

УДК 620.9:665.6

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ И ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В ПЕРСПЕКТИВНОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

Красинский Д.В., Ануфриев И.С.

ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН», Новосибирск,  
e-mail: dkr@itp.nsc.ru

Представлены результаты численного исследования аэротермохимических процессов при сгорании углеводородного топлива в лабораторном образце нового горелочного устройства, отличительной особенностью которого является самоподдерживающийся режим вдува струи перегретого водяного пара в зону реагирования. На основе комплексной физико-математической модели турбулентной аэродинамики, процессов теплопереноса и горения многокомпонентной газовой смеси, с учетом квазиравновесного детального химического реагирования и процессов сажеобразования, проведено численное моделирование горения испаренного дизельного топлива в тракте и внешнем факеле исследуемой горелки. В результате расчетов получены распределения скорости, температуры и концентраций компонент газовой смеси и сажи, анализ которых позволил выявить трехслойную коаксиальную структуру реагирующего потока внутри основного канала горелки. Показано, что наблюдаемый во внешнем факеле эффект интенсификации горения обусловлен процессом паровой газификации топлива.

**Ключевые слова:** углеводородное топливо, горение, паровая газификация, горелочные устройства

## NUMERICAL MODELLING OF STEAM-ENHANCED GASIFICATION AND COMBUSTION OF HYDROCARBON FUEL IN THE PROSPECTIVE BURNER DEVICE

Krasinsky D.V., Anufriev I.S.

*Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, e-mail: dkr@itp.nsc.ru*

The paper presents the results of numerical study of aerothermochemical processes during the hydrocarbon fuel combustion in the pilot burner of novel design, which distinctive feature is the self-sustained regime of injection of superheated water steam jet into the reaction zone. On the basis of comprehensive physicomathematical model of the turbulent aerodynamics, the heat transfer processes and the combustion of multicomponent gas mixture, with equilibrium detailed chemistry approach and soot formation processes taken into account, the numerical simulation of the vaporized diesel fuel combustion inside the studied burner and in its outer flame region has been performed. Flowfield distributions of velocity, temperature, concentrations of gas species and soot have been obtained from numerical predictions, their analysis has allowed to reveal the three-layer coaxial structure of reacting flow inside the main channel of the burner. It has been shown that the effect of combustion intensification observed in the burner outer flame results from the process of steam-enhanced fuel gasification.

**Keywords:** hydrocarbon fuel, combustion, steam-enhanced gasification, burner devices

Разработка малогабаритных горелок, работающих на некондиционных жидких углеводородных топливах и отходах, представляет большой научно-практический интерес. Известно, что специально организованный подвод водяного пара в зону горения позволяет существенно повысить экологические характеристики и эффективность процесса сжигания тяжелых углеводородных топлив. На основе этого принципа в ИТ СО РАН были разработаны макетные образцы перспективного горелочного устройства [1, 2], в которых реализован автономный самоподдерживающийся режим подачи струи перегретого водяного пара в зону горения продуктов термического разложения углеводородного топлива с высоким содержанием сажи. Лабораторная горелка, показанная на рис. 1, состоит из цилиндрического корпуса с топкой, топливопровода, воздухопроводов, встроеного парогенератора с форсункой и камеры га-

зогенерации. Горелка мощностью ~ 10 кВт и объемом бачка-испарителя 0.3 л работает на дизельном топливе при атмосферном давлении, в ней конструктивно реализована отдельная подача потоков: 1) жидкого дизтоплива, которое подвергается пиролизу в топке; 2) атмосферного воздуха, который поступает в топку (как через расположенные по окружности в нижней части корпуса горелки отверстия, так и сверху через кольцевой зазор между парогенератором и корпусом) и смешивается с продуктами разложения топлива, что приводит к воспламенению смеси и формированию сажистого факела в условиях недостатка воздуха; 3) перегретого водяного пара из центральной форсунки в основной канал горелки. В отсутствие пара формируется пламя, содержащее большое количество сажи (рис. 1-а), что характерно для горения дизельного топлива. Часть тепла, выделяющегося при горении, расходуется на нагрев

воды в бачке-испарителе и дополнительный нагрев пара в пароперегревателе. В установившемся режиме (при достижении давления пара более 0.3 МПа) обеспечивается интенсивная подача перегретого пара в первичный сажистый факел, т.е. горелочное устройство выходит на самоподдерживающийся (автономный) режим вдува паровой струи. В результате процессов газификации происходит резкая интенсификация горения, образуется выходящий из горелки яркий короткий вторичный факел, не содержащий сажи (рис. 1-б). В окружающей атмосфере выше среза горелки происходит догорание продуктов в струе вторичного факела.

Ранее в работах авторов [1–5] был проведен цикл экспериментов по сжиганию «тяжелых» и некондиционных жидких топлив (дизтопливо, картерные отходы, сырая нефть и т.п.) в опытных горелках такой конструкции, продемонстрировавших стабильную интенсификацию горения во вторичном факеле и высокие экологические характеристики (низкие уровни выбросов CO, оксидов азота, сажи) этого перспективного горелочного устройства. Представляется, что достижение такого высокоэффективного режима сжигания обусловлено определенным сочетанием и взаимодействием ряда основных факторов и процессов: – геометрическими параметрами конструкции горелки; – аэродинамической структурой потоков топлива, окислителя и струи водяного пара, обеспечивающей необходимые степени эжекции и турбулентного перемешивания; – физико-химическими процессами высокотемпературного испарения и пиролиза исходного жидкого топлива, и газофазного диффузионного реагирования в сложной многокомпонентной смеси; – процессами конвективного и лучистого теплопереноса. Влияние каждого из этих факторов в количественном отношении остается пока невыясненным и требует изучения, в том числе путем численного моделирования.

#### Физико-математическая модель

В настоящей работе представлены результаты численного исследования аэродинамики, процессов теплопереноса и горения испаренного дизельного топлива в рассматриваемом горелочном устройстве. Применяемая физико-математическая модель пространственного турбулентного течения и процессов горения основана на эйлеровом описании многокомпонентной сплошной среды. Течение в тракте горелки и ее внешнем факеле полагается стационарным, дозвуковым, турбулентным, осесимметричным. Аэродинамика такого

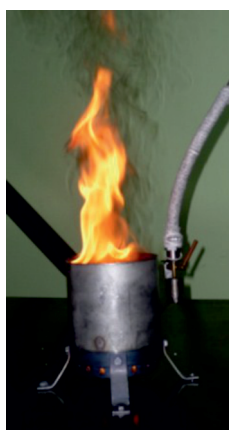
течения определяется осредненными по Фавру уравнениями неразрывности и количества движения, для замыкания которых выбрана «реализуемая» модификация  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности [6]. Анализ экспериментальных наблюдений указывает на необходимость детализации химического реагирования при моделировании процессов в исследуемой горелке. Поэтому для детального описания термохимического состояния газовой смеси, обеспечивающего учет десятков индивидуальных веществ в ее составе, а также промежуточных радикалов, учитываемых в сотнях цепочек химических реакций, применяется подход (приближение Шваба-Зельдовича), в котором вектор зависимых переменных  $\phi = \{T, \rho, C_{pi}, Y_i, \dots\}$  (температура, плотность, теплоемкости и концентрации компонент) в каждой точке потока определяется по значениям независимых переменных: консервативного скаляра «доли смешения топлива»  $\xi$  («mixture fraction») и интенсивности его турбулентных флуктуаций  $\xi'^2$ , для которых решаются дифференциальные уравнения пространственного переноса. На входных границах величина  $\xi = 0$  для струи окислителя (воздуха) и  $\xi = 1$  для струи топливной смеси, а внутри области рассчитывается распределение  $0 \leq \xi \leq 1$ . Для учета неадиабатичности система дифференциальных уравнений дополняется уравнением переноса полной энтальпии  $H$  смеси. Расчет детального химического реагирования проводится на основе полуэмпирической модели химического равновесия [7]. Таким образом, задача определения термохимического состояния смеси при диффузионном реагировании выделяется из газодинамической задачи, поскольку решается в пространстве  $(\xi, \xi'^2, H)$ . С целью описания паровой струи как дополнительного потока применяется подмодель вторичного консервативного скаляра  $\zeta$ , в таком случае используется пространство  $(\xi, \zeta, H)$ . В обоих случаях появляется возможность предварительно протабулировать термохимическое решение (для заданных граничных условий задачи) и использовать эту трехмерную таблицу на каждой итерации газодинамического расчета. Так, была построена термохимическая таблица решения размерностью  $40 \times 25 \times 128$  в пространстве  $(\xi, \zeta, H)$  для 32 компонент смеси. Дизельное топливо во входном сечении полагалось испаренным при температуре 600 К и представлялось смесью углеводородов ( $CH_4, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, C_5H_{12}, C_6H_{14}, C_7H_{16}, C_8H_{18}$ ). Таким образом, применяемая модель

представляет собой робастный алгоритм для учета детального химического реагирования в CFD-расчетах, в т.ч. при моделировании сложных турбулентных реагирующих течений для прикладных задач.

Для учета влияния турбулентных пульсаций на протекание реакций на каждой итерации выполняется ФПВ-осреднение табличного вектора решения:  $\bar{\phi} = \int_0^1 \phi(\xi, \zeta, H) P(\xi, \xi^{n^2}, \xi) d\xi$ , где в качестве весовой функции плотности вероятности (ФПВ)  $P$  применяется двухпараметрическая  $\beta$ -функция (так что средние значения  $\bar{\xi}, \bar{\xi}^{n^2}$  суть ее параметры).

которой также решается пространственное уравнение переноса.

Важность учета присутствия сажи-стых частиц в смеси, процессов роста и окисления сажи обусловлена не только участием активного углерода сажи в химических превращениях, но и существенным влиянием сажи на лучистый теплоперенос ввиду определяющего вклада сажи в величину коэффициента поглощения лучистой энергии в сажегазовой смеси, который в таком случае рассчитывается как  $a_{\Sigma} = a_{\text{г}} + a_{\text{с}}$ , где коэффициент поглощения  $a_{\text{г}}$  в бессажевом газе находится по модели взвешенной суммы серых газов [9], а для коэффициента поглощения



а)



б)

Рис. 1. Горение дизельного топлива в горелочном устройстве: (а) без подачи пара; (б) установившийся сажепаровый режим горения

Важно отметить, что ввиду существенной неравновесности процессов роста и поглощения сажи, эти процессы не могут быть описаны в рамках вышеописанной модели химического равновесия (в отличие от «быстрого» процесса горения углеводородов). Поэтому для отдельного учета процесса сажеобразования в численном моделировании применялась модель [8], основанная на решении двух дополнительных уравнений переноса для концентраций зародышей сажи и ее массовой доли. Источниковые члены в правых частях этих уравнений описывают баланс процессов нуклеации, коагуляции, роста сажевых частиц и их поглощения при окислении в присутствии кислорода  $O_2$  или гидроксила  $OH$ . При ФПВ-осреднении этих источниковых членов, экспоненциально зависящих от температуры, в качестве двух параметров  $\beta$ -функции используются осредненные значения температуры и ее вариации, для

$a_{\text{с}}$  сажи используется аппроксимация [10]:  $a_{\text{с}} = b_1 \rho_{\text{с}} [1 + b_T (T - 2000)]$ , где  $\rho_{\text{с}}$  – «континуальная» плотность сажи,  $b_1 = 1232.4 \text{ м}^2/\text{кг}$ ,  $b_T = 4.8 \times 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ . В результате задача моделирования лучистого теплообмена, сформулированная в рамках  $P-1$  приближения метода сферических гармоник для серой среды, сводится к решению дополнительного уравнения (вида уравнения Пуассона) переноса плотности энергии излучения [11].

На основе вышеописанных моделей проведено численное моделирование аэродинамики и процессов газофазного горения углеводородного топлива в исследуемой конфигурации горелки. Ввиду осевой симметрии горелки, задача формулируется в двумерной постановке в цилиндрической системе координат  $(x, r)$ , при этом аксиальная протяженность вычислительной области от среза горелки вниз по потоку составляет 1 м, а внешний

радиус области – 0.5 м. Расчетная сетка состоит из 85984 гексаэдрических ячеек, средний шаг сетки внутри основного канала горелки – около 0.5 мм и сгущается до 0.3 мм вблизи оси, а внутри центрального канала паровой форсунки радиальный шаг сетки составляет 0.05 мм. Расход топлива составляет ~ 1 л/ч, водяного пара – 0.3 л/ч. При этом расход воздуха, поступающего в горелку, был задан в соответствии с измерениями [3]: через нижние отверстия корпуса горелки ~ 50 л/мин, через верхний канал (образуемый зазором между стенками парогенератора и внешнего кожуха) ~ 75 л/мин. Для проведения расчетов использовался CFD-пакет FLUENT, установленный на суперкомпьютерном кластере НКС-30Т (ССКЦ СО РАН, г. Новосибирск).

### Результаты численного моделирования

Результаты численного моделирования азотермохимической структуры реагирующего потока в тракте исследуемой горелки и ее внешнем факеле представлены на рис. 2–5. Картины полей величин для наглядности показаны вместе со своим зеркальным отражением относительно оси симметрии. Поле скорости в горелке формируется в первую очередь за счет импульса паровой струи, пронизывающей основной канал горелки. При этом высокоскоростная струя пара вносит в этот канал и высокий уровень турбулентных пульсаций, тем самым обеспечивается интенсификация процессов химического реагирования, прежде всего в градиентной области струи. Из анализа распределений температуры и концентраций газовой смеси, показанных на рис. 2–4, можно сделать вывод о том, что структура потока внутри основного канала горелки характеризуется тремя коаксиально расположенными слоями: вдоль

оси распространяется высокоскоростной относительно холодный поток вдуваемой центральной струи, на внешней границе которой (в градиентной области смешения) формируется высокотемпературная зона горения, а вдоль стенки основного канала распространяется холодный поток воздуха, поступающего преимущественно через верхний канал (образуемый зазором между стенками парогенератора и внешнего кожуха горелки). Кислород из этого пристеночного слоя воздуха (см. рис. 3) постепенно расходуется во фронте кольцеобразной зоны горения, которая линейно расширяется вниз по потоку и ближе к срезу сопла «садится» на стенку канала. В экспериментах [3] по измерению расхода воздуха также была отмечена важная роль воздуха, поступающего из верхнего канала, для достижения стабильного самоподдерживающегося режима работы горелки. Из рис. 3 видно, что внутри приосевой струи находится полностью бескислородная зона, что способствует процессу газификации топлива, эжектируемого из топливной предкамеры в область паровой струи. Содержания конечных продуктов  $CO_2$  и  $H_2O$  внутри приосевой струи также пониженные (при исключении доли водяного пара, впрыскиваемого из форсунки). Поэтому, как видно из рис. 4, основной состав смеси внутри струи образуют компоненты синтез-газа  $CO$  и  $H_2$ , концентрации которых достигают там ~30% по объему. Это газифицированное топливо выносится во внешний факел, где догорает, что обуславливает расположение области максимальной температуры факела на определенном расстоянии (70–100 мм) от среза сопла горелки. Также результаты расчетов показывают, что локальные высокотемпературные зоны горения характеризуются повышением концентрации радикала  $OH$ .

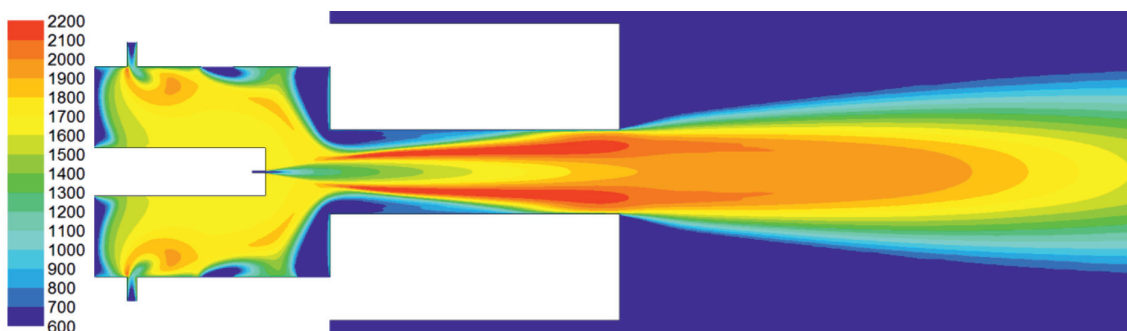


Рис. 2. Распределение температуры в горелке, К

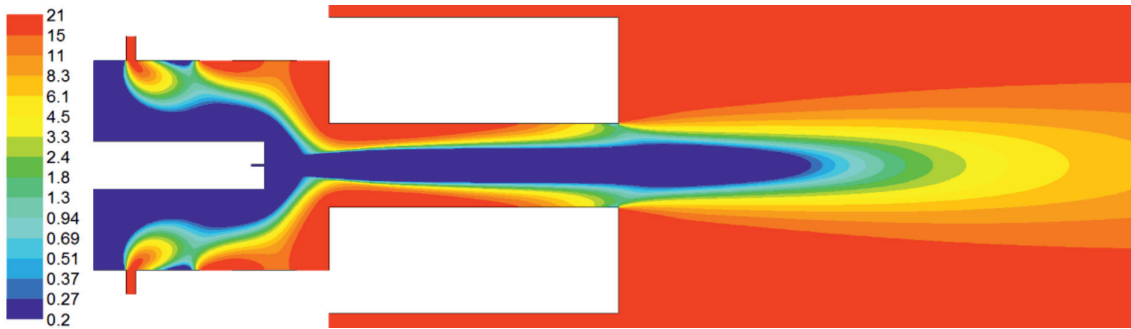


Рис. 3. Распределение объемной доли кислорода  $O_2$  в горелке (в логарифмической шкале), %

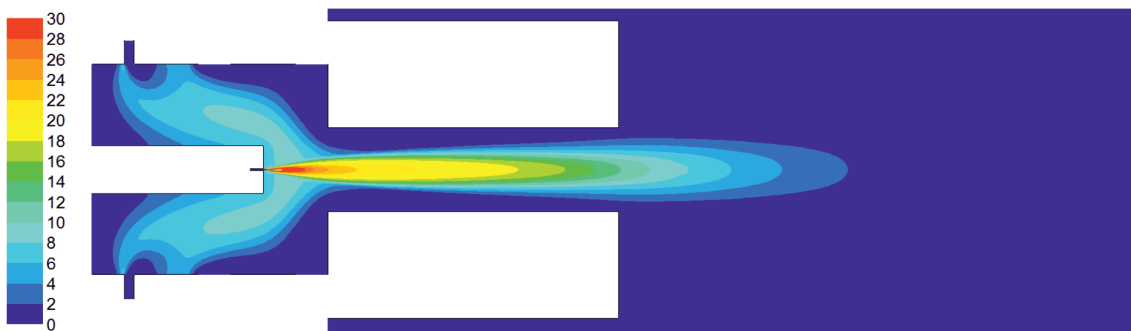


Рис. 4. Распределение объемной доли водорода  $H_2$  в горелке, %

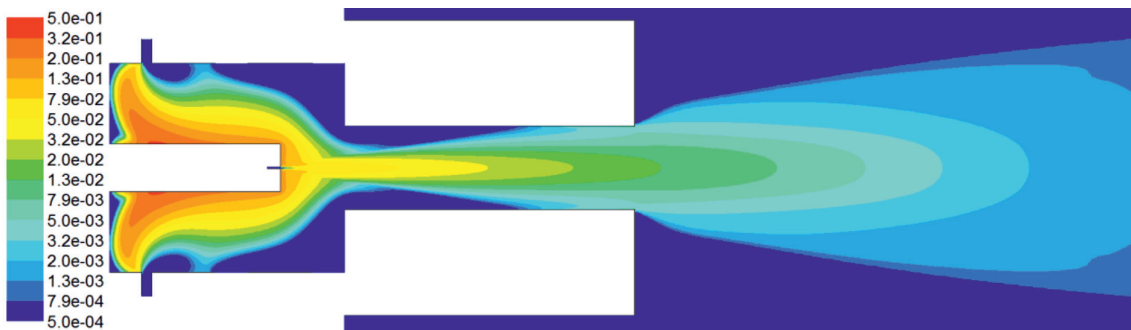


Рис. 5. Распределение «континуальной» плотности сажи (в логарифмической шкале),  $kg/m^3$

На основе проведенного моделирования проанализированы особенности процессов образования и поглощения сажи, их влияние на лучистый теплообмен в тракте горелки. Рассчитанное распределение «континуальной» плотности сажи показано на рис. 5 в логарифмической шкале. В расчетах получено, что процесс зародышеобразования и роста концентрации сажевых частиц происходит главным образом в топливной предкамере при пиролизе исходного топлива в условиях дефицита кислорода. Также определен уровень генерации сажи на-

блюдается в области приосевой струи, где условия высокой концентрации синтез-газа способствуют протеканию в прямом направлении реакций типа:  $CO + CO = C_{(s)} + CO_2$  и  $CO + H_2 = C_{(s)} + H_2O$  (здесь нижний индекс  $s$  обозначает конденсированное состояние углерода в виде сажи). Как было отмечено выше, присутствие сажи дает определяющий вклад в величину коэффициента поглощения лучистой энергии – поэтому распределение коэффициента поглощения излучения по структуре подобно полю плотности сажи (см. рис. 5).

### Заклучение

Проведено численное исследование турбулентной аэродинамики, процессов тепломассопереноса и горения испаренного дизельного топлива в тракте и внешнем факеле разработанного в ИТ СО РАН перспективного горелочного устройства, отличительной особенностью которого является самоподдерживающийся режим вдува струи перегретого водяного пара в область термического разложения и горения топлива. Для численного моделирования применяется комплексная физико-математическая модель турбулентного горения углеводородного топлива, включающая учет детального квазиравновесного химического реагирования для 32 компонент смеси в рамках приближения Шваба-Зельдовича с использованием предварительно рассчитанной термохимической таблицы размерностью  $40 \times 25 \times 128$  (в пространстве двух консервативных скаляров смешения и энтальпии), а также учет процессов сажеобразования. В результате расчетов получены распределения скорости, температуры и концентраций компонент газовой смеси и сажи, анализ которых позволил определить аэротермохимическую структуру реагирующего потока, в том числе выявить трехслойную коаксиальную структуру с кольцеобразной зоной горения внутри основного канала горелки, и подтвердить предположение о том, что за счет воздействия паровой струи происходит газификация топлива, в результате которой в основном канале горелки образуется смесь синтез-газа с инертными продуктами, что приводит к наблюдаемой в экспериментах интенсификации горения во внешнем факеле.

Результаты проведенного численного исследования могут быть использованы при обосновании нового перспективного энергоэффективного и экологически безопасного способа сжигания низкокачественных жидких углеводородных топлив и опасных производственных отходов с использова-

нием разработанного типа горелочного устройства.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-08-00177-а; № 15-38-20558-мол а вед; № 15-58-04032-Бел мол а), гранта ННП «Глобальная энергия» «Энергия молодости-2014» и Стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам (СП-1410.2015.1).*

### Список литературы

1. Алексеенко С.В., Пашенко С.Э., Саломатов В.В. Нанокластерное инициирование горения некондиционных углеводородных топлив // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 682–693.
2. Патент РФ № 2219435. Способ беспламенного сжигания топлива / Вигриянов М.С., Саломатов В.В., Алексеенко С.В.; Институт теплофизики СО РАН, опубл. 20.12.2003.
3. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Bobrova L.N., Dulin V.M., Krasinsky D.V., Salomatov V.V., Sharypov O.V. Experimental and numerical study of steam-enhanced regime of liquid hydrocarbon fuel combustion in a pilot burner // Proceedings of the European Combustion Meeting – 2013 (Lund, Sweden, June 25–28, 2013). – Paper P3-72. ISBN 978-91-637-2151-9.
4. Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Вигриянов М.С., Дулин В.М., Копьев Е.П., Шарыпов О.В. Сажепаровый режим горения жидких углеводородов: распределение скорости в факеле горелки // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 411–414.
5. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Loboda E.L. Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification // Proceedings of SPIE – 2014. Vol. 9292. (20th Int. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics; Novosibirsk; Russian Federation; 23–27 June 2014; Code 110711), Article nr. 929226 – 6 p. DOI:10.1117/12.2086623.
6. Shih T.-H., Liou W.W., Shabbir A., Yang Z., Zhu J. A new k- $\epsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation // Computers & Fluids. – 1995. – Vol. 24 (3). – P. 227–238.
7. R.W.Bilger Reaction rates in diffusion flames // Combustion and Flame. – 1977. – Vol. 30. – P. 277–284.
8. Brookes S.J., Moss J.B. Prediction of soot and thermal radiation in confined turbulent jet diffusion flames // Combustion and Flame. – 1999. – Vol. 116. – P. 486–503.
9. Смит Т.Ф., Шэнь З.Ф., Фридман Д.Н. Вычисление коэффициентов для модели взвешенной суммы серых газов // Теплопередача. – 1982. – Т. 104, № 4. – С. 25–32.
10. Sazhin S.S. An approximation for the absorption coefficient of soot in a radiating gas // Manuscript, Fluent Europe, Ltd., 1994.
11. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. – М.: Наука, 1994. – 320 с.