

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

ИФН

Инженерно-физический
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 76, № 6
Vol. 76, No. 6

НОЯБРЬ-ДЕКАБРЬ
NOVEMBER-DECEMBER

2003

К сведению авторов "Инженерно-физического журнала"

Направляемые статьи для публикации в "Инженерно-физическом журнале", автор тем самым принимает изложенные ниже требования и условия:

- Статьи в "Инженерно-физическом журнале" проходят научное рецензирование.
- Статья должна быть тщательно отредактирована и представлена в бумажном виде в одном экземпляре с пронумерованными страницами.
- Статьи, излагающие результаты исследований, выполненные в учреждениях, должны иметь разрешение учреждения на публикацию.

4. Материал должен быть изложен в такой последовательности: а) номер УДК (универсальная десятичная классификация); б) инициалы и фамилии авторов; в) название; г) аннотация (~ 10 строк), которая давала бы представление о предмете исследования и результатах, содержащихся в статье (не дублировать с разделом "Выводы"); д) основной текст; е) список всех принятых обозначений в алфавитном порядке с указанием размерностей величин в Международной системе единиц (СИ) и индексов с пояснением их происхождения; ж) литература; з) таблицы; и) список подписьных подлинок с указанием размерностей (в СИ) приведенных на рисунках величин; к) рисунки. Пункты е)-к) представляются на отдельных листах.

5. Статьи представляются в печатном виде с размером символов текста не менее 0.42 см (12 points) и индексов не менее 0.35 см (10 points), с четким и чистым очком литер, с межстрочным расстоянием в 0.84 см (24 points), с левым полем не менее 2 см, без помарок и вставок. Электронный вариант в оригиналном формате и в коде ASCII (только текст) 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 стр. машинописного текста (на странице 29 строк, 66 символов в строке - 29 тыс. символов). Рисунки и фотографии представляются на отдельных листах в двух экземплярах. Надписи на рисунках следуют заменять цифрами и символами, разъясняемыми в подписях к рисункам или в тексте статьи. Таблицы не должны дублировать графики; следует приводить тематические заголовки таблиц.

6. Рисунки должны иметь четкое начертание всех линий, цифр и символов и размеры по горизонтали не более 17 см, по вертикали - 25 см (формат А4 "Portrait"), фотографии - контрастное изображение. Штриховка цепи деления осей направляет внутрь рисунка. Рисунки и фотографии представляются отдельно от статьи (как самостоятельные файлы) в одном из графических форматов - предпочтительно в векторном, например в CDR; если в растроевом формате, например в GIF, то с плотностью не менее 300 dpi (точек на дюйм).

7. Используемые для обозначения величин греческие буквы должны быть обведены красным, а прописные и строчные, имеющие одинаковое написание, отмечены двумя черточками черным цветом: прописные - снизу (например, σ , K , Θ), строчные -

сверху ($\bar{\sigma}$, \bar{K} , $\bar{\Theta}$). Показатели степени и индексы, а также надстрочные знаки обводятся другой \cup (для верхнего индекса) или \cap (для нижнего). Обозначения физических величин даются курсивом, математические символы типа lim, cos, sin, max, log, sup, exp, критерии вида Nu, Re и т. п., число 0 и химические символы - прямым шрифтом или отмечаются квадратной скобкой снизу (log 1 = 0). Векторные величины набираются прямым жирным шрифтом и размечаются синим цветом. Русские и латинские буквы в индексах даются прямым шрифтом (соответственно отмечаются квадратной скобкой снизу), если они не относятся к обозначениям физических величин, а являются сокращением слова. Когда сокращение принимает последовательные значения или служит для перенесения чего-либо, обозначения ряда чисел, порядкового номера и т. п., оно дается курсивом. Например: t_w - характерное время вращательной диффузии; T_w - температура стеки (wall - стена); F_i ($i = 1, 2, 3$) - проекция единичных массовых сил на соответствующие оси. Обозначение экспоненциальной функции следует приводить в виде exp z , вместо e^z . Трудно различимые (в рукописном обозначении) буквы и знаки обязательно пояснить на полях. Выделять отдельной строкой и нумеровать следует наиболее важные формулы, на которые имеются ссылки в последующем тексте, избегая нумерации типа (1a), (1') и т. п.

8. Литература должна быть собрана в виде списка 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 Transf. 1975. Vol. 18, No. 6. Pp. 1055-1069, а для книг - фамилий и инициалов всех авторов, названия книги, места издания, издательство, год издания, страницы ссылки, например, Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967; Batchelor G. K. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1967. Список литературы должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте статьи. Ссылки на неопубликованные и нецитируемые работы не допускаются.

9. Не следует употреблять сокращенные слова, кроме общепринятых (т. е., и т. д. и т. п.).

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

11. 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. Например, Треппел Б. Хемосорбция: Пер. с англ. М., 1958 (B. M. W. Trapnell, Chemisorption, Butterworths Scientific Publication, London, 1955).

12. Статья должна быть подписана всеми авторами. Авторы обязаны сообщить следующие сведения: фамилию, имя, отчество, место работы и занимаемую должность, полные почтовый адрес организации и адрес для переписки, а также номера телефонов, факсимильной связи и адрес электронной почты. Просим также сообщить в редакцию о готовности принимать корректуру статьи в формате PDF по электронной почте и о согласии/несогласии на размещение адреса электронной почты в публикуюемой в журнале статье.

13. О факте регистрации, принятия в печать или отклонения статьи авторам сообщается по электронной почте, 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. Указывается страница и место исправления. Доработанный после замечаний рецензента, уточненный или исправленный при редактировании вариант статьи целесообразно направлять в редакцию вместе с пояснительным письмом о проделанной работе и отосланым автору экземпляром статьи с редакционными пометками. При переписке ссылка на регистрационный номер статьи обязательна.

14. При опубликовании датой поступления считается день получения редакцией текста статьи; указывается также дата возвращения в редакцию переработанного ее варианта.

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

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

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

18. Размер вознаграждения авторам за переиздание статей в англоязычной версии журнала ("Journal of Engineering Physics and Thermophysics") определяется с учетом фактических затрат на издание русскоязычной версии. Выплаты валютного авторского гонорара с учетом комиссационных отчислений осуществляют Учебно-исследовательское республиканское унитарное предприятие интеллектуальной собственности (РУПИС) национальные авторско-правовые организации и государственные органы стран СНГ, ведающие охраной авторских прав (см. ИФЖ. 2002. Т. 75, № 3. С. 207).

19. Авторское вознаграждение за издание статей в русскоязычной версии журнала ("Инженерно-физический журнал") не начисляется.

20. Информация об авторах, чьи статьи были опубликованы в журнале, может быть занесена в базу данных электронной версии ИФЖ. Анкета заполняется на русском и английском языках. С анкетой можно ознакомиться на сайте "Инженерно-физического журнала" (www.itmo.by/jepter.html) или в ИФЖ. 1998. Т. 71, № 1.

21. Редакцией журнала создан список рассылки sci.ifzh-jepter.news. Подписаться на список рассылки можно с помощью команды subscribe sci.ifzh-jepter.news в теле э-письма, которое необходимо отправить на адрес newsserv@itmo.by. Форум на сайте ИФЖ дает возможность организовывать дискуссии, задавать вопросы всем его участникам.

22. Демонстрационные версии программ, относящиеся к излагаемым в статье материалам, могут быть размещены в электронной версии ИФЖ.

23. В рубрике "Информационная линия" редакция примет от авторов "Инженерно-физического журнала", оперативно опубликует (не более одной страницы) и распространит в Интернет (предпочтительно на английском языке) сообщения об инженерно-технических методах решения научно-технических проблем в области теплофизики и теплотехники, готовящихся научно-практических конференциях и семинарах, а также информацию о новых печатных изданиях автора.

24. По просьбе автора предоставляется почтовый ящик с именем ИОФамилия@itmo.by и доступом по HTTP на www.itmo.by/jepter.html (www.itmo.by/p-login.html).

25. ИФЖ выходит в свет 6 раз в год. Англоязычный первоэditionный журнал имеет одинарковые с ИФЖ номера тома и выпуск. Тематика журнала: теплофизика, тепломассообмен, теория теплопроводности, термодинамика не обратимых процессов, теория сушки, строительная теплофизика, структурно-механические характеристики дисперсных систем, реодинамика, реология.

26. С целью выполнения требований Законов Республики Беларусь "Об авторском праве и смежных правах", "О печати и других средствах массовой информации", а также для обеспечения национальных информационных приоритетов при передаче научных статей через международную сеть Интернет редакция "Инженерно-физического журнала" готова принимать статьи по электронной почте в режиме шифрования с использованием алгоритма PGP (программа PGP FW6.3.8, см. www.pgp.org). Общедоступный (открытый) ключ ИФЖ (IFZh_public key 2048 1024 DH/DSS) находится по адресу www.itmo.by/jepter/ifzh_p_k.zip.

27. Адрес редакции: 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15. Телефоны: (017) 284-21-31, 284-23-31, факс: 232-25-13. Электронная почта (email): jepter@itmo.by, URL: <http://www.itmo.by/jepter.html>, www.kluweronline.com/issn/1062-0125, сервер новостей: newsserv@itmo.by (sci.ifzh-jepter.news - список полнотекстовой рассылки). 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 536.46

С. И. Футко, К. В. Доброго, Е. С. Шмелев, А. В. Суворов, С. А. Жданок

ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ГОРЕНIE ПРИ ДЕСОРБЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ

Теоретически и экспериментально исследован процесс фильтрационного горения с десорбцией углеводородов из пористого каркаса, реализуемый, в частности, при термической очистке пористых сред от остатков органических загрязнений. Аналитически решена задача о волне такого горения в системе с тремя фазами: газовой, жидкой и инертной твердой. Выявлены особенности данного процесса по сравнению с традиционными процессами фильтрационного горения газов. Получены зависимости основных характеристик волн от содержания метана в газовой смеси, а также масла и воды в пористой среде. Проведено сравнение с экспериментальными данными. Сделаны рекомендации по оптимизации работы очистных устройств на базе рассмотренного процесса.

В настоящее время все большую актуальность приобретают проблемы, связанные с утилизацией промышленных отходов и рециклингом. Важным классом таких задач является очистка адсорбентов и других пористых сред, содержащих связанную на поверхности фазу жидких углеводородов или других горючих веществ, в частности проблема регенерации сорбентов из цеолита от остатков трансформаторных и машинных масел. Традиционный термовакуумный метод [1] восстановления сорбционных свойств цеолита не позволяет избавиться от твердофазных загрязнений. Предпринимаемые попытки отжигать органические примеси не достигали успеха вследствие значительных выбросов неокисленной органики в атмосферу. Восстановление сорбентов в волне фильтрационного горения (ФГ) является весьма перспективным альтернативным методом, поскольку позволяет достаточно полно дожигать испаряемую органику [2] и использовать теплоту ее сгорания для поддержания процесса, что значительно снижает энергозатраты.

В принципе, методика использования тепловой волны фильтрационного горения для рециклинга пористых веществ не нова и разработана для восстановления некоторых типов катализаторов. Однако десорбция горючего оказывает специфическое влияние на характеристики процесса фильтрационного горения. Реализуемые при таком процессе режимы требуют теоретического и экспериментального исследования.

Фильтрационное горение с испарением дополнительного топлива из конденсированной фазы представляет собой малоизученный процесс [3], имеющий большие перспективы для промышленного применения. Работы в этой области сосредоточены в основном на изучении горения аэрозолей [4–6] и жидкости, в частности монотоплива [7, 8]. Так, в работе [7] исследовалось ФГ монотоплива – гидроэтина, получены динамические характеристики волны горения. Возможности управления процессом, появляющиеся при использовании горючих смесей низкой калорийности в системах фильтрационного горения с жидкой фазой, изучены недостаточно.

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследовано фильтрационное горение газов при десорбции углеводородов из пористой среды. Выявлены основные особенности теплового режима и динамики волн ФГ. Проанализировано влияние добавок воды на характеристики тепловой волны. Сделаны рекомендации по реализации практически важного процесса – очистки сорбента из цеолита от органических загрязнений.

Эксперимент. Экспериментальные исследования ФГ с десорбцией органики из пористой среды проводились на газовом стенде, схематически представленном на рис. 1. В качестве реактора использовался кварцевый цилиндр диаметром 0,07 м и высотой 0,4 м. Засыпка реактора формировалась из трех чередующихся слоев: шарики Al_2O_3 (где инициировалась и формировалась волна горения) – цеолит – шарики Al_2O_3 . Пористость засыпки составляла $\varepsilon \approx 0,4$. Инициирование горения проводилось искровым устройством в шариках Al_2O_3 при стехиометрическом составе горючей смеси. Внутрь цилиндра (по оси системы) был помещен кварцевый капилляр, в который вводилась перемещаемая термопара.

В случае спутной волны горения пары органики беспрепятственно выходят в атмосферу, что требует включения в систему дополнительного устройства очистки отходящих газов и тем самым усложняет установку и увеличивает себестоимость процесса. Во встречной волне горения пары масла, формирующиеся перед фронтом (рис. 1), проходят через реакционную зону волны и сгорают как дополнительное горючее.

Скорость перемещения фронта горения определялась визуально с помощью линейки и секундомера. Результаты экспериментов представлены в табл. 1. Массовые доли масла и воды (от насыпной массы цеолита) оценивалось соответственно как $\chi \approx 0,1$ и $\psi \approx 0,054$. В опыте 3, несмотря на значительно меньший расход метана, чем в других сериях измерений, скорость фронта волны и, следовательно, производитель-

Институт тепло- и массобмена им. А. В. Лыкова НАН Беларусь. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; э-почта: foutko@itmo.by. Поступила 28.04.2003.

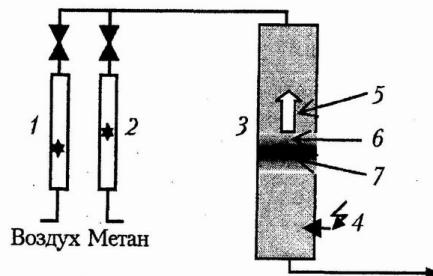


Рис. 1. Схема установки очистки цеолита в режиме встречной волны ФГ: 1, 2 – ротаметры с регулировочными вентилями; 3 – реактор; 4 – искровой поджиг; 5 – направление движения фронта горения; 6 – фронт испарения масла; 7 – зона горения

нность процесса очистки значительно выше. Отметим, что в опытах 1, 2, 4 скорость волны не была постоянной. Вначале фронт горения доходил до неотожженного слоя цеолита, начинал гаснуть и замедляться, при этом температура во фронте волны оставалась достаточно высокой (≥ 1100 К). Когда же слой был отожжен, фронт волны снова разгорался и скорость его распространения росла. После того, как волна доходила до неотожженного слоя цеолита, цикл повторялся.

Эксперименты показали, что при отжиге гранулы цеолита не разрушаются и данный процесс очистки является относительно экологически чистым. Поскольку газообразные продукты горения полностью окисляются, для обеспечения возможно более низкой температуры во фронте волны (для сохранения цеолита от разрушения и коррозии) целесообразно смачивать пористую среду водой. При оптимизации параметров системы процесс может быть относительно недорогим. Этот метод может применяться для очистки и других сорбентов (катализаторов) от органических загрязнений.

Для выяснения температурных и динамических особенностей данной разновидности ФГ и выбора оптимального режима процесса было проведено теоретическое исследование.

Математическая модель. Уравнения, описывающие распространение волны ФГ в пористой среде с наличием жидкой фазы, упрощенно можно записать в следующем виде:

$$\rho_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + c_{pg} G \frac{\partial T_g}{\partial x} = \epsilon \rho_g H_1 K Y_1 \exp(-E/(RT_g)) + \frac{\partial}{\partial t} Q_2 + \frac{\partial}{\partial t} Q_3 + \alpha_v (T_s - T_g), \quad (1)$$

$$(1 - \epsilon) c_s \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \epsilon) \frac{\partial}{\partial x} \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} - \alpha_v (T_s - T_g), \quad (2)$$

$$G \frac{\partial Y_i}{\partial x} = \epsilon \rho_g K Y_i \exp(-E/(RT_g)), \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

Смесь поступает в систему с постоянным массовым расходом $G = \epsilon \rho_g u_g$. Здесь используются уравнения для фильтрационного горения газов (ФГГ) из [3, 9, 10], к которым добавлены источниковые члены вида $\partial Q_k / \partial t$, $k = 2, 3$, обусловленные присутствием жидкой фазы и соответствующие теплу, выделяющемуся при сгорании масляного пара (Q_2) или поглощаемому при испарении воды (Q_3). Поскольку основной целью данной модели является определение суммарного баланса энергии в волне, дополнительные источники отнесены к газовой фазе.

Будем считать, что при подходе фронта горения волны вся имеющаяся в пористой среде жидкость испаряется и далее горение осуществляется в газофазных реакциях. Такое упрощенное представление процесса, в частности, исключает возможность протекания циклов: испарение \rightarrow конденсация \rightarrow испарение и т. д. Предполагается также, что присутствующая в пористой среде вода всегда испаряется полностью и не участвует в реакциях (является химически инертной).

Аналогично [3, 9, 10], сделан переход в уравнениях (1)–(3) в систему координат, движущуюся вместе с фронтом волны с постоянной скоростью u_w , с помощью граничных условий

$$T_s|_{-\infty} = T_g|_{-\infty} = T_0, \quad \partial T_s / \partial x|_{\pm\infty} = \partial T_g / \partial x|_{\pm\infty} = 0;$$

Таблица 1. Экспериментальные данные (для расхода воздуха 1000 л/ч)

Номер опыта	Расход метана, л/ч	Φ	$u_w, \text{м/с}$	$T_{s,m}, \text{К}$
1	75	0.73	$-2.8 \cdot 10^{-5}$	1300
2	50	0.45	$-3.3 \cdot 10^{-5}$	1380
3	23	0.18	$-5.0 \cdot 10^{-5}$	1400
4	80	0.75	$-2.8 \cdot 10^{-5}$	1220

$$\begin{aligned} T_g|_{-0} &= T_{g,i}, \quad T_g|_{+0} - T_g|_{-0} = \Delta \tilde{T}_a; \\ T_s|_{-0} &= T_s|_{+0}, \quad \partial T_s / \partial x|_{-0} = \partial T_s / \partial x|_{+0} \end{aligned} \quad (4)$$

и интегрирования (1)–(3) по x от $-\infty$ до $+\infty$ можно получить балансовое соотношение в волне ФГ

$$T_{s,m} = T_0 + \frac{\Delta T_{1a} + |u| \Delta T_{2a}}{1 - u}. \quad (5)$$

Здесь $\Delta T_{1a} = H_1/c_{pg}$, $|u| \Delta T_{2a}$ – адиабатический разогрев метановоздушной смеси и паров масла соответственно; $u = u_w/u_{th}$ – безразмерная скорость распространения фронта волны, $u_{th} = c_{pg}G/[(1 - \varepsilon)c_s \rho_s]$ – скорость тепловой волны.

Подчеркнем, что в балансовом соотношении (5) входит результирующий адиабатический разогрев системы $\Delta \tilde{T}_a(u) = \Delta T_{1a} + |u| \Delta T_{2a}$, который в отличие от волны ФГГ [9] является явной функцией скорости распространения фронта, теплоты сгорания жидкой фазы и других параметров пористой среды.

Важным элементом модели является учет потребления кислорода в системе. В зависимости от наличия окислителя возможно полное выгорание (ПВ) и неполное выгорание (НВ) органики. В последнем случае возможны нежелательные выбросы углеводородов из системы в атмосферу.

Введя массовый расход масляного пара G_2 :

$$G_2 \equiv |u_w| \rho_s (1 - \varepsilon) \chi = \frac{|u| c_{pg} G \chi}{c_s}, \quad (6)$$

условие недостатка кислорода для окисления масла, поступающего во фронт волны с расходом G_2 , представим в виде

$$\frac{G_2}{C_2} \left(\frac{F}{A} \right)_{2st}^{-1} > \frac{G (1 - \Phi)}{v_n \rho_{g,o}}. \quad (7)$$

Здесь $(F/A)_{st}$ – стехиометрическое соотношение; Φ – эквивалентное соотношение для метановоздушной смеси; C_2 – молярная масса конденсированной органики; v_n – молярный объем газа при нормальных условиях.

Неравенство (7) может быть переписано как условие превышения некоторого критического расхода масляного пара G_2^* :

$$G_2 > G_2^*, \quad G_2^* = \frac{G C_2 (1 - \Phi)}{v_n \rho_{g,o}} \left(\frac{F}{A} \right)_{2st}. \quad (8)$$

Соотношение (8) определяет границу между режимами ПВ и НВ для волны ФГ. Для практических оценок критическое условие (8) удобно представлять в эквивалентном виде

$$|u_w| > |u_w^*|, \quad |u_w^*| = \frac{G C_2 (1 - \Phi)}{v_n \rho_{g,o} \rho_s (1 - \varepsilon) \chi} \left(\frac{F}{A} \right)_{2st} \quad (9)$$

или

$$|u| > |u^*|, \quad |u^*| = \frac{c_s C_2 (1 - \Phi)}{v_n \rho_{g,o} c_{pg} \chi} \left(\frac{F}{A} \right)_{2st}. \quad (10)$$

Введем степень выгорания конденсированной органики χ' :

$$\chi' \equiv \frac{G_2^*}{|u_w| \rho_s (1 - \varepsilon) \chi}. \quad (11)$$

Так, режиму ПВ соответствует $\chi' = 1$, в случае неполного выгорания $\chi' < 1$. Суммарный адиабатический разогрев $\Delta \tilde{T}_a$ будет определяться соответственно как

$$\Delta \tilde{T}_a(u) \cong \Delta T_{1a} + \frac{|u|}{c_s} (\chi H_2 - \psi H_3) \quad (12)$$

в режиме ПВ ($G_2 \leq G_2^*$) и

$$\Delta \tilde{T}_a(u) \cong \Delta T_{1a} + \frac{C_2 H_2 (1 - \Phi)}{v_n \rho_{g,o} c_{pg}} \left(\frac{F}{A} \right)_{2st} - |u| \frac{\psi H_3}{c_s} \quad (13)$$

Таблица 2. Величина адиабатического разогрева метановоздушной смеси в зависимости от эквивалентного соотношения

Φ	0.05	0.18	0.42	0.45	0.73
ΔT_{1a} , К	142	485	1023	1083	1594

в режиме НВ ($G_2 > G_2^*$).

В рамках данной модели и указанных выше предположений для определения характеристик волны ФГ можно применить известные решения для волн фильтрационного горения газов. В частности, будем использовать аналитическое выражение из [11], полученное в приближении узкой зоны реакции:

$$T_{s,m} \cong \frac{\Delta \tilde{T}_a}{1+a} + \frac{E}{R \ln \frac{\varepsilon c_{pg} \rho_{g,o} T_o K (1+a)}{\alpha_v \Delta \tilde{T}_a}}, \quad (14)$$

где $a = (1-\varepsilon) \lambda_s \alpha_v / (c_{pg} G)^2$ – безразмерный параметр.

Результаты и обсуждение. Для расчета максимальной температуры и скорости распространения фронта волны ФГ система уравнений (5), (12)–(14) решалась при следующих значениях параметров: $\varepsilon = 0.49$, $c_s = 794$ Дж/(кг·К), $\rho_s = 3.15 \cdot 10^3$ кг/м³, $c_{pg} = 1.3 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), $\lambda_{s,o} = 1.0$ Вт/(м·К), $d = 6$ мм, $(F/A)_{1st} = 0.11$, $E = 1.3 \cdot 10^5$ Дж/(моль·К), $K = 2.6 \cdot 10^8$ с⁻¹ [12]. Коэффициенты теплопроводности и межфазного теплообмена определялись в соответствии с [10, 13]

$$\lambda_s = \lambda_{s,o} + \frac{32 \varepsilon \sigma d}{9 (1-\varepsilon)} T_s^3, \quad (15)$$

$$\alpha_v = \frac{\pi \lambda_g}{d^2} (2 + 1.1 \text{Re}^{0.6} \text{Pr}^{1/3}). \quad (16)$$

Использованные в расчетах данные для ΔT_{1a} приведены в табл. 2. Считается, что машинное масло (в жидкой фазе) состоит из легких фракций и представлено в основном тетрадеканом ($C_{14}H_{30}$), для которого брутто-реакция полного окисления имеет вид



Предполагается также, что глобальные кинетические коэффициенты горения масляного пара близки к соответствующим данным для метановоздушной смеси и в первом приближении их можно считать одинаковыми. Для моделирования окисления тетрадекана использовались следующие значения параметров: $(F/A)_{2st} = 1.0 \cdot 10^{-2}$, $H_2 = 5.1 \cdot 10^7$ Дж/кг, $C_2 = 198 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Теплота испарения воды (с учетом нагрева от температуры окружающей среды до 100 °C) оценивалась как $H_3 \cong 2.55 \cdot 10^6$ Дж/кг. Теплотой десорбции масла из цеолита H_{2d} пренебрегалось ($H_{2d} \ll H_2$), поскольку, согласно оценкам [14], $H_{2d}/H_2 \cong 0.024$.

Проанализируем влияние трех наиболее важных параметров процесса – концентраций метана, масла и воды – на характеристики волны ФГ. На рис. 2 представлены расчетные зависимости скорости фронта волны u_w , максимальной температуры каркаса $T_{s,m}$ и степени выгорания χ' от расхода газа для различных концентраций метана и масла.

Рассмотрим поведение системы при снижении расхода газа, начиная с момента перехода волны от спутного режима распространения к встречному. Из рис. 2 видно, что по мере поступления масляного пара в зону реакции волны скорость движения фронта и максимальная температура каркаса резко возрастают, что проявляется в характерном "изломе" на кривой $u_w(G)$, искажающем свойственную волнам ФГГ [3] U-образную зависимость скорости распространения фронта от расхода. Такие "изломы" и соответствующие им области немонотонности (т. е. уменьшения максимальной температуры каркаса с увеличением расхода) зависимости $T_{s,m}(G)$ являются отличительными признаками фильтрационных волн с испарением и горением жидкой фазы (по сравнению с волнами ФГГ).

В изучаемой системе достигаются существенно большие значения $|u_w|$ и $T_{s,m}$ по отношению к волнам ФГГ с той же концентрацией метана в смеси (см., например, семейства кривых для $\Phi = 0.73$ на рис. 2). Указанные свойства системы объясняют наблюдаемые в экспериментах эффекты погасания и замедления движения фронта волны при разогреве очередного слоя цеолита (поскольку испарение масла и воды требует значительных затрат энергии), а также "ускорения" и "разгорания" фронта при поступлении масляного пара в зону реакции.

При полном окислении сложной органики потребляется много кислорода (≈ 20 молей на один моль тетрадекана), поэтому довольно быстро достигается критическое условие (7)–(10) начала режима НВ. В результате степень выгорания χ' имеет максимум и быстро падает с уменьшением расхода газа (см. рис. 2). Вследствие этого режим полного выгорания имеет место лишь в достаточно узком диапазоне параметров. Величина расхода газа, соответствующая переходу от режима ПВ к НВ, сильно зависит от концентрации метана и сдвигается в сторону меньших значений при снижении величины Φ .

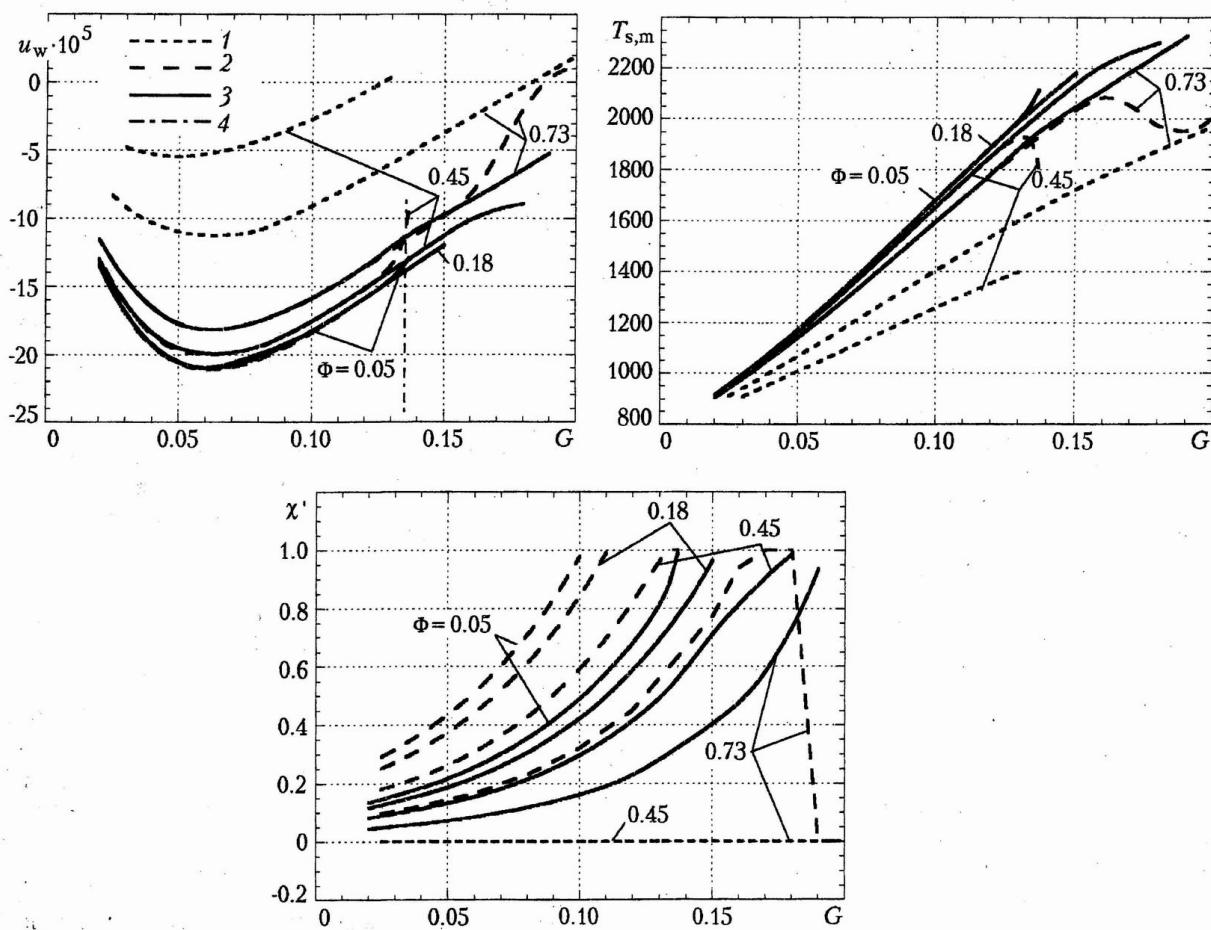


Рис. 2. Зависимости скорости фронта волны u_w , максимальной температуры каркаса $T_{s,m}$ и степени выгорания χ' от расхода газа для разных концентраций метана и масовой доли масла: 1 – $\chi = 0$; 2 – 0.05; 3 – 0.1; 4 – точка перехода ПВ в НВ для $\Phi = 0$. u_w , м/с; $T_{s,m}$, К; G , кг/(м²·с)

На практике даже в режиме существенно "неполного выгорания" значительных выбросов неокисленной органики из системы не произойдет, поскольку газовая фаза будет проходить через отожженную волной область цеолита с восстановленными сорбционными свойствами и с большой вероятностью будет реадсорбирована. С экологической точки зрения такой "запас прочности" рассматриваемого процесса является важным дополнительным преимуществом данной технологии очистки.

Интересно отметить, что в режиме НВ (со стороны "малых" расходов) ход зависимостей u_w , $T_{s,m}(G)$ подобен аналогичным зависимостям для фильтрационного горения газов, что обусловлено выполнением условия $\Delta T_a(u) \cong \text{const}$. В этом случае увеличение массового содержания масла χ в пористой среде не меняет характеристики волны (см. рис. 2). Участок же резкого "излома" зависимости $u_w(G)$ вызван существенно меняющейся функцией суммарного адиабатического разогрева системы ($\Delta T_a(u) \neq \text{const}$).

Детальнее особенности поведения волн ФГ в режиме полного выгорания можно рассмотреть, "растягивая" зону существования ПВ на более широкую область расходов, что достигается уменьшением содержания масла χ в системе и/или увеличением концентрации метана (см. рис. 3). Из рисунка видно, что специфической особенностью режима ПВ (отличающей данный тип фильтрационного горения от ФГГ) является немонотонность зависимости $T_{s,m}(G)$, проявляющаяся в том, что максимальная температура каркаса может увеличиваться с уменьшением расхода газа. Важно отметить нетривиальный факт того, что этот отрезок роста $T_{s,m}(G)$ зависимости совпадает с участком "излома" кривой $u_w(G)$ и соответствует области режима ПВ, что может использоваться на практике для выбора оптимального (с точки зрения чистоты очистки сорбента) режима работы системы. Учитывая, что на пределе появления такой немонотонности функция $T_{s,m}(G) \cong \text{const}$ (см., например, данные для $\Phi = 0.45$, рис. 3), и варьируя (5), получаем следующее условие, необходимое для существования максимума в зависимости $T_{s,m}(G)$:

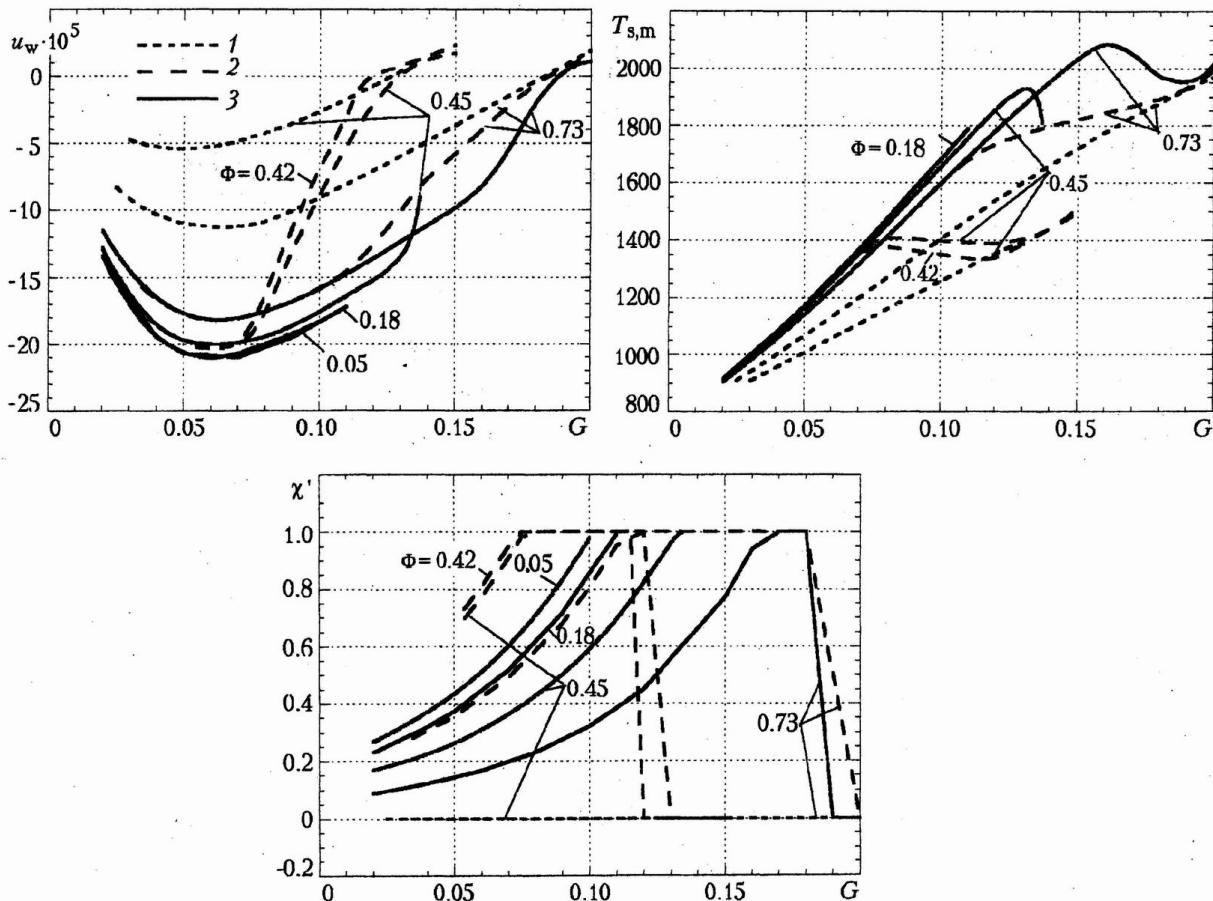


Рис. 3. Зависимости скорости фронта волны u_w , максимальной температуры каркаса $T_{s,m}$ и степени выгорания χ' от расхода газа для малых значений массовой доли масла:
1 – $\chi = 0$; 2 – 0.02; 3 – 0.05. u_w , м/с; $T_{s,m}$, К; G , кг/(м²·с)

$$\Delta T_{1a} < \Delta T_{2a} \equiv \frac{\chi H_2 - \psi H_3}{c_s}, \quad (18)$$

что, в частности, достигается в случае достаточно низкокалорийных (малых значений Φ) метановоздушных смесей.

Отметим еще одну необычную для фильтрационного горения газов особенность системы в режиме ПВ, заключающуюся в практически линейной зависимости скорости фронта волны от расхода газа (см. рис. 3). Действительно, из условия $T_{s,m}(G) \cong \text{const}$ с учетом баланса (5) можно получить выражение

$$u_w \cong \frac{\Delta T_{s,m} - \Delta T_{1a}}{\Delta T_{2a} - \Delta T_{s,m}} u_{th} \sim G. \quad (19)$$

Из вида функции (19) следует также вывод об увеличении наклона "излома" в зависимости $u_w(G)$ при уменьшении концентрации метана:

$$\frac{\partial u_w}{\partial \Delta T_{1a}} \cong -u_{th}/(\Delta T_{2a} - \Delta T_{s,m}), \quad (20)$$

что также соответствует расчетным зависимостям (см. рис. 3).

В пределе малых концентраций метана ($\Phi \rightarrow 0$), когда $\Delta T_{1a} \ll \Delta T_{2a}$, наклон "излома" стремится к $\pi/2$, а область режима ПВ стягивается в точку ($\Phi < 0.18$, рис. 2). И наоборот, когда калорийности метановоздушной смеси и масляного пара сравниваются ($\Delta T_{1a} \sim \Delta T_{2a}$), "излом" в зависимости $u_w(G)$ становится "пологим", а область расходов, соответствующих режиму полного выгорания, растягивается и делается сопоставимой по величине с областью неполного выгорания ($\Phi = 0.73$, рис. 2).

Практически важным методом управления данным процессом является добавление в пористую среду воды. Это позволяет существенно снизить температуру в зоне реакции волны и, следовательно, сохранить цеолит. Расчетная зависимость характеристик волны от массового содержания воды в пористой среде показана на рис. 4.

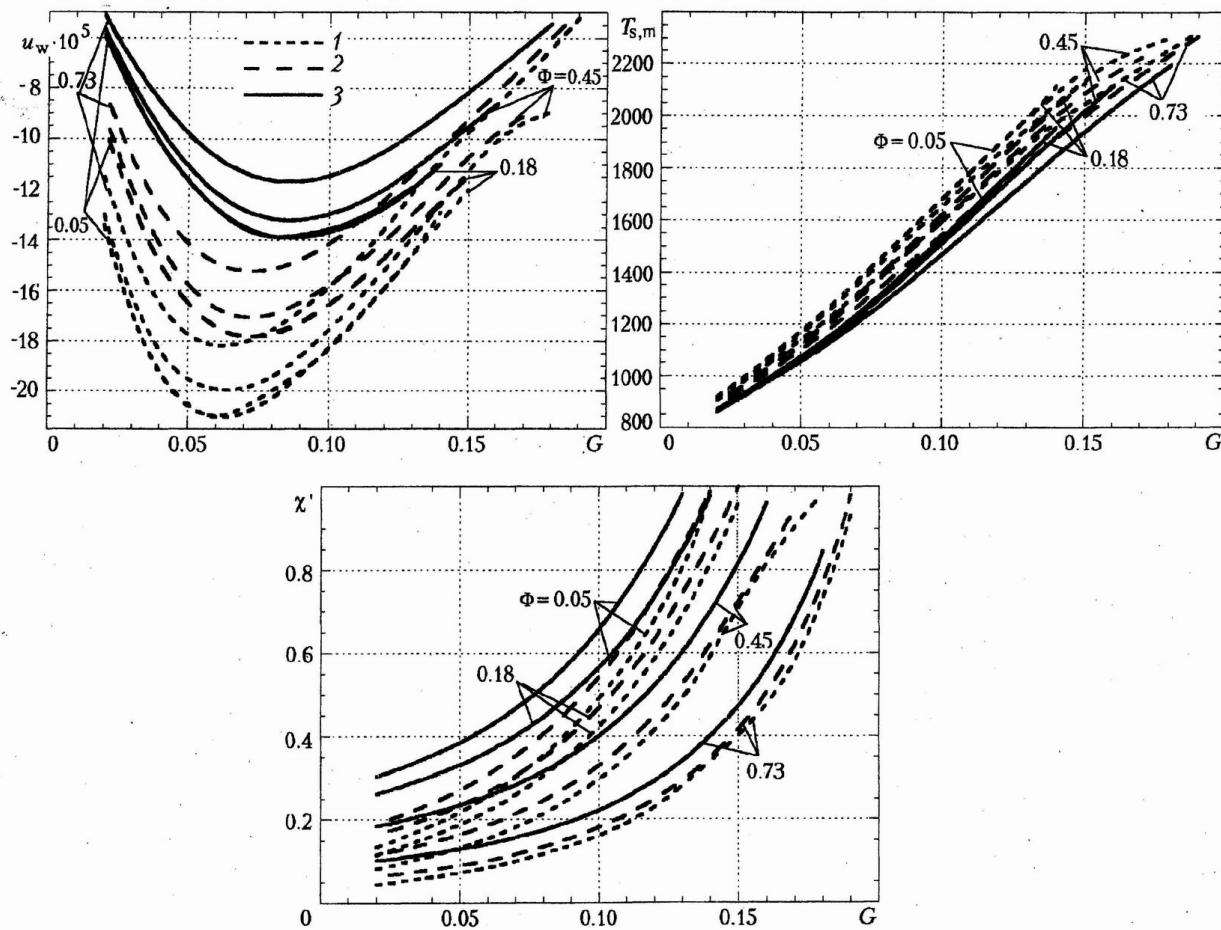


Рис. 4. Зависимости скорости фронта волны u_w , максимальной температуры каркаса $T_{s,m}$ и степени выгорания χ' от расхода газа для разных концентраций метана и содержания воды ($\chi = 0.1$): 1 – $\psi = 0$; 2 – 0.1; 3 – 0.3. u_w , м/с ; $T_{s,m}$, К ; G , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{s})$

Из данных, представленных на рис. 4, видно, что добавка воды ведет к снижению $T_{s,m}$ на (70–150) К и существенному уменьшению скорости распространения фронта в зависимости от расхода и концентрации метана, что объясняется снижением тепловыделения в системе в результате затрат тепла на испарение воды. Интересной особенностью процесса в этом случае является и заметное увеличение полноты выгорания масла, что повышает производительность процесса очистки сорбента (см. рис. 4).

В общем случае выбор параметров процесса термической регенерации цеолита направлен на оптимизацию следующих основных факторов: роста χ' и u_w (повышает производительность процесса очистки), снижения $T_{s,m}$ (сохраняет цеолит) и Φ (снижает себестоимость процесса), увеличения области существования режима ПВ (что облегчает реализацию высоких степеней очистки сорбента в случае флюктуаций других параметров системы).

Из данных, приведенных на рис. 2–4, видно, что типичными являются выборы: "скорость" или "чистота" очистки пористой среды; "ширина области ПВ" или "скорость очистки" и т. п. Например, снижение концентрации метана энергетически выгодно и повышает скорость очистки цеолита, но одновременно резко сужает область режима ПВ, что затрудняет обеспечение стабильности характеристик процесса. Добавление воды в целом весьма желательно, поскольку это снижает температуру каркаса, увеличивает степень выгорания и расширяет область режима ПВ, но в то же время заметно уменьшает скорость очистки. Последнее снижает общую производительность процесса. Поэтому оптимальный выбор параметров системы должен осуществляться на основе конкретных технологических ограничений процесса и свойств сорбента.

В заключение отметим, что важным параметром данной системы является соотношение между теплосодержанием метановоздушной смеси и пара адсорбированной органики. На рис. 5 показано, как меняется ход расчетных кривых $T_{s,m}$, $u_w(\Phi)$ в зависимости от теплоты сгорания масла H_2 . Там же приводятся экспериментальные данные из табл. 1. Из рисунка видно, что наблюдаемое в эксперименте монотонное снижение $T_{s,m}$ и u_w достигается только при довольно высоких значениях $H_2 \geq 5 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$, что объясняется

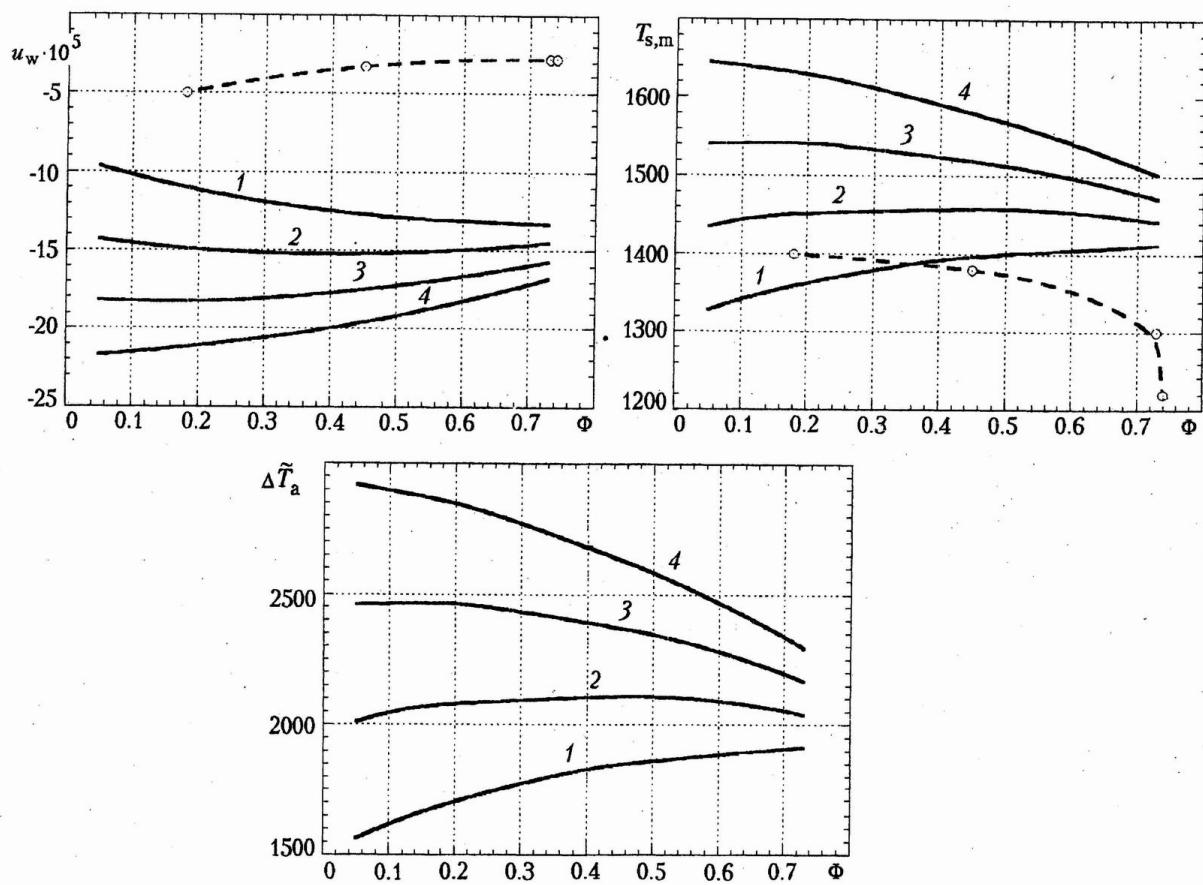


Рис. 5. Зависимости скорости фронта волны u_w , максимальной температуры каркаса $T_{s,m}$ и результирующего адиабатического разогрева $\Delta\tilde{T}_a$ от содержания метана для разных значений теплоты сгорания адсорбированной органики: 1 – $H_2 = 31$ МДж/кг; 2 – 41; 3 – 51; 4 – 61; $\chi = 0.1$; $\psi = 0.054$, $G = 0.1$ кг/(м²·с); точки – эксперимент (по табл. 1). u_w , м/с; $T_{s,m}$, К; $\Delta\tilde{T}_a$, К

ется соответствующим уменьшением суммарного адиабатического разогрева $\Delta\tilde{T}_a$ с ростом Φ в этом случае. Данные соображения обусловили выбор величины $H_2 = 5 \cdot 10^7$ Дж/кг для параметрических расчетов.

Таким образом, в работе обоснована возможность осуществления контролируемого процесса окисления адсорбированной в пористой среде органики в волне фильтрационного горения. Показана связь температурных и динамических параметров волны с другими характеристиками системы, в частности, количеством адсорбированной органики, расходом воздуха и топливного газа (в рассматриваемом случае метана). Развитая модель позволяет оптимизировать практические системы очистки пористых и сыпучих сред. Результаты исследования имеют достаточно широкую область применения и могут быть использованы для качественного описания свойств трехфазных систем с различным состоянием органики в пористой среде (в жидкой или в твердой фазе) – в виде связующего компонента композиционных материалов, газифицирующихся твердотопливных добавок и т. д.

Обозначения

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); d – диаметр зерна засыпки, м; E – энергия активации, Дж/(моль); H – теплота сгорания, Дж/кг; G – массовый расход, кг/(м²·с); K – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹; Pr – число Прандтля; Q – тепловыделение, Вт/м³; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); Re – число Рейнольдса; t – временная координата, с; T – температура, К; u_w – скорость фронта волны, м/с; u_g – скорость фильтрации, м/с; x – пространственная координата, м; Y – безразмерная концентрация топлива; σ – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·К⁴); α_v – коэффициент межфазного теплообмена, Вт/(м³·К); ρ – плотность, кг/м³; ϵ – пористость; Φ – эквивалентное соотношение для метановоздушной смеси; λ_s – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); χ и ψ – массовые доли органики и воды; χ' – степень выгорания. Индексы: а – адиабатический; д – десорбция; н – нормальные условия; p – давление; v – объем; g – газ; s – каркас; o – окружающая среда; m – максимум; th – тепловой; st – стехиометрический; w – волна; 1 – метан; 2 – масло; 3 – вода.

Литература

1. <http://user.bdn.odessa.ua/alliance/ceolit.htm>, <http://www.etma.com.ua/products/ps-1.html>.
2. Шмелев Е. С., Суворов А. В., Доброго К. В.// Материалы конф. "Рециклинг-2002". Минск: Концерн "Белресурсы", 2002. С. 10-15.
3. Лаевский Ю. М., Бабкин В. С.// Распространение тепловых волн в гетерогенных средах/Под ред. Ю. Магроса. Новосибирск: Наука, 1988. С. 108-145.
4. Martynenko V. V., Echigo R., and Yoshida H. Combustion of gaseous mixture with simultaneous evaporation of fuel droplet spray in inert porous medium//Int. J. Heat Mass Transfer. 1993. Vol. 36, No. 13. Pp. 3201-3209.
5. Kaplan M. and Hall M. J. The combustion of liquid fuels within a porous media radiant burner//Expt. Thermal Fluid Sci. 1995. Vol. 11, No. 1. Pp. 13-20.
6. Tseng C. J. and Howell J. R. Experimental stability limits and CO/NO_x emissions of pentane combustion within porous ceramic burners//ASME/AIChE Nat. Heat Transfer Conf. Portland, 1995. Pp. 112-118.
7. Koshkin B. Yu., Bunev V. A., Babkin V. S., and Laevsky Yu. M. The decomposition flame of hydrozine in inert porous media//Combust. Flame. 1995. Vol. 103. Pp. 143-150.
8. Kakutkina N. A., Bunev V. A., and Babkin V. S. Filtration combustion of liquid monofuels//Modern Problems of Combustion and its Applications. Minsk, 1995. Pp. 17-20.
9. Zhdanok S. A., Kennedy L. A., and Koester G. Superadiabatic combustion of methane air mixtures under filtration in a packed bed//Combust. Flame. 1995. Vol. 100. Pp. 221-231.
10. Foutko S. I., Shabunya S. I., Zhdanok S. A., and Kennedy L. A. Superadiabatic combustion wave in a diluted methane-air mixture under filtration in a packed bed//26th (Int.) Symp. on Combustion. Pittsburgh. PA. 1997. Pp. 3377-3382.
11. Доброго К. В., Жданок С. А. Физика фильтрационного горения газов. Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2002. С. 204.
12. Yoshizawa Y., Echigo R., and Sasaki K. Analytical study on the structure of radiation controlled flame//Int. J. Heat Mass Transfer. 1988. Vol. 31. Pp. 311-319.
13. Wakao N., Kaguei S., and Funazkri T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid heat transfer coefficients in packed beds. Correlation of Nusselt numbers//Chem. Eng. Sci. 1979. Vol. 34. Pp. 325-336.
14. Природные цеолиты России//Тез. докл. Республиканского совещания/Под ред. И. А. Белинского, Б. А. Фурсенко. Новосибирск: Наука, 1992. С. 42.

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{c} , \bar{u} , $\bar{\Theta}$). Subscripts should be semicircled from above (\cup); superscripts from below (\cap). 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 ith 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" (BEŁAT) and national authorship-legal bodies and state authorities for copyright protection of the CIS countries (see Inzh.-Fiz. Zh., 79, No. 1, 201 (2006)). 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

необратимых 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 "Kluwer Academic/Plenum Publishers" (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.