

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.

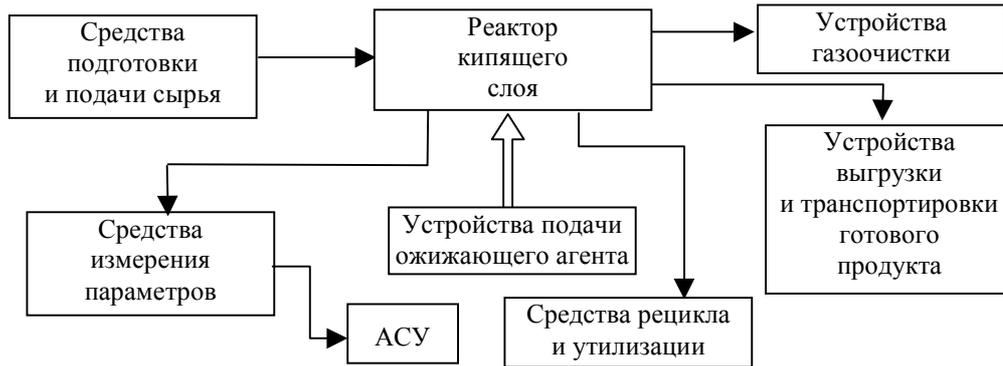


Рис. 1

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):

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

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

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

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

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; δ — толщина первичного преобразователя, τ — 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 ζ — 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 δ в пристенной зоне (рис. 3) имеет вид:

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

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

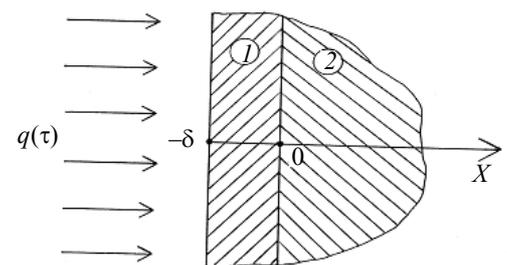


Рис. 2

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; λ_f — теплопроводность газовой фазы, α_f — коэффициент теплоотдачи, T_w — температура поверхности, S_p, S_f — эффективная площадь теплообменных поверхностей пакета и газового пузыря.

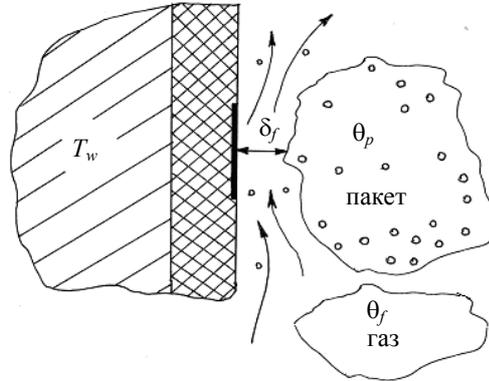


Рис. 3

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, δ_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 (ε — порозность кипящего слоя; U_1, U_2 — сигналы термометров сопротивления) термоприемников.

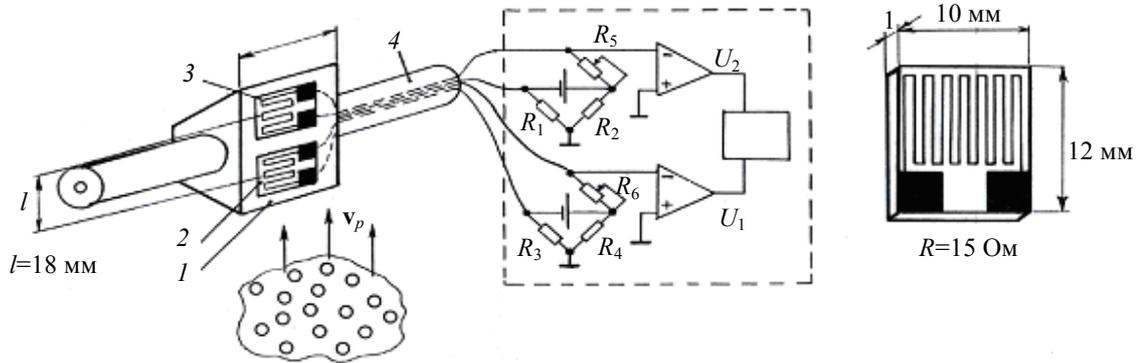


Рис. 4

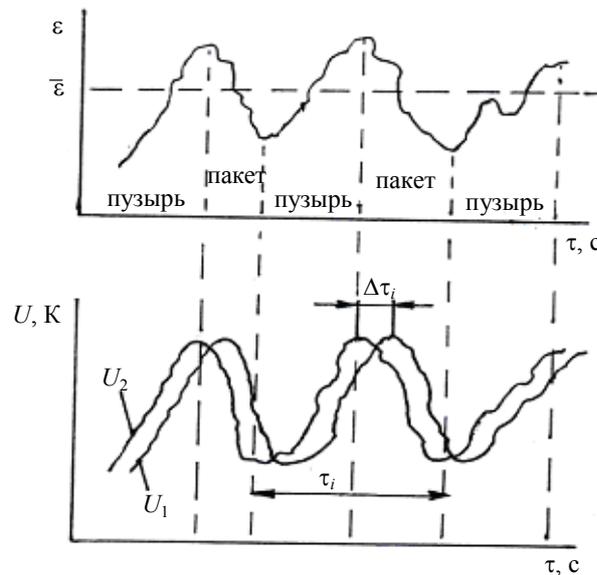


Рис. 5

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 емкостные 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

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

где δ_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-

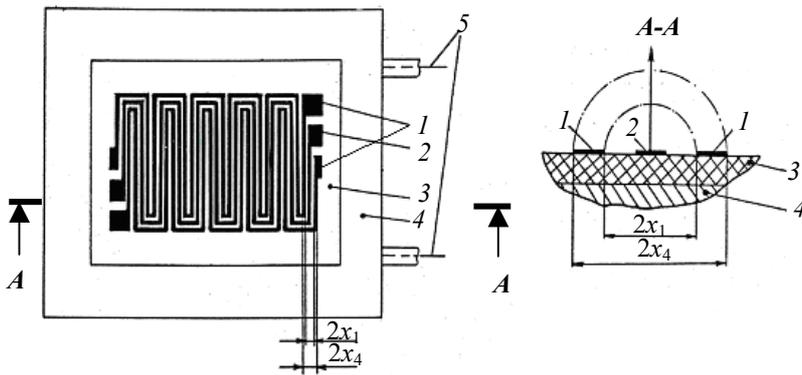


Рис. 6

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 тепломассопереноса 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.