02$ °C. Как видно из рис. 1, с повышением числа Re до 100 относительная неравномерность профиля скорости уменьшалась. Для массообмена влияние конвекции существенно выше в силу малого коэффициента диффузии в жидкости, так как диффузионный критерий Прандтля почти на два порядка больше теплового. Поэтому для корректного изучения вынужденной конвекции в растворимых засыпках требуются достаточно большие значения числа Re с тем, чтобы можно было пренебречь конвективной неустойчивостью, возникающей в разноплотной жидкости. В частности, измерения скорости и давления в описываемых экспериментах проходили при начальном эквивалентном числе $Re \cong 1000$.

Для измерения скорости жидкости за растворимой засыпкой внизу трубы после опытного участка прокладывалась тонкая катетерная трубка, в которой на расстояниях от засыпки 2, 18, 32 см были сделаны отверстия для выпуска пузырьков. Фиксация траектории пузырьков позволяла времяпролетным методом определить распределение скорости по вертикальному сечению трубы [4]. Для устранения влияния кривизны цилиндрической стеклянной трубы на результаты оптического определения положения пузырьков в жидкости труба помещалась в квадратную кювету, заполненную жидкостью с показателем

Рис. 2. Тарировочные измерения в круглой трубе.

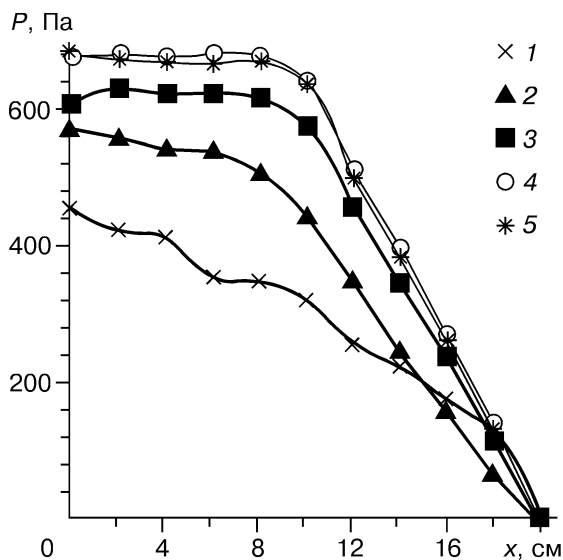
Линия — параболический профиль (теория), точки — экспериментальные данные ($Re = 1100$, $D = 50$ мм).



преломления, равным показателю преломления стекла трубы. Тарировочные эксперименты на установившемся паузейлевском профиле позволили оценить погрешность этого метода, которая не превышала 10 % (см. рис. 2). Одновременно со скоростью измерялось распределение давления по длине засыпки. Давление определялось на стенке опытного участка в девяти сечениях, отстоящих друг от друга на 2 см и расположенных под углом 90° (в четырех точках в каждом сечении). Кроме того, давление измерялось за и перед засыпкой. Таким образом, давление фиксировалось одновременно в 38 точках (точность 10 Па).

В первых экспериментах с полностью растворимой засыпкой обнаружился эффект запирания проходного сечения канала материалом разрушенных, но не успевших раствориться таблеток. Давление через три минуты после начала растворения при $Re \approx 1000$ резко возрастало. Исследование формы таблеток в зависимости от времени растворения показало, что через 3 мин от начала эксперимента разрушенные, но не успевшие полностью раствориться первые слои таблеток внедрялись в поры последующих слоев, полностью перекрывая проходное сечение канала. Засыпка превращалась в сплошной липкий комок, прижатый потоком к ограничивающей решетке. Попадание жидкости внутрь комка исключалось, и происходило лишь достаточно медленное растворение и размывание его поверхности.

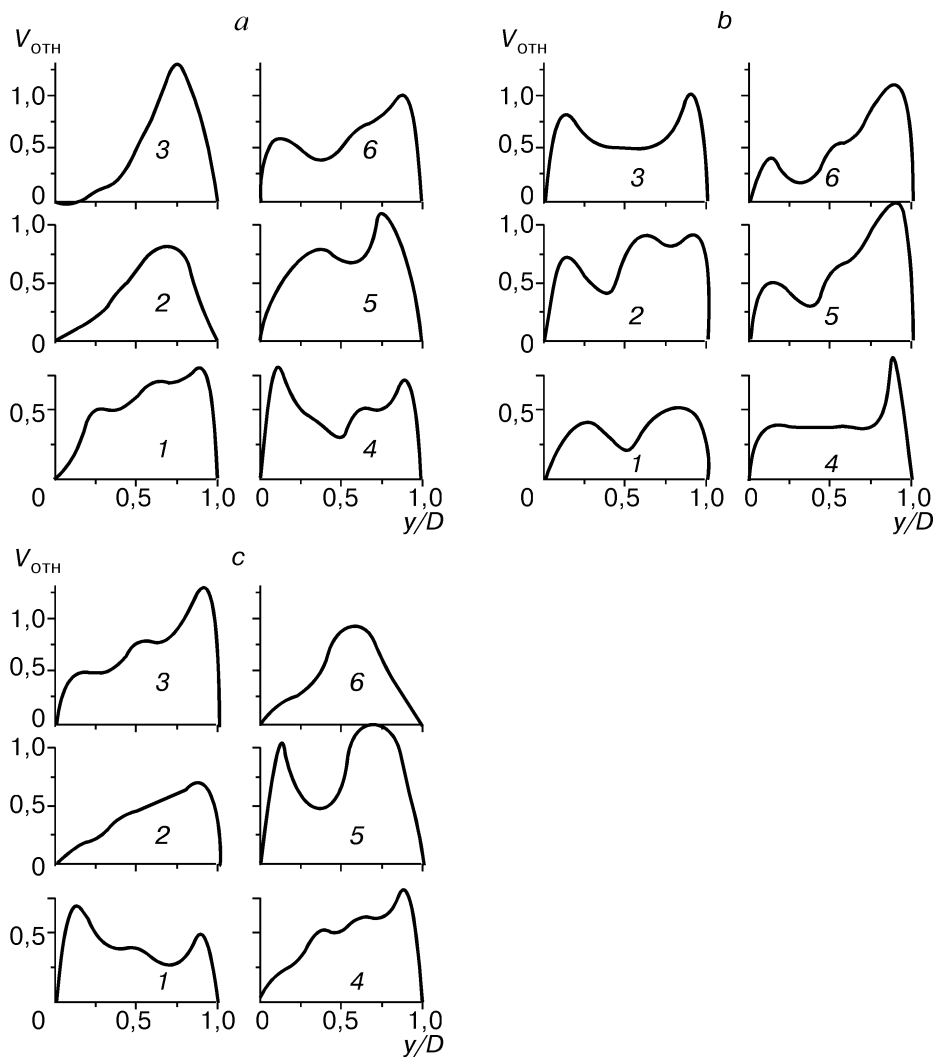
Дальнейшие эксперименты проводились на частично растворимой засыпке: одну ее половину составляли нерастворимые пластмассовые таблетки диаметром 10 и толщиной 3 мм, другую — растворимые таблетки валидола эквивалентным диаметром примерно в 1,5 раза большим. Результаты измерений представлены на рис. 3, 4 ($V_{отн}$ — отношение измеренной скорости к среднерасходной в незаполненном опытном участке). Среднерасходная скорость в процессе эксперимента на частично растворимой засыпке поддерживалась постоянной. Первые три минуты распределение давления в засыпке практически не менялось, так же как оно переставало меняться спустя 6 мин от начала растворения.



Профиль скорости при этом был более чувствителен к процессам растворения. Его изменение уже можно зафиксировать через 1 мин после начала эксперимента (см. рис. 4). И только на 25 минуте после начала растворения на расстоянии шести

Рис. 3. Распределение давления по длине опытного участка с полурастворимой засыпкой.

Время растворения: 1 — 3 мин 44 с, 2 — 4 мин 54 с, 3 — 5 мин 54 с, 4 — 7 мин 18 с, 5 — 8 мин 51 с.



диаметров канала за засыпкой профиль скорости начинал приближаться к начальному профилю за засыпкой (см. кривую 3 на рис. 4, *a*, кривую 6 на рис. 4, *c*). Для всего процесса растворения таблеток профиль скорости был существенно неоднороден по сечению трубы, особенно на 3 и 6 минуте растворения, с характерными максимальными значениями скорости у стенок канала (см. рис. 4, *b*).

Из рис. 4 видно, что при растворении таблеток неоднородность профиля скорости по сечению канала возрастает. По-видимому, эффект уплотнения центральной части упаковки за счет внедрения в поры засыпки крупных фракций разрушенных предыдущих слоев еще не полностью устранялся добавлением в засыпку нерастворимых элементов. Профили скорости по сечению канала после растворимой засыпки были более неоднородными, чем после нерастворимой. Так, максимальное значение скорости в пристеночной области засыпки при ее растворении в большей степени превышало значение скорости потока в центральной части канала после засыпки, чем аналогичные значения скоростей потока в нерастворимой засыпке при тех же начальных и конечных значениях числа Re . Эта неоднородность скорости сохранялась и после 25 мин растворения (см. рис. 4, *c*). Если учесть, что в покоящейся безграничной жидкости таблетки растворялись без остатка за 30 мин, то влияние растворимых таблеток на профиль скорости за засыпкой после 25-минутного

интервала следует отнести уже к изменению вязкости потока в пограничном слое нерастворимых таблеток, на которых адсорбировались частицы растворимых таблеток.

О сложной структуре потока внутри хаотичной засыпки на примере шариков (диаметром 1,8 см) и таблеток (толщиной 2, диаметром 2 см) можно судить по рис. 5, где зафиксирована картина потока вблизи стенки прозрачного опытного участка с разными упаковками. Видно наличие крупномасштабных вихрей при низких числах Рейнольдса, которые разрушались с его повышением, и отличие вихреобразования на таблетках и сферах. На таблетках могли образовываться нестационарные вихри, которые время от времени срывались с острых границ таблеток; на шариках таких вихрей зафиксировать не удалось.

В измерениях за полурастворимой засыпкой таблеток при эквивалентном числе $Re \cong 1000$ возвратные течения не наблюдались, тем не менее в экспериментах на нерастворимых засыпках при более высоких числах Re возвратные течения за упаковкой могли возникать [1, 3]. Эта вихревая структура на выходе из упаковки сложным образом взаимодействовала с внутренним вихреобразованием, изменяя распределение давления на последних слоях засыпки, что и было зафиксировано в экспериментах. Как было обнаружено ранее для стационарных засыпок при вязком режиме течения жидкости [3], поток в частично растворимых засыпках также движется преимущественно по каналам с наибольшим сечением и гидродинамика течения определяется диаметром канала, его извилистостью и локальной вязкостью, зависящей от интенсивности растворения в этом месте засыпки. Для $Re > 100$ при возникновении турбулентности влияние извилистости уменьшается. Профиль средней скорости выравнивается по сечению опытного участка. Переход от одного режима к другому происходит не сразу для всего упакованного слоя. В каналах с наибольшими извилистостью и диаметром турбулентность наступает раньше.

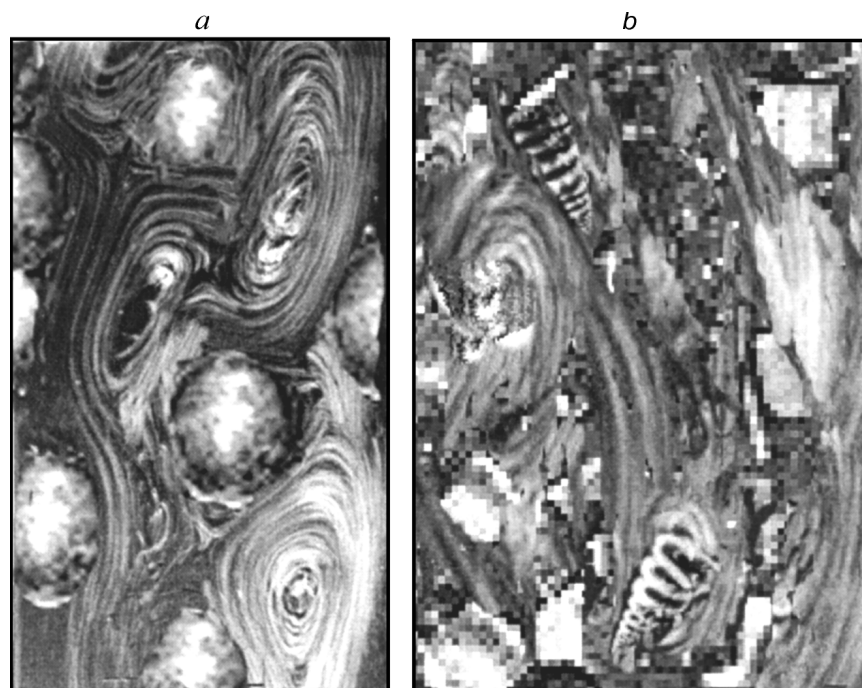


Рис. 5. Картины течения в хаотичных упаковках при разных числах Re .
 a — $Re = 50$ для шариков, b — $Re = 100$ для таблеток.

При полностью развитом турбулентном режиме течения средний профиль скорости жидкости внутри засыпки определяется количеством пустот по ее сечению. Если сравнить полученные результаты с более ранними измерениями за стационарной засыпкой, в которых большинство авторов получали превышение средней скорости у стенки над скоростью в центре канала, то наряду с возможным влиянием свободной конвекции можно предложить некоторую физическую модель, объясняющую подобную структуру течения. При низких значениях числа Рейнольдса ($Re < 100$) за засыпкой образуется ряд струй, которые на расстоянии, равном нескольким диаметрам элемента засыпки, теряют устойчивость и скручиваются в отдельные вихри. Если в центре опытного участка струи из отдельных каналов упаковки могли скручиваться в любом направлении, то у пристенных каналов они скручивались только от стенки к центру опытного участка. Вблизи большей части поверхности стенки опытного участка с засыпкой сохранялось слоистое течение с пониженной турбулентной вязкостью, по крайней мере до чисел $Re \cong 500$ [1, 3]. Исключение составляли лишь места точечного контакта шарика со стенкой, за которыми возникали возвратные течения. В случае таблеток возвратные течения в пристеночной области были более протяженны по сравнению с таковыми для шариков. Площадь соприкосновения таблетки со стенкой была больше, чем практически точечная область касания шарика со стенкой. Тем не менее и для таблеток стенка формировала некую правильную структуру со множеством областей со слоистым безвихревым течением, тогда как в глубине засыпок и шариков, и таблеток при числах $Re \cong 500$ наблюдалось сплошное турбулентное течение. Уменьшение пристенной вязкости для растворимой засыпки обуславливалось как уже отмеченным фактором присутствия стенки, благодаря которому частично гасились турбулентные пульсации и уменьшалась турбулентная вязкость, так и более быстрым выносом из пристенной области материала разрушенных таблеток, в результате чего в пристенном слое концентрация частиц твердой растворяющейся фазы была ниже, чем внутри засыпки. Это отличие пристенной и центральной частей засыпки приводило к неоднородному профилю скорости за ней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков В.И. Изотермическое течение жидкости в упаковке из сфер // ИФЖ. — 1985. — Т. XLIX, № 5. — С. 827 – 833.
2. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. — Л.: Химия, 1979.
3. Волков В.И., Мухин В.А., Накоряков В.Е. Исследование структуры течения в пористой среде // Журн. прикл. химии. — 1981. — Т. XXXIV, № 4. — С. 838 – 842.
4. Волков В.И. Изобретательские задачи в процессах переноса. — Барнаул: Изд. Алтайского гос. ун-та, 1997. — 150 с.

*Статья поступила в редакцию 8 декабря 1997 г.,
в доработанном виде — 23 марта 1998 г.*