

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ С ОЧАГАМИ
ГЕТЕРОГЕННОГО ГОРЕНИЯ**

В. А. Левин^{1,2}, Н. А. Луценко^{1,2}

¹ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

²Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

NickL@inbox.ru

Аннотация

Для исследования нестационарных течений газа в пористых объектах с очагами гетерогенного горения при заданном давлении на границах объекта предложены математическая модель и оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно-разностных схем. С помощью вычислительного эксперимента исследованы одномерные нестационарные процессы гетерогенного горения в пористом объекте при естественной конвекции. Обнаружено два режима распространения волны горения – движение волны вверх по объекту (спутное горение) и вниз по объекту (встречное горение) – и показано, что эти режимы существенно отличаются друг от друга степенью выгорания твердого горючего вещества, температурой в зоне горения и скоростью распространения волны горения.

Введение

Процессы горения в пористых средах достаточно распространены в природе. К пористым средам с точки зрения механики можно отнести грунты, торф, горные породы, завалы разрушенных зданий и так далее. Таким образом, очаги горения в пористых средах могут возникать, например, при разрушении сооружений в результате катастроф и сопровождающихся пожарах, при торфяных пожарах, а также при подземных взрывах и пожарах, возникающих при добыче полезных ископаемых. В последнее время ведутся активные исследования по применению фильтрационного горения в различных

технологических процессах. Имеется огромное количество публикаций, посвященных как горению твердых пористых сред, так и горению газов в фильтрационном режиме, среди которых можно выделить следующие работы [1–9]. Настоящая работа посвящена исследованию нестационарных течений газа в пористых объектах с очагами гетерогенного горения при заданном давлении на границах объекта и неизвестном расходе газа, проходящего через объект.

Физическая и математическая модели

Рассмотрим однородный неподвижный пористый объект, с боков ограниченный непроницаемыми нетеплопроводными стенками, а сверху и снизу открытый (рис. 1). В результате протекания химической реакции в твердой фазе происходит выделение тепла. В нижнюю часть объекта может входить холодный газ, который может двигаться снизу вверх через пористую среду и вытекать в свободное пространство с заданным давлением.

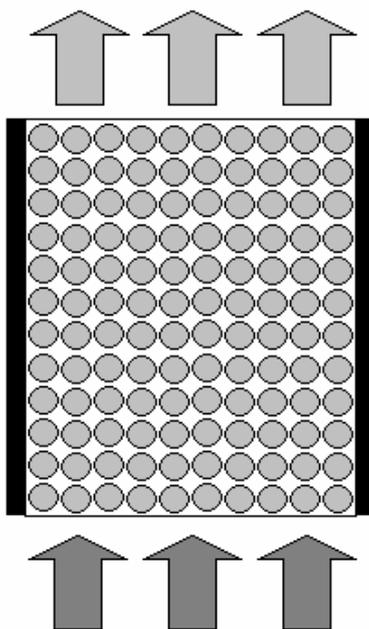


Рис. 1. Пористый объект.

Твердое пористое вещество состоит из горючего и инертного компонента, при этом твердое горючее вещество в результате реакции с газообразным окислителем превращается в газ, то есть справедливо следующее выражение:

Твердое горючее + (μ_g) Окислитель \rightarrow ($1 + \mu_g$) Газовые продукты реакции,

где μ_g – массовый стехиометрический коэффициент для окислителя.

Модель строится в предположении взаимодействующих взаимопроникающих континуумов [10] с использованием классических подходов теории фильтрационного горения [1]. В уравнении энергии для твердой компоненты кроме происходящего в результате реакции тепловыделения учитывается также теплопроводность и межфазный теплообмен, интенсивность которого предполагается пропорциональной разности фазовых температур в точке среды. В уравнении энергии для газа теплопроводность не учитывается из-за её малости, а также предполагается, что гомогенные реакции не происходят. Для описания динамики газа используется уравнение сохранения импульса для пористых сред, которое является более корректным, чем классическое уравнение Дарси. Твердая фаза предполагается неподвижной, поэтому уравнение движения для неё вырождается. В модели учитывается изменение объема и массы фаз при взаимодействии, наличие диффузии окислителя, а также полагается справедливость уравнения состояния совершенного газа. Процессы горения описываются одностадийной химической реакцией первого порядка по отношению к каждому компоненту. Так как в [11, 12] показано, что учет температурной зависимости вязкости газа при его движении через пористую тепловыделяющую среду может изменять решение не только количественно, но и качественно, то динамическая вязкость газа предполагается зависящей от температуры по формуле Сазерленда. Таким образом, система уравнений, моделирующая нестационарные течения газа в пористом объекте с очагами гетерогенного горения, имеет следующий вид:

$$(\rho_{cf}c_{cf} + \rho_{ci}c_{ci})\frac{\partial T}{\partial t} = -\alpha(T - T_g) + Q_0\rho_{cf0}W + (1 - a)\lambda\Delta T,$$

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla)T_g\right) = \alpha(T - T_g),$$

$$\rho(1 + \chi(1 - a))\left(\frac{\partial \mathbf{v}_g}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla)\mathbf{v}_g\right) = -a\nabla p + \rho\mathbf{g} - a^2\frac{\mu}{k_1}\mathbf{v}_g - \rho_{cf0}W\mathbf{v}_g,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}_g) = \rho_{cf0} W, \quad p = \rho R T_g / (a \cdot M), \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{v}_g \cdot \nabla) C \right) = \nabla \cdot (\rho D_g \nabla C) - \mu_g \rho_{cf0} W - \rho_{cf0} W C,$$

$$D_g = D_{g0} (T_g / 273)^b, \quad W = (1 - \eta) C k \exp(-E / (R T)),$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = W, \quad \rho_{cf} = (1 - \eta) \rho_{cf0}, \quad a = a_0 + a_{f0} \eta, \quad \mu = c_{s1} \frac{T_g^{1.5}}{c_{s2} + T_g}.$$

На входе в пористый объект (на его нижней границе) известны температура газа, давление и массовая концентрация окислителя. На выходе (верхней границе) известно давление, так как истечение газа происходит в открытое пространство. Известны также условия теплообмена на входе и выходе из пористого объекта и на ограничивающих непроницаемых стенках. Отличительной особенностью рассматриваемой модели является то, что расход и скорость фильтрации газа на входе в пористый объект неизвестны и должны определяться при решении задачи. Таким образом, краевые условия для системы (1) имеют следующий вид:

$$p|_{x \in G_1} = p_0(x), \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial n}|_{x \in G_1} = \beta (T_{g0} - T|_{x \in G_1}),$$

$$T_g|_{x \in G_1} = T_{g0} \text{ и } C|_{x \in G_1} = C_0, \text{ если } \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} \leq 0,$$

$$\frac{\partial T_g}{\partial n}|_{x \in G_1} = 0 \text{ и } \frac{\partial C}{\partial n}|_{x \in G_1} = 0, \text{ если } \mathbf{v}_g|_{x \in G_1} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_1} > 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n}|_{x \in G_2} = 0, \quad \frac{\partial T_g}{\partial n}|_{x \in G_2} = 0, \quad \mathbf{v}_g|_{x \in G_2} \cdot \mathbf{n}|_{x \in G_2} = 0.$$

Численный метод

Для исследования нестационарных течений газа через пористые объекты с очагами гетерогенного горения разработан оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно разностных схем. Этот метод есть результат развития вычислительного алгоритма, который ранее успешно применялся для расчета течений газа через пористые объекты с источниками энерговыделения при известном перепаде давлений на входе и на выходе из объекта [11, 13–16]. Уравнения энергии, сохранения импульса и концентрации окислителя, согласно методу, преобразуются в явные конечно-разностные

уравнения, из которых определяются температура газа, температура твердой среды, скорость газа и массовая концентрация окислителя. Уравнение неразрывности сводится к неявному конечно-разностному уравнению, из которого, с учетом уравнения состояния совершенного газа, вычисляется давление газа. Эффективная плотность газа и остальные искомые величины определяются тривиально.

Результаты расчетов

Рассмотрим процесс естественной конвекции, то есть когда давление газа на нижней и на верхней границах пористого объекта соответствует атмосферному давлению на заданных высотах. До начального момента времени движение газа в объекте отсутствует и его температура равна температуре окружающей среды T_{g0} ; в начальный момент времени в очаге возгорания, расположенном в нижней, или верхней, или средней части объекта, температура твердой фазы достигает значения, равного или превосходящего температуру самовоспламенения, и начинается горение.

В расчетах будем использовать следующие значения параметров [17–19]:

$$\rho_{cf0} = 1.1 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3, \quad \rho_{ci} = 6.6 \cdot 10^2 \text{ кг/м}^3, \quad c_{cf} = 1.84 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$c_{ci} = 1.84 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad \alpha = 10^3 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \quad c_{gp} = 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$c_{s1} = 1.458 \cdot 10^{-6} \text{ кг/(м} \cdot \text{с} \cdot \sqrt{\text{К}}), \quad c_{s2} = 110.4 \text{ К}, \quad k_1 = 10^{-8} \text{ м}^2, \quad g = 9.8 \text{ м/с}^2,$$

$$\lambda_c = 1.2 \text{ Дж/(м} \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \quad \beta = 10 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с)}, \quad R = 8.31441 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)},$$

$$M = 2.993 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}, \quad \chi = 0.5, \quad k = 3.16 \cdot 10^7 \text{ 1/с}, \quad Q = 8 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг},$$

$$E = 110 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}, \quad D_{g0} = 1.82 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}, \quad b = 1.724, \quad \mu_g = 2.667,$$

$$a_{g0} = 0.3, \quad a_{cf0} = 0.1, \quad T_{g0} = 300 \text{ К}, \quad C_0 = 0.23, \quad H = 10 \text{ м}, \quad p_0|_{x=0} = 10^5 \text{ Па}.$$

Вначале рассмотрим случай, когда очаг возгорания расположен в нижней части объекта. Проведенные расчеты показывают, что для возникновения и распространения волны горения необходимо, чтобы очаг возгорания был достаточно протяженный и температура в нем должна быть существенно выше температуры самовоспламенения. На рис. 2. показано распределение

температуры твердой среды в рассматриваемом пористом объекте в различные моменты времени при высоте зоны поджигания $L = H/10$ и температуре в ней в начальный момент $T_0 = 750$ К. Как видно из рисунка, в этом случае спутная волна горения медленно возникает и затем устойчиво распространяется. Температура в зоне горения поднимается достаточно существенно, при этом скорость волны горения возрастает с ростом температуры. Твердое горючее вещество выжигается полностью. После того, как волна горения проходит через весь пористый объект, процесс горения прекращается и начинается медленное остывание пористого объекта.

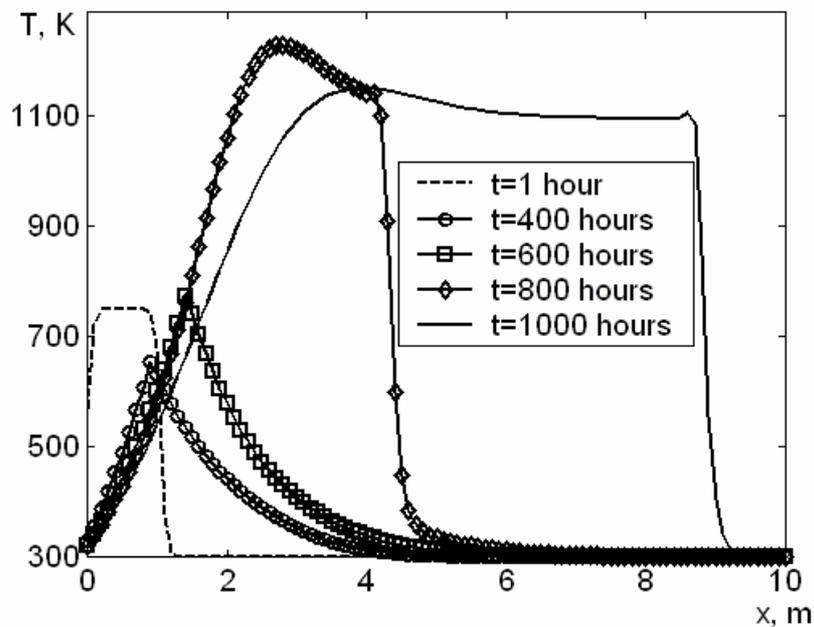


Рис. 2. Распределение температуры твердой среды в пористом объекте в различные моменты времени при расположении очага возгорания в нижней части объекта.

В случае, когда очаг возгорания расположен в верхней части объекта, волна горения возникает в гораздо большем диапазоне параметров. Она может возникнуть даже если температура зажигания равна температуре самовоспламенения при достаточно протяженном очаге возгорания. При распространении волны горения её скорость и температура в зоне горения практически не зависят от размеров очага зажигания и температуры зажигания. При этом температура в зоне горения и скорость распространения встречной волны горения

оказываются существенно меньше, чем в ранее рассмотренном случае спутной волны горения. Кроме этого, при распространении встречной волны горения твердое горючее вещество выжигается неполностью. Когда встречная волна горения доходит до нижней границы объекта, она отражается и начинает движение вверх, переходя в спутную волну и дожигая до конца оставшееся твердое горючее вещество. При этом температура в зоне горения и её скорость распространения существенно увеличиваются. Это наглядно демонстрирует рис. 3, на котором показано распределение температуры твердой среды в рассматриваемом пористом объекте в различные моменты времени при высоте зоны поджигания $L = H/10$ и температуре в ней в начальный момент $T_0 = 540$ К.

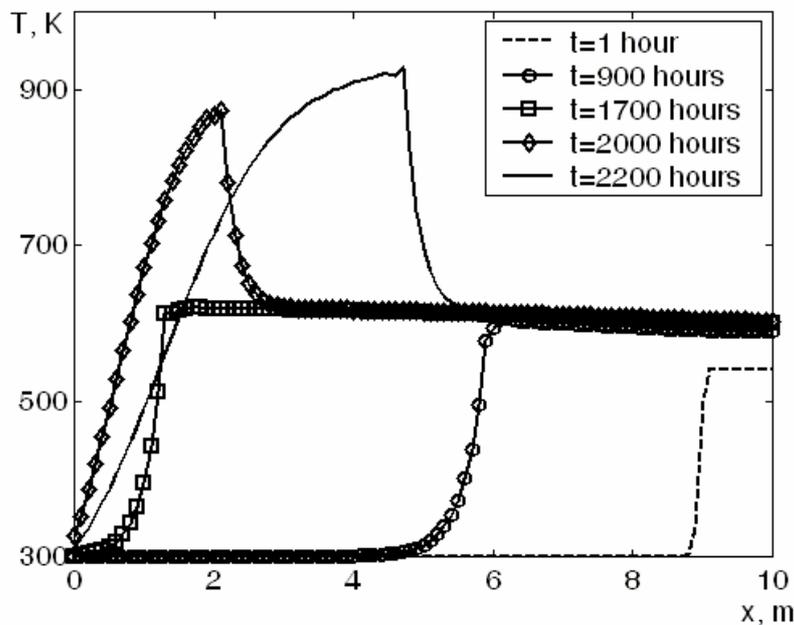


Рис. 3. Распределение температуры твердой среды в пористом объекте в различные моменты времени при расположении очага возгорания в верхней части объекта.

В случае, когда очаг возгорания расположен в средней части объекта, волна горения может возникнуть при достаточно протяженном очаге возгорания даже если температура зажигания равна температуре самовоспламенения. При этом интересным оказывается то обстоятельство, что волна горения может двигаться как вверх, так и вниз. Движение волны горения вверх, как и в рассмотренных ранее случаях спутной волны, характеризуется высокой

температурой в зоне горения и полным выжиганием твердого горючего вещества. Также развитие волны горения происходит достаточно медленно, а с ростом температуры её скорость возрастает. При движении волны горения вниз она также только частично выжигает твердое горючее вещество, а при достижении нижней границы объекта волна отражается и начинает движение вверх, дожигая до конца оставшееся твердое горючее вещество. При этом также, как и в рассмотренном ранее случае отражения встречной волны горения, температура в зоне горения и её скорость распространения после отражения существенно увеличиваются. После выхода волны горения в область, в которой горения ещё не было, температура в зоне реакции и скорость волны горения ещё более возрастают.

Заключение

Для исследования нестационарных течений газа в пористых объектах с очагами гетерогенного горения при заданном давлении на границах объекта предложены математическая модель и оригинальный численный метод, основанный на комбинации явных и неявных конечно разностных схем. Используемый подход позволяет решать задачи фильтрационного горения как при вынужденной фильтрации газа, так и при естественной конвекции. С помощью вычислительного эксперимента исследованы одномерные нестационарные процессы гетерогенного горения в пористом объекте в случае, когда давление на нижней и верхней границах объекта соответствует атмосферному давлению на заданных высотах. Обнаружено два режима распространения волны горения – движение волны вверх по объекту (спутное горение) и вниз по объекту (встречное горение). Показано, при встречной волне горения, в отличие от спутного горения, происходит неполное выгорание твердого горючего вещества, а температура в зоне горения и скорость волны горения в этом случае оказываются более низкими. Показано, что при достижении встречной волны горения нижней границы объекта происходит её отражение и переход в спутную волну горения. Обнаружено, что при расположении зоны поджигания в средней части объекта могут возникать как спутные, так и встречные волны горения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант № МК-2198.2011.1), РФФИ (№ 11-01-98510-р_восток_a), ДВО РАН.

Обозначения

a – пористость; a_0 – начальная пористость; a_{f0} – начальная объемная концентрация горючего компонента конденсированной фазы; b – показатель степени в выражении для коэффициента диффузии; C – массовая концентрация окислителя в газовой смеси (т.е. кислорода); C_0 – массовая концентрация окислителя в газовой смеси в окрестности объекта; c_{cf} – теплоемкость горючего компонента конденсированной фазы, Дж/(кг·К); c_{ci} – теплоемкость инертного компонента конденсированной фазы, Дж/(кг·К); c_p – теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К); c_{s1} – константа в формуле Сазерленда, кг/(м·с·К^{1/2}); c_{s2} – константа в формуле Сазерленда, К; D_g – коэффициент диффузии газа, м²/с; D_{g0} – константа в выражении для коэффициента диффузии, м²/с; E – энергия активации, Дж/моль; g – ускорение силы тяжести, м/с²; G_1 – открытые в атмосферу поверхности объекта; G_2 – непроницаемые поверхности объекта; k – предэкспоненциальный множитель в выражении для скорости реакции, с⁻¹; k_1 – коэффициент проницаемости конденсированной фазы, м²; M – молярная масса газа, кг/моль; \mathbf{n} – вектор, направленный из объекта наружу по нормали к G_1 или к G_2 ; p – давление газа, Па; p_0 – давление газа в окрестности объекта, Па; Q_0 – тепловой эффект реакции, Дж/кг; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); t – время, с; T – температура конденсированной фазы, К; T_g – температура газа, К; T_{g0} – температура газа в окрестности объекта, К; v_g – скорость газа, м/с; W – скорость обобщенной одностадийной химической реакции, с⁻¹; α – константа, определяющая интенсивность межфазного теплообмена, Дж/(м³·К·с); β – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²·К·с); η – степень превращения горючего компонента конденсированной фазы, λ – теплопроводность конденсированной фазы, Дж/(м·К·с); μ – динамическая вязкость газа, кг/(м·с); ρ – эффективная плотность газа, кг/м³; ρ_{cf} – эффективная плотность горючего компонента

конденсированной фазы, кг/м³; ρ_{cf0} – эффективная начальная плотность горючего компонента конденсированной фазы, кг/м³; ρ_{ci} – эффективная плотность инертного компонента конденсированной фазы, кг/м³; χ – коэффициент, учитывающий инерционное взаимодействие фаз при их ускоренном относительном движении.

Литература

1. Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука, 1988. С. 9-52.
2. Aldushin A.P., Matkowsky B.J., Schult D.A. Upward buoyant filtration combustion // Journal of Engineering Mathematics. 1997, V. 31. pp. 205-234.
3. Aldushin A.P., Rumanov I.E., Matkowsky B.J. Maximal Energy Accumulation in a Superadiabatic Filtration Combustion Wave // Combustion and flame. 1999, V. 118. pp. 76-90.
4. Babkin V.S., Korzhavin A.A., Bunev V.A. Propagation of Premixed Gaseous Explosion Flames in Porous Media // Combustion and Flame. 1991. Vol. 87. P. 182-190.
5. Доброго К.В., Жданок С.А. Физика фильтрационного горения газов. Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова НАНБ, 2002. 203 с.
6. Какуткина Н.А., Рычков А.Д. Моделирование нестационарных процессов фильтрационного горения газов // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 3. С. 44-51.
7. Минаев С.С., Потытняков С.И., Бабкин В.А. О неустойчивости фронта пламени при фильтрацион-ном горении газов // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 1. С. 49-54.
8. Салганский Е.А., Полианчик Е.В., Манелис Г.Б. Моделирование горения углерода в фильтрационном режиме // Химическая физика. 2006. Т. 25, № 10. С. 83-91.
9. Салганский Е.А., Кислов В.М., Глазов С.В., Жолудев А.Ф., Манелис Г.Б. Фильтрационное горение системы углерод – инертный материал в режиме со сверхадиабатическим разогревом // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 3. С. 30-38.
10. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.

11. Левин В.А., Луценко Н.А. Возникновение неустойчивых режимов охлаждения пористого тепловыделяющего элемента при докритических краевых условиях // Горение и плазмохимия. 2005. Т. 3, № 2. С. 81-90.
12. Levin V.A., Lutsenko N.A. Gas Flow through a Porous Heat-Releasing Medium with Allowance for the Temperature Dependence of Gas Viscosity // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2006. Vol. 79, No. 1. pp. 33-39.
13. Левин В.А., Луценко Н.А. Численное моделирование двумерных нестационарных течений газа через пористые тепловыделяющие элементы // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. № 6. С. 44-58.
14. Левин В.А., Луценко Н.А. Движение газа через пористые объекты с неравномерным локальным распределением источников тепловыделения // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 3. С. 407-417.
15. Левин В.А., Луценко Н.А. Нестационарные течения газа через осесимметричные пористые тепловыделяющие объекты // Математическое моделирование. 2010. Т. 22. № 3. С. 26-44.
16. Луценко Н.А., Мирошниченко Т.П., Одякова Д.С., Харитонов Д.И. Параллельная реализация алгоритма для расчета двумерных нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками тепловыделения // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16. № 2. с. 98-110.
17. Таблицы физических величин: Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
18. Физические величины: Справочник. Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
19. Sørum L., Grønli M.G., Hustad J.E. Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid wastes // Fuel, 2001. V. 80. pp. 1217-1227.