

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК: 662.612

И.А. Куксов, С.П. Мочалов, В.Д. Сарычев, А.Е. Шендриков

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА STAR-CCM+

Одной из основных причин более широкого применения водоугольного топлива (ВУТ) является решение экологических проблем. Вода, содержащаяся в топливе в виде высокодисперсных частиц, принципиально изменяет процесс горения. Это приводит к возможности сжигания низкокалорийных топлив – отходов углеобогащения. В этом случае требуется определения закономерностей процессов, выбора оптимальных конструктивных решений и режимов работы топки. Численное моделирование процесса сжигания топлива в камере, дополняющее натурные эксперименты, может использоваться для решения этих проблем.

Целью настоящей работы является создание трехмерной модели сжигания ВУТ в цилиндрической камере. Геометрия камеры, схема подачи ВУТ и отвода продуктов горения выбраны в упрощенном виде, отражающем однако основные особенности горения экспериментальной адиабатической камеры, созданной в СибГИУ в рамках

совместного проекта с ОАО «СибШахтоСтрой». В качестве инструмента для компьютерного численного моделирования использовался пакет STAR-CCM+, который помимо общих моделей газодинамических, физических и химических процессов содержит встроенные модели горения угля.

Трехмерная модель сжигания ВУТ в цилиндрической камере, имеющей один канал подачи дутьевого воздуха и один канал для отвода продуктов горения, представлена на рис. 1,а.

На первом этапе численного моделирования создана трехмерная сетка в расчетной области. В среде STAR-CCM+ была построена многогранная объемная сетка с базовым размером ячейки $5 \cdot 10^{-3}$ м и общим количеством ячеек объемной сетки 1 078 941. Фрагмент расчетной сетки приведен на рис. 1,б.

Полная модель сжигания ВУТ в вихревой камере должна описывать ряд газодинамических, химических и физических процессов: турбулентные потоки газа и взвеси частиц, выход угольных летучих из частиц топлива, реакции горения в газовой фазе, процессы теплопереноса.

Для описания потока частиц большинство моделей используют лагранжев подход [1], который позволяет учитывать траектории отдельных частиц или их групп в камере сжигания и является подходящим для моделирования горения впрыскиваемого ВУТ. Сплошная газовая фаза описана с помощью эйлерова подхода.

Для расчета газодинамических процессов в сплошной фазе использовались осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) совместно с $k - \omega$ моделью турбулентности (Menter Shear Stress Transport, MSST).

В декартовой системе координат нестационарное течение вязкого сжимаемого газа относительно фильтрованных переменных описывается системой уравнений в дивергентном виде:

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \frac{\partial P_j}{\partial x_j} = F \quad (1)$$

Система (1) дополняется уравнением состояния идеального газа:

$$p = (\gamma - 1)\rho(e - 0,5(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)) \quad (2)$$

Компоненты векторов системы (1) определя-

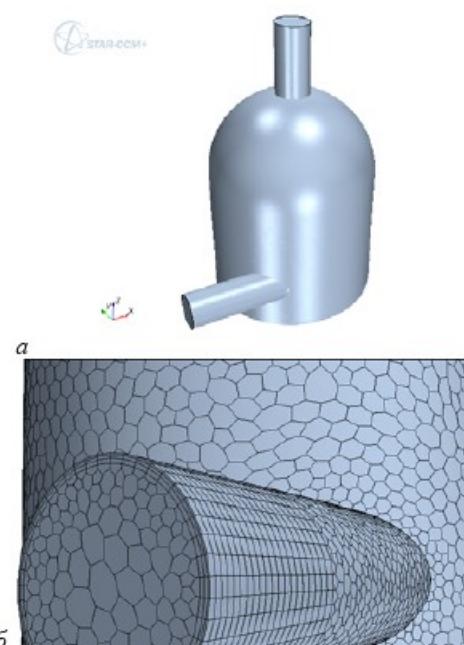


Рис.1. Общий вид трехмерной модели и фрагмент расчетной сетки

ются по формулам:

$$R = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ \rho e \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$P_1 = \begin{pmatrix} \rho u_1 \\ \rho u_1^2 + p - \tau_{11} \\ \rho u_1 u_2 - \tau_{12} \\ \rho u_1 u_3 - \tau_{13} \\ (\rho e + p) - u_i \tau_{1i} \end{pmatrix}; \quad P_2 = \begin{pmatrix} \rho u_2 \\ \rho u_2 u_1 - \tau_{21} \\ \rho u_2^2 + p - \tau_{22} \\ \rho u_2 u_3 - \tau_{23} \\ (\rho e + p) - u_i \tau_{2i} \end{pmatrix};$$

$$P_3 = \begin{pmatrix} \rho u_3 \\ \rho u_3 u_1 - \tau_{31} \\ \rho u_3 u_2 - \tau_{32} \\ \rho u_3^2 + p - \tau_{33} \\ (\rho e + p) - u_i \tau_{3i} \end{pmatrix}$$

Компоненты тензора вязких напряжений и координаты вектора теплового потока находятся из соотношений:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right), \quad q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j},$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (5)$$

где t – время, с; u_1, u_2, u_3 – компоненты вектора скорости в направлениях декартовых координат x_1, x_2, x_3 , м/с; ρ – плотность, кг/м³; p – давление, Па; T – температура, К; e – внутренняя энергия на единицу массы, (м/с)²; γ – отношение удельных теплоемкостей; μ , λ – эффективные значения вязкости и теплопроводности, Па·с, Вт/(К·м); F – вектор источников массы, импульса и энергии.

Уравнения (1) формально совпадают с уравнениями Навье-Стокса с эффективными вязкостью и теплопроводностью, вычисляемым как

$$\mu = \mu_m + \mu_t, \quad \lambda = C_p \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right), \quad (6)$$

где C_p – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг·К; μ_m , μ_t – молекулярная и турбулентная вязкости, Па·с; $Pr=0,72$; $Pr_t=0,8$ – числа Прандтля для воздуха.

Рейнольдсовы напряжения выражаются через скорость деформации, выраженные через фильтрованные скорости:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \delta_{ij} \quad (7)$$

Система уравнений (1–7) выражает осреднен-

ные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS). Тензор рейнольдсовых напряжений вычисляется с помощью моделей турбулентности. Использованная в данной задаче модель MSST к-о описывается уравнениями:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \alpha k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right];$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (8)$$

где

$$P = \tau_{ij} S_{ij}; \quad \tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (9)$$

Турбулентная вихревая вязкость определяется по формуле

$$\mu_t = \frac{\rho \alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, \Omega F_2)}. \quad (10)$$

В представленных выражениях ν_t – турбулентная кинематическая вязкость, Ω – амплитуда напряженности вихря, F_1, F_2 рассчитываются по специально разработанному алгоритму.

В модели MSST к-о используются следующие величины:

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}}; \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} \kappa^2}{\sqrt{\beta^*}},$$

$$\sigma_{\omega 1} = 0,85; \quad \sigma_{\omega 2} = 1,0; \quad \sigma_{\omega 1} = 0,5; \quad \sigma_{\omega 2} = 0,856;$$

$$\beta_1 = 0,075; \quad \beta_2 = 0,0828; \quad \beta^* = 0,09; \quad \kappa = 0,41;$$

$$\alpha_1 = 0,31.$$

Процесс моделирования процесса сжигания угля в пакете STAR-CCM+ включает следующие основные шаги: создание необходимых газовых компонент в непрерывной (сплошной) фазе; выбор подходящей модели горения для непрерывной фазы; активация модели лагранжевой многофазности и выбор подходящих фазовых моделей; задание инжекторов угольных частиц; создание условий для воспламенения угля.

Для компонент газовой фазы используются уравнения переноса вида

$$\frac{\partial Y_n}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u_j Y_n + \Gamma_{ij} \frac{\partial Y_n}{\partial x_i} \right) = -\sigma Y_n + S_n. \quad (11)$$

Для фазы, описывающей частицы топлива, использовались подходящие для расчета горения угля модели лагранжевых фаз: модель материальных частиц; модель многокомпонентного угля, модель испарение влаги из угля, модель выхода летучих моделей сжигания угля, модель окисления

коксового остатка.

Основное уравнение движения лагранжевых частиц записывается в виде:

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p; \quad m_p \frac{d u_p}{dt} = F_A + F_g + F_{\text{am}} + F_{\text{Sa}} + F_M + \dots \quad (12)$$

где x_p – координата частицы, u_p – скорость частицы, F_A , F_g , F_{am} , F_{Sa} , F_M – силы аэродинамического сопротивления, сила тяжести, виртуальная массовая сила, сила Сэфмена, сила Магнуса, соответственно; кроме того, могут быть добавлены другие силы.

В расчете использовалась двусторонняя связь между сплошной эйлеровой и лагранжевой фазами, необходимая для моделирования горения топлива [2]. Общая интенсивность массопереноса между частицами и сплошной фазой описывается в нестационарной постановке выражением, учитывающим все группы частиц в расчетной области:

$$S_n = -\frac{1}{\Delta t} \sum_k \sum_{\alpha_p} n_k m_{kp}^* \dot{\alpha}_p, \quad (13)$$

где m_{kp}^* – интенсивность массопереноса между от-

дельной частицей и сплошной фазой.

Энергетический баланс частицы записывается в виде

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = Q_t + Q_{\text{rad}} + Q_s, \quad (14)$$

где Q_t – интенсивность конвективного теплопереноса, Q_{rad} – интенсивность теплопереноса излучением, Q_s – теплоперенос от других источников.

Модель горения угольной частицы подразумевает, что частица состоит из четырех компонентов: влага, уголь с летучими, полуокс и золы.

Реакции горения угольного топлива делятся на две группы: выход летучих из угля в ходе его разогрева и окисление компонентов. В первую очередь выделяется влага, в дальнейшем по мере повышения температуры выделяются газы и тяжелые смолистые компоненты. Вторая стадия состоит в окислении оставшегося после выхода летучих полуокса – гетерогенной реакции, при которой кислород адсорбируется и реагирует на поверхности частицы. Скорость этого процесса, как правило, значительно меньше скорости выхода летучих и зависит от типа угля, температуры, давления, размера угольной частицы и концентрации окислителя. Другие окислители – водяной пар,

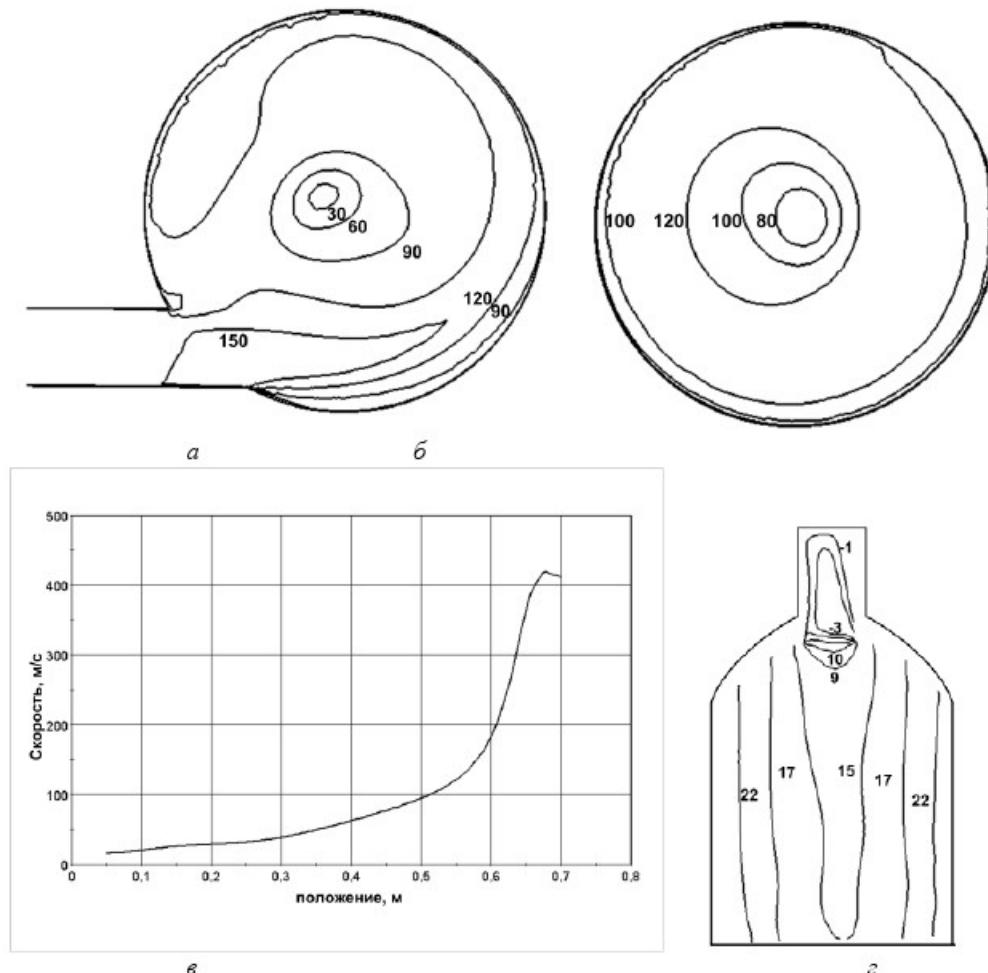


Рис. 2. Скорость газа в горизонтальных сечениях, м/с (а, б), осевая скорость по вертикальной оси камеры, м/с (в), изобары в вертикальном сечении, КПа (г)

углекислый газ и водород также вступают в реакцию с полукоксом, однако скорость этих реакций значительно меньше, чем окисление кислородом [3].

Уравнение для выделения влаги из частицы угля имеет вид:

$$\frac{da_{wp}}{dt} = -r_{wp} \quad (15)$$

Интенсивность испарения влаги r_{wp} определяется на основе расчета процессов теплопереноса и массопереноса, a_{wp} – массовая доля влаги в частице.

Уравнение для выхода летучих из угля в частице имеет вид:

$$\frac{da_{cp}}{dt} = -k_{pn} \gamma_{pn} \alpha_{cp}, \quad (16)$$

где α_{cp} – массовая доля сырого угля в частице, γ_{pn} – стехиометрический коэффициент в реакции вы-

хода летучих из угля, k_{pn} определяется по формуле Аррениуса.

Уравнение для горения коксового остатка в частице имеет вид:

$$\frac{da_{hp}}{dt} = -A_{pl} T_p^n \exp\left(-\frac{E_{pl}}{RT_p}\right) \quad (17)$$

где a_{hp} – массовая доля полукокса в частице, T_p – температура частицы, К; A_{pl} – предэкспонента Аррениуса для реакции окисления коксового остатка 1; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К.

В качестве основной модели для расчетов химических реакций в процессе горения использовалась подходящая для таких процессов модель распада вихря (Eddy-Break-Up Model) [4].

Для сплошной фазы были приняты следующие компоненты: O_2 , H_2O , CO_2 , CO , H_2 , C , HCN , N_2 , CH_4 . В соответствии с определенным элемент-

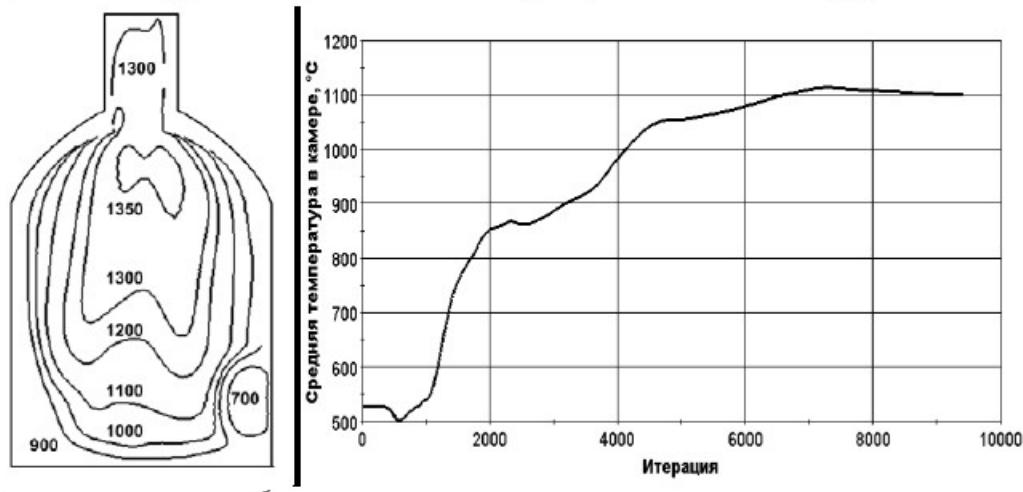


Рис. 3. Изотермы в вертикальном сечении, °С (а), график изменения средней расчетной температуры (б)

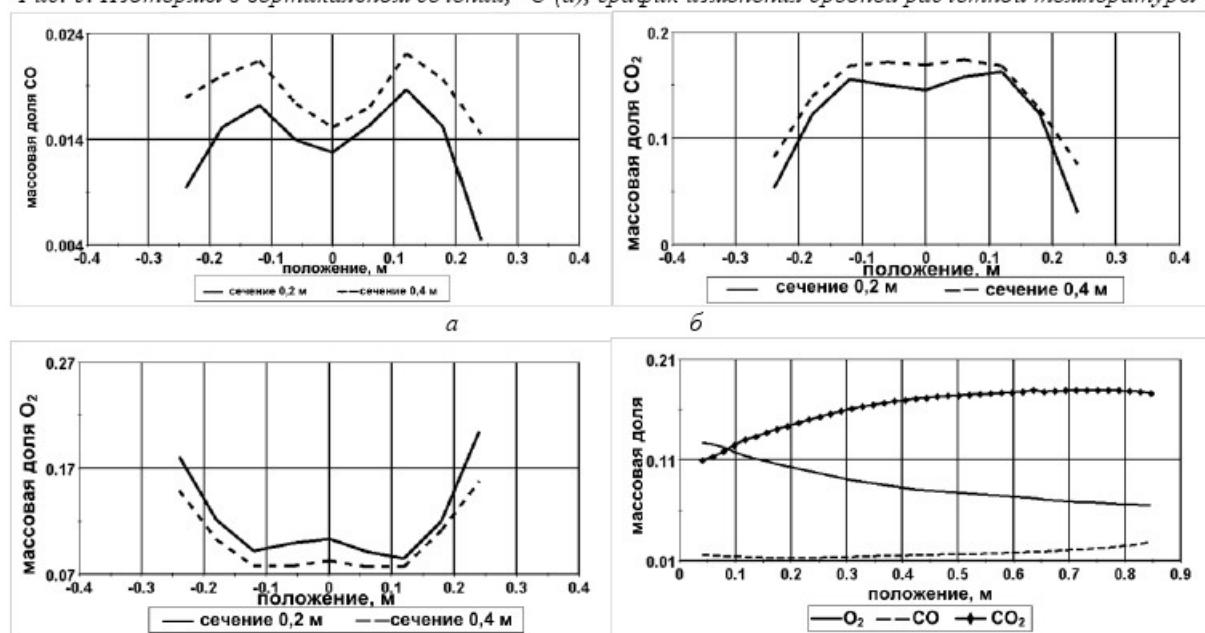


Рис. 4. Массовые доли CO (а), CO_2 (б), O_2 (в) в горизонтальных сечениях на расстоянии 0,2 м и 0,4 м от основания, массовые доли CO , CO_2 и O_2 в вертикальном сечении

ным составом летучих были вычислены стехиометрические коэффициенты газов для реакции распада летучих.

Для данной конструкции камеры была задана одна входная и одна выходная границы. На входной границе задано избыточное давление 0,3 атм. На выходной границе было задано атмосферное давление. Подача ВУТ осуществлялась двумя точечными инжекторами с общим массовым расходом 0,017 кг/с. Состав угольных частиц (в том числе содержание в них влаги), а также закон распределения размеров частиц задавался в параметрах инжектора. Характеристики движения частиц определялись потоком газа в сплошной фазе.

Схема расчета неявная нестационарная, количество внутренних итераций - 20. Шаг по времени для данного расчета принят равным 0,01 с. В расчете использовалось сопряженное решение уравнения энергии.

Во избежание расхождения математической модели на начальном этапе расчета впрыск угольных частиц осуществлялся после истечения одной секунды. Чтобы обеспечить выход летучих, формирующих газообразное горючее, и инициировать воспламенение на начальном этапе расчета температура подаваемого газа была принята равной 800К. Впоследствии вместе с началом процесса горения температура газа была уменьшена до 300К.

С целью получения более точного решения в областях входной и выходной границ было реализовано ортогональное экструдирование расчетной сетки на этих границах, фрагмент которого изображен на рис. 16.

Помимо основных многогранных ячеек созданы 3 пристеночных призматических слоя с коэффициентом сжатия - 1,5.

Для повышения скорости вычислений моделей лагранжевой фазы, являющихся одними из

наиболее ресурсоемких, в расчете не учитывались частицы, масса которых после процессов горения не превышала заданного минимального порогового значения.

Результаты моделирования представлены на рис. 2-4. Максимальная расчетная температура в камере составила 1368°С.

Результаты расчетов поля скоростей в сечениях перпендикулярных оси камеры представлены на рис. 2, где видно, что течение генерируется струей (рис. 2,а) и приводит к течению с прямоточной вихревой линией, совпадающей с осью камеры (рис. 2,б). На рис. 2,в представлено распределение осевой скорости. Из этой зависимости следует, что осевая скорость монотонно возрастает вдоль оси. Это приводит к возникновению разрежения в зоне выходного канала (рис. 2,г).

Изотермы температур по вертикальному сечению, проходящему через ось камеры и перпендикулярно оси входного сечения, приведены на рис. 3,а. Вблизи среза входного канала температура держится в районе 700°С, что указывает на то, что частицы ВУТ только нагреваются, но загораться не успевают. График изменения усредненной по объему температуры показан на рис. 3,б; установившееся решение достигнуто при температуре около 1100°С.

Зависимости концентраций кислорода, монооксида и диоксида углерода от координат представлены на рис. 4,г.

Работа выполнена в рамках проекта № 2010-218-02-174 по Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Guoa, Y.C. A multi-fluid model for simulating turbulent gas-particle flow and pulverized coal combustion / Y.C. Guoa, C.K. Chanb // Fuel, 2000, Volume 79, Issue 12. – P. 1467–1476.
- Kuniyoshi Ishii / Advanced pulverized coal injection technology and blast furnace operation. – Elsevier, 2000. – 307 p.
- Smoot, D.J. Combustion and Gasification / D.J. Smoot, P.J. Smith // The Plenum Chemical Engineering series, 1985. – New York.
- Warnatz, J. Combustion: physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation / J. Warnatz, U. Maas, R. W. Dibble. – Springer, 2006. – 378 p.

□ Авторы статьи:

Куксов

Игорь Анатольевич,
мл. научн. сотрудник
Управления научных
исследований СибГИУ,
e-mail: saget@inbox.ru

Мочалов

Сергей Павлович,
докт. техн. наук, про-
фессор, ректор СибГИУ,
e-mail: rector@sibsiu.ru

Сарычев

Владимир Дмитриевич,
канд. техн. наук, доцент каф.
физики СибГИУ,
e-mail:
sarychev_vd@physics.sibsiu.ru

Шендриков

Александр Евгеньевич,
начальник отдела корпо-
ративных технологий
СибГИУ, e-mail:
shenale@sibsiu.ru