

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

ІФЖ

Інженерно-фізический
журнал

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 79, № 5

Vol. 79, No. 5

СЕНТЯБРЬ–ОКТЯБРЬ
SEPTEMBER–OCTOBER

2006

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 (редакцией 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, фотографий – контрастное изображение. Штрихи, цены деления на осиях 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 дугой \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 размечаются 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_a – характерное время вращательной диффузии (a – вращательный); T_w – температура стены (w – стена (wall)); Y_i – массовая концентрация i -го компонента.

9. Обозначение экспоненциальной функции следует приводить в виде $exp z$, а не e^z . 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 Баклея–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 подпдана всеми авторами. Авторы обязаны сообщить следующие сведения: фамилию, имя, отчество, место работы и занимаемую должность, полные почтовые адреса организаций и адреса для переписки, а также номер телефона и адрес электронной почты для связи.

15. О факте регистрации, принятия в печать или отклонения статьи 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 комиссionных отчислений осуществляют Республикаское унитарное предприятие "Белорусское авторское общество" и национальные авторско-правовые организации и государственные органы стран СНГ, ведающие охраной авторских прав (см. ИФЖ. 2006. Т. 79, № 1. С. 201). 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 необратимых 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.

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПОРИСТЫХ И ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

УДК 536.46

Н. Н. Гнездилов, К. В. Доброго, И. М. Козлов, Е. С. Шмелев**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕАКТОРА ОКИСЛЕНИЯ
ОРГАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ С НЕПОДВИЖНЫМ ПОРИСТЫМ СЛОЕМ
И ЭЛЕМЕНТАМИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА**

Промоделирован реактор окисления низкокалорийных органических примесей воздуха с дополнительным электрическим подогревом, состоящий из трубы с рекуператором, заполненной пористым каркасом. Проведено исследование влияния расположения нагревательных элементов, теплотоперь с верхней крышки реактора, расхода газа и мощности нагревателя на максимальную температуру пористого каркаса и газа, концентрацию недоокисленной органики на выходе. Показано, что для дожига примеси достаточна температура подогрева газа $\Delta T_e = 300$ К. Установлено, что оптимальным является расположение нагревателя на уровне верхнего среза внутренней трубы реактора.

Введение. Обезвреживание и очистка загрязненных газов является актуальной проблемой для многих механических, химических, биохимических и ряда других производств и технологических процессов [1, 2]. Существует большое количество методов очистки таких газов, основанных на сорбции, конденсации, горении (в том числе каталитическом), мембранным разделением, химическом и биохимическом преобразовании и других процессах [1, 2]. Сорбционная очистка газов требует восстановления или замены сорбентов, имеющих ограниченный ресурс. Методы, где используется конденсация летучих органических веществ (ЛОВ), применимы лишь к специфическим компонентам, имеющим относительно высокие температуры конденсации и находящимся в достаточно высоких концентрациях в смеси [1]. Чтобы прямое сжигание газов в открытых пламенах и печах было экономически выгодным, оно должно производиться в специально настроенной печи или иной энергетической установке. Кроме того, такое сжигание неприемлемо для некоторых типов загрязнений. Мембранные разделение, каталитическое окисление, химическое или биохимическое преобразования достаточно селективны и дорогостоящи и поэтому эффективны лишь в особых случаях [1, 2].

Широко распространенные загрязняющие воздух вещества – летучие органические вещества (ЛОВ), такие как фенол, ацетон, формальдегид, бензол и многие другие имеют теплоту сгорания, достаточную для эффективного сжигания в инертной пористой среде (фильтрационное горение) [3–6]. Процесс фильтрационного горения (ФГ) обеспечивает эффективную рециркуляцию тепла в системе и, следовательно, низкую энергетическую стоимость его в целом. Даже в случае весьма низких концентраций ЛОВ (~1 мас.%) процесс горения может быть самоподдерживающимся за счет теплоты сгорания самих загрязнителей. В известной работе [7] представлено стационарное сжигание метана в пористой среде в рекуперативном реакторе при эквивалентном отношении смеси с воздухом $\Phi = 0.026$ (что почти в 20 раз ниже предела горения в условиях открытого пламени). В работе [3] моделировался регенеративный реактор, в котором волна фильтрационного горения стабилизировалась в пористом каркасе за счет перемены направления фильтрации газов. Авторами [3] было получено стабильное горение при $\Phi = 0.15$.

Физические аспекты фильтрационного горения в инертной пористой среде обсуждаются в [4, 8, 9] и других работах. Одна из принципиальных особенностей такого горения – внутренняя рециркуляция тепла в волне горения за счет теплообмена газа и пористой среды в области ее преднагрева. Заметим, что на практике в реакторах для сжигания сверхбедных топливных смесей используют также методы рециркуляции тепла за счет теплообмена входящего и выходящих газов (рекуперативная схема), а также за счет перемены направления фильтрации газа (регенеративная схема). Такие системы исследовались в лабораторных условиях [3, 4, 7, 10, 11] и используются в промышленных реакторах окисления ЛОВ таких фирм как Thermatrix

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; э-почта: nick_gn@itmo.by. Поступила 06.02.2006.

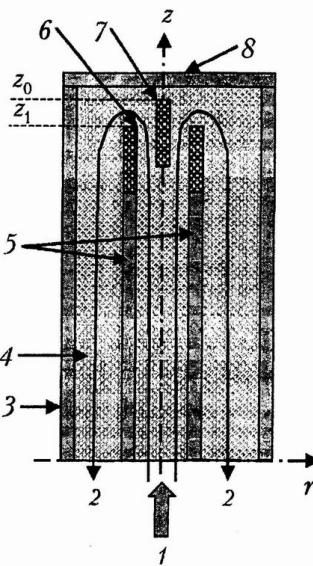


Рис. 1. Схемы моделируемых реакторов с различными положениями НЭ: 1 — входящая смесь газов; 2 — отходящие газы; 3 — корпус реактора; 4 — пористый каркас; 5 — внутренняя труба; 6 — НЭ, имеющий кольцевую форму и расположенный в верхней части внутренней трубы; 7 — НЭ, расположенный на оси; 8 — крышка

[12], ReEco-Stroem [13] и др. В работе [14] моделируется комбинированная схема такого реактора, объединяющая оба механизма рециркуляции тепла и дающая возможность расширить рабочий диапазон по концентрации ЛОВ и расходу газа.

Использование электронагрева в реакторах окисления дает возможность снять ограничения на нижний предел концентрации ЛОВ в воздухе и в общем случае обеспечить надежный контроль за тепловым режимом работы реактора. Обычно такая технология применяется при очень низком теплосодержании газов, в случае переменного теплосодержания или переменного расхода газов и при необходимости поддержания стабильной работы реактора. Хотя электрические нагревающие элементы (НЭ) используются в таких реакторах, теоретические исследования влияния параметров НЭ на характеристики авторам не известны.

В настоящей статье исследуется работа стационарного реактора рекуперативного типа с дополнительным подводом тепла при помощи НЭ. Изучается влияние расположения и геометрии электронагревательного элемента на тепловую эффективность реактора и полноту окисления органики. Химическая кинетика окисления ЛОВ моделируется брутто-кинетикой окисления метана.

Физическая постановка задачи. Исследуемый реактор состоит из двух коаксиальных труб, заполненных шарами — пористым каркасом (рис. 1). Входящий газ, состоящий из бедной смеси метана с воздухом, проходит через внутреннюю трубу, обмениваясь при этом теплом с пористым каркасом и нагреваясь по мере продвижения по трубе. В конце внутренней трубы расположен нагреватель мощностью W . По мере продвижения газа вдоль внутренней трубы его температура увеличивается за счет рекуперативного потока тепла от выходящего газа через стенку трубы, теплообмена с пористым каркасом и экзотермических реакций. При достижении газом температуры порядка 1000 К начинаются интенсивные экзотермические процессы окисления ЛОВ. Предполагается, что стенки внутренней и внешней трубы имеют нулевую толщину.

Рассматривались два случая расположения электронагревателей: в первом тепловыделяющий элемент (длина 0.2 м, диаметр 0.01 м) размещена на оси симметрии реактора, верхняя граница НЭ 6 имеет координату z_0 ; во втором нагревающий элемент 7 располагается по кольцу в стенке внутренней трубы (рис. 1) (высота кольца 0.2 м, толщина 0.005 м, диаметр 0.1 м). Нагревательный элемент имеет нулевую пористость и обменивается теплом только с окружающим его пористым каркасом. Параметрические исследования работы реактора проводились для двух указанных расположений НЭ.

Математическая постановка задачи. Задача сформулирована в объемно-усредненном приближении. В систему входят уравнения неразрывности для газовой фазы, фильтрации газа, сохранения массы химических компонентов газа, теплопроводности для пористой засыпки, теплопроводности для газа, состояния идеального газа [14–16]:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla (\rho_g \mathbf{u}) = 0 , \quad (1)$$

$$-\nabla p = \frac{\mu}{k_0} \mathbf{u} + \frac{\rho_g}{k_1} |\mathbf{u}| \mathbf{u} , \quad (2)$$

$$\rho_g \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \rho_g \mathbf{u} \nabla Y_i - \nabla s_i = \dot{\rho}_i , \quad (3)$$

$$\rho_g c_p \frac{\partial T_g}{\partial t} + c_p \rho_g \mathbf{u} \nabla T_g - \nabla q = \frac{\alpha_{vol}}{m} (T_s - T_g) - \sum_i h_i \dot{\rho}_i , \quad (4)$$

$$(1 - m) \rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} - \nabla (\lambda \nabla T_s) = \alpha_{vol} (T_g - T_s) + W_e , \quad (5)$$

$$\rho_g = \frac{pM}{RT_g} . \quad (6)$$

В уравнениях переноса для газа (4) учитываются дисперсионные диффузия и теплопроводность, в уравнении теплопроводности для каркаса (5) – радиационная составляющая теплопроводности. Для боковых стенок реактора были поставлены адиабатические граничные условия, для верхней крышки – либо адиабатические, либо теплообмена с окружающей средой по закону Ньютона с коэффициентом $\alpha = 6.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Для стенок внешней и внутренней трубы и для верхней крышки ставились условия непроницаемости. Более подробная формулировка задачи с используемыми граничными условиями приведена в [14].

Значения стандартных параметров задачи следующие: $z_0 = 0.82 \text{ м}$, $z_1 = 0.82 \text{ м}$, $z_2 = 1 \text{ м}$, $d_0 = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $d_1 = 0.1 \text{ м}$, $d_2 = 0.16 \text{ м}$, $T_0 = 300 \text{ К}$, $\rho_0 = 1.01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $\varepsilon = 0.35$, $m = 0.5$, $\rho_s = 1750 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_s = 1300 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, $\lambda = 0.2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $D_p = 0.5 \text{ м}^{-1}$, $D_t = 0.1 \text{ м}^{-1}$, $\Phi = 0.02 \text{ моль}/\text{моль}$, $G = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$, $U_g = 0.66 \text{ м}/\text{с}$, $\Delta T_e = 272.5 \text{ К}$.

Нагревательный элемент расположен на оси системы. Горение метана моделировалось брутто-реакцией $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \xrightarrow{k} \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$, $k = 2.17 \cdot 10^8 \exp(-15640/T_g)$ [17].

Результаты моделирования. Основными параметрами, представляющими интерес при проектировании и эксплуатации реакторов окисления ЛОВ, являются максимальные температуры газа и пористой среды, а также концентрация неокисленной органики на выходе. В качестве ЛОВ-содержащего газа бралась метано-воздушная смесь с $\Phi = 0.02$, мольная доля метана $X[\text{CH}_4] = 0.001996$, соотношение компонентов воздуха $\text{N}_2:\text{O}_2 = 4:1$, удельная теплота сгорания $\Delta H = 5.7 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{кг}$, $\Delta T_{ad} = 53.0 \text{ К}$, плотность газа при $T_0 = 300 \text{ К}$ $\rho_g = 1.16 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплоемкость $c_p = 1025 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. При стандартных параметрах коэффициент теплообмена $\alpha_{vol} \approx 10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Исследовано влияние положения области нагрева, величины теплопотерь на крышке реактора, мощности электроподогрева W на максимальные температуры газа $T_{g,max}$ и каркаса $T_{s,max}$ и концентрацию метана на выходе $X[\text{CH}_4]_{fin}$. Мощность электроподогрева будем характеризовать температурой прогрева газа ΔT_e , определяемой как

$$\Delta T_e = \frac{W}{G (c_p \rho_g) |_{T=T_0}} . \quad (7)$$

Задача (1)–(6) решалась при помощи пакета программ нестационарного двумерного моделирования 2DBurner [16]. Значения параметров для построения интересующих нас зависимостей брались при достижении стационарного (установившегося) режима работы реактора.

Влияние скорости газа при постоянной температуре электроподогрева. Изменение расхода смеси при прочих постоянных параметрах приводит к изменению положения фронта горения и соответствующей тепловой перестройке системы. Для поддержания постоянной температуры подогрева $\Delta T_e = 272.5 \text{ К}$ соответствующим образом изменялась мощность НЭ.

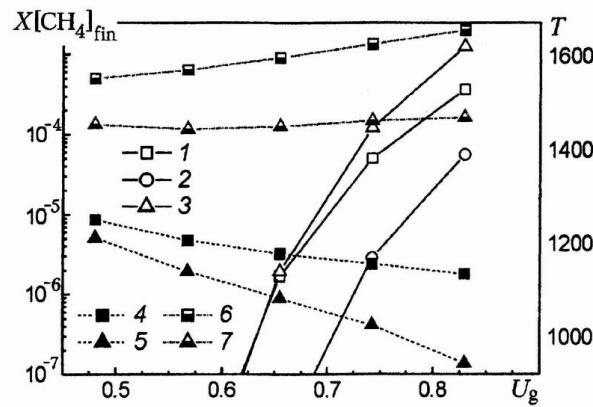


Рис. 2. Зависимость концентрации метана на выходе $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$ (1–3), максимальных температур газа $T_{g,\text{max}}$ (4, 5) и пористого каркаса $T_{s,\text{max}}$ (6, 7) от скорости газа U_g при разных длинах внутренней трубы и различных конфигурациях НЭ: 1, 4, 6 – $z_1 = 0.82$ м, осевое расположение НЭ; 2, 4, 6 – $z_1 = 0.9$ м, осевое; 3, 5, 7 – $z_1 = 0.82$ м, кольцевое. U_g , м/с; $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, моль/моль; T , К

На рис. 2 приведены зависимости $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, $T_{g,\text{max}}$ и $T_{s,\text{max}}$ от скорости газа U_g при разных длинах внутренней трубы и конфигурациях нагревательного элемента. Для этих длин трубы температуры $T_{g,\text{max}}$ и $T_{s,\text{max}}$ практически совпадают, поэтому на рис. 2 представлены температуры $T_{g,\text{max}}$ (кривая 4) и $T_{s,\text{max}}$ (кривая 6) только для внутренней трубы стандартной длины $z_1 = 0.82$ м. Как следует из рис. 2, при $\Delta T_e = \text{const}$ с ростом расхода газа максимальная температура газа незначительно падает (кривые 4, 5), а каркаса – растет (кривые 6, 7). Это связано с тем, что НЭ отдает тепло только через пористый каркас, и, следовательно, при увеличении мощности W растет и температура НЭ. Однако коэффициент объемного теплообмена, входящий в (4), (5), определяется как $\alpha_{\text{vol}} \approx Re^{0.6}$ [14, 16], и поэтому плотность теплового потока из пористого каркаса в газ возрастает медленнее расхода, что и приводит к снижению максимальной температуры газа. Очевидно, что в случае постоянной мощности НЭ с увеличением расхода снижаются как $T_{g,\text{max}}$, так и $T_{s,\text{max}}$. Вариации конструктивных параметров реактора, таких как длина внутренней трубы и расположение нагревательного элемента, оказывают существенное влияние на режим его работы. На рис. 2 для сравнения приведены зависимости остаточной концентрации метана (кривые 1, 2) и максимальных температур газа (кривая 4) и пористого каркаса (кривая 5) от скорости газа при $z_1 = 0.82$ и 0.9 м. Видно, что увеличение длины внутренней трубы мало влияет на максимальные температуры, однако существенно (на порядок) снижает концентрацию метана на выходе из системы. Данный факт объясняется увеличением расстояния, на котором происходит дожиг нагретой газовой смеси.

Из графиков рис. 2 видно также, что осевое расположение нагревателя приводит к существенному увеличению максимальной температуры газа и более низкой остаточной концентрации метана при $U_g > 0.66$ м/с. Полученные результаты указывают на более высокую эффективность такого расположения с точки зрения достижения максимальной температуры, однако при этом поле температуры в области горения оказывается более неоднородным, чем при кольцевом расположении нагревателя, и часть газа, фильтрующаяся через низкотемпературные зоны, остается недоокисленной. Данная особенность иллюстрируется кривыми 1, 2 на рис. 3, представляющими корреляции концентрации остаточного метана с максимальной температурой в газе для осевого и кольцевого расположения нагревателей при фиксированном ΔT_e . При росте максимальной температуры газа на оси абсцисс соответственно уменьшается скорость газа U_g .

Таким образом, осевое расположение нагревателя целесообразно применять при высоких расходах смеси, поскольку низкая остаточная концентрация органики на выходе является принципиальным требованием к реакторам такого типа.

Постоянная мощность электронагревателя W . Режим с постоянной мощностью электронагрева является более простым с технической точки зрения. Параметрические зависимости при этом несколько отличаются от подобных зависимостей в режиме с постоянным удельным энерговкладом (рис. 2, 3). На рис. 4 приведены расчетные зависимости $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, $T_{g,\text{max}}$ и $T_{s,\text{max}}$ для двух значений мощности нагревателя 1200 и 1500 Вт в зависимости от ΔT_e , определяемой из (7). Как видно из рисунка, при одинаковых температурах подогрева концентрация метана на выходе меньше в случае меньшего энерговклада $W = 1200$ Вт, несмотря на то, что в этом случае максимальная температура газа также ниже. Этот результат является следствием

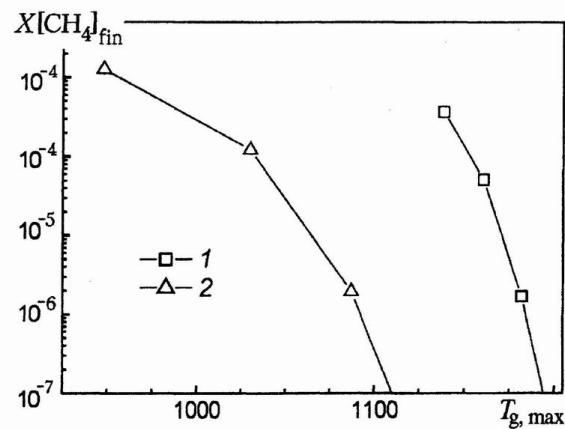


Рис. 3. Корреляция остаточной концентрации метана $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$ с максимальной температурой газа $T_{g,\max}$ при постоянной температуре подогрева ΔT_e : 1 – осевое расположение НЭ; 2 – кольцевое. $T_{g,\max}$, К; $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, моль/моль

неравномерного прогрева газового потока в области нагревателя. Можно сделать вывод о том, что при данных теплофизических параметрах при $\Delta T_e = 0.66$ м/с и температуре подогрева $\Delta T_e \approx 275$ К достигается хорошая очистка газа от примеси метана.

Влияние нагрева при постоянном расходе. Ряд параметрических зависимостей был получен при фиксированной скорости $U_g = 0.66$ м/с. На рис. 5 приведены зависимости $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, $T_{g,\max}$ и $T_{s,\max}$ от температуры подогрева ΔT_e при осевом и кольцевом расположениях нагревательного элемента. Из рис. 5 следует, что при кольцевой конфигурации НЭ горение метана происходит при $\Delta T_e \approx 260$ К, что приблизительно на 40 К выше, чем для осевой конфигурации. Свидетельством этому служит резкий спад концентрации метана на выходе из системы (кривая 2) и рост максимальных температур (кривые 4, 6).

Из сравнения представленных на рис. 5 соответствующих характеристик для осевого (кривая 1) и кольцевого (кривая 2) расположения НЭ следует, что при осевом расположении сгорание метана начинается при меньших температурах подогрева ΔT_e . Таким образом, при постоянной температуре подогрева ΔT_e , так же как и при постоянной мощности W , предпочтительным является осевое расположение нагревательного элемента. При таком расположении максимальная температура газа выше и метан выгорает лучше и при меньших температурах ΔT_e . Однако, как указывалось, при осевом расположении нагревательного элемента наблюдается менее равномерный прогрев газа по поперечному течению, что ведёт к относительно большему $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$ при одном и том же $T_{g,\max}$.

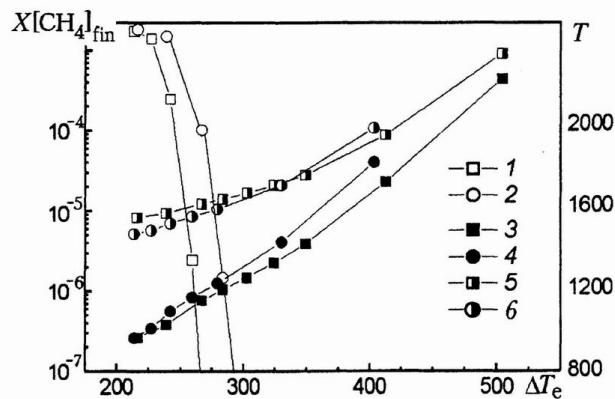


Рис. 4. Зависимость концентрации метана на выходе $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$ (1, 2), максимальных температур газа $T_{g,\max}$ (3, 4) и пористого каркаса $T_{s,\max}$ (5, 6) от температуры подогрева смеси ΔT_e : 1, 3, 5 – $W = 1200$ Вт; 2, 4, 6 – 1500. ΔT_e , К; $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, моль/моль; T , К

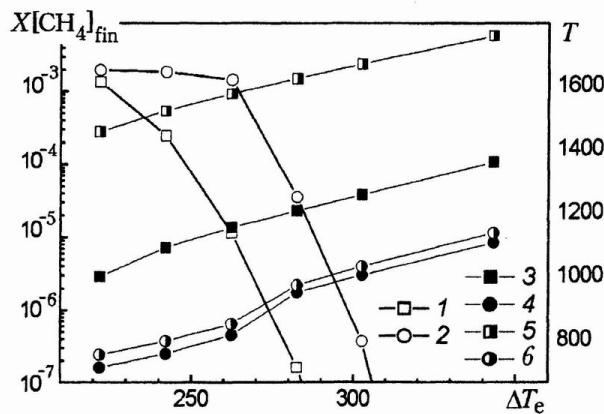


Рис. 5. Зависимость концентрации метана на выходе $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$ (1, 2), максимальных температур газа $T_{g,\text{max}}$ (3, 4) и пористого каркаса $T_{s,\text{max}}$ (5, 6) от температуры подогрева смеси ΔT_e : 1, 3, 5 — осевое расположение нагревательных элементов; 2, 4, 6 — кольцевое. $U_g = 0.66 \text{ м/с}$. $\Delta T_e, \text{ К}$; $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, моль/моль; $T, \text{ К}$

Эффективность электронагревателя в различных условиях теплоизоляции реактора. В зависимости от условий теплоизоляции реактора, длины внутренней трубы и положения НЭ эффективность нагрева меняется. Для выяснения оптимального положения нагревателя в зависимости от теплопотерь с верхней крышки (см. рис. 1) был рассчитан ряд реакторов с различными положениями НЭ на оси системы с адиабатической верхней крышкой и неадиабатической, обменивающейся теплом с внешней средой ($T_0 = 300 \text{ К}$) по закону Ньютона с коэффициентом теплообмена $6.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Результаты моделирования представлены на рис. 6. Рис. 7 иллюстрирует влияние расположения НЭ на $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, $T_{g,\text{max}}$ и $T_{s,\text{max}}$ для внутренних труб длиной 0.82 и 0.9 м.

Как видно из рис. 6 и 7, при расположениях НЭ в пределах внутренней трубы $z_0 \leq z_1$ наличие теплопотерь и увеличенная длина внутренней трубы не влекут за собой значительные изменения максимальных температур реактора $T_{g,\text{max}}$ и $T_{s,\text{max}}$ относительно стандартного случая. Однако теплопотери с верхней крышки приводят к тому, что кривая остаточной концентрации метана $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$ на рис. 6 (кривая 2) лежит выше, чем в стандартном случае (кривая 1). Такой недогар метана по отношению к стандартному случаю объясняется захолаживанием части реактора, находящейся вблизи верхней крышки. Увеличение длины внутренней трубы уменьшает концентрацию метана на выходе (рис. 7, кривая 2) относительно стандартного случая (кривая 1), что можно объяснить только более длительным нахождением газа в горячей области. Плавный рост максимальных температур (кривые 3—6 на рис. 6, 7) является следствием увеличения длины рекуперации (ее можно считать равной z_0), на которой отходящий нагретый газ отдает свое тепло входящему по внутренней трубе холодному газу.

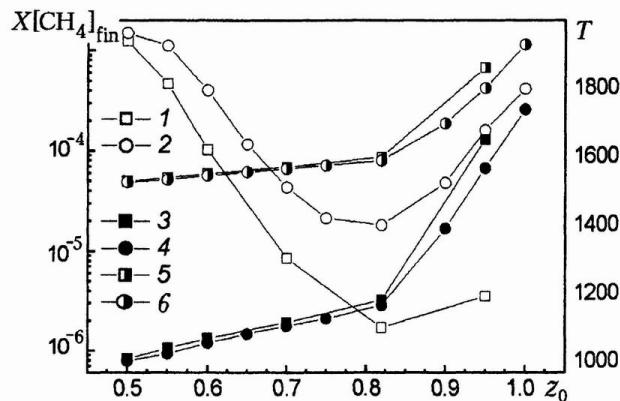


Рис. 6. Зависимость концентрации метана на выходе $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$ (1, 2), максимальных температур газа $T_{g,\text{max}}$ (3, 4) и пористого каркаса $T_{s,\text{max}}$ (5, 6) от положения НЭ z_0 : 1, 3, 5 — адиабатический реактор; 2, 4, 6 — реактор с неизолированной верхней крышкой. $z_0, \text{ м}$; $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, моль/моль; $T, \text{ К}$

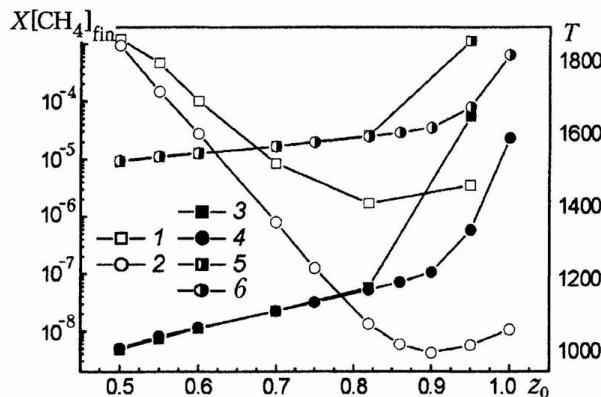


Рис. 7. Зависимость концентрации метана на выходе $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$ (1, 2), максимальных температур газа $T_{g,\max}$ (3, 4) и пористого каркаса $T_{s,\max}$ (5, 6) от положения НЭ z_0 при разной длине внутренней трубы: 1, 3, 5 – $z_1 = 0.82$ м; 2, 4, 6 – 0.9 м. z_0 , м; $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}}$, моль/моль; T , К

При дальнейшем увеличении координаты НЭ ($z_0 > z_1$) максимальные температуры реактора $T_{g,\max}$ и $T_{s,\max}$ начинают расти (рис. 6, 7). Данный факт объясняется помещением находящейся над внутренней трубой части НЭ в застойную зону, в которой теплообмен с газом практически отсутствует, что приводит к сильному неравномерному нагреву системы. Часть газа проходит мимо горячей области, не окисляясь, вызывая увеличение концентрации метана на выходе (кривые 1, 2 на рис. 6, 7). С увеличением z_0 максимальные температуры в случае с теплопотерями повышаются медленнее, чем в стандартном случае (рис. 6, кривые 3–6).

Выводы

1. При проектировании реакторов окисления ЛОВ рекуперативного типа целесообразно использовать внутреннюю трубу максимальной длины, допускаемой конструкцией и требованиями к перепаду давления в системе. При этом достигаются большие степени рекуперации тепла и окисления ЛОВ.

2. Осевое расположение нагревательного элемента внутри трубы позволяет существенно повысить максимальную температуру газа при всех расходах, однако приводит к уменьшению концентрации метана на выходе только при больших расходах (в случае моделируемой системы $U_g > 0.66$ м/с). Такое расположение НЭ приводит к более неравномерному прогреву каркаса и газа по поперечному сечению потока, чем кольцевое расположение. Этот факт следует учитывать, если термостойкость материала или стойкость к термоизменениям в пористой среде является критическим фактором при проектировании реактора.

3. Расчеты дают возможность оптимизировать рабочие параметры реактора. Так, оптимальное значение температуры подогрева смеси ΔT_e при концентрации метана, соответствующей $\Phi = 0.02$, находится вблизи 275 К, что дает приемлемую концентрацию метана на выходе $X[\text{CH}_4]_{\text{fin}} \approx 10^{-7}$ моль/моль при достаточно низком энерговкладе. Оптимальным (при котором достигается минимум остаточных углеводородов) будет расположение НЭ на оси реактора на расстоянии, равном длине внутренней трубы.

4. Результаты получены для модельной конфигурации реактора и при большом количестве фиксированных его параметров. При поиске оптимальных режимов в широком диапазоне концентраций, как и для других геометрий системы и параметров пористой среды, необходимо выполнить соответствующие дополнительные расчеты.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект Т05-259, и Государственного комитета по науке и технике Республики Беларусь, проект 61.

Обозначения

c_p – теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К); c_s – теплоемкость пористого каркаса, Дж/(кг·К); D – тензор диффузии, включающий коэффициент диффузии газа и тензор дисперсной диффузии (D_p и D_t – его компоненты); d_0 – диаметр частиц засыпки, м; d_1 – диаметр внутренней трубы, м; d_2 – диаметр внешней трубы, м; G – расход газа, $\text{м}^3/\text{ч}$; h_i – массовая энталпия i -го компонента газа, Дж/кг; k_0 , k_1 – константы проницаемости Эргуна; m – пористость; M – средняя молярная масса газа, кг/моль; p – давление, Па; p_0 – давление на выходе, Па; q – кондуктивный тепловой поток в газе, $q = \Lambda \nabla T_g$; r – радиальная координата, м; R – универсальная газовая

постоянная; Re — число Рейнольдса; S — площадь сечения реактора; s_i — диффузионный поток i -го химического компонента, $s_i = \rho_g D \nabla Y_i$; t — время; T_0 — начальная температура системы, К; T — температура, К; T_{ad} — адиабатическая температура горения, К; $\Delta T_{ad} = T_{ad} - T_0$; $\Delta T_e = \frac{W}{G(c_p \rho_g)|_{T=T_0}}$ — температура подогрева смеси (температура,

на которую нагрелся бы газ только электрическим нагревателем), К; $T_{g,max}$ — максимальная температура газа, К; $T_{s,max}$ — максимальная температура пористого каркаса, К; u — скорость фильтрации газа, м/с; $U_g = G/S$ — удельный расход газа, м/с; W — общая мощность электрического нагревателя, Вт; W_e — мощность электрического нагревателя на единичный объем, Вт; Y_i — массовая доля i -го компонента газа, кг/кг; z — продольная координата, м; z_0 — координата верхней границы нагревательного элемента, м; z_1 — длина внутренней трубы, м; z_2 — длина реактора, м; α и α_{vol} — коэффициенты теплообмена, Вт/(м²·К) и Вт/(м³·К); ϵ — степень черноты пористого каркаса; Λ — тензор теплопроводности газа, $\Lambda = c_p \rho_g D$; λ — эффективная теплопроводность пористого каркаса, Вт/(м·К); μ — вязкость газа, Па·с; ρ — плотность, кг/м³; $\dot{\rho}_i$ — скорость возникновения i -го компонента в результате химических реакций, кг/с; Φ — соотношение топливо/окислитель. Индексы: 1 — внутренняя труба; 2 — внешняя труба; ad — адиабатический; e — электрический; fin — на выходе; g — газ; i — номер компонента газовой смеси; max — максимальный; s — пористый каркас; vol — объемный.

Литература

1. Selecting the most appropriate HAP emission control technology//The Air Pollution Consultant. 1993. Vol. 3, Issue 2. Pp. 1–9.
2. Матрос Ю. Ш., Носков А. С., Чумаченко В. А. Катализическое обезвреживание отходящих газов промышленных производств. Новосибирск: Наука, 1991. С. 22 — 37.
3. Contarin F., Saveliev A. V., Fridman A. A. and Kennedy L. A. A reciprocal flow filtration combustor with embedded heat exchangers: numerical study//Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. Pp. 949—961.
4. Kennedy L. A., Fridman A. A., and Saveliev A. V. Superadiabatic combustion in porous media: wave propagation, instabilities, new type of chemical reactor//Int. J. Fluid Mech. Res. 1995. Vol. 22. Pp. 1—26.
5. Hoffman J. G., Echigo R., Yoshida H., and Tada S. Experimental study on combustion in a porous media with a reciprocating flow system//Combust. Flame. 1997. Vol. 111. Pp. 32—46.
6. Binder W. D. and Martin R. J. The destruction of air toxic emissions by flameless thermal oxidation//Incineration Conf. Knoxville, Tennessee, 1993.
7. Takeno T. and Sato K. An analytical study on excess enthalpy flames//Combust. Sci. Technol. 1979. Vol. 20. P. 73.
8. Доброго К. В., Жданок С. А. Физика фильтрационного горения газов. Минск: ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2002.
9. Hanamura K., Echigo R., and Zhdanok S. Superadiabatic combustion in a porous medium//Int. J. Heat Mass Transfer. 1993. Vol. 36, No. 13. Pp. 3201—3209.
10. Drayton M. K., Saveliev A. V., Kennedy L. A., Fridman A. A., and Li Y. E. Superadiabatic partial oxidation of methane in reciprocal and counterflow porous burners//Proc. 27th Int. Symp. on Combustion. Pittsburg: PA, 1998. Pp. 1361—1367.
11. Migoun A. N., Chernukho A. P., and Zhdanok S. A. Numerical modeling of reverse-flow catalytic reactor for methane partial oxidation//Proc. V Int. School-Seminar "Nonequilibrium Processes and Their Applications". Minsk, 2000. Pp. 131—135.
12. <http://www.thermatrix.com/>
13. <http://www.eco-web.com/>
14. Dobrego K. V., Gnesdilov N. N., Kozlov I. M., Bubnovich V. I., and Gonzalez H. A. Numerical investigation of the new regenerator-recuperator scheme of VOC oxidizer //Int. J. Heat Mass Transfer. 2005. Vol. 48. Pp. 4695—4703.
15. Dobrego K. V., Kozlov I. M., Zhdanok S. A., and Gnesdilov N. N. Modeling of diffusion filtration combustion radiative burner//Int. J. Heat Mass Transfer. 2001. Vol. 44. Pp. 3265—3272.
16. Dobrego K. V., Kozlov I. M., Gnesdilov N. N., and Vasiliev V. V. 2DBurner — Software Package for Gas Filtration Combustion Systems Simulation and Gas Non-Steady Flames Simulation. Minsk, 2004. (Preprint of the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, No. 1.)
17. Басевич В. Я., Беляев А. А., Фролов С. М. "Глобальные" кинетические механизмы для расчета турбулентных реагирующих течений. Ч. 1. Основной химический процесс тепловыделения//Хим. физика. 1998. Т. 17, № 9. С. 117—129.

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 "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.