

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА

© 2015

*В.А. Кузьмин*, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Физика»  
*И.А. Заграй*, кандидат технических наук, докторант, доцент кафедры «Физика»  
*Вятский государственный университет, Киров (Россия)*

**Ключевые слова:** характеристики излучения; продукты сгорания; газогенератор; частицы сажи; плотность потока; степень черноты.

**Аннотация:** Одной из основных задач нефтедобывающей промышленности является увеличение коэффициента нефтеотдачи пластов и темпов разработки нефтяных месторождений. В условиях уменьшения запасов углеводородного сырья и возрастающего потребления энергии возникает проблема освоения трудноизвлекаемых запасов, к которым, в частности, относятся тяжелые сорта нефти, обладающие высокой вязкостью. К основным методам снижения вязкости нефти относятся: введение химических агентов (растворителей), механическое воздействие, наложение магнитных и электрических полей, термообработка и др. Основным из способов разогрева и снижения вязкости труднодобываемых сортов нефти является использование газогенераторов, работающих на твердом топливе. Использование в газогенераторах баллиститных топлив с возможностью введения различных охладителей разной концентрации позволяет регулировать температуру и излучательные характеристики гомогенных продуктов сгорания до уровня, определенного технологией добычи.

В работе приводятся методика и результаты расчета теплового излучения продуктов сгорания газогенератора, работающего на твердом топливе. В качестве охладителя рассматривается вода. Продукты сгорания представляют собой совокупность монодисперсной системы частиц сажи и газовой фазы. Методом вычислительного эксперимента исследовано влияние концентрации охладителя (0 %, 10 % и 25 %) на температуру, спектральные и интегральные характеристики излучения (плотности потоков и степени черноты) при разном давлении (0,1 МПа и 7 МПа) продуктов сгорания. Установлено, что введение охлаждающих добавок при наличии в продуктах сгорания только газовой фазы сильнее сказывается на величине плотности потока, чем степени черноты. Увеличение содержания сажи приводит к росту спектральных и интегральных характеристик излучения даже при введении добавок, снижающих температуру продуктов сгорания. Представлена графическая зависимость интегральных характеристик от толщины излучающего слоя.

### ВВЕДЕНИЕ

Улучшение качества разработки нефтяных месторождений является приоритетным направлением в области нефтедобывающей промышленности.

Разработка и внедрение новых методов по увеличению нефтеотдачи пластов позволяют не только повысить эффективность технологии добычи нефти, но и экономно расходовать ее ресурсы. Наибольший коэффициент нефтеотдачи (отношение добытого количества нефти к общим запасам) при современных системах разработки нефтяных месторождений достигается нагнетанием в пласт рабочих агентов, основным из которых является вода [1]. В работе [2] рассматриваются основные методы увеличения коэффициента нефтеотдачи и возможные сферы применения каждого из них на различных стадиях разработки. Сложность извлечения и транспортировки данного сырья во многом определяется плотностью и вязкостью добываемой нефти. Причем вязкость является главным физическим параметром сырой нефти, связанным со всеми процессами ее производства. Особенно это касается тяжелой нефти.

Вязкость нефти может быть снижена путем добавления некоторых химических соединений, включая различные виды растворителей (спирты, керосин и др.) [3–5]. В работах [6; 7] предлагается метод гидродинамической кавитационной обработки нефти с предварительным введением реагента для снижения ее вязкости. В работе [8] установлено, что под влиянием магнитного поля происходит изменение вязкостных характеристик парафинистых и высоковязких сортов нефти. Снижение вязкости нефти под действием тепла [9] приводит

к появлению в пласте дополнительного источника энергии в виде выделившегося газа. Это приводит к тепловому расширению нефти, что способствует ее полному вытеснению.

В данной работе в качестве способа разогрева и снижения вязкости труднодобываемых сортов нефти рассматривается использование газогенератора, работающего на твердом топливе. Использование в газогенераторах баллиститных топлив с возможностью введения различных охладителей разной концентрации позволяет регулировать температуру и излучательные характеристики гомогенных продуктов сгорания до уровня, определенного технологией добычи. В качестве охладителя рассматривается вода. Исследуется влияние концентрации охладителя на температуру, спектральные и интегральные характеристики излучения (плотности потоков и степени черноты) продуктов сгорания (ПС) газогенератора на твердом топливе.

### МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

При работе газогенератора конденсированная фаза ПС определяется главным образом частицами сажи. Даже небольшое массовое содержание сажи существенно усиливает тепловое излучение ПС. В связи с этим возникает необходимость рассмотрения оптических свойств, радиационных характеристик индивидуальных частиц сажи и единичного объема ПС.

Все радиационные характеристики частиц могут быть определены в зависимости от двух основных

параметров: параметра дифракции  $\rho = 2\pi r/\lambda$  и комплексного показателя преломления  $m = n_1 - n_2 \cdot i$ , определяющего оптические свойства вещества частиц конденсата ПС. При температуре  $T = 2250$  К (по результатам работы Сталла и Пласса [10]) в спектральном интервале 1–10 мкм показатели преломления  $n_1$  и поглощения  $n_2$  сажи изменяются в пределах  $n_1 = 2,0 - 4,3$ ;  $n_2 = 1,0 - 3,9$ .

Поле излучения системы среда-частица описывается системой уравнений Д. Максвелла. Решение задачи рассеяния света однородной сферической частицей, на которую в определенном направлении падает плоская волна, сводится к нахождению амплитудных коэффициентов

$$a_n = \frac{\psi'_n(y)\psi_n(\rho) - m\psi_n(y)\psi'_n(\rho)}{\psi'_n(y)\xi_n(\rho) - m\psi_n(y)\xi'_n(\rho)},$$

$$b_n = \frac{m\psi'_n(y)\psi_n(\rho) - \psi_n(y)\psi'_n(\rho)}{m\psi'_n(y)\xi_n(\rho) - \psi_n(y)\xi'_n(\rho)},$$
(1)

где  $y = m\rho$ .

Через эти коэффициенты (1) находятся факторы эффективности ослабления, рассеяния и поглощения [11]:

$$K_{\text{осл}} = \frac{2}{\rho^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n),$$

$$K_{\text{рас}} = \frac{2}{\rho^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2),$$

$$K_{\text{погл}} = K_{\text{осл}} - K_{\text{рас}}.$$

Далее определяются радиационные характеристики индивидуальных частиц (РХИЧ) – сечения ослабления, рассеяния и поглощения [11; 12]:

$$\sigma_{\text{осл}} = \pi r^2 K_{\text{осл}}(m, \rho),$$

$$\sigma_{\text{рас}} = \pi r^2 K_{\text{рас}}(m, \rho),$$
(2)

$$\sigma_{\text{погл}} = \sigma_{\text{осл}} - \sigma_{\text{рас}}.$$

По известным значениям величин (2) и концентрации частиц  $N$  рассчитываются радиационные характеристики единичного объема (РХЕО) – спектральные коэффициенты ослабления, рассеяния и поглощения [11; 12]:

$$\kappa_{z\lambda} = N\sigma_{\text{осл}},$$

$$\beta_{\lambda} = N\sigma_{\text{рас}},$$

$$\alpha_{z\lambda} = N\sigma_{\text{погл}}.$$

Из-за малости дифракционных эффектов при рассеянии излучения в спектральном интервале 1–10 мкм на частицах с размерами 0,005–0,08 мкм [13] сечения

и коэффициенты рассеяния не учитываются. Ослабление излучения происходит за счет большой поглощательной способности частиц сажи. Радиус частиц сажи принимался равным 0,04 мкм. С увеличением длины волны от 1 до 10 мкм сечение ослабления  $\sigma_{\text{погл}}$  монотонно убывает от  $1,63 \cdot 10^{-3}$  до  $4,49 \cdot 10^{-5}$  мкм<sup>2</sup>. Характер зависимости  $\alpha_{z\lambda}$  от длины волны повторяет характер зависимости  $\sigma_{\text{погл}}$  от  $\lambda$ . Максимум поглощательной способности приходится на коротковолновую часть спектра.

ПС газогенератора помимо частиц сажи представляют собой газовую фазу, состоящую из молекул H<sub>2</sub>O, CO и CO<sub>2</sub>. Коэффициенты поглощения  $\alpha_{r\lambda}$  зависят от температуры и давления ПС. Общий коэффициент  $\alpha_{r\lambda}$  смеси газов вычислялся с использованием информационной системы Spectra (<http://spectra.iao.ru>) [14], включающей банки данных HITRAN [15], HITEMP [16] и др. Излучение газовой фазы носит ярко выраженный селективный характер. Роль газовой фазы возрастает с ростом давления и увеличением концентраций основных ее компонентов. Наибольший вклад в суммарный  $\alpha_{z\lambda}$  вносят молекулы H<sub>2</sub>O (во всем диапазоне  $\lambda = 1 - 10$  мкм) и CO<sub>2</sub> (в диапазоне  $\lambda = 4,2 - 4,6$  мкм). При рассмотрении РХЕО ПС суммарный коэффициент поглощения конденсированной фазы и газовой фазы определялся по формуле:  $\alpha_{\lambda} = \alpha_{z\lambda} + \alpha_{r\lambda}$ . Коэффициент ослабления единичного объема ПС (без учета рассеяния):  $\kappa_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$ .

### МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

Для ПС газогенератора рассматривалось интегродифференциальное уравнение (ИДУ) переноса энергии излучения [17]:

$$(\Omega \nabla) I_{\lambda}(r, \Omega) + \kappa_{\lambda} I_{\lambda}(r, \Omega) = \beta_{\lambda} \int_{(4\pi)} I_{\lambda}(r', \Omega') \gamma_{\lambda}(r, r', \Omega, \Omega') d\omega' + \alpha_{\lambda} I_{\lambda\text{АЧТ}}(r). \quad (3)$$

Здесь  $\Omega$  – направление,

$I_{\lambda}$  – спектральная интенсивность излучения,

$r$  – координата,

$\omega$  – телесный угол,

$I_{\lambda\text{АЧТ}}$  – спектральная интенсивность излучения абсолютно черного тела (АЧТ),

знак ' – рассеяние назад.

В работе для решения ИДУ (3) использовался метод сферических гармоник в  $P_3$ -приближении для условий одномерной геометрии. Спектральные и интегральные плотности потоков ( $F_{\lambda}$  и  $F$ ) определялись по формулам:

$$F_{\lambda} = \int_{\Omega} I_{\lambda}(r, \Omega) \Omega \sin \theta d\Omega,$$

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda} d\lambda.$$

Спектральные и интегральные степени черноты ( $\varepsilon_{\lambda}$  и  $\varepsilon$ ) находились:

$$\varepsilon_\lambda = F_\lambda / F_{\lambda\text{АЧТ}},$$

$$\varepsilon = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_\lambda d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_{\lambda\text{АЧТ}} d\lambda.$$

Описание разработанной комплексной методики решения ИДУ подробно рассматривается в работах [18; 19].

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Методом вычислительного эксперимента исследовалось влияние концентрации охладителя на спектральные и интегральные плотности потоков энергии излучения и степени черноты ПС газогенератора. Процесс понижения температуры рабочих тел связан с увеличением в них концентрации паров воды и углекислого газа, что приводит к существенному перераспределению спектрального состава излучения за счет сильных полос поглощения.

Исходными данными в вычислительном эксперименте являлись состав, температура, давление и молярная масса ПС, определяемые термодинамическим расчетом (таблица 1) [20]. Толщина излучающего слоя  $L=56$  мм. Выбор исследуемого спектрального интервала  $\lambda=1-10$  мкм обусловлен основной долей энергии излучения, испускаемой в диапазоне температур  $T=690-1309$  К.

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Расчеты спектральных и интегральных характеристик излучения проводились для различного содержания охладителя ( $C_{\text{охл}}=0\%$ ,  $10\%$  и  $25\%$ ) при давлениях  $p=0,1$  МПа (рис. 1, 2) и  $7$  МПа (рис. 3, 4). На основании анализа результатов расчета было установлено, что с увеличением доли охладителя температура ПС уменьшается на  $15-16\%$  и возрастает концентрация излучающих компонентов  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ .

При  $p=0,1$  МПа присутствие охладителя, с одной стороны, понижает температуру ПС, но, с другой стороны, увеличение содержания сажи вызывает рост спектральных и интегральных плотностей потоков энергии излучения и степеней черноты ПС (рис. 1, 2). Интегральная плотность потока  $F$  возрастает в  $2,4$  раза, а интегральная степень черноты  $\varepsilon$  в  $5$  раз (таблица 1). Излучение ПС при  $T=690$  К все больше напоминает излучение АЧТ (рис. 1).

При  $p=7$  МПа присутствие охладителя больше сказывается на изменении  $F_\lambda$ , чем на  $\varepsilon_\lambda$  (рис. 3, 4). Так, при  $C_{\text{охл}}=25\%$   $F$  уменьшается по сравнению с  $C_{\text{охл}}=0\%$  на  $48\%$ , а  $\varepsilon$  возрастает на  $17\%$ . Как показали расчеты, даже ввод  $25\%$  охладителя при  $p=7$  МПа слабо влияет на спектральную степень черноты в основных полосах излучения газовой фазы и она близка к единице в полосах  $2,7, 4,3, 5,5, 6,5 \dots 8$  мкм (рис. 4).

Исследована зависимость характеристик излучения от толщины слоя  $L$  (рис. 5). Для условий, соответствующих

Таблица 1. Исходные параметры, плотность потока и степень черноты ПС

Давление $p$ , МПа	0,1			7		
Концентрация охладителя $C_{\text{охл}}$ , %	0	10	25	0	10	25
Температура ПС $T$ , К	819	779	690	1309	1192	1076
Массовая доля сажи $z$	0,008	0,019	0,281	0	0	0
Молярная масса ПС $\mu$ , г/моль	22,80	23,60	24,90	20,33	20,93	22,40
Массовая доля $\text{H}_2\text{O}$	0,218	0,263	0,354	0,231	0,237	0,267
Массовая доля $\text{CO}$	0,067	0,036	0,006	0,219	0,183	0,113
Массовая доля $\text{CO}_2$	0,226	0,232	0,225	0,103	0,128	0,172
Плотность потока $F$ , Вт/см <sup>2</sup>	0,3553	0,4359	0,8365	8,303	6,068	4,325
Степень черноты $\varepsilon$	0,1615	0,2467	0,8128	0,5246	0,5630	0,614

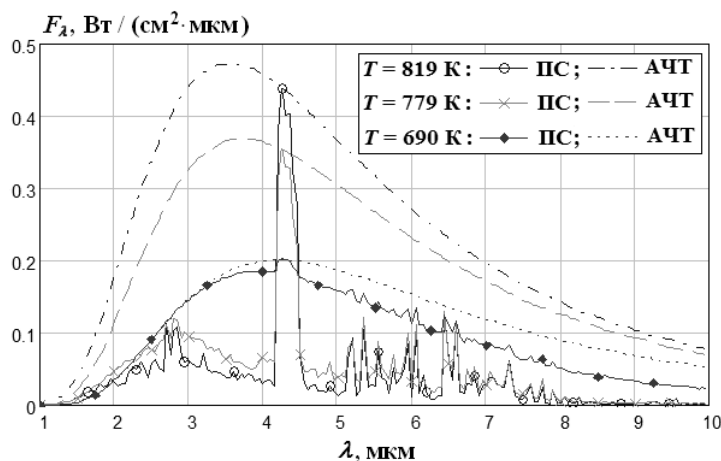


Рис. 1. Плотность потока ПС,  $p=0,1$  МПа

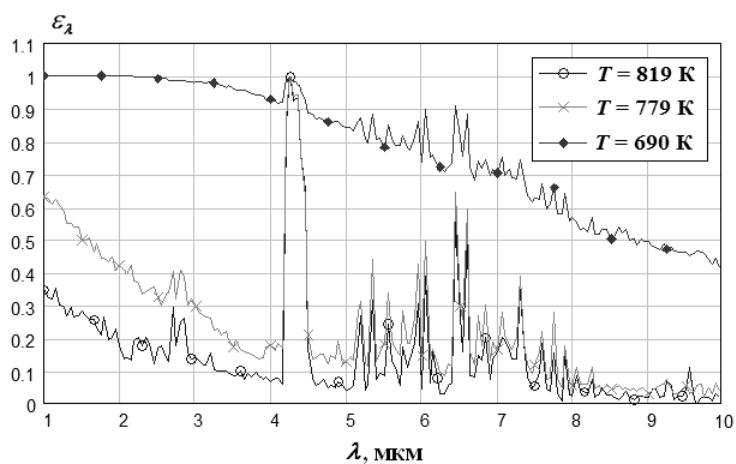


Рис. 2. Степень черноты ПС,  $p=0,1 \text{ МПа}$

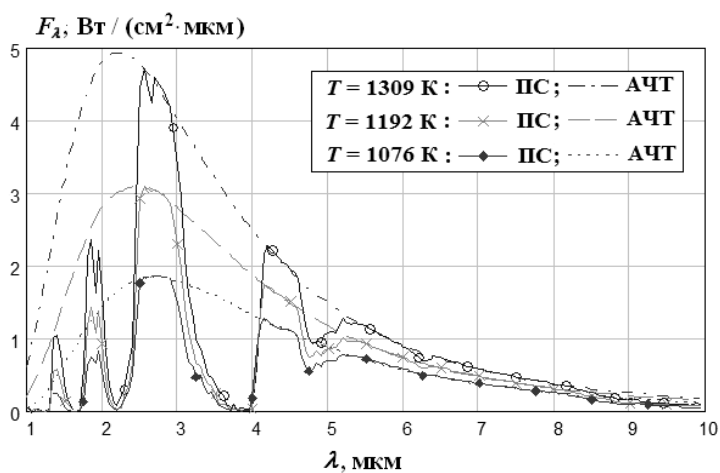


Рис. 3. Плотность потока ПС,  $p=7 \text{ МПа}$

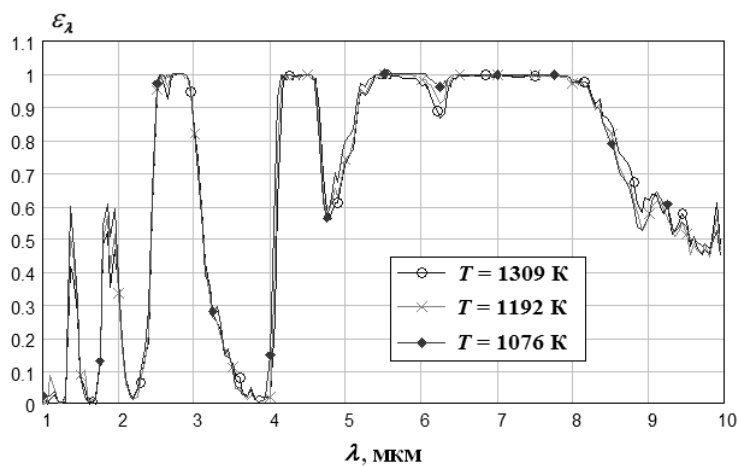


Рис. 4. Степень черноты ПС,  $p=7 \text{ МПа}$

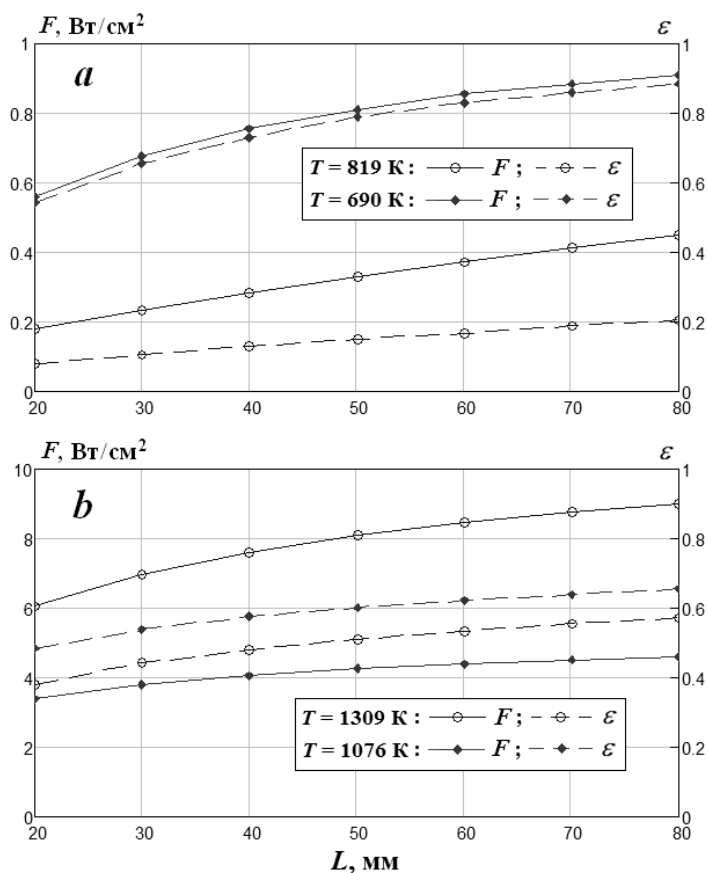


Рис. 5. Влияние толщины слоя на характеристики излучения ПС:  
а)  $p=0,1$  МПа, б)  $p=7$  МПа

малым оптическим толщинам ( $\tau < 5 \dots 7$ ) (рис. 5 а), увеличение  $L$  от 20 до 80 мм при отсутствии охладителя повышает  $F$  и  $\epsilon$  ПС в 2,5 раза. Ввод 25 % охладителя понижает это влияние до 64 %. Для условий, соответствующих большим оптическим толщинам ( $\tau > 10$ ) (рис. 5 б), увеличение  $L$  от 20 до 80 мм это влияние сводит до 36–50 %.

### ВЫВОДЫ

С помощью вычислительного эксперимента исследовано влияние концентрации охладителя на температуру, спектральные и интегральные характеристики излучения (плотности потоков и степени черноты) ПС газогенератора.

При интерпретации экспериментальных результатов с вводом в ПС охлаждающих добавок необходимо учитывать разную зависимость величин  $F_\lambda$ ,  $\epsilon_\lambda$ ,  $F$ ,  $\epsilon$  от температуры и концентрации основных излучающих компонентов газовой фазы.

Введение охлаждающих добавок при наличии в ПС только газовой фазы ( $p=7$  МПа) сильнее сказывается на  $F_\lambda$  и  $F$ , чем на  $\epsilon_\lambda$  и  $\epsilon$ .

Увеличение содержания сажи ( $p=0,1$  МПа) вызывает рост спектральных и интегральных характеристик излучения даже при введении добавок, снижающих температуру ПС.

Влияние толщины слоя на  $F$  и  $\epsilon$  становится тем меньше, чем выше содержание охлаждающих добавок в топливе и чем больше оптическая толщина ПС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нефтегазовая энциклопедия. В 3 т. Т. 2. К–П. М.: МАИ, 2003. 380 с.
2. Стародубцева Б.А., Егоров В.И. Эффективность новой техники и технологии в добыче нефти. М.: Недра, 1977. 125 с.
3. Henaut I., Gateau P. Method of transporting heavy crude oils in dispersion : US Patent, application 20060118467, 2006.
4. Martinez-Palou R., de Lourdes Mosqueira M., Zapata-Rendon B. Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review // Journal of petroleum science and engineering. 2011. Vol. 75. P. 274–282.
5. Yu Y., Li K. A method for calculating the temperature profile in heavy oil wells with injection of light oil Diluent // Petroleum Science and Technology. 2013. Vol. 31. № 24. P. 2569–2576.
6. Ершов М.А., Муллакаев М.С., Баранов Д.А. Снижение вязкости парафинистых нефтей обработкой в гидродинамическом проточном реакторе // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2011. № 4. С. 22–26.
7. Ершов М.А., Баранов Д.А., Муллакаев М.С., Абрамов В.О. Снижение вязкости парафинистых нефтей в ультразвуковом поле // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011. № 7. С. 16–19.
8. Лоскутова Ю.В., Юдина Н.В., Писарева С.И. Влияние магнитного поля на парамагнитные,

- антиоксидантные и вязкостные характеристики ряда нефтей // Нефтехимия. 2008. Т. 48. № 1. С. 50–54.
9. Байбаков Н.К., Гарушев А.Р. Тепловые методы разработки нефтяных месторождений. М.: Недра, 1988. 344 с.
  10. Stull R.V., Plass G.N. Emissivity of dispersed carbon particles // *Journal Opt. Soc. of America*. 1960. Vol. 50. № 2. P. 121–129.
  11. Кузьмин В.А., Заграй И.А. Радиационные характеристики дисперсных систем энергетических установок. Саарбрюккен: Lambert Academic Publishing, 2013. 140 с.
  12. Кузьмин В.А., Пяткова И.А. Радиационные характеристики частиц двигателей и энергетических установок // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2010. № 3-4. С. 11–14.
  13. Хюлст Г.Х. ван де. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 320 с.
  14. Михайленко С.Н., Бабиков Ю.Л., Головкин В.Ф. Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции // *Оптика атмосферы и океана*. 2005. Т. 18. № 9. С. 765–776.
  15. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2009. № 110. P. 533–572.
  16. Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., Dothe H., Gamache R.R., Goldman A., Perevalov V.I., Tashkun S.A., Tennyson J. HITRAN, the high-temperature molecular spectroscopic database // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2010. № 111. P. 2139–2150.
  17. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 544 с.
  18. Кузьмин В.А. Тепловое излучение в двигателях и энергетических установках. Киров: Полекс, 2004. 231 с.
  19. Кузьмин В.А., Маратканова Е.И., Заграй И.А., Рукавишников Р.В. Тепловое излучение гетерогенных продуктов сгорания в факеле модельного ракетного двигателя // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22. № 3. С. 385–400.
  20. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П., Худяков В.А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. 266 с.
  - crude oil by pipeline: A review. *Journal of petroleum science and engineering*, 2011, vol. 75, pp. 274–282.
  5. Yu Y., Li K. A method for calculating the temperature profile in heavy oil wells with injection of light oil Diluent. *Petroleum Science and Technology*, 2013, vol. 31, no. 24, pp. 2569–2576.
  6. Erschov M.A., Mullakaev M.S., Baranov D.A. Reduction of oil viscosity by means of ultrasound treatment and chemical reagents. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2011, no. 4, pp. 22–26.
  7. Ershov M.A., Baranov D.A., Mullakaev M.S., Abramov V.O. Reducing viscosity of paraffinic oils in ultrasonic field. *Chemical and petroleum engineering*, 2011, no. 7-8, pp. 457–461.
  8. Loskutova Yu.V., Yudina N.V., Pisareva S.I. Effect of magnetic field on the paramagnetic, antioxidant, and viscosity characteristics of some crude oils. *Petroleum Chemistry*, 2008, vol. 48, no. 1, pp. 51–55.
  9. Baybakov N.K., Garushev A.R. *Teplovye metody razrabotki neftyanykh mestorozhdeniy* [Thermal methods of oilfields development]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 344 p.
  10. Stull R.V., Plass G.N. Emissivity of dispersed carbon particles. *Journal Opt. Soc. of America*, 1960, vol. 50, no. 2, pp. 121–129.
  11. Kuzmin V.A., Zagray I.A. *Radiatsionnye kharakteristiki dispersnykh sistem energeticheskikh ustanovok* [Radiation properties of disperse systems of energy-generating plants]. Saarbrücken, Lambert Academic Publishing, 2013. 140 p.
  12. Kuzmin V.A., Pyatkova I.A. Radiation characteristics of particles emitted by engines and power generators. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2010, no. 3-4, pp. 11–14.
  13. Hulst H.C. van de. *Rasseyaniye sveta malymi chastitsami* [Light scattering by small particles]. Moscow, Izdatelstvo inostrannoy literatury Publ., 1961. 320 p.
  14. Mikhailenko S.N., Babikov Yu.L., Golovko V.F. Information-calculating system Spectroscopy of Atmospheric Gases. The structure and main functions. *Atmospheric and oceanic optics*, 2005, vol. 18, no. 9, pp. 685–695.
  15. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2009, no. 110, pp. 533–572.
  16. Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., Dothe H., Gamache R.R., Goldman A., Perevalov V.I., Tashkun S.A., Tennyson J. HITRAN, the high-temperature molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2010, no. 111, pp. 2139–2150.
  17. Surzhikov S.T. *Teplovoe izlucheniye gazov i plazmy* [Thermal emission of gases and plasma]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2004. 544 p.
  18. Kuzmin V.A. *Teplovoe izlucheniye v dvigateleyakh i energeticheskikh ustanovkakh* [Thermal emission in engines and energy-generating plants]. Kirov, Poleks Publ., 2004. 231 p.
  19. Kuzmin V.A., Maratkanova E.I., Zagray I.A., Rukavishnikova R.V. Thermal radiation of heterogeneous combustion products in the model rocket engine

## REFERENCES

1. *Neftegazovaya entsiklopediya. T. 2. K-P* [Oil-and-gas encyclopedia. Vol. 2. K–P]. Moscow, MAI Publ., 2003. 380 p.
2. Starodubtseva B.A., Egorov V.I. *Effektivnost novoy tekhniki i tekhnologii v dobyche nefti* [The effectiveness of new machinery and technology in oil production]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 125 p.
3. Henaut I., Gateau P. Method of transporting heavy crude oils in dispersion. US Patent, application 20060118467, 2006.
4. Martinez-Palou R., de Lourdes Mosqueira M., Zapata-Rendon B. Transportation of heavy and extra-heavy

- plume. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 371–386.
20. Alemasov V.E., Dregalin A.F., Tishin A.P., Khudyakov V.A. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya* [Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products]. Moscow, VINITI AN SSSR Publ., 1971. 266 p.

## THE ANALYSIS OF EMISSION CHARACTERISTICS OF GAS PRODUCER COMBUSTION PRODUCTS

© 2015

*V.A. Kuzmin*, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, professor of Chair “Physics”  
*I.A. Zagray*, PhD (Engineering), doctoral candidate, assistant professor of Chair “Physics”  
*Vyatka State University, Kirov (Russia)*

*Keywords:* emission characteristics; combustion products; gas producer; soot particles; flux density; emissivity factor.

*Abstract:* One of the main tasks of oil producing industry is the increase of producible oil index and the oil-field development rate. In the context of hydrocarbon crude stock reduction and the increasing energy consumption, the issue of hard to recover reserves development occurs and the high-viscosity heavy oil rates are considered to be such reserves. Chemical agents (resolvents) addition, mechanical effects, magnetic and electrostatic fields imposing, and thermal treatment are the basic methods of oil viscosity reduction. The main method of heating and viscosity reduction of hard to recover oil rates is the application of gas producers, which operate using solid fuel. The use of ballistite fuels in gas producers with the possibility of adding various coolants of different concentrations allows regulating temperature and emission characteristics of homogeneous combustion products to the level specified by the recovery methods. The paper presents the methods and the results of heat emission calculation of the combustion products of a gas producer that operates using solid fuel. Water is used as a coolant. The combustion products are represented by the aggregation of monodisperse system of soot particles and gas phase. Using the method of computing experiment, the authors studied the influence of a coolant concentration (0 %, 10 % and 25 %) on the temperature and spectral and integral emission parameters (flux density and emissivity factor) of combustion products at different pressures (0.1 MPa and 7 MPa). It was established that the cooling agents addition influences on the flux density value more than the emissivity factor when the combustion products have only gas phase. The growth of soot content causes the increase of spectral and integral emission characteristics even when adding agents lowering combustion products temperature. The authors present the graphic dependence of integral characteristics on the emitting layer thickness.