

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- и МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

Инженерно-физический
журнал

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 81, № 3
Vol. 81, No. 3

МАЙ–ИЮНЬ
MAY–JUNE

2008

К сведению авторов "Инженерно-физического журнала"

Направляя статьи для публикации, автор тем самым принимает изложенные ниже требования и условия:

1. Статьи в "Инженерно-физическом журнале" проходят научное рецензирование.

2. Статья должна быть тщательно отредактирована, размечена и представлена в бумажном виде в **одном** экземпляре с пронумерованными страницами.

3. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь разрешение учреждения на публикацию.

4. Материал должен быть изложен в такой последовательности: а) УДК; б) инициалы и фамилии авторов; в) название; г) аннотация (до 10 строк), которая давала бы представление о предмете исследования и результатах, содержащихся в статье (не дублировать раздел "Выводы"); д) основной текст; е) список всех принятых обозначений в алфавитном порядке с указанием размерностей величин и индексов с пояснением их происхождения; ж) литература; з) таблицы; и) список подрисуночных подписей с указанием размерностей приведенных на рисунках величин; к) рисунки. Материалы пунктов е–к размещаются на отдельных листах.

5. Статьи представляются в печатном виде с левым полем не менее 2 см, без помарок и вставок. Электронный вариант необходимо присыпать на диске 3.5" или CD (редакции не возвращаются) вместе со статьей в печатном виде либо **электронной почтой**. Объем статей не должен превышать 15 страниц машинописного текста.

6. Рисунки должны иметь четкое начертание всех линий, цифр и символов, фотографии – контрастное изображение. Штрихи цены деления на ось следует направлять внутрь рисунка. Рисунки и фотографии представляются как самостоятельные файлы в одном из графических форматов.

7. Надписи на рисунках следует заменять цифрами и символами, разъясняемыми в подписях к рисункам или в тексте статьи. Таблицы не должны дублировать графики; следует приводить тематические заголовки таблиц.

8. Используемые для обозначения величин греческие буквы должны быть обведены красным, а прописные и строчные буквы, имеющие одинаковое написание, отмечены двумя черточками черным цветом: прописные – снизу (например, Σ , U , Θ), строчные – сверху ($\bar{\Sigma}$, \bar{u} , $\bar{\theta}$). Показатели степени и индексы, а также надстрочные знаки обводятся другой \cup (для верхнего индекса) или \cap (для нижнего). Обозначения физических величин даются курсивным шрифтом, математические символы типа \lim , \cos , \sin , \max , \log , \sup , \exp , критерии вида Nu , Re и т. п., число 0 и химические символы – прямым шрифтом и отмечаются квадратной скобкой снизу ($\log 1 = 0$). Векторные величины набираются прямым жирным шрифтом (без стрелки) и размечиваются синим цветом. Русские и латинские буквы в индексах даются прямым шрифтом (размечаются квадратной скобкой снизу), если они не относятся к обозначениям физических величин, а являются сокращением слова, курсивом – если принимают последовательные значения или служат для перечисления чего-либо, обозначения ряда чисел, порядкового номера и т. п. Например: τ_b – характеристическое время вращательной диффузии (b – вращательный); T_w – температура стены (w – стена (wall)); Y_i – массовая концентрация i -го компонента.

9. Обозначение экспоненциальной функции следует приводить в виде e^x и e^z , а не e^2 . Выделять отдельной строкой и нумеровать следует наиболее важные формулы, на которые имеются ссылки в последующем тексте, избегая нумерации типа (1a), (1') и т. п.

10. Литература должна быть собрана в виде списка в порядке упоминания ссылок в тексте статьи на отдельной странице: для статей – с указанием фамилий и инициалов всех авторов, названия статьи, названия журнала или сборника, года, тома, номера, страниц (начальной и конечной), например, Лыков А. В. О системах дифференциальных уравнений тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах // ИФЖ. 1974. Т. 26, № 1. С. 18–25; Reynolds A. J. The prediction of turbulent Prandtl and Schmidt numbers // Int. J. Heat Mass Transfer. 1975. Vol. 18, No. 6. Pp. 1055–1069; для книг – фамилии и инициалы всех авторов, название книги, места издания, издательства, года издания, например, Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967; Batchelor G. K. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge:

Cambridge Univ. Press, 1967. Ссылки на неопубликованные и нецитируемые работы не допускаются.

11. Не следует употреблять сокращенных слов, кроме общепринятых (т. е., и т. д. и т. п.).

12. Если цитируемые в статье фамилии авторов теорем, теорий, законов и т. д. известны на языке оригинала, то во избежание искажений при переводе следует приводить их в скобках после русского написания. Например, теорема Эйлера (Euler), теория двухфазной фильтрации Баклей–Леверетта (Buckley–Leverett) и т. п.

13. По возможности следует давать перевод на английский язык используемых в статье основных специальных терминов (отдельным списком к статье), а также переводные литературные ссылки представлять в оригинальном виде в скобках после основной ссылки.

14. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторы обязаны сообщить следующие сведения: фамилию, имя, отчество, место работы и занимаемую должность, полные почтовые адреса организаций и адрес для переписки, а также номер телефона и адрес электронной почты для связи.

15. О факте регистрации, принятия в печать или отклонения статьи авторам сообщается по электронной почте или письмом. С момента регистрации и до опубликования при редакционной подготовке статьи к автору могут возникнуть вопросы – на них можно ответить электронной почтой, по телефону, письмом. Перед направлением в печать автору для ознакомления высыпается оригинал-макет статьи. Об изменениях принципиального характера необходимо срочно сообщить с указанием страницы и места исправления. Доработанный после замечаний рецензента, уточненный или исправленный при редактировании вариант статьи целесообразно направлять в редакцию вместе с пояснительным письмом о сделанных изменениях и отосланым автору экземпляром статьи с редакционными пометками. При переписке ссылка на регистрационный номер статьи обязательна.

16. Датой поступления считается день получения редакцией текста статьи (указывается при публикации).

17. Просьба редакции о доработке статьи не означает, что статья принята к печати, так как она вновь рассматривается рецензентами, а затем редакционной коллегией. В случае отклонения статьи редакция сообщает автору решение редакколлегии и заключение рецензента, рукопись автору не возвращается. Автор отклоненной статьи имеет право обратиться к редакколлегии с просьбой повторно рассмотреть вопрос о возможности опубликования статьи.

18. После выхода очередного номера журнала в свет автору высыпаются 10 экземпляров оттисков опубликованной статьи.

19. Автор передает редакции "Инженерно-физического журнала" исключительное право на воспроизведение, распространение статьи в периодической печати и в сети Интернет, а также на ее перевод на английский язык для переиздания в журнале "Journal of Engineering Physics and Thermophysics".

20. Выплаты авторского гонорара с учетом комиссионных отчислений осуществляют Республиканское унитарное предприятие "Белорусское авторское общество" и национальные авторско-правовые организации и государственные органы стран СНГ, ведающие охраной авторских прав (см. ИФЖ. 2008. Т. 81, № 1. С. 200). Авторское вознаграждение за издание статей в русскоязычной версии журнала ("Инженерно-физический журнал") не начисляется.

21. Информация об авторах, чьи статьи были опубликованы в журнале, может быть занесена в базу данных электронной версии ИФЖ. С анкетой можно ознакомиться на сайте www.itmo.by/jepter.html или в ИФЖ. 1998. Т. 71, № 1. С. 189.

22. Тематика журнала: теплофизика, тепломассообмен, теория теплопроводности, термодинамика необрывимых процессов, теория сушки, строительная теплофизика, структурно-механические характеристики дисперсных систем, реодинамика, реология.

23. Адрес редакции: 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15. Телефоны: (017)284-21-31, 284-23-31. Электронная почта (e-mail): jepter@itmo.by, URL: <http://www.itmo.by/jepter.html>, www.kluweronline.com/issn/1062-0125.

24. ИФЖ выходит 6 раз в год. Подписка возможна на полугодие (3 номера) или на каждый номер в отдельности. Индекс 74920 по каталогам РО "Белпочта", агентства "Роспечать", "Издания стран СНГ" национальных агентств.

УДК 536.244·532.546

К. В. Доброго, И. А. Козначев, Е. С. Шмелев**О ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОРИСТЫХ СРЕД, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ**

Рассмотрены модели, которые могут быть использованы при расчете транспортных параметров пористой среды. Несмотря на простоту, модели качественно и количественно характеризуют распространенные классы пористых сред и насколько известно авторам в рассматриваемом контексте в литературе не приведены. Обсуждаются некоторые аспекты определения и оценки параметров лучистого переноса в пористой среде.

Фильтрационное горение (ФГ) — сложный физико-химический процесс горения в пористой среде, сопровождающийся фильтрацией газов и сложным тепло- и массообменом [1–3]. К фильтрационному горению в широком смысле слова относятся газификация твердых углеводородов, горение в слое торфа, агломерация руд, самораспространяющийся высокотемпературный синтез и др. В последние годы интерес к ФГ возрос в связи с перспективной эффективной конверсии углеводородных топлив в синтез-газ и водород [4–8], а также благодаря исследованиям очистки газов и жидкостей методом окисления в сверхдиабатических волнах ФГ [9–11]. Появилась потребность в надежном моделировании таких систем с целью оптимизации конструкции, масштабирования, предсказания параметров, режимов и т. д. [12].

Опыт численного и экспериментального исследования систем ФГ [3, 5, 8] показывает, что наибольшую неопределенность (погрешность) в моделирование наряду с химической кинетикой вносит неточность задания структурных параметров и связанных с ними параметров тепломассопереноса в пористой среде. Последнее наиболее важно при численной оптимизации и подборе пористой среды для заданного процесса или установки.

Математическая модель для описания ФГ в режиме сильной тепловой связи с каркасом (режим малых скоростей) хорошо известна, апробирована и строится на уравнениях баланса тепла и массы, уравнениях фильтрации и состояния [2, 3, 5, 8]. Важнейшими структурными параметрами пористых сред являются пористость, удельная поверхность, характерный размер частиц твердой фазы и длина пробега кванта. Именно на них основан расчет межфазового тепло- и массообмена, лучистой и эффективной теплопроводности пористой среды, дисперсионной диффузии и теплопроводности в газовой фазе [2, 3].

Простейшая пористая среда — монодисперсная засыпка шаров. Она полностью описывается двумя легко измеряемыми параметрами — диаметром шаров и средней пористостью. (Некоторые нюансы при этом связаны лишь с определением эффективной длины пробега, что будет показано ниже.) Другие типы пористых сред (волокнистые, слоистые, высокопористые) часто не имеют однозначного и удобного описания. Как правило, легко устанавливаются величина пористости и тип среды (монодисперсная, полидисперсная, упорядоченная, неупорядоченная) и упаковки (волокнистая, слоистая, губчатая и т. п.), а также один из характерных линейных размеров — диаметр частиц, число пор на единицу длины и т. п. В таких случаях возникает задача определения связи измеренных параметров с другими — удельной поверхностью, характерным размером частиц твердой фазы, длиной пробега кванта и формулировки необходимых моделей тепло- и массообмена.

В данной работе описаны модели пористой среды, которые могут быть использованы для расчета взаимосвязи между ее структурными и транспортными параметрами. Формулировка моделей максимально упрощена, при этом достаточно хорошо описываются различные классы пористых сред. Приводятся основные формулы, связывающие структурные (геометрические), гидродинамические и теплофизические параметры пористой среды. Кратко обсуждаются некоторые методические аспекты определения и оценки параметров лучистого переноса в пористой среде.

Связь структурных параметров пористой среды с транспортными характеристиками. Основным уравнением гидродинамики для пористых сред является уравнение, связывающее градиент давления и скорость фильтрации. Многие исследователи используют двучленное уравнение Форчхаймера:

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларусь. 220072, г. Минск ул. П. Бровки, 15. Поступила 27.09.2007.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{k_0} u_g - \frac{\rho_g}{k_1} |u_g| u_g,$$

где $k_0 = \frac{m^3 d_p}{150(1-m)^2}$, $k_1 = \frac{m^3 d_p}{1.70(1-m)}$ [13] и среда характеризуется средним диаметром частиц твердой фазы d_p и пористостью m .

Для определения коэффициента теплоотдачи используется выражение числа Нуссельта через безразмерные числа Рейнольдса и Прандтля: $Nu = f(Re, Pr)$ [14, 15]. При рассмотрении внутренней задачи (задачи протекания) для вычисления чисел Nu и Re используется эквивалентный диаметр порового канала d_0 : $Nu = h d_0 / \lambda$, $Re = u_g d_0 / \nu$, а при рассмотрении внешней задачи — средний диаметр частиц d_p . Согласно определению, эквивалентный диаметр порового канала — внутренний диаметр цилиндрической трубы, имеющей пористость и удельную площадь внутренней поверхности такие же, как у пористой среды:

$$d_0 = \frac{4m}{S}. \quad (1)$$

Заметим, что определенный таким образом диаметр d_0 не имеет непосредственного отношения к измеряемым геометрическим параметрам — диаметру пор d_{por} (который может быть определен как диаметр вписанной в пору сферы), среднему расстоянию между центрами пор и др.

Приведем эмпирические формулы Аэрода и Тодеса [16], а также Вакао и Кагуи [17], наиболее часто применяемые в расчетно-теоретических исследованиях фильтрационного горения:

$$Nu = 0.395 \left(\frac{2m}{3(1-m)} \right)^{-0.36} Re^{0.64} Pr^{1/3}, \quad Re > 65, \quad (2)$$

$$Nu = 2 + 1.1m^{0.6} Re^{0.6} Pr^{1/3}. \quad (3)$$

Коэффициент объемного теплообмена α , непосредственно фигурирующий в уравнениях баланса тепла, находится как произведение коэффициента поверхностного теплообмена и величины удельной поверхности пористой среды: $\alpha = hS$. Удельная поверхность пористой среды выражается через удельную поверхность отдельной частицы S_p и пористость:

$$S = S_p (1-m). \quad (4)$$

Дисперсионный перенос в газовой фазе является важнейшим механизмом переноса. Он эквивалентен диффузионному механизму и определяется усредненным по пространству и времени стохастическим "разбрызгиванием" частиц газа. Большинство исследователей используют для расчета дисперсионной диффузии полуэмпирические формулы следующего типа [17, 18]:

$$D_{\parallel} = \frac{D_g m}{T} + 0.5d_p u_g, \quad (5)$$

$$D_{\perp} = \frac{D_g m}{T} + 0.1d_p u_g, \quad (6)$$

где различают продольную (5) и поперечную (6) дисперсию. В работе [3] показано, что для изотропных сред и задач фильтрационного горения физически обосновано использование одинаковых значений коэффициентов для продольной и поперечной дисперсии

$$D_{\perp} = D_{\parallel} = \frac{D_g m}{T} + 0.1d_p u_g.$$

Это связано с тем, что релаксационная составляющая дисперсии несущественна для формирования квазистационарного концентрационного профиля фронта. Составляющая дисперсии, связанная с пульсацией скорости (механическая дисперсия), в изотропных средах не может быть существенно анизотропной. Однако этот важный вопрос еще не обсуждался в научной литературе. Заметим, что ввиду преобладания вторых слагаемых в уравнениях (5), (6) точность величин пористости и извилистости каналов не оказывает существенного влияния на общую точность выражения.

Лучистый перенос в пористой среде является доминирующим механизмом теплопередачи при высоких температурах в волне $T > 1000$ °С. Модель лучистой теплопроводности, широко применяемая для расчета лучистых тепловых потоков, для коэффициента лучистой теплопроводности дает выражение

$$\lambda_{\text{rad}} = \frac{16\sigma\varepsilon l_0 T^3}{3}. \quad (7)$$

Средняя длина пробега кванта l_0 по сути является геометрической характеристикой пористой среды, равной среднему расстоянию между точками поверхности твердой фазы, находящимися в прямой видимости. При этом имеет место особенность модели переноса, впервые указанная в [3] и заключающаяся в том, что модель лучистой теплопроводности подразумевает локальность и изотропность испускания/поглощения кванта (пористая среда — "серый газ"), в то время как в реальной пористой среде это не выполняется. Для формального применения модели "серого газа" (выполнения требования изотропности и локальности испускания/поглощения) к пористой среде следует предположить, что испускание/поглощение происходит не в конкретной точке поверхности твердой фазы, а распределено по объему частицы, и температура испускания соответствует средней температуре поверхности частицы. Однако в этом случае эффективная длина пробега кванта l_0 , фигурирующая в (7), должна быть больше геометрической длины пробега кванта l на величину порядка $d_p/2$. (Данные рассуждения справедливы для любой другой модели лучистого переноса в пористой среде, принимающей приближение "серого газа".) Сравнение с экспериментальными данными по лучистой теплопроводности упаковок сплошных шаров [3] показывает физическую состоятельность этих рассуждений и более высокую точность соответствующих моделей.

Подробнее вопрос о соответствии модели лучистой теплопроводности лучистому переносу тепла в пористой среде обсуждается в [3]. Ниже приводятся выражения как для геометрической длины пробега кванта в пористой среде l , так и рекомендуемые для расчета лучистой теплопроводности l_0 . Так, для плотных упаковок частиц более высокую точность обеспечивает эффективный пробег квант, рассчитанный как среднее расстояние между центрами соседних частиц:

$$l_0 = d_p \left(\frac{\pi/6}{1-m} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

Модели пористых сред. Засыпка шаров близких размеров. Упаковка (засыпка) одинаковых шаров — наиболее простая и универсальная модель, используемая в случае, если пористая среда представляет собой упаковку сплошных частиц с малым распределением по размерам $d_{\max}/d_{\min} < 2$ [16]. Как правило, пористость случайных упаковок $m \sim 0.4$. Формулы для структурных характеристик в этой модели следующие:

$$S = \frac{6(1-m)}{d_p}, \quad d_0 = \frac{2}{3} \frac{m}{1-m} d_p, \quad l = \frac{2}{3} \frac{m}{1-m} d_p \quad (9)$$

(d_0 — по определению эквивалентного порового канала, l — из [19]). Эффективную длину пробега кванта можно рассчитывать двумя способами: использовать либо формулу (8), либо выражение, полученное в работе [3]:

$$l_0 = \frac{2}{3} \frac{m}{1-m} d_p + \frac{2}{3} d_p = \frac{2}{3(1-m)} d_p.$$

Укладки параллельных волокон. Эта модель соответствует пористым системам, составленным из волокон или частиц с большим отношением размерностей примерно от 10 до бесконечности (рис. 1). Формулы для характеристик такой среды:

$$S = \frac{4(1-m)}{d_p}, \quad d_0 = \frac{m}{1-m} d_p, \quad l = \frac{\pi d_p}{4(1-\varepsilon)}.$$

Последняя формула взята из работы [20], в которой рассматривались пересекающиеся пучки волокон.

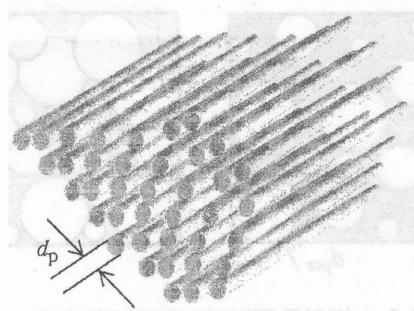


Рис. 1. Пористая среда, образованная укладкой параллельных волокон

Укладки параллельных листов. Эта модель описывает пористые системы, составленные из пластин или частиц с большим отношением больших размерностей по отношению к меньшей размерности (10 и более) (рис. 2). Формулы для характеристик пористой среды в этой модели следующие:

$$S = \frac{2(1-m)}{d_p}, \quad d_0 = \frac{2m}{1-m} d_p, \quad l_{\perp} = \frac{m}{1-m} d_p.$$

При расчете средней длины пробега кванта в направлении, параллельном плоскостям l_{\parallel} , определяющими являются параллельность слоев и расстояние между слоями, поскольку эти характеристики задают максимальный пробег кванта в этом направлении $l_{\parallel\max}$. Можно показать, что $l_{\parallel} \approx \frac{m}{1-m} d_p \ln(l_{\parallel\max}/l_{\perp})$. В реальных средах $l_{\parallel} \approx 2 \dots 3 l_{\perp}$.

Среды с повышенной пористостью. Среды с повышенной по сравнению со случайной засыпкой шаров пористостью ($m > 0.45$) образуются при наличии в частицах внутренних полостей, выемок (например, упаковки колец, седловидных частиц, перфорированных частиц) или в сплошных материалах губчатого типа. В последнем случае пористость может доходить до $m \sim 0.95$ и более. Величина удельной поверхности сред, состоящих из стандартных (геометрически определенных) частиц, легко вычисляется с использованием (4) и измеренной пористости. Удельная поверхность и другие параметры указываются производителями стандартных частиц.

Губчатая пористая среда (модель полых сфер). Среды со средней пористостью ($m < 0.6$). Для сплошных пористых сред, не составленных из отдельных зерен (губчатых, вспененных), затруднительно определить размер "элемента" твердой фазы d_p . На практике могут быть измерены диаметры пор (максимальные внутренние размеры) d_{por} , средние диаметры сечений пор на срезе d_{por} (для сферических пор $d_{por} = \pi d_{por}/4$), количество пор на единицу длины и др. В некоторых случаях размер рассчитывается по измеренным удельной поверхности и пористости. Непосредственно измеренные и рассчитанные параметры существенно различаются и для определения связи между ними и нахождения через них удельной поверхности, длины пробега кванта и других характеристик необходимо использовать модели пористой среды.

В качестве геометрической модели для умеренно больших пористостей ($m < 0.6$) может использоваться модель полых сфер (МПС), распределенных в твердой среде (рис. 3, а). Предполагается, что геометрическая структура среды определяется в основном изолированными порами (хотя они могут соединяться между собой). Модель удобна тем, что основные структурно-геометрические соотношения в известном смысле

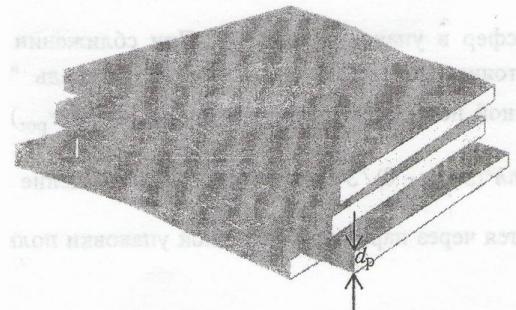


Рис. 2. Укладка параллельных листов — модель пористой среды

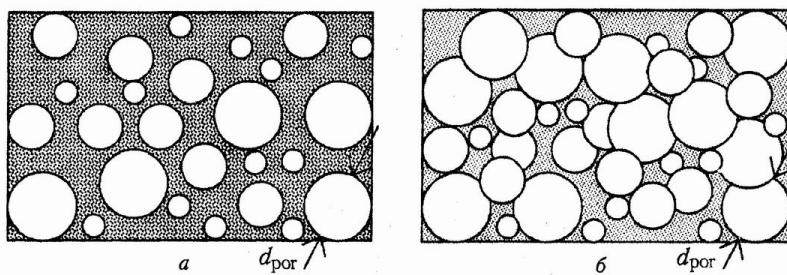


Рис. 3. Губчатая среда: а – модель непересекающихся полых сфер, б – модель пересекающихся полых сфер

аналогичны (обратны) таковым стандартной пористой среды – упаковки шариков. Выражение для удельной площади поверхности получается из (9):

$$S = \frac{6m}{d_{\text{por}}}$$

Из соотношения (1) следует, что

$$d_0 = \frac{2}{3} d_{\text{por}}$$

Формулы для других структурных характеристик в этой модели имеют вид

$$\bar{d}_{\text{por}} = \frac{\pi}{4} d_{\text{por}},$$

$$d_p = \frac{2}{3} \frac{1-m}{m} d_{\text{por}}, \quad (10)$$

$$l = \frac{2}{3} d_{\text{por}}, \quad l_0 = \frac{2}{3} d_{\text{por}} + \frac{d_p}{2}. \quad (11)$$

Среды с высокой пористостью ($m > 0.6$). Модель полых сфер также может быть использована для описания пористой среды с высокой пористостью. При этом следует учитывать "пересечение" полостей и связанное с этим образование "окон" между порами, уменьшение удельной поверхности. Такие среды могут быть представлены моделью пересекающихся полых сфер (МППС) (рис. 3, б). Выразим в рамках данной модели некоторые параметры пористой среды. Примем следующие допущения:

- 1) сферы имеют одинаковый размер d_{por} ;
- 2) сферы располагаются относительно упорядоченно так, что одновременное пересечение трех сфер (тройные пересечения) отсутствуют; упаковка характеризуется координационным числом N , для расчета среднестатистических геометрических характеристик допустимо использование модели идеальных упаковок сфер;
- 3) за характерный размер пор можно принять d_{por} , поскольку высокая степень пересечения (>50%) достаточно редка.

Рассмотрим пару соседних сфер в упаковке (рис. 4). При сближении центров сфер на величину 2δ (относительное изменение расстояния при этом равно δ/r_{por}) площадь "окна" между порами составит $s_{\text{win}} = 2\pi r_{\text{por}}\delta$ (доля окна от полной поверхности сферы $s_{\text{win}}/s_{\text{por}} = \delta/(2r_{\text{por}})$), эффективный объем каждой сферы уменьшится на $\Delta V_{\text{por}} = \pi h^2(3r_{\text{por}} - \delta)/3$ (относительное уменьшение объема $\frac{\Delta V_{\text{por}}}{V_{\text{por}}} = \frac{\delta^2(3r_{\text{por}} - \delta)}{4r_{\text{por}}^3}$).

Пористость системы выражается через параметры исходной упаковки полых сфер m_{in} , N , r_{por} и величину сближения сфер δ :

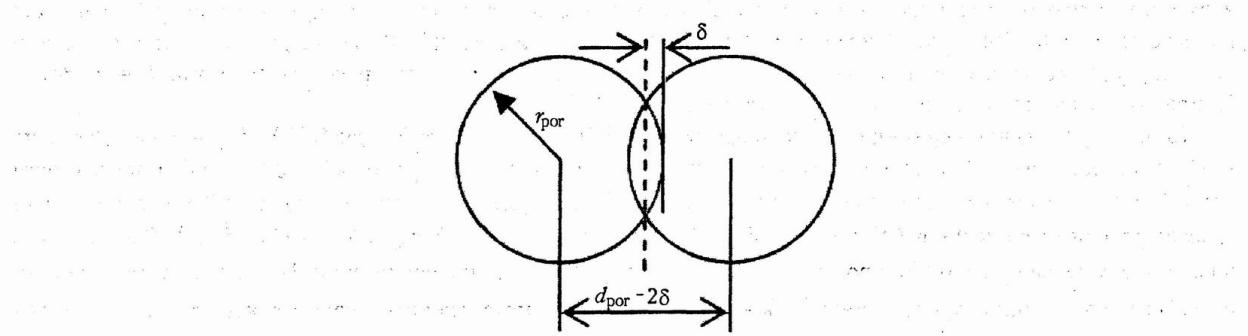


Рис. 4. Пара полых сфер – пор, сдвинутых друг к другу с образованием "окна" между порами

$$m = m_{in} \frac{1 - \frac{3}{4} N \left(\frac{\delta}{r_{por}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\delta}{r_{por}} \right)^3}{1 - \frac{3\delta}{r_{por}} + 3 \left(\frac{\delta}{r_{por}} \right)^2 - \left(\frac{\delta}{r_{por}} \right)^3} \cong \frac{m_{in}}{1 - \frac{3\delta}{r_{por}}} \quad (12)$$

Отсюда в первом приближении по δ/r_{por}

$$\delta = \frac{m - m_{in}}{3m} r_{por} \quad (13)$$

Учитывая, что доля окон в поверхности поры $N\delta/(2r_{por})$, получаем

$$\Psi = \frac{Ns_{win}}{s_{por}} = N \frac{m - m_{in}}{6m} \quad (14)$$

Средняя длина пробега кванта из (11) в такой системе выразится рядом

$$l = \frac{2}{3} d_{por} (1 - \Psi) + \frac{4}{3} d_{por} \Psi (1 - \Psi) + \frac{6}{3} d_{por} \Psi^2 (1 - \Psi) + \frac{8}{3} d_{por} \Psi^3 (1 - \Psi) + \dots$$

После несложных преобразований получаем

$$l = \frac{2}{3(1 - \Psi)} d_{por} \quad (15)$$

Удельная площадь поверхности на единицу объема одной поры равна

$$S_{por} = \frac{s_{por} - Ns_{win}}{V_{por} - N\Delta V_{por}} = \frac{4\pi r_{por}^2 - 2\pi N r_{por} \delta}{\frac{4}{3} \pi r_{por}^3 - N\pi \delta^2 \frac{3r_{por} - \delta}{3}} \cong \frac{6r_{por} - 3N\delta}{2r_{por}^2},$$

тогда для пористой среды (по аналогии с формулой (4))

$$S = S_{por} m = m \frac{6r_{por} - 3N\delta}{2r_{por}^2} \quad (16)$$

Приведем пример использования модели МПС. В работе [21] среда описывается пористостью $m = 0.87$ и задаваемым производителем числом пор на единицу (дюйм) длины секущего отрезка $n = 32 \text{ дюйм}^{-1}$. Получим формулу для перехода от этой характеристики к другим геометрическим параметрам пористой среды. Согласно принципу Кавальieri – Акера, на 1 дюйм секущего отрезка в пористой среде приходится m дюймов порового пространства и $1 - m$ дюймов пространства, занятого твердой фазой. Таким образом,

зная n и m , устанавливаем среднюю длину части секущего отрезка, приходящейся на одну пору (в пересчете на метры): $L = 0.0254m/n$. Считая, что как для МПС, так и для МППС геометрия пор остается сферической, среднюю длину части секущего отрезка, приходящуюся на пору, рассчитываем как $L = 2/3d_{\text{por}}$. Приравнивая два выражения для L , получаем $d_{\text{por}} = 0.0381m/n$.

Таким образом, для керамики, исследованной в [21] ($m = 0.875$, $n = 32$ дюйм⁻¹), $d_{\text{por}} = 1$ мм. Согласно (14) – (16), для базовой плотной гексагональной упаковки ($N = 12$, $m_{\text{in}} = 0.74$) доля "окон" в поверхности поры $\Psi = 0.31$, средняя длина пробега кванта $l = 0.96 d_{\text{por}}$, удельная поверхность $S = 3500 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Если базовая упаковка случайная ($N = 8$, $m_{\text{in}} = 0.6$), то $\Psi = 0.42$, $l = 1.15 d_{\text{por}}$, $S = 2900 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Заметим, что в первом случае $\delta/r_{\text{por}} \sim 0.05$, а во втором ~ 0.1 . Для определения дисперсии, коэффициентов проницаемости и эффективной длины пробега кванта $l_0 = l + d_p/2$ необходимо оценить значение характерного размера частиц (элементов) твердой фазы. Согласно (10), $d_p = \frac{2}{3} \frac{1-m}{m} d_{\text{por}} = 0.1$ мм.

Выводы

1. Систематизированы и приведены формулы для расчета структурных характеристик пористых сред различной структуры. Для описания структурных характеристик высокопористых сред губчатого ("вспененного") типа предложена модель полых сфер (варианты пересекающихся и непересекающихся полых сфер). С использованием данных моделей получены формулы, связывающие структурные характеристики пористых сред и характеристики тепло- и массообмена.

2. Обсуждены методические вопросы формулировок моделей дисперсионного и лучистого переноса в пористых средах: включение в дисперсию релаксационной компоненты и оценка эффективной длины пробега кванта при рассмотрении пористого тела как однородной серой среды.

3. Данные настоящей работы могут быть использованы для научных и инженерно-технических расчетов термохимических реакторов, газогенераторов, различных химических реакторов и агрегатов, где используются пористые среды в качестве рабочей среды.

Работа выполнена при поддержке ИНТАС, грант № 05-1000005-7745.

Обозначения

d – диаметр, м; d_p – средний диаметр частиц (элементов) твердой фазы, м; d_0 – эффективный (эквивалентный) диаметр порового канала, м; d_{por} – средний диаметр пор пористой среды, м; D – коэффициент диффузии, м²/с; h – поверхностный коэффициент межфазного теплообмена, Вт/(м²·К); k_0 , k_1 – коэффициенты проницаемости пористой среды в формуле Форчхаймера, м; L – средняя длина части секущего отрезка, приходящейся на одну пору, м; l – средняя геометрическая длина пробега кванта, м; l_0 – средняя эффективная длина пробега кванта в пористой среде, м; m – пористость; n – число пор на единицу длины секущего отрезка, 1/дюйм; N – координатное число упаковки; Nu – число Нуссельта; p – давление, Па; Pr – число Прандтля; r – радиус, м; Re – число Рейнольдса; s – площадь поверхности, м²; S – удельная площадь поверхности, м²/м³; T – температура, К; \bar{T} – извилистость каналов фильтрации; u – скорость, м/с; V – объем, м³; ΔV_{por} – изменение объема поры при образовании "окна", м³; α – объемный коэффициент межфазного теплообмена, Вт/(м³·К); δ – половина величины сближения центров пор, м; ε – степень черноты поверхности пористой среды, λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴); ρ – плотность, кг/м³; Ψ – доля "окон" в поверхности поры. Индексы: g – газовый; in – начальный; max – максимальный; min – минимальный; p – частица; por – поровый; rad – лучистый; win – "окно"; \parallel – продольный; \perp – поперечный; черта сверху – для сечений пор на срезе.

Литература

1. Weinberg F. J. Combustion temperature – the future? // Nature. 1971. No. 233. Pp. 239–241.
2. Матрос Ю. Ш. Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988.
3. Доброго К. В., Жданок С. А. Физика фильтрационного горения газов. Минск: ИТМО, 2002.
4. Гаврилюк В. В., Дмитренко Ю. М., Жданок С. А., Минкина В. Г., Шабуня С. И., Ядревская Н. Л., Якимович А. Д. Конверсия метана в водород в волне фильтрационного горения // Тепломассообмен – ММФ-2000: IV Минский междунар. форум, 22–26 мая 2000 г. Минск, 2000. Т. 4. С. 21–31.
5. Шабуня С. И., Мартыненко В. В., Ядревская Н. Л., Якимович А. Д. Моделирование нестационарного процесса конверсии метана в водород в волне фильтрационного горения // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 5. С. 7–12.
6. Bingue J. P., Saveliev A. V., Fridman A. A., and Kennedy L. A. Hydrogen production in ultra-rich filtration combustion of methane and hydrogen sulfide // Int. J. Hydrogen Energy. 2002. Vol. 27, No. 6. Pp. 643–649.

7. **Bingue J. P., Saveliev A. V., and Kennedy L. A.** Optimization of hydrogen production by filtration combustion of methane by oxygen enrichment and depletion//Int. J. Hydrogen Energy. 2004. Vol. 29, No. 13. Pp. 1365–1370.
8. **Dhamrat R. and Ellzey J.** Numerical and experimental study of the conversion of methane to hydrogen in a porous media reactor//Combust. Flame. 2006. Vol. 144, No. 4. Pp. 698–709.
9. **Dobrego K. V., Gnedilov N. N., Kozlov I. M., and Shmelyov E. S.** Numerical study and optimization of the porous media VOC oxidizer with electric heating elements//Int. J. Heat Mass Transfer. 2006. Vol. 49, No. 25–26. Pp. 5062–5069.
10. **Dobrego K. V., Gnedilov N. N., and Kozlov I. M.** Parametric study of recuperative VOC oxidation reactor with porous media//Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. Vol. 50, No. 13–14. Pp. 2787–2794.
11. **Доброго К. В., Шмелев Е. С., Суворов А. В.** Использование метода фильтрационного горения для очистки твердых дисперсных и жидких сред от органических загрязнителей//Материалы междунар. науч.-техн. конф. "Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления", 24–26 ноября 2004 г. Минск, 2004. С. 148–150.
12. **Dobrego K. V., Gnedilov N. N., Lee S. H., and Choi H. K.** Lean combustibility limit of methane in reciprocal flow filtration combustion reactor//Int. J. Heat Mass Transfer. (In Press).
13. **Ergun S.** Fluid flow through packed columns//Chem. Eng. Progress. 1952. Vol. 48, No. 2. Pp. 89–94.
14. **Жукаускас А. А.** Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982.
15. **Лыков А. В.** Тепломассообмен: Справочник. М.: Энергия, 1972.
16. **Аэроп М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А.** Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1979.
17. **Wakao N. and Kaguei S.** Heat and Mass Transfer in Packed Beds. New York: Gordon and Breach Science Publ., 1982.
18. **Amiri A. A. and Vafai K.** Analysis of dispersion effects and non-thermal equilibrium, non-Darcian, variable porosity incompressible flow through porous media//Int. J. Heat Mass Transfer. 1994. Vol. 37, No. 6. Pp. 939–954.
19. **Горелик Г. Е., Левданский В. В., Лейцина В. Г., Павлюкевич Н. В.** О поглощении излучения в слое высокопористого материала//ИФЖ. 1986. Т. 50, № 6. С. 999–1005.
20. **Verschoor J. D. and Greeber P.** Radiation heat transfer intensification in fiber tissue//Trans. ASME. 1952. Vol. 74. Pp. 961–968.
21. **Hoffmann J. G., Echigo R., Yoshida H., and Tada S.** Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system//Combust. Flame. 1997. Vol. 111, No. 1. Pp. 32–46.

Information for authors of the Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal
(Journal of Engineering Physics and Thermophysics is a translation of Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal (IFZh),
a publication of the Academy of Sciences of Belarus)

The author who presents a paper for publication thus adopts the requirements and terms formulated below:

1. The papers presented to Inzhenerno Fizicheskii Zhurnal (Journal of Engineering Physics and Thermophysics) are subjected to scientific revision.

2. One copy of a thoroughly edited paper should be submitted (with the pages numbered).

3. The papers expounding the results of the studies conducted in the institutions should be provided with the permission for publication issued by the institution.

4. The material should be presented in the following order: a) the UDC (universal decimal classification) number; b) the initials and names of the authors; c) the title of the paper; d) the abstract (not exceeding 10 lines) which should be most informative, giving a clear indication of the nature and range of the results contained in the paper, and should not duplicate Conclusions; e) the body of the text; f) the complete list of symbols (in an alphabetical order) with dimensions and sub- and superscripts with explanation of their origin; g) references; h) tables; i) captions to figures with all dimensions indicated; j) figures.

5. The manuscripts should be printed with the left margin not less than 2 cm. The text should be clear and legible, without inserts and corrections. The authors are also requested to enclose a floppy disk (3.5") or CD (not returned) with the electronic version of the paper or send the latter by email. The length of the paper should normally not exceed 15 typed pages.

6. Figures should have clear lines, figures, and symbols and photographs should be contrast. Dashes dividing the scale on the axes should be inwardly directed. Both figures and photographs should be presented in an electronic form as individual files in one of graphic formats.

7. Inscription in figures should be replaced with figures and symbols explained in the captions to figures or in the paper. Tables should be titled and not duplicate graphs.

8. Greek symbols should be circled in red, capital and small letters which are identical in writing should be marked by two dashes in black: capital letters from below (for example, \underline{C} , \underline{U} , $\underline{\Theta}$), small from above ($\bar{\tau}$, \bar{u} , $\bar{\theta}$). Subscripts should be semicircled from above (\circlearrowleft), superscripts from below (\circlearrowright). Physical quantities should be italicized. Mathematical symbols such as lim, cos, sin, max, log, sup, exp, the criteria Nu, Re, etc., the number 0 (zero), and chemical symbols are marked by a square bracket from below ($\log_1 = 0$). Vectors are printed as roman bold (without an arrow) and marked in blue. Latin letters in sub- and superscripts, if they do not represent physical quantities but are the abbreviation of the word, are also marked by a square bracket. When an abbreviation acquires consecutive values and serves for enumeration, it is given in italics. For example, t_r is characteristic time of rotational diffusion; T_w is wall temperature; Y_i is mass concentration of the i th component.

9. An exponential function should be given as $\exp z$ rather than e^z . The most important formulas that are referred to in the text should be numbered without resorting to the numbers such as (1a), (1'), and so on.

10. References to cited literature should be grouped in numerical order of appearance. References to articles should include the following: the initials and names of all authors, the title of the article, the title of the journal or proceedings, the volume, number, inclusive page numbers of the article, and the year of publication, for example, A. J. Reynolds, The prediction of turbulent Prandtl and Schmidt numbers, Int. J. Heat Mass Transfer, 18, No. 6, 1055-1069 (1975). In the references to books the following should be included: the initials and names of all authors, the title, publishing house, place, and year of publication, for exam-

ple, G. K. Batchelor, An Introduction to Fluid Dynamics, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1967). References to unpublished works are not allowed.

11. One should not use abbreviations, except for those commonly adopted (i.e., etc., e.g.).

12. The paper should be undersigned by all authors. The authors are requested to give the following information: the first name, second name and patronymic, affiliation, exact mailing address, telephone number and email address.

13. The authors are informed of the fact of registration, acceptance or rejection of the paper by email. From the date of registration till publication the author must be ready to promptly answer all the questions which arise during editing by email, telephone or letter. Before publication, the proofs of the paper are sent to the author. The author must promptly inform the Editorial office on principal changes indicating the page and place of corrections to be incorporated. It is worthy to send a revised, verified or corrected copy of the paper together with the explanatory letter. The copy of the paper which contains editorial marks should be returned to the Editorial office. Reference to the registration number of the paper is obligatory.

14. The date of the paper receipt is that at which an original paper is received. The date of the receipt of revision is also indicated on the front page.

15. The request of the Editorial office to revise the paper does not mean that the paper is accepted for publication since it will again be subjected to reviewing and considered by the Editorial Board. If the paper is not accepted for publication, the Editorial office informs the author of the rejected paper on the referees' comments and the official decision of the Editorial Board. The editors reserve the right not to return the manuscript. The author of the rejected paper has the right to ask the Editorial Board to reconsider the possibility of publication of the paper.

16. Upon publication of the due issue, 10 copies of reprints of the published paper are sent to the author.

17. The author transfers to the Editorial office of Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal the exclusive right to reproduce and distribute the paper as periodicals and in Internet and to subsequently publish it in the Journal of Engineering Physics and Thermophysics.

18. Payment of remuneration in foreign currency with account for commissions is made by the Republican Unitary Enterprise "Byelorussian Authors Society" (BELAT) and national authorship-legal bodies and state authorities for copyright protection of the CIS countries (see Inzh.-Fiz. Zh., 81, No. 1, 200 (2008)). Remuneration for publication of papers in the Russian version of the journal (Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal) is not charged.

19. The information about the authors whose papers were published in the journal can be included into the database of an electronic (online) version of Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal. A sample of the questionnaire is given in Inzh.-Fiz. Zh., 71, No. 1, 189, (1998) or one can get acquainted with it via Internet: www.itmo.by/jepter.html.

20. The journal is a multidisciplinary publication devoted to thermophysics, heat and mass exchange, heat conduction theory, thermodynamics of irreversible processes, drying theory, building thermophysics, structural-mechanical characteristics of disperse systems, rheodynamics, and rheology.

21. Address: 15, P. Brovka Str., Minsk 220072, Belarus. Tel: +375 (17) 284-21-31, +375 (17) 284-23-31. Email: jepter@itmo.by, URL: <http://www.itmo.by/jepter.html>, www.kluweronline.com/issn/1062-0125.

22. The journal is published bimonthly. Index 74920 by the Catalogues of the Republican Association "Belpochta" (Belarus), "Rospechat" Agency (Russia), and "Editions of the CIS countries" of national agencies.

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основное внимание в журнале уделяется научным проблемам, имеющим важное значение для современной техники. В частности, журнал публикует результаты теоретических и экспериментальных физических исследований в области теплофизики, тепломассообмена, теории теплопроводности, термодинамики

не обратимых процессов, теории сушки, строительной теплофизики, структурно-механических характеристик дисперсных систем, реодинамики, реологии. Журнал широко освещает также инженерно-технические методы решения научно-технических проблем в указанных областях научных знаний.

Journal publishes the results of theoretical and experimental studies in the fields of thermophysics, heat and mass transfer, theory of heat conduction, thermodynamics of irre-

versible processes, theory of drying, structural thermophysics, structural and mechanical characteristics of disperse systems, rheodynamics, rheology.

Журнал публикует статьи и письма в редакцию, имеет разделы: критика и библиография, хроника важнейших событий научной

жизни, информационная линия, раздел обзорных статей по наиболее актуальным вопросам современной науки и техники.

ЖУРНАЛ РАССЧИТАН НА ШИРОКИЕ КРУГИ НАУЧНЫХ РАБОТНИКОВ, ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКИЙ СОСТАВ, АСПИРАНТОВ, СТУДЕНТОВ, ИНЖЕНЕРОВ И ТЕХНИКОВ, РАБОТНИКОВ КОНСТРУКТОРСКИХ И ПРОЕКТНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ, ЗАВОДСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ.

"Инженерно-физический журнал" переиздается на английском языке в Голландии издательством "Springer Science+Business Media" (URL: "<http://www.wkap.nl>") под названием "Journal of Engineering Physics and Thermophysics". Journal of Engineering Physics and Thermophysics is abstracted or indexed in Chemical Abstract, Chemical Titles, ISMEC, Engineering Index, Applied Mechanics Reviews, and Electronics Abstracts.