

УДК 62

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.03

Д.С. Пинягин, Н.А. Костарев, Н.М. ТруфановаПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СКВАЖИНЕ С ПРИЗАБОЙНЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ

По причине снижения природных запасов нефти в нефтедобыче остро стоит вопрос освоения месторождений с высоковязкой нефтью. Одним из способов добычи высоковязкой нефти является прогрев призабойной зоны скважины при помощи нагревателя. **Цели:** разработка и исследование модели процесса тепломассопереноса в нефтяной скважине с призабойным нагревателем путем сравнения различных моделей турбулентного и ламинарного течения и выявление оптимальной. **Методы:** в работе рассмотрена двухмерная осесимметричная математическая модель процесса тепломассопереноса в нефтяной скважине с призабойным нагревателем, который используется для скважин с высоковязкой нефтью. Использование локального нагревателя в призабойной области позволяет снизить вязкость нефти, поступающей в насос, обеспечивая тем самым бесперебойную работу скважины. Рассматривалось продольное сечение нефтяной скважины глубиной 105 м, окружённой грунтом. Нагреватель расположен над забоем. Численная реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных элементов в ANSYS. Для построения геометрии и разбиения на сетку конечных элементов использовался препроцессор ICEM CFD. Поставленная задача решалась численным методом конечных элементов в среде инженерных расчетов Fluent. **Результаты:** разработана математическая модель нефтяной скважины с турбулентным и ламинарным течением нефти с учетом призабойного нагревателя. В результате исследования получены поля скоростей и температур во всем объеме скважины. Построены распределения скоростей и температур по сечению насосно-компрессорных труб, произведено сравнение различных моделей турбулентного течения и *k-epsilon* модели. Исследовано влияние величины вязкости на температуру перед входом в электрический центробежный насос. Выбрана наиболее оптимальная модель течения при данных условиях. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют выбрать оптимальную модель течения для расчета данной задачи и принять необходимые меры по снижению вязкости нефти на заранее известном участке, что существенно снизит материальные затраты при разработке месторождений.

Ключевые слова: призабойный нагреватель, нефтяная скважина, турбулентное течение, высокая вязкость, тепловой процесс.

D.S. Pinyagin, N.A. Kostarev, N.M. Trufanova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

NUMERICAL STUDY OF THERMAL PROCESSES IN A WELL WITH A BOTTOM HEATER

Due to the decline in natural oil reserves in oil production, the problem of developing fields with high-viscosity oil is very relevant. One of the ways to produce high-viscosity oil is to warm up the bottomhole zone of the oil well using a heater. **Purpose:** development and study of a model of the heat and mass transfer process in an oil well with a bottom-hole heater by comparing various models of turbulent and laminar flow and identifying the optimal one. **Methods:** The paper considers a two-dimensional axisymmetric mathematical model of the heat and mass transfer process in an oil well with a bottom-hole heater, which is used for wells with high-viscosity oil. The use of a local heater in the bottom-hole area allows to reduce the viscosity of the oil entering the pump, thereby ensuring the smooth operation of the well. A longitudinal section of an oil well with a depth of 105 meters, surrounded by soil, was considered. The heater is located above the bottom. The numerical implementation of the developed mathematical model was carried out by the finite element method in ANSYS. The ICFM CFD preprocessor was used to build the geometry and mesh the finite elements. The problem was solved by a numerical finite element method in the Fluent engineering environment. **Results:** a mathematical model of an oil well with turbulent and laminar oil flow was developed, taking into account the bottom-hole heater. As a result of the study, the fields of velocities and temperatures were obtained in the entire volume of the oil well. The distributions of velocities and temperatures over the cross-section of the tubing were constructed and a comparison between various turbulent flow models and the k-epsilon model was made. The influence of the viscosity value on the temperature before entering the electric centrifugal pump was investigated. The most optimal flow model was selected under the given conditions. **Practical relevance:** the results obtained make it possible to choose the optimal flow model for calculating this problem and to take the necessary measures to reduce the oil viscosity in a previously known area, which will significantly reduce material costs during field development.

Keywords: bottom-hole heater, oil well, turbulent flow, high viscosity, heat process.

Введение. В связи со снижением природных запасов нефти все большее внимание начинают привлекать способы разработки месторождений с высоковязкой нефтью. Проблема усиливается тем фактом, что большая часть месторождений высоковязкой нефти требует особых методов ее добычи. Решению проблемы добычи высоковязкой нефти посвящено большое количество работ [1–3], в которых рассматриваются различные технологии перекачки нефти. Авторами исследуется как турбулентное [4–6], так и ламинарное [7–9] течение, а также проводится сравнительный анализ результатов расчета. Стоит отметить, что в качестве одного из эффективных способов добычи высоковязкой нефти рассматривается нагрев призабойной зоны скважины при помощи электрических нагревателей, что делает задачу проработки данной технологии достаточно актуальной.

Постановка цели и задач. Целью данного исследования является разработка математической модели процессов тепломассопереноса [10–15] в нефтяной скважине с призабойным нагревателем для снижения вязкости нефти перед входом в электрический центробежный насос.

В рамках исследования приняты следующие допущения: задача – осесимметричная, стационарная; течение нефти – турбулентное. Теплофизические свойства твердых материалов не зависят от температуры, бесконечный массив земли заменен ограниченной областью. На границе раздела разнородных сред выполняется условие идеального контакта.

Схематическое изображение исследуемой области приведено на рис. 1.

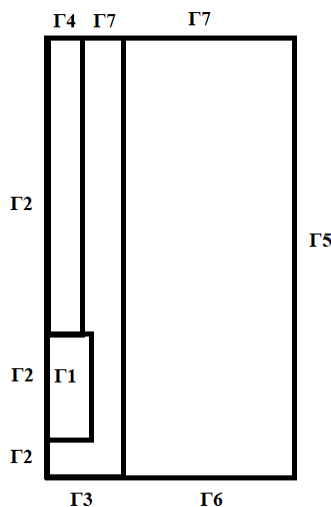


Рис. 1. Граничные условия

Математическая модель движения и теплопереноса в нефтяной скважине основывается на законах сохранения энергии, сохранения количества движения и сохранения массы [6, 16–19].

Система уравнений имеет вид [20], представленный ниже.

Уравнения переноса (уравнения Навье–Стокса, осреднённые по Рейнольдсу):

$$\rho_i \left(\bar{v}_{ir} \frac{\partial \bar{v}_{ir}}{\partial r} + \bar{v}_{iz} \frac{\partial \bar{v}_{ir}}{\partial z} \right) = - \frac{\partial \bar{P}_i}{\partial r} + \mu_i \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_{ir}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_{ir}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{v}_{ir}}{\partial z^2} - \frac{\bar{v}_{ir}}{r^2} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r \rho_i \overline{v'_{ir}{}^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\rho_i \overline{v'_{ir} v'_{iz}} \right), \quad (1)$$

$$\rho_i \left(\bar{v}_{ir} \frac{\partial \bar{v}_{iz}}{\partial r} + \bar{v}_{iz} \frac{\partial \bar{v}_{iz}}{\partial z} \right) = -\frac{\partial \bar{P}_i}{\partial z} + \mu_i \left(\frac{\partial^2 \bar{v}_{iz}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}_{iz}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{v}_{iz}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \bar{v}_{iz}}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(-r \rho_i \overline{v'_{ir} v'_{iz}} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\rho_i \overline{v'^2_{iz}} \right). \quad (2)$$

Уравнение переноса для кинетической энергии турбулентности k :

$$\left(\frac{\partial \rho_i k \bar{v}_{ir}}{\partial r} + \frac{\partial \rho_i k \bar{v}_{iz}}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k + G_b - \rho_i \varepsilon - Y_M. \quad (3)$$

Уравнение переноса для скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε :

$$\left(\frac{\partial \rho_i \varepsilon \bar{v}_{ir}}{\partial r} + \frac{\partial \rho_i \varepsilon \bar{v}_{iz}}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \rho_i C_i S \varepsilon - \rho_i C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu_i \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b. \quad (4)$$

Турбулентная вязкость μ_t :

$$\mu_t = \rho_i C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Уравнение неразрывности:

$$-\rho_i \left(\frac{\partial (r \bar{v}_{iz})}{\partial z} + \frac{\partial (r \bar{v}_{ir})}{\partial r} \right) = \left(\bar{v}_{iz} \frac{\partial (r \rho_i)}{\partial z} + \bar{v}_{ir} \frac{\partial (r \rho_i)}{\partial r} \right). \quad (6)$$

Уравнение энергии для жидких элементов:

$$\frac{\partial}{\partial r} [\bar{v}_{ir} (\rho_i E + p)] + \frac{\partial}{\partial z} [\bar{v}_{iz} (\rho_i E + p)] = \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial r} + \bar{v}_{ir} (\tau)_{eff} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} + \bar{v}_{iz} (\tau)_{eff} \right). \quad (7)$$

Уравнение энергии для твердых элементов:

$$\lambda_j \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (8)$$

Уравнение энергии для источника:

$$\lambda_j \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + qv = 0. \quad (9)$$

Граничные условия задачи [20] в соответствии с рис. 1 приведены в таблице.

Граничные условия задачи моделирования

Положение	Обозначение	Величина
Нагреватель	Г1	Источник, Вт/м ³
Центр скважины	Г2	Ось симметрии
Вход в скважину	Г3	Дебит жидкости 50 м ³ /сут., температура 20 °С
Выход из скважины	Г4	Дебит жидкости 50 м ³ /сут
Граница грунта	Г5	Геотерма
Нижняя часть	Г6	Температура 20 °С
Верхняя часть	Г7	Конвективный теплообмен

Численное моделирование процессов в скважине. Рассмотрим основные результаты проведенных исследований в соответствии с разработанными моделями процесса тепломассопереноса в нефтяной скважине с призабойным нагревателем.

1. *Исследование сходимости.* Исследование процесса сходимости решения (рис. 2, 3) показало, что установившееся решение может быть получено при использовании 700 000 элементов и 100 итераций.

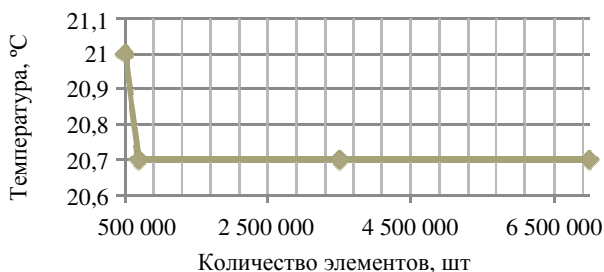
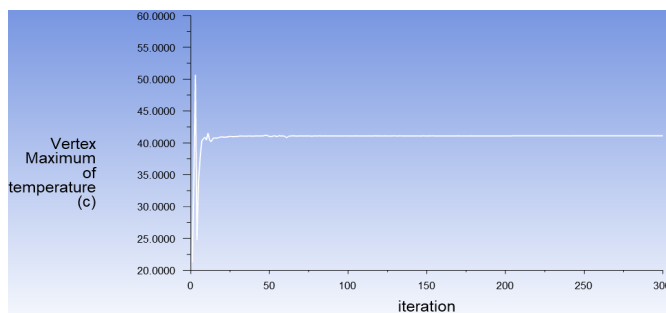
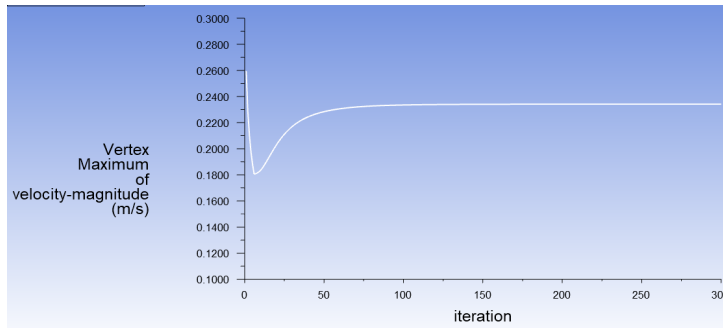


Рис. 2. Зависимость средней температуры на выходе из насосно-компрессорной трубы от количества элементов



a

Рис. 3. Зависимость температуры (a) и скорости (б) на выходе из насосно-компрессорной трубы от числа итераций



б

Рис. 3. Окончание

2. *Сравнение моделей течения.* Результаты численного исследования для случая ламинарного и турбулентного течений представлены на рис. 4 и 5.

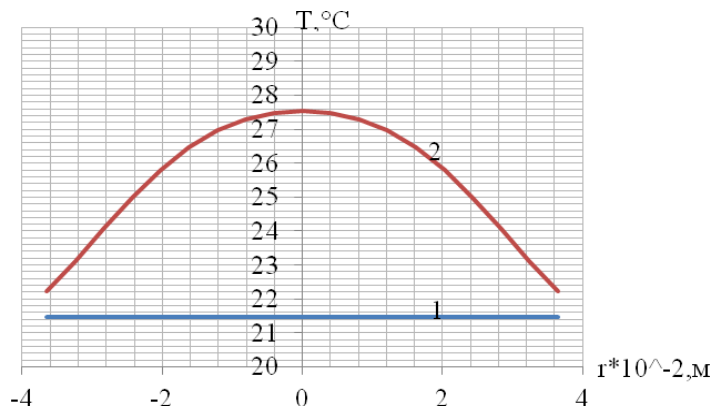


Рис. 4. Распределение температур по сечению НКТ перед ЭЦН: турбулентное (1) и ламинарное (2) течение

На рис. 4 показано, что температура распределяется равномерно по всему сечению насосно-компрессорной трубы для турбулентного течения. Это связано с тем, что элементы жидкости совершают неупорядоченные, неустановившиеся движения по сложным траекториям, что приводит к интенсивному перемешиванию между слоями движущейся жидкости. В случае ламинарного течения перепад температур по сечению составляет 6°C .

Поля продольной скорости для двух видов течения приведены на рис. 5. Максимальное отличие не превосходит 5%.

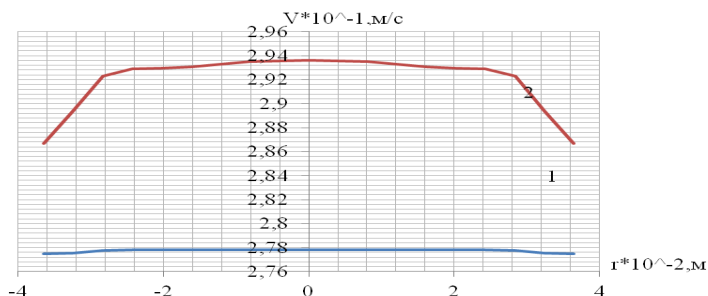


Рис. 5. Распределение скоростей по сечению НКТ перед ЭЦН: турбулентное (1) и ламинарное (2) течение

3. *Сравнение различных турбулентных моделей.* Рассмотрены три наиболее используемые в численном анализе математические модели турбулентного течения: Sapalart-Allmaras, k -epsilon, k -omega. Распределение скоростей и температур представлено на рис. 6 и 7. Как видно из рис. 6, все модели турбулентности показали близкие друг к другу результаты по значениям скоростей и температур. Отличие как по одному, так и по другому параметру не превосходит доли процента. Кривые практически совпадают. Таким образом, для описания течения в скваженном канале можно выбрать наиболее распространенную модель k -epsilon.

4. *Сравнение различных k -epsilon моделей.* Поскольку существует ряд разновидностей k -epsilon моделей, отличающихся формой записи турбулентной вязкости, проведено сравнение наиболее используемых математических моделей турбулентности: *Realzable*, *Standard*, *RNG*. Результаты сравнения моделей приведены на рис. 7.

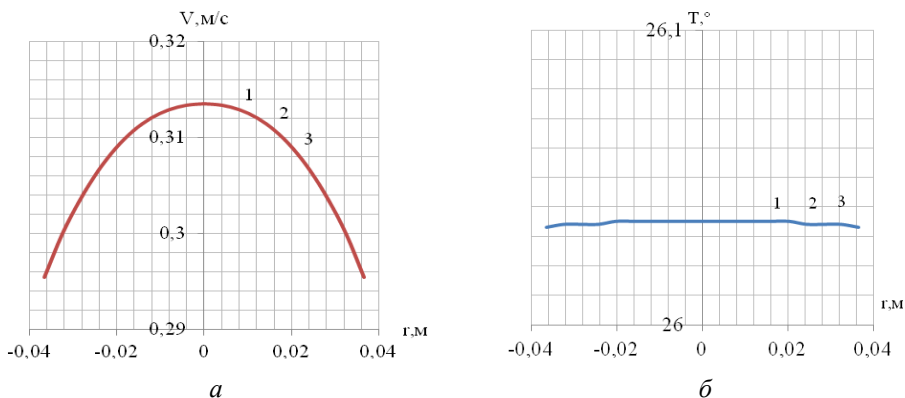


Рис. 6. Сравнение турбулентных моделей при расчете значений скорости (а) и температуры (б) на выходе НКТ: 1 – Sapalart-Allmaras; 2 – k -epsilon; 3 – k -omega

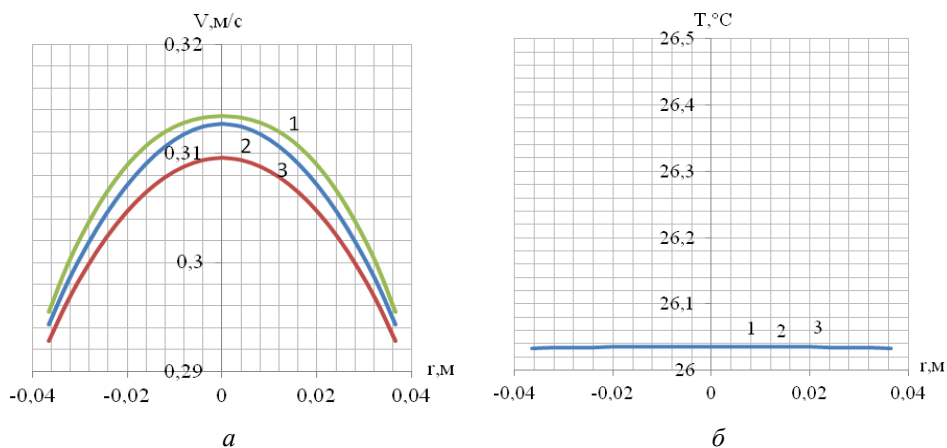


Рис. 7. Сравнение k - ϵ моделей: 1 – *Realizable*, 2 – *Standard*, 3 – *RNG*

Анализ данных на рис. 7 позволяет сделать вывод, что все k - ϵ модели показали близкие друг к другу результаты по значениям показателей скорости и температуры. Максимальное отклонение по скорости не превысило 2%. Поскольку из трех рассмотренных моделей наибольшей скоростью сходимости обладает модель *realizable*, то для дальнейших исследований была выбрана k - ϵ *realizable* модель.

5. Исследование влияния величины вязкости на поле температур и скоростей. Исследование проводилось как при высоких, так и при низких значениях вязкости для случаев ламинарного и турбулентного течения.

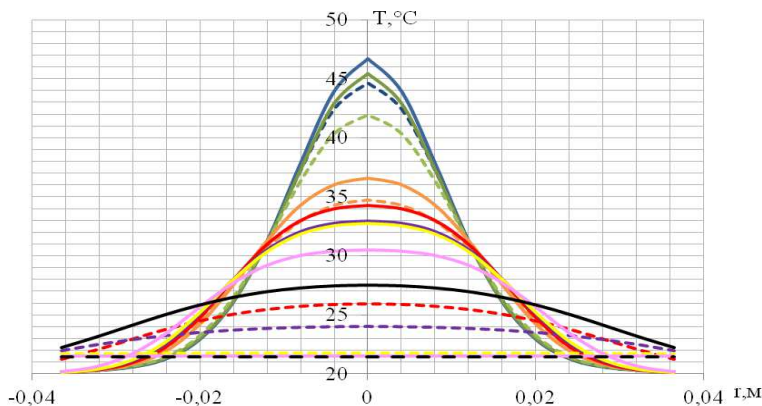


Рис. 8. Распределение температур по сечению НКТ при различной вязкости: сплошная линия – ламинарное течение, штриховая линия – турбулентное; начальная вязкость: синий – 10 Па·с, зеленый – 5 Па·с, оранжевый – 1 Па·с, красный – 0,5 Па·с, фиолетовый – 0,35 Па·с, желтый – 0,2 Па·с, розовый – 0,1 Па·с, черный – 0,001 Па·с

Рассмотрены 8 различных ситуаций, относящихся к значениям вязкости нефти от 0,001 до 10 Па·с. Как видно из рис. 8 и 9, наибольшие перепады температур по сечению НКТ возникают при вязкости в 0,2 и 0,1 Па·с и составляют 11 и 9 °С.

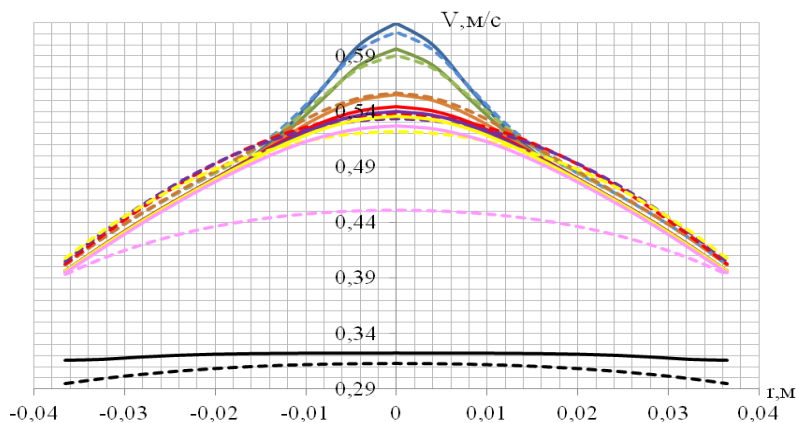


Рис. 9. Распределение скоростей по сечению НКТ при различной вязкости: сплошная линия – ламинарное течение, штриховая линия – турбулентное; начальная вязкость: синий – 10 Па·с, зеленый – 5 Па·с, оранжевый – 1 Па·с, красный – 0,5 Па·с, фиолетовый – 0,35 Па·с, желтый – 0,2 Па·с, розовый – 0,1 Па·с, черный – 0,001 Па·с

Наибольший перепад скоростей возникает при вязкости 0,1 Па·с и составляет 16,5 %. В остальных случаях перепад по значениям температуры не превышает 8 °С и 4 % по значениям скоростей. Анализ представленных на рисунках результатов также свидетельствует о том, что особенности турбулентного течения начинают проявляться со значения вязкости в 0,2 Па·с.

Выводы. Анализ турбулентного и ламинарного течения показал, что разница в результатах по значениям скоростей на выходе НКТ составляет не более 5 %, а разница по значениям температурам – около 6 °С. На основании сравнения различных моделей турбулентности в качестве оптимальной модели для данной задачи выбрана *k-epsilon realizable* модель. Рассмотрены 8 видов вязкости нефти от 0,001 до 10 Па·с. Наибольшие перепады температур по сечению возникли при вязкости в 0,2 и 0,1 Па·с и составили 11 и 9 °С. Наибольший перепад скоростей возник при вязкости 0,1 Па·с и составил 16,5 %. В остальных случаях перепад по температурам не превышает 8 °С и 4 % по значениям скоростей. Показано, что особенности турбулентного течения начинают проявляться при значении вязкости в 0,2 Па·с.

Разработанная модель успешно справляется с задачей по определению наиболее рационального способа прогрева призабойной зоны скважины, что позволяет снизить вязкость нефти перед входом в электрический центробежный насос как при ламинарном, так и при турбулентном течении нефти. Использование данной модели позволяет принять необходимые меры по снижению вязкости нефти на заранее известном участке, что существенно снизит материальные затраты при разработке месторождений.

Библиографический список

1. Тарасюк В.М. Высоковязкие нефти и природные битумы: проблемы и повышение эффективности разведки и разработки // Берег. 777.сова. – 2014. – № 2. – С. 121–125.
2. Башкирцева Н.Ю. Высоковязкие нефти и природные нефти // Вестник Казан. технолог. ун-та. – 2014. – С. 296–299.
3. Шандрыгин А.Н. Разработка залежей тяжелой нефти и природного битума методом парогравитационного дренажа (SAGD) // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 7. – С. 92–96.
4. Исследование процессов турбулентного движения однородной жидкости в стволе горизонтальной скважины при различных типах перфорационных отверстий / М.А. Фатхлисламов, И.В. Владимиров, О.П. Торопчин, С.А. Кротов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2009. – № 9. – С. 36–40.
5. Исследование процессов турбулентного, вязкого движения двухфазной жидкости в полого направленном стволе скважины при различных свойствах коллектора / М.А. Фатхлисламов, Т.Г. Казакова, О.П. Торопчин, А.С. Кротов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 1. – С. 79–84.
6. Филиппов А.И., Ахметова О.В., Родионов А.С. Температурное поле турбулентного потока в скважине // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, № 2. – С. 277.
7. Харламов С.Н., Терещенко Р.Е. Теплообмен при ламинарном течении нефти и нефтепродуктов с аномальной реологией в трубопроводах большой протяженности // Вестник Рос. акад. естеств. наук. Западно-Сибирское отделение. – 2013. – № 15. – С. 96–100.
8. Ананьев Д.В., Халитова Г.Р. Интенсификация теплопереноса при ламинарном течении высокопарафинистой нефти в круглой трубе // Труды Академэнерго. – 2014. – № 2. – С. 7–16.

9. Стрункин С.И., Григорьев А.В., Хузин Л.И. Применение установок прогрева призабойной зоны пласта // Инженерная практика. – 2015. – Вып. 12.

10. Ибрагимов А.М. Тепломассоперенос при граничных условиях второго и третьего рода // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 9. – С. 58–59.

11. Труфанова Н.М., Костарев Н.А. Исследование процесса тепломассопереноса в нефтяной скважине // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 4. – С. 126–129.

12. Конюхов В.М., Конюхов И.В., Чекалин А.Н. Математическое моделирование и параллельные вычисления процессов тепломассопереноса при эксплуатации единого комплекса «Нефтяной пласт – система скважин – электроцентробежные насосы» // Вестник Казан. технолог. ун-та. – 2014. – Т. 17. – № 10. – С. 195–202.

13. Файзуллин А.Э., Труфанова Н.М. Анализ тепловых процессов в нефтяной скважине // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 7. – С. 150–153.

14. Ковригин Л.А., Кухарчук И.Б. Конвективный теплообмен в межтрубном пространстве нефтяной скважины с греющим кабелем // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2012. – № 6. – С. 43–47.

15. Фертиков М.Г., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Исследование тепловых режимов греющего кабеля различных конструкций // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исследов. политехн. ун-та, 2018. – Т. 2. – С. 115–120.

16. Костарев Н.А., Труфанова Н.М. Исследование процессов тепломассопереноса в нефтяной скважине с учетом процесса парафинообразования // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исследов. политехн. ун-та, 2017. – Т. 2. – С. 136–142.

17. Ming-Jing Du, Yu-Lan Wang, Chao-Lu Temuer. Reproducing kernel method for numerical simulation of downhole temperature distribution // Applied Mathematics and Computation. – 2017. – 297. – P. 19–30.

18. Tarom N., Hossain M.M. Using ANSYS to Realize a Semi-Analytical Method for Predicting Temperature Profile in Injection/Production Well // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2012. – 72.

19. Труфанова Н.М., Костарев Н.А. Моделирование процесса теплопереноса при промывке нефтяной скважины через полые штанги // XXI Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл., (г. Пермь, 18-22 февр. 2019 г.) / Урал. отд-ние Рос. акад. наук, Ин-т механики сплошных сред УрО РАН – филиал Федер. гос. бюджет. учр. науки «Перм. федер. исслед. центра» УрО РАН. – Пермь: Новопринт, 2019. – С. 158.

20. Пинягин Д.С., Костарев Н.А., Труфанова Н.М. Анализ процессов теплопереноса в нефтяной скважине при использовании призабойных нагревателей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 30. – С. 211–226.

References

1. Tarasiuk V.M. Vysokoviazkie nefiti i prirodnye bitумы: problemy i povyshenie effektivnosti razvedki i razrabotki [Heavy crude oils and natural bitumens: problems and efficiency]. *Bereginya.777.sova*, 2014, no. 2, pp. 121-125.

2. Bashkirtseva N.Iu. Vysokoviazkie nefiti i prirodnye nefiti [High viscosity oils and natural oils]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, pp. 296-299.

3. Shandrygin A.N. Razrabotka zalezhei tiazheloi nefiti i prirodnogo bituma metodom parogravitatsionnogo drenazha (SAGD) [Development of deposits of heavy crude and natural bitumen by a Steam Assisted Gravity Drainage]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2006, no. 7, pp. 92-96.

4. Fatkhislamov M.A., Vladimirov I.V., Toropchin O.P., Krotov S.A. Issledovanie protsessov turbulentnogo dvizheniia odnorodnoi zhidkosti v stvole gorizontnoi skvazhiny pri razlichnykh tipakh perforatsionnykh otverstii [Investigation of the processes of turbulent motion of a homogeneous fluid in a horizontal wellbore with various types of perforations]. *Avtomatizatsiia, telemekhanizatsiia i sviaz' v neftianoi promyshlennosti*, 2009, no. 9, pp. 36-40.

5. Fatkhislamov M.A., Kazakova T.G., Toropchin O.P., Krotov A.S. Issledovanie protsessov turbulentnogo, viazkogo dvizheniia dvukhfaznoi zhidkosti v pologo napravlennom stvole skvazhiny pri razlichnykh svoistvakh kollektora [Investigation of the processes of turbulent, viscous motion of a two-phase fluid in a hollow directional wellbore with different

properties of the reservoir]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2010, no. 1, pp. 79-84.

6. Filippov A.I., Akhmetova O.V., Rodionov A.S. Temperaturnoe pole turbulentnogo potoka v skvazhine [The temperature field of a turbulent flow in a well]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2013, vol. 51, no. 2, 277 p.

7. Kharlamov S.N., Tereshchenko R.E. Teploobmen pri laminarnom techenii nefti i nefteproduktov s anomal'noi reologiei v truboprovodakh bol'shoi protiazhennosti [Heat transfer in the laminar flow of oil and oil products with abnormal rheology in long pipelines]. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie*, 2013, № 15, pp. 96-100.

8. Anan'ev D.V., Khalitova G.R. Intensifikatsiia teploperenosa pri laminarnom techenii vysokoparafinitoi nefti v krugloi trube [Heat transfer intensification in laminar flow of highly paraffinic oil in round tube]. *Trudy Akademenergo*, 2014, no. 2, pp. 7-16.

9. Strunkin S.I., Grigor'ev A.V., Khuzin L.I. Primenenie ustanovok progreva prizaboinoi zony plasta [The use of installations warm-up zone formation]. *Inzhenernaia praktika*, 2015, iss. 12.

10. Ibragimov A.M. Teplomassoperenos pri granichnykh usloviakh vtorogo i tret'ego roda [Heat transfer under boundary conditions of the second and third type]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2006, no. 9, pp. 58-59.

11. Trufanova N.M., Kostarev N.A. Issledovanie protsessa teplomassoperenosa v neftianoi skvazhine [Research process of heat and mass transfer in an oil well]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2015, no. 4, pp. 126-129.

12. Koniukhov V.M., Koniukhov I.V., Chekalin A.N. Matematicheskoe modelirovanie i parallel'nye vychisleniia protsessov teplomassoperenosa pri ekspluatatsii edinogo kompleksa "Neftianoi plast - sistema skvazhin - elektrotsentrobezhnye nasosy" [Mathematical modeling and parallel calculations of heat and mass transfer processes when operating a single complex "oil plast - wells system - electrocentrumping pumps"]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 10, pp. 195-202.

13. Faizullin A.E., Trufanova N.M. Analiz teplovykh protsessov v neftianoi skvazhine [Analysis of thermal processes in an oil well]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2018, no. 7, pp. 150-153.

14. Kovrigin L.A., Kukharchuk I.B. Konvektivnyi teploobmen v mezhtrubnom prostranstve neftianoi skvazhiny s greiushchim kabelem

[Convective heat transfer in the annular space of an oil well with a heating cable]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2012, no. 6, pp. 43-47.

15. Fertikov M.G., Diatlov I.Ia., Trufanova N.M. Issledovanie teplovykh rezhimov greiushchego kabelia razlichnykh konstrukttsii [Research of the thermal modes of the heating cable of various constructions]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2018, vol. 2, pp. 115-120.

16. Kostarev N.A., Trufanova N.M. Issledovanie protsessov teplomassoperenosa v neftianoi skvazhine s uchetom protsessa parafino-obrazovaniia [Process of oil heat and mass transfer in vertical well with influence of paraffin deposits on tubing]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2017, vol. 2, pp. 136-142.

17. Ming-Jing Du, Yu-Lan Wang, Chao-Lu Temuer. Reproducing kernel method for numerical simulation of downhole temperature distribution. *Applied Mathematics and Computation*, 2017, 297, pp. 19-30.

18. Tarom N., Hossain M.M. Using ANSYS to Realize a Semi-Analytical Method for Predicting Temperature Profile in Injection/Production Well. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, 72.

19. Trufanova N.M., Kostarev N.A. Modelirovanie protsessa teplomassoperenosa pri promyvke neftianoi skvazhiny cherez polye shtangi [Modeling the heat and mass transfer process when washing an oil well through hollow rods]. *XXI Zimniaia shkola po mekhanike sploshnykh sred: tezisy dokladov, (Perm', 18-22 February 2019). Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, Institut mekhaniki sploshnykh sred UrO RAN - filial Federal'nogo gosudarstvennogo biudzhethnogo uchrezhdeniia nauki «Permskii federal'nyi issledovatel'skii tsentr» UrO RAN*. Perm': Novoprint, 2019, 158 p.

20. Piniagin D.S., Kostarev N.A., Trufanova N.M. Analiz protsessov teplomassoperenosa v neftianoi skvazhine pri ispol'zovanii prizaboinykh nagrevatelei [Analysis of heat and mass processes in an oil well with using the bottom heaters]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 30, pp. 211-226.

Сведения об авторах

Пинягин Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pinyaginDS@gmail.com).

Костарев Никита Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nikostarev@gmail.com).

Труфанова Наталия Михайловна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

About the authors

Pinyagin Dmitry Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: pinyaginDS@gmail.com).

Kostarev Nikita Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of designing and technology in electrical equipment Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: nikostarev@gmail.com).

Trufanova Nataliya Mikhailovna (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Professor, head of the Department of designing and technology in electrical equipment Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 07.10.2020