

УДК 532.516.5

ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГЛЕВОДОРОДНЫЕ СРЕДЫ

Л. А. Ковалева, А. А. Мусин, Р. Р. Зиннатуллин

Башкирский государственный университет, 450076 Уфа, Россия
E-mails: liana@ic.bashedu.ru, mus-airat@yandex.ru, rasulz@yandex.ru

Представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования процессов тепло- и массопереноса в высоковязкой углеводородной жидкости, вязкость и теплопроводность которой зависят от температуры, под действием высокочастотного электромагнитного поля с учетом естественной тепловой конвекции.

Ключевые слова: высокочастотное электромагнитное поле, углеводородная жидкость, тепловая конвекция, теплообмен, математическая модель.

Введение. В последнее время высокочастотные электромагнитные (ВЧЭМ) поля широко применяются для обработки сложных углеводородных систем, к числу которых относятся высоковязкие нефти, нефтяные битумы, устойчивые водонефтяные эмульсии, отходы производства нефтедобывающей промышленности (так называемые нефтяные шламы) и др. [1–6]. При обработке таких систем используется не только нагрев (для уменьшения их вязкости), но и разрушение устойчивых структур высокомолекулярных углеводородных соединений под действием электромагнитного (ЭМ) излучения. Наиболее эффективным способом теплового и разрушающего воздействия на рассматриваемые среды является ВЧЭМ-воздействие. При этом происходит нагрев среды за счет ориентационной поляризации полярных углеводородных компонентов, а также их реструктуризация вследствие взаимодействия диполей полярных компонентов с ЭМ-полем. Преимущество данного способа нагрева по сравнению с другими способами воздействия состоит в том, что в этом случае нагрев является объемным и высокоскоростным. В общем случае при воздействии ЭМ-излучения происходит изменение термодинамического состояния сред, которое характеризуется появлением взаимосвязей между ЭМ-полями и полями других физических величин: температуры и давления (в жидкостях и газах), механического напряжения и деформации (в твердых телах и пористых средах), концентрации и химических потенциалов (в многофазных и многокомпонентных системах) [7]. Основными электрофизическими (макроскопическими) характеристиками, количественно описывающими степень взаимодействия электромагнитных полей со средой, являются диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь, представляющие собой немонотонные функции температуры, частоты поля и характеристик поглощающей среды вследствие резонансного взаимодействия поля с веществом на микро- и наноуровнях. В связи с этим пред-

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 3.1251.2014/К, грант № 11.G34.31.0040) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-97005).

© Ковалева Л. А., Мусин А. А., Зиннатуллин Р. Р., 2015

ставляет интерес построение адекватной математической модели на основе измеряемых физических характеристик среды и результатов физического (экспериментального) моделирования процесса воздействия на нее ВЧЭМ-поля.

Экспериментальные исследования. Экспериментальные исследования воздействия ВЧЭМ-поля на углеводородные системы проводились на лабораторном стенде, основными узлами которого являются высокочастотный генератор ВЧД 2,5/13 с рабочей частотой 13,56 МГц и максимальной выходной мощностью 1,2 кВт, узел обработки ЭМ-полем и система передачи электромагнитной энергии от генератора к узлу обработки [8, 9]. Узел обработки представлял собой металлическую емкость цилиндрической формы высотой 600 мм с внутренним диаметром 210 мм, вдоль оси которой располагался металлический стержень — излучатель электромагнитной энергии. В экспериментах боковая стенка емкости и металлический стержень выполняли функцию электродов. С точки зрения электродинамики такая система представляет собой конденсатор со стержневой емкостью.

Емкость заполнялась до уровня 440 мм тяжелой углеводородной средой, вязкость которой при комнатной температуре составляла 1460 Па·с. В ходе экспериментальных исследований наряду с визуальным наблюдением проводилось измерение температуры с помощью семи термопар, расположенных внутри емкости на глубине 140 мм от поверхности исследуемой жидкости на расстояниях от оси, равных 11, 15, 20, 40, 60, 80, 105 мм.

Изменение температуры на термопарах фиксировалось через равные промежутки времени. Начальная температура составляла $T_0 = 24$ °С. Вследствие объемного нагрева среды при ВЧЭМ-воздействии в эксперименте температура начинала увеличиваться сразу во всем объеме, но с различной скоростью. Так, уже через 10 мин после начала воздействия температура жидкости в окрестности первых трех ближайших к излучателю термопар составляла 93 °С и в дальнейшем практически не увеличивалась. Аналогичный результат наблюдался на четвертой термопаре через 20 мин после начала воздействия. На остальных термопарах температура изменялась более плавно. Этот результат принципиально отличается от результата, полученного в случае индукционного нагрева (см. [10]). На рис. 1 приведены результаты описанных экспериментов. Видно, что высокочастотное воздействие на тяжелые углеводородные системы является более эффективным по сравнению с индукционным нагревом.

В тех областях, где температура достигала порогового значения, соответствующего началу текучести жидкости, визуально наблюдалось возникновение локальных очагов конвективного перемешивания, которые постепенно распространялись по всему объему.

Математическая модель. Математическое моделирование ВЧЭМ-нагрева углеводородной жидкости проводилось с использованием параметров описанной выше экспериментальной установки. Схема расчетной области, соответствующая физической модели, приведена на рис. 2. Задача решалась в осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат, начало которой находится в центре основания емкости, ось z направлена вверх перпендикулярно основанию.

Физическая модель представляет собой многослойную систему, состоящую из металлического стержня, стальной емкости и углеводородной среды (см. рис. 2). В каждом слое рассчитывается поле температур, а в углеводородной среде, кроме того, определяется поле скоростей конвективного течения жидкости.

Уравнение теплопроводности в металлическом стержне и стенке емкости имеет вид

$$\rho_m c_m \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_m}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_m \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где ρ_m , c_m , k_m — плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность металла соответственно.

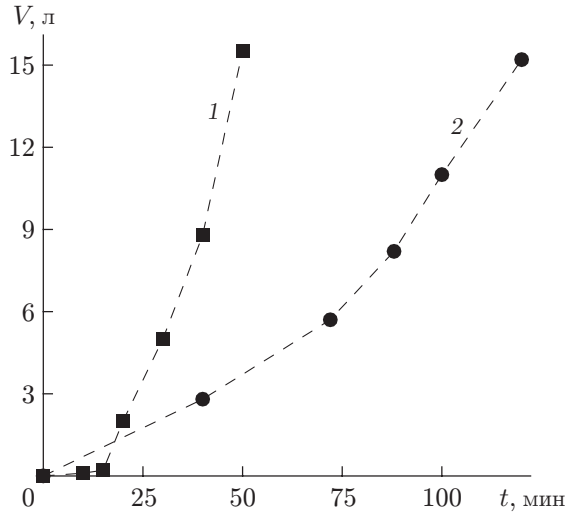


Рис. 1

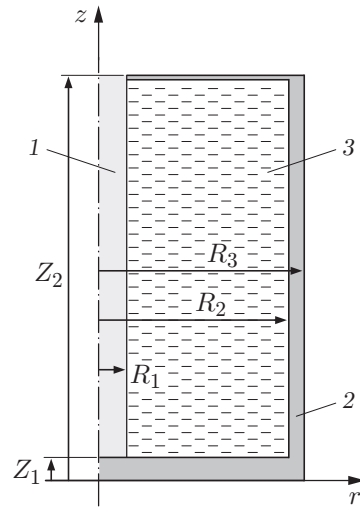


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость объема углеводородной жидкости, нагретой до температуры 90 °С, от времени нагрева при различных способах воздействия:

1 — ВЧЭМ-воздействие, 2 — индукционный нагрев

Рис. 2. Геометрия расчетной области:

1 — металлический стержень, 2 — стальная емкость, 3 — углеводородная среда

Поля температур и скоростей в слое жидкости описываются системой уравнений тепловой конвекции в приближении Буссинеска [11]. Преобразование энергии ВЧЭМ-поля в тепловую моделируется распределенным источником тепла в среде [7]. В результате имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned}
 \rho_f \left(\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ruu) + \frac{\partial}{\partial z} (vu) \right) &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\eta_f \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_f \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \eta_f \frac{u}{r^2}, \\
 \rho_f \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ruv) + \frac{\partial}{\partial z} (vv) \right) &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\eta_f \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta_f \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \rho_f g f(T), \\
 \rho_f c_f \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ruT) + \frac{\partial}{\partial z} (vT) \right) &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk_f \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_f \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \\
 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{\partial v}{\partial z} &= 0, \quad f(T) = B \exp \left(-\frac{\gamma}{T - T_s} \right), \quad q = \frac{N_0}{\pi r^2 l \ln(R_2/R_1)}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь ρ_f , η_f , c_f , k_f — плотность, динамическая вязкость, удельная теплоемкость и теплопроводность углеводородной жидкости; u , v — компоненты скорости теплового движения жидкости вдоль осей r , z соответственно; P — давление; g — ускорение свободного падения; T — температура; $f(T)$ — функция, характеризующая зависимость плотности углеводородной жидкости от температуры; T_s — температура начала кипения углеводородных компонентов жидкости; γ — эмпирический коэффициент интенсивности парообразования; B — эмпирическая постоянная; q — плотность распределения источников тепла; N_0 — мощность высокочастотного генератора; l — длина стержня; R_1 , R_2 — радиус стержня и внутренний радиус емкости соответственно.

Зависимость теплопроводности жидкости от температуры полагается линейной [10, 12]:

$$k_f(T) = k_{f0}[1 + b(T - T_0)]$$

(k_{f0} — теплопроводность при температуре $T = T_0$; b — эмпирическая постоянная). Вязкость углеводородной жидкости также зависит от температуры: используется аппроксимированная зависимость вязкости от температуры в виде двух экспонент, полученная экспериментальным путем [10]:

$$\eta_f(T) = \begin{cases} \eta_{01} \exp(-\gamma_1(T - T_{01})), & T_{01} < T < T_{02}, \\ \eta_{02} \exp(-\gamma_2(T - T_{02})), & T_{02} < T < T_{03}. \end{cases}$$

Здесь η_{01} , η_{02} — значения вязкости углеводородной жидкости при температуре T_{01} , T_{02} соответственно; γ_1 , γ_2 — значения температурного коэффициента в диапазонах $T = T_{01} \div T_{02}$ и $T > T_{02}$ соответственно.

Начальные и краевые условия. В начальный момент времени жидкость покоится и имеет постоянную температуру, равную температуре окружающей среды:

$$u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = 0, \quad T(r, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Для скоростей на всех твердых стенках задаются условия прилипания

$$u|_G = v|_G = 0 \quad (4)$$

(индекс G соответствует внутренним границам емкости).

Емкость с жидкостью со всех сторон теплоизолирована. Соответствующие граничные условия имеют вид

$$\frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T(r, Z_2, t)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T(0, z, t)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T(R_3, z, t)}{\partial r} = 0. \quad (5)$$

Здесь Z_2 — высота емкости; R_3 — внешний радиус емкости (см. рис. 2).

Результаты вычислений. Система уравнений (1), (2) с краевыми условиями (3)–(5) решалась численно методом контрольного объема с использованием алгоритма Simple [13]. В расчетах использовались следующие значения параметров среды и постоянных физической модели: $k_f = 0,125$ Вт/(м·К), $c_f = 1864$ Дж/(кг·К), $\rho_f = 954$ кг/м³, $k_m = 45$ Вт/(м·К), $c_m = 461$ Дж/(кг·К), $\rho_m = 7900$ кг/м³, $k_s = 120$ Вт/(м·К), $c_s = 920$ Дж/(кг·К), $\rho_s = 2750$ кг/м³, $\eta_{01} = 1460$ Па·с, $\eta_{02} = 0,228$ Па·с, $\gamma_1 = 0,497$ К⁻¹, $\gamma_2 = 0,031$ К⁻¹, $Z_1 = 0,01$ м, $Z_2 = 0,44$ м, $R_1 = 0,01$ м, $R_2 = 0,105$ м, $R_3 = 0,11$ м, $N_0 = 260$ Вт, $T_0 = 24$ °С, $T_{01} = 35,5$ °С, $T_{02} = 54,2$ °С, $T_{03} = 75$ °С, $b = 0,0095$ К⁻¹, $T_s = 70$ °С, $\gamma = 93$ °С, $B = 0,0542$.

На рис. 3 показано распределение температуры в центральном радиальном сечении емкости в различные моменты времени. Видно, что низкая температура и высокая вязкость жидкости в начальный момент времени исключают возможность возникновения какого-либо движения жидкости. Поэтому в течение достаточно длительного промежутка времени с момента начала высокочастотного воздействия нагрев среды происходит только за счет распределенных источников тепла и молекулярной теплопроводности (кривая 1 на рис. 3). Вблизи излучателя образуется нагретая до температуры текучести зона, в которой возникает тепловое движение жидкости и происходит конвективный перенос тепла, о чем свидетельствует наличие пологих участков на кривых 2 и 3 на рис. 3. При этом вследствие объемного нагрева среды конвективное течение охватывает практически всю прилегающую к излучателю зону от дна емкости до ее поверхности. В результате происходит более равномерный нагрев среды.

На рис. 4 показаны поля температур и линии тока в жидкости в момент времени $t = 60$ мин после начала нагрева. Во всех вертикальных сечениях емкости наблюдается существенное различие значений температуры (см. рис. 4,а). Это обусловлено тем, что, несмотря на наличие объемного нагрева, тепловая энергия в основном сосредоточена вблизи излучателя, вследствие чего возникает тепловое движение жидкости. Интенсивность

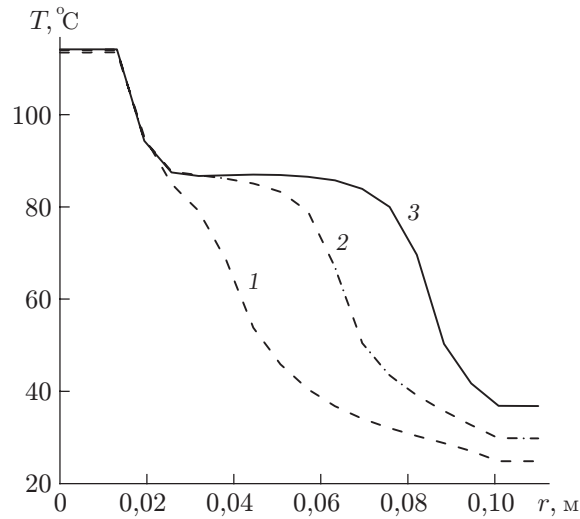


Рис. 3. Распределение температуры в центральном горизонтальном сечении емкости в различные моменты времени:

1 — $t = 20$ мин, 2 — $t = 40$ мин, 3 — $t = 60$ мин

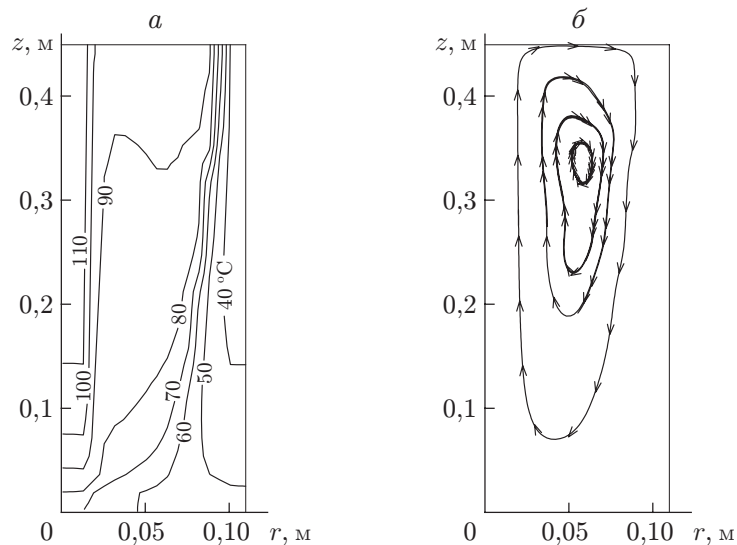


Рис. 4. Температурное поле (а) и линии тока (б) в жидкости в момент времени $t = 60$ мин

конвективного перемешивания увеличивается по мере увеличения размеров нагретой до температуры текучести зоны. Из рис. 4, б следует, что к моменту времени $t = 60$ мин практически весь объем жидкости оказывается охваченным конвективным течением, однако в нижней части емкости сохраняется область, в которой углеводородная жидкость имеет высокую вязкость, вследствие чего движение в этой области отсутствует. В течение всего процесса нагрева наблюдается одновихревая структура течения, ядро которой располагается в верхней части емкости. Наличие вертикального градиента температуры во всем объеме жидкости свидетельствует о том, что влияние конвективного теплообмена в жидкости является преобладающим по сравнению с влиянием тепловых источников.

На рис. 5 приведена зависимость температуры жидкости от времени при ВЧЭМ-нагреве. Видно, что результаты расчета качественно хорошо согласуются с эксперимен-

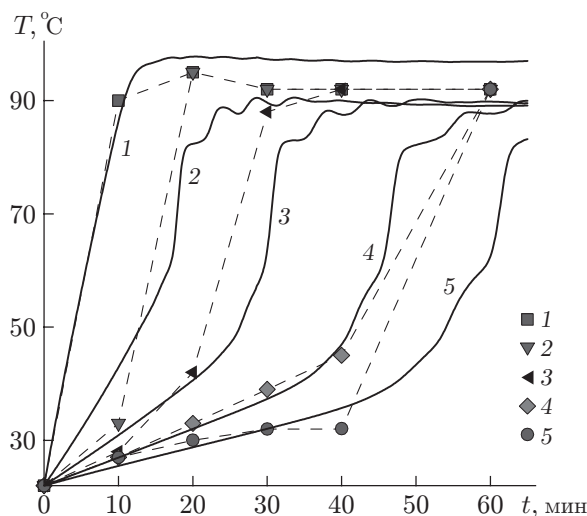


Рис. 5. Динамика температуры жидкости в емкости при высокочастотном нагреве: точки — эксперимент, сплошные линии — расчет; 1, 2, 3, 4, 5 — показания 3, 4, 5, 6, 7-й термопар, расположенных на расстояниях от оси емкости, равных 20, 40, 60, 80, 105 мм соответственно

тальными данными. Количественные различия объясняются тем, что в процессе воздействия термопары извлекались из жидкости, а при замерах температуры углеводородной жидкости ЭМ-поле отключалось (металлические элементы термопары не позволяют проводить измерения температуры при наличии поля).

Вследствие более однородного характера распределения температуры при ВЧЭМ-нагреве (см. рис. 4, 5) по сравнению с индукционным нагревом [10, 14] большая часть объема жидкости оказывается охваченной конвективным течением (см. рис. 4), что значительно ускоряет процесс теплопереноса в жидкости. Таким образом, ВЧЭМ-нагрев является более эффективным способом воздействия на углеводородные жидкости по сравнению, например, с индукционным нагревом.

Удовлетворительные результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных об изменении температуры жидкости при ВЧЭМ-нагреве свидетельствуют о применимости предложенной математической модели для моделирования процессов тепло- и массопереноса в углеводородной жидкости при ее электромагнитном нагреве.

Заключение. Проведенные экспериментальные и расчетные исследования ВЧЭМ-воздействия на углеводородную жидкость показали, что при таком воздействии, проявляющемся в объемном нагреве среды, температура начинает увеличиваться сразу во всем объеме. На основе результатов выполненных расчетов установлено наличие локально-неоднородного движения жидкости в пространстве, сопровождающегося вихревыми течениями, вследствие чего в среде образуются две области: область с высокой температурой, где происходит интенсивное конвективное перемешивание, и область, в которой температура ниже температуры текучести и движение практически отсутствует. Анализ индукционного и ВЧЭМ-способов нагрева показал, что при одной и той же мощности источников нагрев всего объема жидкости до температуры ее текучести под действием ВЧЭМ-поля происходит приблизительно в два раза быстрее, чем при индукционном воздействии. Большая эффективность ВЧЭМ-воздействия по сравнению с воздействием индукционного нагрева обусловлена наличием наряду с кондуктивным и конвективным процессами переноса тепла внутренних распределенных источников тепла, возникающих во всем объеме углеводородной жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Carrizales M. A., Lake L. W., Johns R. T.** Production improvement of heavy-oil recovery by using electromagnetic heating // Proc. of the SPE Annual tech. conf. and exhibition, Colorado (USA), 21–24 Sept. 2008. S. 1., 2008. P. 2000–2015.
2. **Kasevich R. S., Price S. L., Faust D. L., Fontaine M. F.** Pilot testing of a radio frequency heating system for enhanced oil recovery from diatomaceous earth // Proc. of the SPE Annual tech. conf. and exhibition, New Orleans (USA), 25–28 Sept. 1994. S. 1., 1994. P. 105–113.
3. **Kovaleva L., Musin A., Zinnatullin R., Akhatov I. S.** Destruction of water-in-oil emulsions in electromagnetic fields // Proc. of the Intern. mech. engng congress and exposition, Denver (USA), Nov. 11–17, 2011. S. 1., 2011. P. 617–621.
4. **Kovaleva L. A., Minnigalimov R. Z., Zinnatullin R. R.** Destruction of water-in-oil emulsions in radio-frequency and microwave electromagnetic fields // Energy Fuels. 2011. V. 25, N 8. P. 3731–3738.
5. **Ковалева Л. А., Миннигалимов Р. З., Зиннатуллин Р. Р.** Об эффективности утилизации нефтяных шламов высокочастотным электромагнитным полем // Нефтегазовое дело. [Электрон. ресурс]. 2008. Вып. 1. Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Kovaleva/Kovaleva_1.pdf.
6. **Ковалева Л. А., Миннигалимов Р. З., Зиннатуллин Р. Р.** Развитие электромагнитной технологии для утилизации нефтяных шламов // Нефт. хоз-во. 2009. № 9. С. 75–79.
7. **Ландау Л. Д.** Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1982.
8. **Суфьянов Р. Р.** Исследование воздействия высокочастотного электромагнитного поля на нефтяные шламы: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 2005.
9. **Пат. 2213863 RU, МКИ С1 7 Е 21 В 43/34.** Устройство для переработки нефтяного шлама / Ф. Л. Саяхов, Р. Р. Суфьянов, А. Ш. Газизов, М. Г. Гафиуллин, Р. Р. Зиннатуллин, М. Р. Гайсин, А. А. Газизов, Р. С. Нурмухаметов. Оpubл. 10.10.03, Бюл. № 28.
10. **Ковалева Л. А., Насыров Н. М., Максимочкин В. И., Суфьянов Р. Р.** Изучение теплопроводности высоковязких углеводородных систем методом экспериментального и математического моделирования // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 6. С. 96–102.
11. **Герщуни Г. З.** Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г. З. Герщуни, Е. М. Жуховицкий. М.: Наука, 1972.
12. **Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справ.** / Под общ. ред. А. В. Клименко, В. М. Зорина. М.: Моск. энерг. ин-т, 2001. Кн. 2.
13. **Патанкар С. В.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.
14. **Ковалева Л. А., Киреев В. Н., Мусин А. А.** Моделирование процессов тепло- и массопереноса в углеводородной жидкости при индукционном нагреве // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 1. С. 95–100.

*Поступила в редакцию 5/III 2014 г.,
в окончательном варианте — 5/V 2014 г.*