

---

---

# К 110-летию СПбГУ ИТМО

---

---

УДК 536.24:66.096.5

Г. Н. Дульнев, Н. В. Пилипенко, В. П. Ходунков

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Рассматривается актуальность тепловых измерений для исследования динамики процессов псевдоожигения, применяемых в современных энерготехнологиях. Приводятся основные методы и устройства для измерения теплофизических и структурно-гидродинамических параметров систем.

*Ключевые слова:* псевдоожигение, тепловые измерения, нестационарные методы, пульсации температуры, тепловой поток, ресурсосбережение.

Современными особенностями развития мировой энергетики являются резкое ужесточение экологических требований, переход на высокоэффективные энергоресурсосберегающие технологии и попытки поиска альтернативных источников энергии. Сегодня основной вклад в мировое производство электроэнергии дает уголь (40 %), заметно меньше — газ (19 %), атомная энергия и гидроэнергетика (по 16 %). И в будущем (прогноз до 2030 г.) уверенное лидерство по приросту генерирующих мощностей будет принадлежать углю, далее идут газ, гидроэнергия, возобновляемые источники (биомасса и отходы, ветер, солнечная энергия, геотермальное и сбросное тепло), и совсем небольшая роль отводится атомной энергии. В России наибольший вклад в производство электрической энергии вносит газ (46 %) и лишь 18 % — уголь.

Однако ситуация в России начинает изменяться в сторону общемировых тенденций, о чем свидетельствует официально принятая „Энергетическая стратегия развития России на период до 2020 года“ [1].

В соответствии с данной стратегией необходимо создавать горелочные устройства для низкотемпературного сжигания (при температуре 600—700 °С) твердого и жидкого топлива в псевдоожигенном слое катализатора, предназначенные, главным образом, для муниципальных нужд [2]. Создание топочных устройств на базе ныне действующих теплоэлектростанций особенно актуально для районов Поволжья и Сибири. Довольно остро также стоит проблема оптимизации и ресурсосбережения в таких энергоемких производствах, как обжиг руд и нерудных материалов, термообработка, сушка, катализ, пиролиз, кристаллизация, основанных на применении принципа псевдоожигения. Это актуально для электронной промышленности (выращивание кристаллов редкоземельных металлов), фармацевтики, химической промышленности (производство минеральных удобрений, серной и азотной кислоты) и т.д. Например, в последнее время активно разрабатываются кристаллизаторы-грануляторы псевдоожигенного слоя для производства лекарственных препаратов, искусственных кристаллов для микроэлектроники, сушильные агрегаты для сельскохозяйственных нужд и т.д.

Для создания и оптимизации таких технологических устройств необходимо детально исследовать все происходящие процессы (химические, тепловые, гидродинамические и др.). Теплофизические параметры характеризуют технологический процесс в целом. Исследование

таких параметров требует адекватных методов экспериментальной диагностики и математического моделирования [3].

Процессы, основанные на применении псевдооживленного слоя, описываются обобщенной блок-схемой (рис. 1). Ядром технологической цепочки является реактор псевдооживленного (кипящего) слоя, а вспомогательные системы, узлы и агрегаты должны обеспечивать его оптимальное функционирование. Главный критерий эффективной работы реактора — максимальный выход готового продукта при минимуме энергозатрат вспомогательного оборудования, что может быть достигнуто заданием оптимального теплового и гидродинамического режима кипящего слоя на стадии проектирования, стабильностью его поддержания средствами мониторинга и управления при эксплуатации.

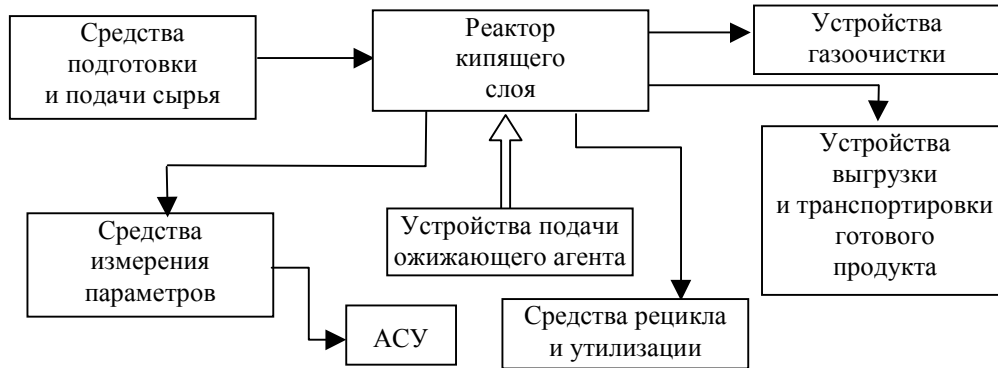


Рис. 1

Тепловой и гидродинамический режимы псевдооживленного слоя характеризуют качество работы всей системы. Основными структурно-гидродинамическими и тепловыми параметрами псевдооживленного слоя являются порозность, эффективная теплопроводность и температуропроводность слоя, коэффициент перемешивания (диффузии), скорость движения (циркуляции) твердых частиц и оживающего газа, потеря динамического напора по высоте слоя, температура слоя, тепловой поток и коэффициент теплоотдачи от поверхности к двухфазной среде, высота слоя, качество псевдооживления и т.д.

К настоящему времени набор методик и аппаратных средств измерения указанных параметров крайне ограничен, а для некоторых параметров — отсутствует.

В силу специфики псевдооживленных систем — изменяющихся во времени тепловых и гидродинамических условий — представляется логичным использовать нестационарные методы измерений параметров системы. Перспективными и наиболее адекватными для данной ситуации являются методы нестационарной теплотрии, позволяющие разработать универсальные средства для одновременного измерения нескольких параметров.

Цель настоящей работы — создание специальных зондирующих устройств лабораторного и диагностического назначения, средств и методов мониторинга, включая электронные системы обработки и визуализации информации о параметрах.

Рассматриваемые ниже методы и устройства базируются на использовании теории теплопроводности и теплообмена, обратных задач теплопроводности, пространства состояний и параметрической идентификации динамических систем, теплофизического эксперимента и численного моделирования [4].

Для быстропротекающих процессов теплообмена поверхностей с псевдооживленным слоем разработана методика, предполагающая регистрацию пульсаций температуры и теплового потока на границе раздела псевдооживленного слоя и малоинерционного первичного преобразователя, размещенного на массивном теле.

Расчетные зависимости для определения нестационарного теплового потока  $q(\tau)$  получены из решения задачи (1)—(4) для системы тел (рис. 2):

$$\frac{dt_i}{d\tau} = a_i \frac{d^2 t_i}{dx^2}, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

$$q(\tau) = \lambda_1 \frac{dt_1}{dx} \Big|_{x=-\delta}, \quad (2)$$

$$\lambda_1 \frac{dt_1}{dx} \Big|_{x=0} = \lambda_2 \frac{dt_2}{dx} \Big|_{x=0}, \quad \frac{dt_2}{dx} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (3)$$

$$t_1 \Big|_{x=0} = t_2 \Big|_{x=0}, \quad t_i \Big|_{\tau=0} = t, \quad (4)$$

где  $t_1, t_2, \lambda_1, \lambda_2, a_1, a_2$  — температура, теплопроводность и температуропроводность материала первичного преобразователя 1 и массивного тела 2 соответственно;  $\delta$  — толщина первичного преобразователя,  $\tau$  — время. Уравнения для определения нестационарного теплового потока имеют следующий вид:

$$q(\tau) = C_1 \frac{dt_1(\tau)}{dx} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{\pi a_2}} \int_0^\tau \frac{t_1'(\tau - z)}{\sqrt{z}} dz, \quad (5)$$

$$q(\tau) = q'(\tau) + q''(\tau) = \frac{\lambda_1}{\sqrt{\pi a_1}} \left\{ 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ 1 + \left( \frac{1-\varphi}{1+\varphi} \right)^m \exp\left( \frac{-m^2 A^2}{4\tau} \right) \right] \right\} \Delta t(\tau) +$$

$$+ \frac{\lambda_1}{\sqrt{2\pi a_1}} \int_0^\tau \frac{\Delta t(\tau) - \Delta t(\zeta)}{\sqrt{(\tau - \zeta)}} \left\{ 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \left[ 1 + \left( \frac{1-\varphi}{1+\varphi} \right)^m \frac{(m^2 A^2 - 2(\tau - \zeta))}{2(\tau - \zeta)} \exp\left[ -\frac{m^2 A^2}{4(\tau - \zeta)} \right] \right] \right\} d\zeta, \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \quad A = \frac{\delta}{\sqrt{a_1}},$$

где  $C_1$  — теплоемкость материала первичного преобразователя,  $z$  и  $\zeta$  — переменные интегрирования.

В случае медленно меняющихся потоков рассматривается модель градиентного тепломера, для высокочастотных пульсаций — модель пленочного тепломера, расположенного на полуграниченном теле. Мгновенные значения теплового потока восстанавливаются решением обратной задачи теплопроводности путем параметрической идентификации дифференциально-разностной модели теплопереноса с использованием рекуррентного алгоритма фильтра Калмана [5]. С помощью проточного калориметра определяются средние значения теплового потока и коэффициент теплоотдачи.

Для измерения температуры псевдооживленного слоя предлагается метод, базирующийся на линейной зависимости средней амплитуды пульсаций температуры пленочного термоприемника от разности температур между ним и псевдооживленным слоем [6]. Для обоснования этого положения рассмотрим процесс теплообмена поверхности с дисперсной средой. Уравнение теплового баланса для пакета твердых частиц и газовой фазы с учетом наличия газового зазора  $\delta$  в пристенной зоне (рис. 3) имеет вид:

$$dQ_p = \frac{\lambda_f}{\delta} S_p (T_w - \theta_p) d\tau = C_p \gamma_p V_p d\theta_p, \quad (7)$$

$$dQ_f = \alpha_f S_f (T_w - \theta_f) d\tau = C_f \gamma_f V_f d\theta_f,$$

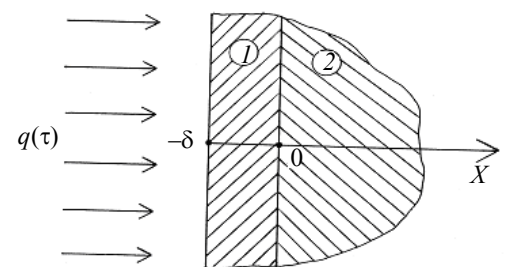


Рис. 2

где  $C_p, C_f, \gamma_p, \gamma_f, V_p, V_f$  — удельная теплоемкость, плотность и объем твердой фазы (пакета) и газовой фазы (пузыря) соответственно;  $\lambda_f$  — теплопроводность газовой фазы,  $\alpha_f$  — коэффициент теплоотдачи,  $T_w$  — температура поверхности,  $S_p, S_f$  — эффективная площадь теплообменных поверхностей пакета и газового пузыря.

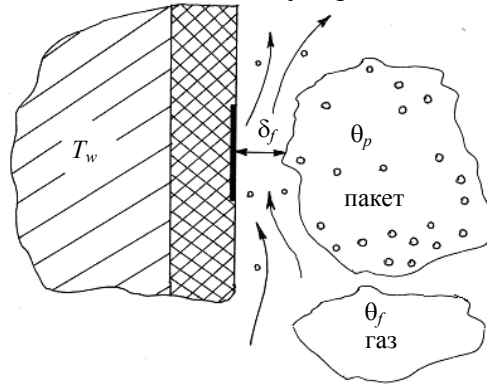


Рис. 3

После интегрирования уравнений (7) и проведения ряда преобразований получим выражение для среднего значения изменения температуры  $j$ -го пакета  $\Delta\bar{\theta}_{pj}$  и  $j$ -й газовой фазы  $\Delta\bar{\theta}_{ff}$  за время контакта с поверхностью:

$$\Delta\bar{\theta}_{pj} = \frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} \Delta\theta_p(\tau) d\tau = \frac{(T_w - T_b)}{\tau_p k_p} (\tau_1 k_1 - 1) + \frac{(T_w - T_b) \exp^{-k_p \tau}}{\tau_p k_p} = k'_{pj} (T_w - T_b), \quad (8)$$

где

$$\Delta\bar{\theta}_{ff} = k'_{ff} (T_w - T_b), \quad k_p = \frac{\lambda_p S_p}{\delta C_p \gamma_p V_p}, \quad k_f = \frac{\alpha_f S_f}{C_f \gamma_f V_f}, \quad (9)$$

$T_b$  — температура слоя,  $\delta_f$  — толщина газового зазора между слоем и поверхностью.

При условии, что средняя амплитуда пульсаций температуры поверхности равна среднему перегреву двухфазной среды у поверхности за один период гравитационных колебаний слоя, получим:

$$\Delta\bar{T}_{wj} = \Delta\bar{\theta}_j = \sum_{j=1}^n \left[ (1 - f_{vj}) \Delta\bar{\theta}_{pj} + f_{vj} \Delta\bar{\theta}_{ff} \right] = \sum_{j=1}^n \frac{(\tau_{pj} k'_{pj} + \tau_{ff} k'_{ff})}{(\tau_{pj} + \tau_{ff})} (T_{wj} - T_b) = B (T_{wj} - T_b), \quad (10)$$

где  $f_{vj}$  — доля времени, в течение которого поверхность омывается газовой фазой. При расчетах искомой температуры псевдооживленного слоя удобнее воспользоваться методом наименьших квадратов, в результате получена окончательная формула:

$$T_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{wi} - \frac{\sum_{i=1}^n \left( T_{wi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{wi} \right) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta\bar{T}_{wi}}{\sum_{i=1}^n \left( T_{wi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{wi} \right) \Delta\bar{T}_{wi}}, \quad (11)$$

где  $n$  — число устанавливаемых при измерениях разностей температур  $i = \overline{0, n}$  ( $T_w - T_b$ ).

Измерение скорости движения (циркуляции) твердой фазы  $v_p$  основывается на регистрации последовательных пульсаций температуры, вызванных локальным изменением усло-

вий теплообмена вблизи поверхности [6]. Значение скорости определяется величиной временной задержки сигналов на заданном базовом расстоянии первичного преобразователя.

На рис. 4 приведена принципиальная схема устройства измерений скорости движения твердой фазы: *а*) 1 — массивное тело; 2, 3 — термометры сопротивления; 4 — узел крепления, *б*) конфигурация термометров сопротивления. На рис. 5 представлена временная диаграмма сигналов ( $\varepsilon$  — порозность кипящего слоя;  $U_1, U_2$  — сигналы термометров сопротивления) термоприемников.

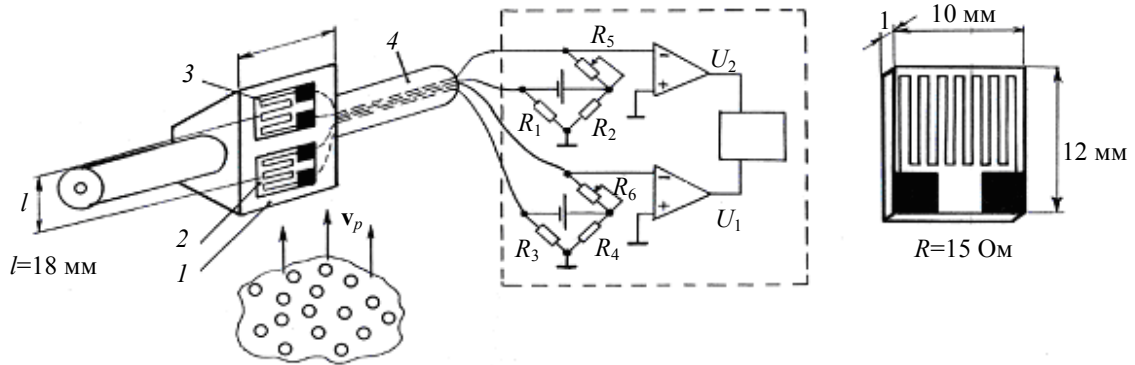


Рис. 4

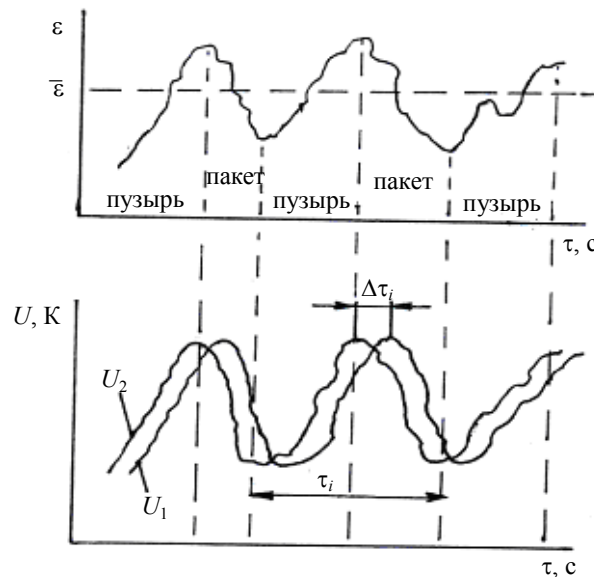


Рис. 5

Расчетная формула скорости имеет вид:

$$v_p = \frac{nL}{\sum_{i=1}^n \Delta\tau_i}, \quad (12)$$

$L$  — базовое расстояние между датчиками, м;  $\Delta\tau_i$  — значение временного сдвига сигналов ( $i=0, n$ ) с термоприемников, с.

Одновременно, что особо важно, можно определить значение локального коэффициента эффективной температуропроводности слоя ( $a_b$ ) в пристенной зоне по следующему соотношению (рис. 5):

$$a_b = \frac{1 - \varepsilon}{4\pi} v_p^2 T, \quad (13)$$

где  $T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$  — среднее значение периода пульсаций температуры, с.

Следует подчеркнуть, что интегральное значение эффективной температуропроводности псевдооживленного слоя  $\bar{a}_b$ , характеризующее процессы тепломассопереноса по всему объему слоя, может существенно отличаться от его локальных значений  $a_b$ , но также может быть определено из временной диаграммы термоприемников, при этом в расчете используется низкочастотная составляющая энергетического спектра пульсаций температуры ( $f_{i2}$ ), выделяемая при спектральном анализе. Полученная нами зависимость для  $\bar{a}_b$  имеет вид:

$$\bar{a}_b = f_{i2} D^2 = 0,12 (f_0 H_0)^{0,6} D^{1,2} \approx 0,08 H_0^{0,3} D^{1,2}, \quad (14)$$

где  $f_0$  — частота гравитационных колебаний, Гц;  $H_0$  — высота насыпного слоя, м;  $D$  — диаметр реактора, м.

Для оценки интенсивности тепловых и гидродинамических процессов в псевдооживленном слое введен параметр качества псевдооживления, равный  $f_0/f_{i2}$  [8]. По данному параметру можно управлять технологическим процессом псевдооживления вне зависимости от его типа [9].

Технологический параметр, характеризующий структуру псевдооживленного слоя, — порозность слоя — в настоящее время может измеряться различными методами [10]. Наибольшее распространение получили электроемкостные методы, их суть заключается в регистрации сигнала с датчика-конденсатора, между обкладками которого проходит неоднородная среда. Главной задачей при создании устройств для измерения порозности является уменьшение методической погрешности, связанной с присутствием в слое датчика. Ранее применялись пластинчатые первичные преобразователи, датчики стержневого типа. Наиболее перспективными представляются планарные емкостные преобразователи [11], в наименьшей степени

искажающие гидродинамику процесса вблизи теплообменной поверхности. Кроме того, их можно использовать совместно с аналогичными термопреобразователями планарного типа. В частности, было установлено, что два первичных преобразователя (емкостной и тепловой), размещенные на одной поверхности, регистрируют сигналы с коэффициентом взаимной корреляции более 0,95. Для этого необходимо обеспечить равенство зон реагирования первичных преобразователей (рис. 6), что достигается выполнением условия

$$0,3\delta_f \leq x_1 \leq 0,8\delta_f \text{ при } x_1 = 0,6x_4, \quad (15)$$

где  $\delta_f$  — толщина теплового пограничного слоя у поверхности.

На рис. 6 представлен комплексный планарный преобразователь (1 — емкостной чувствительный элемент; 2 — термопреобразователь; 3 — подложка; 4 — массивное тело; 5 — подвод хладагента).

Рассмотренные выше подходы к определению основных структурно-гидродинамических и тепловых параметров псевдооживленных систем могут успешно заполнить образовавшийся в последние годы пробел в создании методов и устройств в данной области тепло-

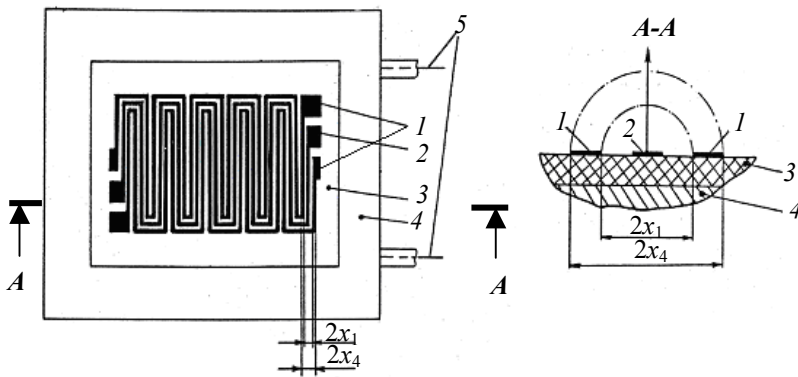


Рис. 6

физических измерений, что особенно важно для развивающихся ресурсосберегающих технологий. Из проведенного анализа следует, что измерение большинства режимных параметров возможно производить тепловыми методами, при этом открываются новые перспективы для углубления знаний о процессах теплопереноса в псевдооживленных системах, физического моделирования, создания новых методов и устройств для исследований, диагностики и управления технологическими процессами. Предоставляются также дополнительные возможности для решения проблемы масштабирования, возникающей при проектировании новых установок для энергоемких технологических процессов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года. Распоряжение Правительства РФ от 28.08.2003 г., № 1234-р.
2. Безруких П. П., Стребков Д. С. Возобновляемая энергетика: Стратегия, ресурсы, технологии. М.: ВИЭСХ, 2005. 263 с.
3. Алексенко С. В. Теплофизические основы новых энергетических технологий // Наука в Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. № 15.
4. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2003. 560 с.
5. Пилипенко Н.В. Нестационарная теплотметрия на основе параметрической идентификации дифференциально-разностных моделей теплопереноса в одномерных приемниках: Автореф. дис. докт. техн. наук. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 35 с.
6. А.с. 1597600 СССР. Способ определения температуры взвешенного слоя / В. П. Ходунков, А. Л. Вассель. 1990. Б.И. № 37.
7. А.с. 1282012 СССР. Устройство для определения скорости движения частиц неоднородной дисперсной среды / Н. В. Пилипенко, В. М. Ключев, В. П. Ходунков. 1987. Б.И. № 1.
8. А.с. 1395997 СССР. Способ определения качества псевдооживления и устройство для его осуществления / Н. В. Пилипенко, В. М. Ключев, В. П. Ходунков. 1988. Б.И. № 18.
9. А.с. 1272077 СССР. Способ управления технологическими процессами в аппаратах с кипящим слоем / О. М. Тодес, О. Б. Цитович, В. М. Чушев, Н. В. Пилипенко, В. М. Ключев, В. П. Ходунков. 1986. Б.И. № 43.
10. Протодьяконов И. О., Глинский В. А. Экспериментальные методы исследования гидродинамики двухфазных систем в инженерной химии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 196 с.
11. А.с. 1499199 СССР. Планарный датчик порозности псевдооживленного слоя / Н. В. Пилипенко, В. П. Ходунков. 1989. Б.И. № 29.

#### Сведения об авторах

- Геннадий Николаевич Дульнев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра энергофизического мониторинга и компьютерной теплофизики
- Николай Васильевич Пилипенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра энергофизического мониторинга и компьютерной теплофизики
- Вячеслав Петрович Ходунков** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра энергофизического мониторинга и компьютерной теплофизики

Рекомендована кафедрой  
энергофизического мониторинга  
и компьютерной теплофизики

Поступила в редакцию  
25.12.09 г.