

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-2-141–150

УДК 622.01; 622.276.654

## Об устойчивости фронта вытеснения нефти в условиях термогазового воздействия на пласт

К. В. Доброго<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Термогазовый метод воздействия на пласт является перспективным методом повышения нефтеотдачи и в настоящее время осваивается в Беларуси. Устойчивость температурного фронта и фронта вытеснения нефти – принципиальный вопрос данной технологии. В статье методом малых возмущений решается задача об устойчивости фронта вытеснения нефти при термогазовом воздействии на пласт. Показано, что инкремент роста возмущений отличается от случая фильтрационного горения газа и определяется волновым числом волны возмущения, разностью скоростей фильтрации дутья и фронта тепловыделения, отношением плотностей, коэффициентов фильтрации, сжимаемостей среды дутья и вытесняемой нефти и другими величинами. Проанализированы основные параметры, влияющие на устойчивость фронта. Даны рекомендации по методам и процедурам, повышающим устойчивость (компенсирующим неустойчивость) фронта вытеснения. Механизмами подавления или компенсации возмущений фронта являются: снижение вязкости нефтяной смеси и повышение вязкости дутья; увеличение сжимаемости дутья; увеличение толщины теплового фронта термогазового воздействия прежде всего за счет повышения его температуры и изменения химизма (использование низкотемпературных катализаторов); снижение скорости волны и/или соответственно подачи дутья. Применение воздушного или водовоздушного дутья, а также насыщение воды плохо растворимыми газами обеспечивают относительно большую устойчивость фронта по сравнению с использованием составов на основе воды. Результаты и рекомендации предлагается использовать в рамках общих методик и процедур управления процессом термогазового воздействия в условиях опытной и опытно-промышленной нефтедобычи. Дальнейшие исследования методов и механизмов компенсации неустойчивости фронта, в том числе его динамики на нелинейной стадии, могут быть проведены путем детального многомерного расчета системы.

**Ключевые слова:** термогазовый метод, нефтеотдача, устойчивость, фронт вытеснения

**Для цитирования:** Доброго, К. В. Об устойчивости фронта вытеснения нефти в условиях термогазового воздействия на пласт / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 141–150

## On Stability of the Oil Displacement Front under Conditions of Thermogas Impact on the Oil Bearing Layer

К. V. Dobrego<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The method of thermogas impact on the oil bearing layer is a perspective one to improve oil recovery. It is now under experimental implementation in Belarus. Stability of

---

### Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/2,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 292-42-32  
ef@bntu.by

### Address for correspondence

Dobrego Kirill V.  
Belarusian National Technical University  
65/2 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 292-42-32  
ef@bntu.by

---

the thermal front and that of the oil displacement is a point of principle for the given technology. The article offers solution based on the method of small perturbations for the problem of the oil-displacement front stability under thermogas impact on the oil layer. The perturbation growth increment is shown to be quite different from that of the gas filtration combustion. Being determined by the perturbation wave number (or wave length), by difference in speed of the blowing filtration and that of the heat development front, by the ratios of densities, filtration coefficients, compressibility of the displacement agent and the displaced oil mass, and by other parameters. The author analyses the main parameters influencing the stability of the front. Recommendations are given on possible methods and procedures improving stability of the displacement front (neutralizing perturbation growth). The mechanisms of suppression or compensation of the front perturbation growth are as follows: the crude oil viscosity reduction and increase of that of the displacement agent, the displacement agent compressibility increase, increase of the thermogas impact heat-front width in the first instance at the expense of the temperature growth and alteration in the chemism (low temperature catalysts utilization, etc.), reduction in speed of the front propagation and/or correspondingly of the displacement agent feed. Utilization of the gas or water-gas displacement agent as well as the agent impregnation with hydrophobic gases provides a relatively better stability of the front as compared to that employing water based compounds. Analytical data and derived recommendations are offered for utilization within the framework of general techniques and procedures of the thermogas impact process management in the context of developmental and experimental-industrial oil extraction. Further research into methods and mechanisms of the displacement front perturbation compensation, including the front dynamics at nonlinear stage, might be conducted via detailed 2D and 3D numerical simulation of the system.

**Keywords:** thermogas method, oil recovery, stability, displacement front

**For citation:** Dobrego K. V. (2016) On Stability of the Oil Displacement Front under Conditions of Thermogas Impact on the Oil Bearing Layer. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (2), 141–150 (in Russian)

## Введение

Термогазовый метод (ТГМ) воздействия на пласт является перспективным методом повышения коэффициента извлечения вязких и трудноизвлекаемых нефтей. Устойчивость теплового фронта и фронта вытеснения – принципиальный вопрос реализации технологии. Несмотря на достаточно проработанную в литературе тему об устойчивости фронтов гидродинамического вытеснения в пористой среде, приложение этой задачи к процессу ТГМ и соответствующий анализ не сделаны. В данной статье на основе классического подхода линейной теории устойчивости выполнен анализ отмеченной задачи. Сделаны выводы о критериях устойчивости и методах ее повышения (компенсации возмущений).

Экспериментальные исследования, проведенные П. Г. Саффманом, Г. И. Тейлором, Р. Л. Чоуком [1–3] и другими, показали, что развитие возмущений плоского фронта вытеснения в пористой среде при нарушении устойчивости происходит в виде неограниченно разрастающихся языков вытесняющей жидкости. Эксперименты на насыпных пористых средах [4] свидетельствуют о том, что нарушение устойчивости происходит при отношении вязкости взаимодействующих жидкостей, превышающем критическое значение 10–15. В то же время при малых скоростях вытеснения возмущения затухают даже при отношениях вязкостей, больших критического значения. Математическая модель развития языков вытесняющей жидкости предложена Г. И. Баренблаттом [5]. Влиянию капиллярных сил на процесс двухфазной фильтрации посвящены работы В. И. Пеньковского [6, 7]. Влияние вибраций на устойчивость плоского фронта вытеснения в пористой среде рассмотрено Д. В. Любимовым [8]. Обобщение модели двух-

фазной фильтрации Рапопорта – Лиса на случай анизотропных пористых сред представлено в работе М. Н. Дмитриева [9]. При этом устойчивость фронтов вытеснения, распространяющихся совместно с тепловыми и концентрационными полями, исследована значительно хуже.

Устойчивость фронта вытеснения нефти при ТГМ может быть описана и исследована традиционными методами, апробированными в теории горения и гидродинамике. В данной статье воспользуемся методом малых возмущений аналогично исследованию устойчивости фронта при фильтрационном горении газов (ФГГ) [10], учитывая физические особенности, отличающие процесс вытеснения нефти при ТГМ.

### Постановка и решение задачи

Рассмотрим плоский фронт вытеснения, сформированный равномерно подаваемым дутьем при квазистационарном горении внутри пласта (рис. 1).

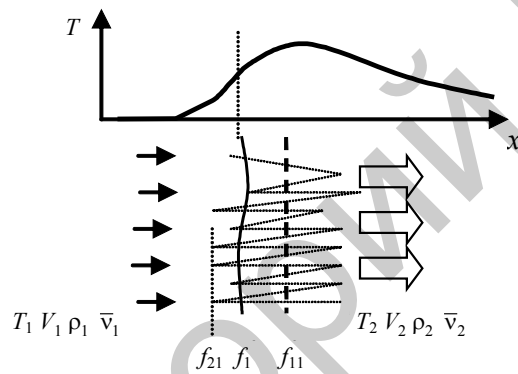


Рис. 1. Схема плоского фронта вытеснения нефти при ТГМ:  $f_1$  – фронт тепловыделения;  $f_{11}$  – среднемассовый фронт вытеснения нефтяной смеси;  $f_{21}$  – передний фронт соприкосновения остаточных углеводородов и дутья

Fig. 1. Diagram of the plane front of oil displacement at TGM:  $f_1$  – emission of heat front;  $f_{11}$  – average weight displacement front of the crude oil;  $f_{21}$  – front contact edge of the residual hydrocarbons and the displacement agent

Ввиду того что закачиваемый газ при высоком давлении и температуре может находиться в сверхкритическом состоянии, не будем употреблять термин «газ», а используем термин «флюид», относя его как к дутью, так и к вытесняемой смеси – нефти с водой дутьем и продуктами горения. В отсутствие горения среднемассовый фронт вытеснения будет распространяться со скоростью движения флюида дутья  $V_1$ , выполняющего роль поршня, а сам фронт размываться со временем за счет как диффузии флюидов, так и механической дисперсии  $D_{dis}$  (задержание и перемешивание нефти в погранслоях и застойных областях пор). Скорость фронта соприкосновения  $f_{21}$  может быть связана со скоростью фильтрации дутья  $u_{f_{21}} = \text{const} \cdot V_1$ .

При горении фронт тепловыделения будет распространяться медленнее вследствие потребления кислорода дутья и встречного теплового потока. При этом скорость фронта вытеснения нефти в общем случае не совпадает со скоростью распространения тепловой волны и определяется комплексом процессов тепло- и массообмена в области фронта, изменения плотности

среды, температуры и состава. Поэтому область гидродинамического и химического взаимодействия дутья и нефти в общем случае может расширяться, сужаться со временем, либо распространяться в квазистационарном состоянии. Собственно, область между  $f_1$  и  $f_{11}$  и будем рассматривать как фронт термогазового воздействия на пласт, подлежащий анализу.

Оценка скорости фронта тепловыделения может быть сделана на основе решения системы уравнений баланса теплоты и массы реагентов и химической кинетики численными методами. Приняв гипотезу о том, что фронт тепловыделения движется со скоростью, определяемой скоростью доставки в нее горючего компонента, а нефтенасыщенность пласта обратно пропорциональна ширине области термогазового взаимодействия  $L_{ТГМ}$ , можно записать условие равенства потоков окислителя и нефти к фронту химического реагирования

$$\rho_1 C_{O_2} [V_1 - u_{f1}] = \rho_2 \xi_{ct} u_{f1} \frac{l_0}{L_{ТГМ}}, \quad (1)$$

где  $C_{O_2}$  – концентрация кислорода в дутье;  $\xi_{ct}$  – массовый стехиометрический коэффициент для горючего вещества;  $l_0$  – характерный линейный масштаб дисперсии и диффузии, относительно которого оценивается уменьшение содержания нефти в слое вытеснения  $l_0/L_{ТГМ}$ .

Особенностью данной задачи является разделение фронта тепловыделения (области максимального тепловыделения или максимального градиента температурного фронта) и среднемассового фронта вытеснения. Для гидродинамической задачи границей раздела сред будем считать среднемассовый фронт вытеснения. Примем, что на границе имеет место резкое изменение параметров среды и фильтрации – фронты, разделяющие относительно однородные флюиды, узки по сравнению со всеми характерными размерами пласта. Слева и справа от границы раздела флюиды характеризуются скоростями движения  $V_1$  и  $V_2$ , плотностями  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , температурами  $T_1$  и  $T_2$ , вязкостью  $\bar{\nu}_1$  и  $\bar{\nu}_2$ , коэффициентами сжимаемости  $\beta_1$  и  $\beta_2$  (рис. 1). Рассматривается двумерная система, где вертикальная координата пласта не учитывается.

Рассмотрим плоский стационарный фронт вытеснения и тепловыделения, моделируемый скачком температуры и плотности флюида. Примем, что длина волны возмущения значительно превышает ширину области прогрева фронта горения. Направление фильтрации флюида совпадает с осью  $x$ , положение фронта соответствует нулю, ось  $y$  параллельна фронту. Исследуем динамику роста малых деформационных возмущений, длина волны которых значительно превышает ширину фронта. Для гидродинамической задачи исходными являются уравнения фильтрации, неразрывности и состояния для флюида в области фронта вытеснения:

$$u_g = -\kappa \nabla p; \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}(\rho u_g) = 0, \quad (3)$$

где  $\kappa$  – коэффициент фильтрации,  $\kappa = k_0/(m\mu)$ . Предполагается, что вязкость не зависит от давления.

В отличие от газа флюид обладает малой сжимаемостью, а уравнение состояния для флюида можно приближенно записать в виде

$$\rho = \rho_0(1 - p_0\beta) + \rho_0\beta p, \quad (4)$$

где  $\rho_0$ ,  $p_0$  – плотность и давление при фиксированных (стандартных) условиях;  $\beta = 1/\rho_0(\partial\rho/\partial p)$  – коэффициент сжимаемости.

Коэффициент сжимаемости нефти зависит от температуры, количества растворенного в нефти газа, фракционного состава. Для дегазированной нефти он колеблется от  $4 \cdot 10^{-10}$  до  $7 \cdot 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup>, а для легких нефтей, в которых растворено значительное количество газа, достигает  $140 \cdot 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup>. С повышением температуры сжимаемость растет. Для большинства месторождений нефти сжимаемость не выходит за пределы  $(7-30) \cdot 10^{-10}$  Па<sup>-1</sup> [11] и для рассматриваемых оценок принята  $\beta = 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>.

Подставляя (2) и (4) в (3) и принимая во внимание, что  $\beta p_0 \ll 1$ , приходим к уравнению нестационарной фильтрации

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\kappa}{\beta} \Delta(p). \quad (5)$$

Связь между деформацией фронта горения и возмущением поля фильтрации устанавливается исходя из известной зависимости между скоростью волны ФГГ и скоростью фильтрации флюида [10]

$$u_w = u_w(u_g). \quad (6)$$

В отличие от случая газовой фильтрации, уравнение (5) – линейное. Следовательно, суперпозиция его решений также является решением, и возмущение должно удовлетворять (5) независимо от вида основного невозмущенного решения. Для определенности считаем, что невозмущенное решение характеризуется скоростью движения фронта  $u_w$ , давлением  $p = C_1 + xC_2$  (стационарное решение (5)), нормальной к фронту скоростью фильтрации  $V_1$  в области перед фронтом и  $V_2 = (\rho_1/\rho_2)V_1$  – за фронтом.

Найдем функцию возмущения давления, удовлетворяющую (5) и отвечающую требованиям обращения в нуль на бесконечности и периодичности по поперечной координате:

$$p \sim \exp(ik_y y \pm k_x x + \Omega t), \quad (7)$$

где  $\Omega$  – временной инкремент роста возмущения  $\Omega = (\kappa/\beta)(k_x^2 - k_y^2)$ .

Согласно (7), для квазистационарных процессов  $k_{x,1} \approx k_{y,1} = k_{y,2} \approx k_{x,2}$ , что позволяет опустить индексы при  $k$  везде, где их различия несущественны; индексы 1 и 2 относятся к области исходной смеси дутья и продуктов вытеснения соответственно. Используя (7) и (2), условия обращения возмущения в нуль на бесконечности, а также тождественность поперечного масштаба возмущений давления и деформации фронта, ищем решение для величин возмущения давления, скорости и положения фронта в виде:

$$\begin{aligned}
p_1 &= A \exp(ik_y y + k_x x + \Omega t); \\
v_1 &= -\kappa_1 k_x A \exp(ik_y y + k_x x + \Omega t); \\
u_1 &= -i\kappa_1 k_y A \exp(ik_y y + k_x x + \Omega t); \\
p_2 &= B \exp(ik_y y - k_x x + \Omega t); \\
v_2 &= \kappa_2 k_x B \exp(ik_y y - k_x x + \Omega t); \\
u_2 &= -i\kappa_2 k_y B \exp(ik_y y - k_x x + \Omega t); \\
f &= C \exp(ik_y y + \Omega t), \tag{8}
\end{aligned}$$

где  $v$ ,  $u$  – нормальная и касательная к начальному фронту составляющие возмущения скорости фильтрации;  $f$  – функция смещения (деформации) фронта вытеснения/горения.

Для определения постоянных  $A$ ,  $B$ ,  $C$  в (8) сформулируем граничные условия на разрыве (фронте). Условие равенства возмущений давлений не может быть использовано, поскольку в принятом виде решений (8) оно приводит к нарушению сохранения потока массы через границу. Действительно, если положить  $A = B$ , то, согласно (8), нормальные составляющие скорости на фронте имеют разные знаки ( $v_1 = -(\kappa_1/\kappa_2)v_2$ ), что противоречит условию неразрывности. Поток импульса не сохраняется отдельно для флюида, так как при фильтрации принципиальное значение имеет взаимодействие флюида и пористой среды. Поэтому в качестве граничных условий используем уравнение сохранения потока массы, уравнение изменения тангенциальной составляющей скорости фильтрации и уравнение, связывающее скорость фильтрации и скорость движения фронта. Первые два условия, записанные для малых амплитуд деформации, дают:

$$\alpha(f'_t - v_1) = f'_t - v_2; \tag{9}$$

$$\left(\frac{\kappa_2 \beta_1}{\kappa_1 \beta_2}\right) u_1 + \left(\frac{\kappa_2 \beta_1}{\kappa_1 \beta_2}\right) (V_1 + v_1 - u_w) f'_y = u_2 + (\alpha(V_1 - u_w) + v_2) f'_y, \tag{10}$$

Для записи третьего условия используем уравнение (6) в предположении, что  $v_1 \ll V_1$ :

$$f'_t = \varepsilon v_1, \tag{11}$$

где  $\alpha \equiv \rho_1/\rho_2$ ;  $u_w$  – скорость невозмущенного фронта волны термогазового воздействия;  $\varepsilon \equiv \partial u_w / \partial u_g$  – отклик фронта горения на изменение скорости фильтрации (определяемый тепломассообменом во фронте горения).

Заметим, что уравнение (10) не следует из условия сохранения потока импульса или галилеевой инвариантности явления, подобно случаю свободного пламени, и не соответствует принятому в [12]. Его можно получить исходя из (2) и непрерывности давления при фильтрации. Действи-

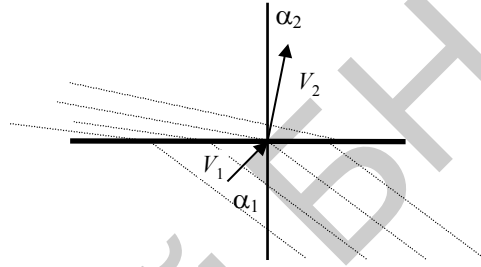
тельно, из непрерывности давления на границе фронта горения (непрерывность изобар на рис. 2) и из геометрических соображений следует  $|\nabla p_1| \sin \alpha_1 = |\nabla p_2| \sin \alpha_2$ . Тогда тангенциальная компонента скорости до разрыва  $u_1 = (\kappa_1/\beta_1)|\nabla p_1| \sin \alpha_1$ , а после разрыва  $u_2 = (\kappa_2/\beta_2)|\nabla p_2| \sin \alpha_2 = (\kappa_2\beta_1/\kappa_1\beta_2)u_1$ , т. е. сохраняется с точностью до множителя  $\kappa_2\beta_1/\kappa_1\beta_2$ . Это поясняет рис. 2.

Рис. 2. Пояснение к выводу (10):

$V_1, V_2, \alpha_1, \alpha_2$  – скорости и углы отклонения скорости фильтрации от нормали до фронта вытеснения и после него соответственно; штриховые линии – изобары

Fig. 2. Explanation for the conclusion (10):

$V_1, V_2, \alpha_1, \alpha_2$  – speeds and angles of the filtration speed deviation from the normal before the displacement front and after it respectively; dashed lines – isobar



Пренебрегая величинами возмущений скорости (но не скоростью движения фронта) по сравнению с  $v$ , а также учитывая, что при малых амплитудах деформации  $\exp(k_x x) \approx 1$ , подставляем (8) в уравнения (9)–(11):

$$\alpha\Omega C + \alpha \left( \frac{\kappa_1}{\beta_1} \right) kA = \Omega C - \left( \frac{\kappa_2}{\beta_2} \right) kB; \quad (12)$$

$$\left( \frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right) [V_1 - u_w] kC - \left( \frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right) \left( \frac{\kappa_1}{\beta_1} \right) kA = \alpha [V_1 - u_w] kC - \left( \frac{\kappa_2}{\beta_2} \right) kB; \quad (13)$$

$$\Omega C = -\varepsilon \left( \frac{\kappa_1}{\beta_1} \right) kA. \quad (14)$$

При выводе граничных условий и системы уравнений (12)–(14) использовано условие малости амплитуды деформации фронта, а малость амплитуды возмущения давления в явном виде не требовалась. После исключения неизвестных из (12)–(14) получим

$$\Omega = \varepsilon k [V_1 - u_w] \frac{\alpha - \left( \frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right)}{\alpha + \left( \frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right)}. \quad (15)$$

Для случаев ФГГ и ТГМ значения параметров в (15) существенно различаются. Если в первом варианте  $\alpha = \rho_1/\rho_2 = T_2/T_1 \gg 1$ , то во вто-

ром  $\alpha = \rho_1/\rho_2 \sim 1$ . Величина  $\kappa_2/\kappa_1 \sim \sqrt{T_1/T_2} < 1$  в первом случае и также меньше единицы во втором из-за более высокой вязкости нефти. Таким образом, формула (15) приводит к различным выводам для упомянутых случаев – абсолютной неустойчивости фронта ФГГ с  $\Omega \sim ku_w$  и условной неустойчивости фронта ТГМ при

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} - \frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} > 0 \text{ или } \rho_1\kappa_1\beta_2 > \rho_2\kappa_2\beta_1. \quad (16)$$

Учитывая определение коэффициента фильтрации  $\kappa = k_0/(m\mu)$  и кинематической вязкости  $\bar{\nu} = \mu/\rho$ , условие неустойчивости (16) сведется к требованию  $\bar{\nu}_2\beta_2 > \bar{\nu}_1\beta_1$ . Таким образом, предпосылкой для неустойчивости фронта вытеснения при ТГМ являются высокая кинематическая вязкость и сжимаемость нефтяного флюида по сравнению с дутьем. Отсюда следует, что вытеснение несжимаемым водным раствором способствует неустойчивости, а использование газового или водогазового дутья – стабилизации фронта вытеснения. Из данного анализа следует, что при прогреве нефтяного флюида и образовании теплового фронта устойчивость фронта вытеснения повышается.

Для случая ФГГ [10] существенным фактором, оказывающим влияние на характер неустойчивости, является изменение теплового баланса области участка сечения за счет изменения кривизны фронта. Для ФГГ данный эффект приводит к появлению устойчивости малых по длине волны возмущений при неустойчивости длинноволновых возмущений. Количественной мерой этого влияния служит коэффициент  $\gamma$

$$u_w = u_{w,0} + \gamma u_t f_x'' \quad (17)$$

Коэффициент  $\gamma$  оценивается через толщину теплового фронта  $\Delta x$  и безразмерную скорость его движения

$$\gamma = 2\Delta x \left( \frac{u_w}{u_t} \right).$$

В случае ТГМ [3] ширина фронта может составлять несколько метров в силу низкой максимальной температуры, а безразмерная скорость может примерно соответствовать скорости тепловой волны  $u_w/u_t \sim 1$ . Инкремент роста возмущения имеет вид

$$\Omega = \varepsilon k [V_1 - u_w] \frac{\alpha - \left( \frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right)}{\alpha + \left( \frac{\kappa_2\beta_1}{\kappa_1\beta_2} \right)} - \gamma u_t k^2. \quad (18)$$

Оценивая порядок  $\gamma u_t k^2$ , можно показать, что неоднородности с характерными длинами волн около нескольких толщин фронта будут подавлять-



ся термическими механизмами. При скорости фронта, близкой к скорости фильтрации дутья, эффективность подавления неустойчивостей за счет теплового потока резко возрастает.

### ВЫВОДЫ

1. Вопрос о гидродинамической устойчивости фронта вытеснения и связанного с ним температурного фронта термогазового взаимодействия рассмотрен аналитически в приближении малых возмущений. Показано, что отношение кинематических вязкостей флюида дутья и нефтяной смеси является основным критерием устойчивости.

2. Разогрев нефтяной смеси способствует повышению устойчивости фронта вследствие снижения вязкости нефтяной смеси за счет прогрева и насыщения продуктами окисления, а также тепловой компенсации искривления температурного фронта. Механизмами подавления или компенсации возмущений фронта являются: снижение вязкости нефтяной смеси и повышение вязкости дутья; увеличение толщины теплового фронта термогазового взаимодействия прежде всего за счет повышения его температуры и изменения химизма (использование низкотемпературных катализаторов); снижение скорости волны и/или соответственно подачи дутья.

3. Применение воздушного или водовоздушного дутья, а также насыщение воды плохо растворимыми газами обеспечивают относительно большую устойчивость фронта по сравнению с использованием составов на основе воды. В результате анализа можно предположить осуществление пульсирующих режимов термогазового взаимодействия, обусловленных снижением/прекращением химического тепловыделения при расширении области термогазового взаимодействия дутья и нефти и увеличением проницаемости пласта в области, подверженной локально избыточному тепловому воздействию и окислению вследствие неоднородности/искривления фронта. Для дальнейших исследований методов и механизмов компенсации неустойчивости фронта, в том числе его динамики на нелинейной стадии, следует провести детальный многомерный расчет системы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Saffman, P. G. The Penetration of a Fluid Into a Porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Liquid / P. G. Saffman, G. I. Taylor // Proc. R. Soc. London, 1958. A245, P. 321–329.
2. Saffman, P. G. Viscous Fingering in Hele-Shaw Cells / P. G. Saffman // J. Fluid Mech. 1986. No 173. P. 73–94.
3. Chouke, R. L. Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media / R. L. Chouke, P. Meurs, C. Poel // Pet. Trans. AIME. 216. 1959. P. 188–194.
4. Рыжик, В. М. Исследование устойчивости движения раздела воды и нефти / В. М. Рыжик, Б. Е. Кисленко // ВНК. Физико-геологические факторы при разработке нефтяных и нефтегазоконденсатных месторождений. М.: Недра, 1969. С. 82–92.
5. Баренблатт, Г. И. Движение жидкостей и газов в природных пластах / Г. И. Баренблатт, В. М. Ентов, В. М. Рыжик. М.: Недра, 1984. 207 с.

6. Разработка целиклов нефти при воздействии на пласт химических реагентов / В. И. Пеньковский [и др.] // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Т. 54, № 3. С. 87–94.
7. Остаточные нефтенасыщенные зоны продуктивных пластов и способы воздействия на них с целью вовлечения в разработку / В. И. Пеньковский [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 5. С. 41–51.
8. Любимов, Д. В. Влияние вибраций на устойчивость плоского фронта вытеснения в пористой среде / Д. В. Любимов, Г. А. Седельников // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2006. Т. 41, № 1. С. 6–14.
9. Дмитриев, М. Н. Модель двухфазной фильтрации Рапопорта – Лиса в анизотропных средах / М. Н. Дмитриев // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. Т. 46, № 2. С. 136–144.
10. Добрего, К. В. Физика фильтрационного горения газов / К. В. Добрего, С. А. Жданок. Минск: Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, 2002. 204 с.
11. Щелкачев, В. Н. Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации / В. Н. Щелкачев. М.: Нефть и газ, 1995. 493 с.
12. Минаев, С. С. О неустойчивости фронта пламени при фильтрационном горении газов / С. С. Минаев, С. И. Потытняков, В. С. Бабакин // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 6. С. 49–54.

Поступила 11.01.2016 Подписана в печать 12.03.2016 Опубликована онлайн 30.03.2016

#### REFERENCES

1. Saffman P. G., Taylor G. I. (1958) The Penetration of a Fluid Into a Porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Liquid. *Proceedings of the Royal Society of London*, A245, 321–329.
2. Saffman P. G. (1986) Viscous Fingering in Hele-Shaw Cells. *Journal of Fluid Mechanics*, 173, 73–94.
3. Chouke R. L., Meurs P., Poel C. (1959) Instability of Slow, Immiscible, Viscous Liquid-Liquid Displacements in Permeable Media. *Trans. AIME*, 216, 188–194.
4. Ryzhik V. M., Kislenco B. Ye. (1969) Investigation of Dynamic Stability of Oil-Water Interface. *Physical-Geological Factors at Development of Oil and Oil-Gas Condensate Fields*. Moscow, Nedra, 82–92 (in Russian).
5. Barenblatt G. I., Yentov V. M., Ryzhik V. M. (1984) *Liquid and Gas Motion in Natural Formations*. Moscow, Nedra, 207 (in Russian).
6. Penkovskii V. I., Korsakova N. K., Altunina L. K., Kuvshinov V. A. (2013) Development of Unrecovered Oil Affecting the Formation by Chemical Reagents. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 54 (3), 415–422 DOI: 10.1134/S0021894413030103.
7. Penkovskii V. I., Korsakova N. K., Simonov B. F., Savchenko A. V. (2012) Residual Oil-Saturated Zones of Productive Strata and Methods of Affecting them Towards Involvement Into Development. *Fiziko-Tekhnicheskie Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh* [Physicotechnical Challenges of Mining], (5), 41–51 (in Russian).
8. Lubimov D. V., Sedelnikov G. A. (2006) Effect of Vibration on the Stability of a Plane Displacement Front in a Porous Medium. *Fluid Dynamics*, 41 (1), 3–11. DOI: 10.1007/s10697-006-0016-0.
9. Dmitriev M. N. (2011) Rapoport – Leas Two-Phase Flow Model for Anisotropic Porous Media. *Fluid Dynamics*, 46 (2), 291–298. DOI: 10.1134/S0015462811020128.
10. Dobrego K. V., Zhdanok S. A. (2002) *Physics of Filtrational Combustion of Gases*. Minsk: Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus. 204 (in Russian).
11. Shchelkachev V. N. (1995) *Basis and Applications of the Unsteady Flow Theory*. Moscow, Neft i gaz. 493 (in Russian).
12. Minaev S. S., Potytnyakov S. I., Babakin V. S. (1994) On Instability of Flame Front During Filtrational Combustion of Gases. *Vizika Goreniya i Vzryva* [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 30 (6), 761–763. DOI: 10.1007/BF00755247.

Received: 11 January 2016

Accepted: 12 March 2016

Published online: 30 March 2016