Код МРНТИ 52.47.17:52.01.77

*Ж.Н. Алишева, О.С. Курманбаев, А. Кумар
Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан)

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ НАУЧНО-ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Аннотация. Компьютерное моделирование в нефтедобыче способствует повышению производительности, эффективности и разработке инновационных методов увеличения нефтеотдачи. Важную роль в сырьевой базе нефтяной отрасли Казахстана и других стран играют запасы тяжелых и битумных нефтей. Этот вид углеводородов с потенциалом в более чем 14 миллиардов тонн добычи ежегодно привлекает внимание нефтяных компаний. Среди перспективных методов воздействия выделяются физические поля: магнитные, ультразвуковые, вибрационные. Они разрушают структуры нефтяных ассоциатов, снижая вязкость нефти. Математическое моделирование и компьютерные расчеты подтвердили эффективность ультразвукового воздействия на флюидосодержащие системы, подтвердив данные лабораторных исследований.
Ключевые слова: *компьютерное моделирование, электромагнитное воздействие, нефть, ультразвук, научные вычисления, сетка, поровое пространство, нефтяные ассоциаты.*

Ғылыми және қолданбалы есептерді шешу барысында компьютерлік модельдеудің кейбір ерекшеліктері

Аңдатпа. Мұнай өндіруде компьютерлік модельдеу өнімділікті, тиімділікті арттыруға және мұнай қайтарымын көбейтудің инновациялық әдістерін әзірлеуге ықпал етеді. Қазақстан мен басқа да елдердің мұнай өнеркәсібінің шикізат базасында ауыр және битумды мұнай қоры маңызды рөл атқарады. Жыл сайын өндірілетін 14 миллиард тоннадан астам әлеуеті бар бұл көмірсутек түрі мұнай компанияларының назарын аударуда. Әсер етудің болашағы зор әдістерінің арасында магниттік, ультрадыбыстық, вибрациялық сияқты физикалық өрістер ерекшеленеді. Олар мұнай ассоциаттарының құрылымын бұзып, оның тұтқырлығын төмендетеді. Математикалық модельдеу мен компьютерлік есептеулер сұйықтықпен қаныққан жүйелерге ультрадыбыстық әсер етудің тиімділігін және зертханалық зерттеулердің нәтижелерін растады.
Түйінді сөздер: *компьютерлік модельдеу, электромагниттік әсер, мұнай, ультрадыбыстық әсер ету, ғылыми есептеу, тор, кеуекті кеңістік, мұнай ассоциаттары.*

Some features of computer simulation in solving scientific and applied problems

Abstract. Computer modeling in oil production enhances productivity, efficiency, and the development of innovative methods to increase oil recovery. Heavy and bituminous oil reserves play a significant role in the resource base of Kazakhstan's oil industry and other countries. This type of hydrocarbon, with a production potential exceeding 14 billion tons annually, continues to attract the attention of oil companies. Among the promising methods of influence are physical fields such as magnetic, ultrasonic, and vibrational fields. These methods break down the structures of oil associates, reducing oil viscosity. Mathematical modeling and computer simulations have confirmed the effectiveness of ultrasonic impact on fluid-containing systems, supporting the findings of laboratory studies.
Key words: *computer modeling, electromagnetic influence, oil, ultrasound, scientific computing, mesh, the pore space, oil associates.*

Введение

При постановке экспериментальных задач используют физическое и компьютерное моделирование. Физическое моделирование в многофакторном эксперименте позволяет прогнозировать ожидаемый результат путем исключения второстепенных факторов на конечный результат. При компьютерном (математическом) моделировании чаще всего используют графическое представление получаемых данных в 2D и 3D форматах для наглядности или для проведения операций вычисления в алгоритме процессов цифровизации.

В нашем случае для оценки влияния состояния межфазовой поверхности использовали внешнее воздействие импульсными электромагнитными колебаниями на фиксированной частоте разложения воды (42,8 кГц – частота Пухарича) [1]. В качестве измеряемого параметра использовали замеры электросопротивления между статическими выводами реактора изменением структуры подвергаемой воздействию нефтяной пленки. Полученные результаты свидетельствовали о том, что появление активного водорода на границе раздела меняет химсостав поверхностного слоя и, соответственно, электросопротивление между измерительными электродами в зависимости от продолжительности внешнего воздействия. Этот экспериментальный факт удобно использовать для компьютерного (численного) моделирования при графическом представлении полученных результатов.

На первом этапе компьютерного моделирования необходимо представить информацию о начальных условиях эксперимента, т.к. это предопределяет величину констант в математической модели. Начальными условиями в данной ситуации являются:

- *постоянство размеров экспериментального реактора;*
- *постоянство исходной температуры (эксперимент проводили при комнатной температуре).*

На втором этапе численного моделирования возникает необходимость выбора измеряемых параметров, пределы их колебаний около положения равновесия.

Следующим этапом создания компьютерной модели является создание алгоритма (последовательности вычислений) для получения ожидаемого результата.

Использование ультразвукового воздействия совместно с другими методами интенсификации добычи нефти может значительно повысить продуктивность низкодебитных скважин. Однако для успешной реализации этой технологии необходимо провести комплексные научно-исследовательские работы и опытно-промысловые испытания. В настоящее время эта методика обещает быть перспективной, но требует дальнейшего изучения и тестирования на практике. Ультразвуковая обработка нефтей и нефтяных фракций позволяет эффективно влиять на их реологические свойства и фракционный состав путем гидрирования.

Проведены расчеты взаимодействия ультразвука с жидкостью, находящейся в микротрещинах, капиллярах и порах призабойной зоны скважины. Исследование проведено для одномерной плоской ультразвуковой волны, длина которой существенно больше радиуса указанных каналов [1–5].

Моделирование воздействия ультразвука на углеводородные соединения необходимо для анализа изменений физико-химических характеристик нефти, прогнозирования исходов экспериментальных исследований и улучшения методов добычи, транспортировки и переработки нефти с использованием ультразвуковых технологий.

Материалы и методы

При создании модели ультразвукового влияния на нефть в программе COMSOL Multiphysics применяются акустические уравнения и уравнения Навье-Стокса для анализа потока жидкости. Важной частью модели является уравнение Гельмгольца, которое используется для моделирования распространения звуковых волн в жидкости:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \qquad (1)$$

где p – давление;

c – скорость звука в среде.

Уравнение Навье-Стокса для описания движения жидкости под воздействием ультразвука:

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + v\ \nabla v\right) = -\nabla p + \nabla\tau + f, \qquad (2)$$

где ρ – плотность;

v – скорость;

p – давление;

τ – тензор напряжений;

f – внешняя сила.

Уравнение состояния для жидкости связывает давление (P), плотность (ρ) и температуру (T) и может быть представлено следующим образом:

$$P = P\,(\rho,\ T). \qquad (3)$$

Эти уравнения могут быть дополнены граничными условиями, описывающими граничные условия на границах моделируемой области, и начальными условиями, описывающими начальные условия для переменных, таких как давление и скорость.

В моделировании распространения акустических волн в твердых материалах, таких как геологические пласты, используется уравнение упругости. Это уравнение включает параметры вязкости и теплопроводности для анализа вектора смещения U:

$$\rho_0\partial_{tt}^2 U = \left[\rho_0\left(c_l^2 - c_t^2\right) + \zeta_0 + \frac{\eta_0}{3}\right]\nabla divU +$$

$$+\left(\rho_0 c_t^2 + \eta_0\right)\Delta U - \frac{E_\alpha}{3(1-2\sigma)}\nabla T. \qquad (4)$$

и уравнения теплопроводности в твердом теле для температуры:

$$C_V\partial_t T + \frac{C_P - C_V}{\alpha}\partial_t divU = \chi * \Delta T, \qquad (5)$$

где ρ_0 – плотность материала;

c_l и c_t –скорости продольных и поперечных колебаний в твердом теле;

E и σ – упругие модули;

C_P и C_V – теплоемкости при постоянном давлении и объеме соответственно;

ζ_0 и η_0 – коэффициенты первой и второй вязкости;

χ – коэффициент теплопроводности;

α – коэффициент теплового расширения материала.

Если направление распространения акустической волны выбрать вдоль оси z, а источник излучения поместить в начало координат $z = 0$, то граничное условие для смещения U продольной волны будет представлено следующим равенством:

$$U(z = 0, t) = U_m\, exp(-i\omega t), \qquad (6)$$

где U_m – амплитуда смещения на выходе источника излучения;

ω – частота колебаний источника.

Когда акустическая волна достигает полости с жидкостью плотностью ρ, колебания стенок полости вызывают возмущения в жидкости со скоростью v. Для описания этих возмущений применяется система уравнений Навье-Стокса, включающая уравнение непрерывности [6–9]:

$$\partial\rho_t + div(\rho v) = 0. \qquad (7)$$

Другое представляет собой уравнение движения жидкости:

$$\partial_t v + (v\nabla)v - \mu\Delta v = -\nabla\frac{p}{\rho}, \qquad (8)$$

где p – давление в жидкости;

μ – динамическая вязкость.

Для создания модели необходимо определить геометрию среды (нефти), задать уравнения и параметры для моделирования ультразвуковых волн, настроить граничные условия и запустить расчеты для анализа воздействия ультразвука на нефть. Для конкретного моделирования ультразвукового воздействия на нефть могут быть также учтены физические свойства нефти, такие как вязкость, плотность и скорость звука в нефти, которые могут быть включены в уравнения и расчеты.

Этапы моделирования:

- Определение геометрии и физических свойств. На этом этапе необходимо определить геометрию модели, включая размеры и форму реактора, а также физические свойства углеводородов и среды, в которой происходит процесс.

- Выбор уравнений моделирования. Для моделирования ультразвукового воздействия на углеводороды необходимо использовать уравнения Навье-Стокса, уравнения переноса тепла и уравнения акустики.

- Задание граничных условий. Граничные условия определяют поведение физических величин на границах модели. В данном случае необходимо задать граничные условия для давления, скорости и температуры.

- Решение задачи. На этом этапе COMSOL Multiphysics использует численные методы для решения системы уравнений, полученных на предыдущих этапах.

- Постобработка результатов. После решения задачи COMSOL Multiphysics позволяет визуализировать результаты расчетов в виде графиков, изображений и анимаций.

Для моделирования задаем следующие условия:

- Плотность нефти при нормальных условиях – это значение плотности нефти при стандартных условиях (обычно 20 °C и атмосферном давлении), которое используется для расчетов. Обычно это задается в килограммах на кубический метр (kg/m³);
- Динамическая вязкость нефти – это мера сопротивления нефти деформации при движении. Это значение указывается в программе COMSOL Multiphysics и обычно измеряется в Па·с или миллипаскалях (мПа·с);
- Модуль Юнга – это характеристика упругости материала, которая описывает его способность деформироваться под действием напряжения. Модуль Юнга измеряется в Па или гигапаскалях (ГПа);
- Коэффициент Пуассона – это безразмерная величина, которая характеризует поперечное сжатие или растяжение материала при его продольном нагружении. Обычно он задается безразмерным числом между -1 и 0,5.

В результате моделирования воздействия ультразвука на нефть на поровом уровне с использованием COMSOL Multiphysics и реальных данных были установлены следующие параметры:

- Плотность нефти: $\rho = 850$ кг/м³;
- Динамическая вязкость нефти: $\mu = 0{,}025$ Па*с.

Изучалось влияние ультразвука на движение жидкости в поровом пространстве размерами 640 * 320 мкм. Сетка моделируемого порового пространства показана на рис. 1.

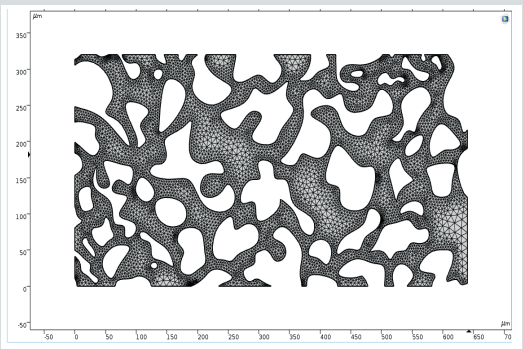

Рис. 1. Сетка моделируемого порового пространства.
Сурет 1. Модельдендірілген поралық кеңістіктің торы.
Figure 1. Mesh of the simulated pore space.

Эмпирическая зависимость для расчета изменения динамической вязкости μ_w в результате воздействия давления волны p_w имеет следующий вид [5]:

$$\mu_w = \mu_0((0,80498 - 0,013468) \cdot \cdot (ln(p_w + 5.145 \cdot 10^{-7})), \quad (9)$$

где μ_0 – начальная динамическая вязкость жидкости (нефти) при стандартных условиях;

p_w – давление волны, вызванное ультразвуковым воздействием;

0,80498 и -0,013468 – коэффициенты, полученные эмпирическим путем, которые определяют влияние давления волны на вязкость;

ln – натуральный логарифм.

Формула позволяет рассчитать новую вязкость μ_w на основе измеренного или предполагаемого давления волны p_w, применяя логарифмическую зависимость между этими двумя параметрами.

Рассмотрим изменение вязкости при частоте ультразвукового излучения 18 кГц.

На рис. 2 показано распространение звукового давления при 18 кГц.

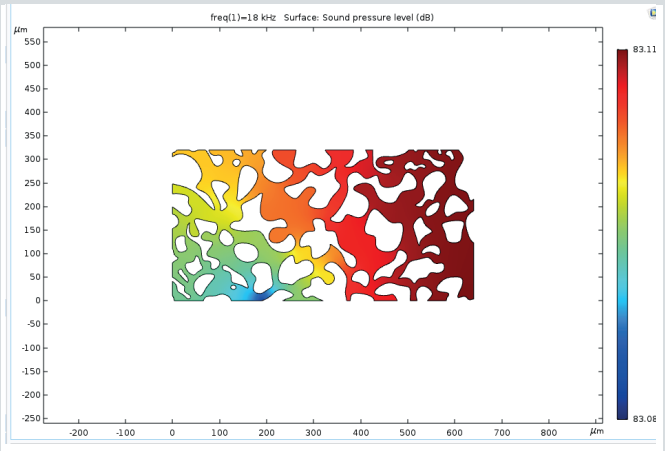

Рис. 2. Распространение звукового давления в поровом пространстве при 18 кГц.
Сурет 2. Поралық кеңістікте дыбыстық қысымның таралуы (18 кГц).
Figure 2. Propagation of sound pressure in the pore space at 18 kHz.

Если продолжительность воздействия превышает время τ_p, то происходит разрыв межмолекулярных связей:

$$\tau_p = \frac{N_p}{\omega}$$

$$N_p = \frac{\sigma_T}{\sigma_0} - \frac{kT}{\gamma\sigma_0} ln\left\{\frac{\sigma_T}{\sigma_0}\right\},$$

где σ_T – значение напряжения разрыва межмолекулярных связей данного типа;

γ – параметр, характеризующий этот вид межмолекулярных связей;

K – постоянная Больцмана;

T – температура;

τ – напряжение сдвига;

ω – частота колебаний.

Результаты расчета УЗ воздействия на нефть в поровом пространстве приведены в таблице 1.

Исследования показывают, что частота ультразвука играет ключевую роль в определении вязкости нефти. Наиболее заметное уменьшение вязкости происходит при частоте 18 кГц. Однако при использовании более высоких частот наблюдается обратный эффект – увеличение динамической вязкости.

Таблица 1

Результаты компьютерного моделирования

Кесте 1

Компьютерлік модельдеу нәтижелері

Table 1

Results of computer simulation

Частота УЗ излучения	Вязкость, мПа*с	Звуковое давление, дБ
18 кГц	0,02	83,11
20 кГц	0,07	68,09
22 кГц	0,075	56,04
24 кГц	0,08	54,82

Лабораторные эксперименты подтверждают, что ультразвуковое воздействие приводит к повышению температуры нефти на 3–4 °С, что в свою очередь снижает ее вязкость на 30%. Кроме того, был отмечен эффект разделения фаз без использования деэмульгаторов и дополнительного нагрева.

На основе данных экспериментов рекомендуется применять акустическое воздействие на скважинах с низким дебитом и обводненностью. Экспериментальные данные также указывают на то, что активация воды оказывает значительное влияние на изменение вязкости нефти.

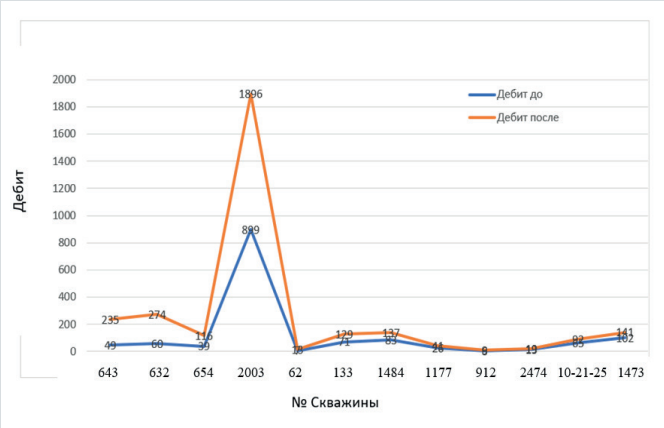

Рис. 5. Сравнение дебита до и после применения технологии обработки ультразвуком на испытуемых скважинах.

Сурет 5. Ультрадыбыстық өңдеу технологиясын қолданғанға дейін және кейін сынақ скважиналарындағы дебитті салыстыру.

Figure 5. Comparison of flow rate before and after the application of ultrasonic treatment technology in test wells.

Из рис. 5 видно, что применение технологии УЗ действует на эффективность нефтеотдачи пластов.

В ходе исследования была разработана секторная геолого-гидродинамическая модель, и на основе собранных данных был выполнен прогноз на следующий год. Результаты показали, что благодаря применению модели можно ожидать дополнительную добычу нефти в размере 53,75 тонн для одной скважины.

Компьютерное моделирование показало, что ультразвуковое воздействие на нефть в поровом пространстве при частоте 18 кГц эффективно снижает вязкость. Это снижение вязкости при перекачке нефти через трубопроводы позволяет уменьшить удельные затраты на транспортировку [10–12].

Экономический анализ подтвердил значительную выгоду от использования ультразвукового воздействия для уменьшения вязкости нефти в скважинах. Однако при применении этого метода на перекачиваемую нефть в трубопроводах выгода оказалась менее значительной.

Для достижения максимальной эффективности метода снижения вязкости нефти критически важно правильно подобрать оптимальные параметры волновой обработки. С учетом усовершенствования текущих технологий, данный метод может быть интегрирован в комплексные решения для добычи трудноизвлекаемых запасов нефти.

Выводы

1. *Главной особенностью при физическом моделировании процессов синтеза и разложения УВ в тройной системе «кварц-нефть-вода» является резонансное соответствие скоростей звука кварца и сопутствующих компонентов границы раздела фаз. Об этом свидетельствует факт возникновения гармонического ряда откликов на внешнее импульсное воздействие на частоте разложения воды.*

2. *Изменение химического состава в трехкомпонентной системе проявляет себя появлением низкоамплитудных откликов, находящихся между частотами гармонического ряда, появляющихся от кварцевых частиц трехкомпонентной смеси. Граница раздела фаз флюидосодержащей системы «нефть-вода» при обработке ее на частоте разложения воды приобретает свойства, характерные для процессов гидрирования, т. е. изменяет химический состав пленочной нефти и воды. При этом в воде образуются органические соединения, не характерные для пленочной нефти.*

3. *Разработку нового способа снижения вязкости нефти в природных условиях необходимо осуществлять путем управления свойствами границы раздела фаз «нефть-вода», о чем свидетельствуют экспериментальные результаты, полученные для нефтей месторождении Карабулак, Акшабулак и Жанатан.*

4. *Управление свойствами границы раздела фаз для практического использования можно осуществлять двумя способами: подачей импульсного воздействия в зону гидрирования или подачей активированной воды в нагнетательную скважину.*

5. *В рамках данной работы была построена секторная геолого-гидродинамическая модель, с использованием полученных данных был осуществлен прогнозный расчет на 1 год. По итогам расчета была получена дополнительная добыча нефти в объеме 53,75 тонн по одной скважине.*

6. *Было проведено компьютерное моделирование, по результатам которого при ультразвуковом воздействии на нефть в поровом пространстве вязкость нефти снизилась при частоте 18 кГц. При компьютерном моделировании процесса УЗ воздействия на нефтепровод снижение вязкости позволило снизить удельные затраты на перекачку нефти.*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Moldabayeva G.Z., Metaxa G.P., Alisheva Zh.N. Теоретические основы реализации процессов снижения вязкости в условиях природного заповедника // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан, Серия геология и технические науки. 2019. № 5 (437). С. 138–143 (на английском языке)*
2. *Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности: М.: Недра, 1983. 192 с. (на русском языке)*
3. *Ясин Халили, Мохаммад Ахмади. Моделирование коллекторов: достижения, проблемы и перспективы на будущее // Журнал химической и нефтяной инженерии. 2023. № 57 (2). С. 343–364 (на английском языке)*
4. *Влияние ультразвуковой обработки на реологические свойства парафинистой нефти / Галимзянова А. Р. [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2024. Т. 14. № 1. С. 74–83 (на русском языке)*
5. *Бадретдинов И.А., Карпов В.Г. Классификация методов увеличения нефтеотдачи (экономический подход) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2014. Т. 9. № 1. С. 1–10 (на русском языке)*
6. *Исследование акустического шума при фильтрации газа через пористую среду / Метелев И.С. [и др.] // Акустический журнал. 2019. Т. 65. № 2. С. 200–207 (на английском языке)*
7. *Fatykhov M.A., Idrisov R.I. Дегазация углеводородной жидкости в высокочастотном электромагнитном поле // Инженерно-физический журнал. Теплофизика. 2007. Т. 80. № 3. С. 630–633 (на английском языке)*
8. *Фатыхов М.А., Худайбердина А.И. Математическое моделирование процесса нагрева карбонатосодержащего нефтяного пласта при совместном воздействии соляной кислоты и высокочастотного электромагнитного поля // Башкирский химический журнал. 2008. Т. 15. № 3. С. 29–32 (на русском языке)*
9. *Моделирование электрического поля. Методические рекомендации / Л.И. Алексеева, С.А. Сверчинская. – Иркутск, 2001. – С. 10–12 (на русском языке)*
10. *Ковалева Л.А., Насыров Н.М., Хайдар А.М. Математическое моделирование высокочастотного электромагнитного нагрева призабойной зоны горизонтальных нефтяных скважин // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 77. № 6. С. 105 (на русском языке)*
11. *Квантовые вычисления и моделирование для энергетических приложений: обзор и перспективы / Paudel H.P. [и др.] // АКС Инжиниринг. 2022. № 2 (3). С. 151–196 (на английском языке)*
12. *Абдель Ваххаб М.А., Абдель Хафез Н.А., Эмбаби А.М. 3D-статическое моделирование водохранилища и бассейна озерно-дельтовой системы в Суэцком заливе, Египет // Пет. Резолюция. 2022. № 8. С. 18–35 (на английском языке)*

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1.. *Moldabayeva G.Z., Metaxa G.P., Alisheva Zh.N. Теориялық негіздер табиғи қор аймағында вискозитетті төмендету процестерін іске асыру // Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясының хабарлары, Геология және техникалық ғылымдар сериясы. 2019. № 5 (437). Б. 138–143 (ағылшын тілінде)*
2. *Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Нефтяной өнеркәсібінде ультрадыбысты қолдану: М.: Недра, 1983. 192 б. (орыс тілінде)*
3. *Ясин Халили, Мұхаммед Ахмади. Резервуарларды модельдеу және модельдеу: жетістіктер, қиындықтар және болашақ перспективалар // Химиялық және мұнай инженериясы журналы. 2023. № 57 (2). Б. 343–364 (ағылшын тілінде)*
4. *Парафинді мұнайдың реологиялық қасиеттеріне ультрадыбыстық өңдеудің әсері / Галимзянова А.Р. [және т. б.] // Мұнай және мұнай өнімдерін құбыр арқылы тасымалдау ғылымы мен технологиялары. 2024. Т. 14. № 1. Б. 74–83 (орыс тілінде)*
5. *Бадретдинов И.А., Карпов В.Г. Мұнай алу тиімділігін арттыру әдістерінің классификациясы (экономикалық тұрғыдан) // Нефтегаз геологиясы. Теория және практика. 2014. Т. 9. № 1. Б. 1–10 (орыс тілінде)*
6. *Кеуекті орта арқылы газдың фильтрациясы кезінде акустикалық шуды зерттеу / Метелев И.С. [және т. б.] // Акустикалық журнал. 2019. Т. 65. № 2. Б. 200–207 (ағылшын тілінде)*
7. *Fatykhov M.A., Idrisov R.I. Жоғары жиілікті электромагниттік өрісте көмірсутек сұйықтығын дегаздандыру // Инженерлік физика және термофизика журналы. 2007. Т. 80. № 3. Б. 630–633 (ағылшын тілінде)*
8. *Фатыхов М.А., Худайбердина А.И. Карбонат құрамды мұнай қабатының қыздыру процесін математикалық модельдеу, тұз қышқылы мен жоғары жиілікті электромагниттік өрістің бірлескен әсері кезінде // Башқұрт химиялық журналы. 2008. Т. 15. № 3. Б. 29–32 (орыс тілінде)*
9. *Электр өрісін модельдеу / Л.И. Алексеева, С.А. Сверчинская. Әдістемелік ұсыныстар. – Иркутск, 2001. – Б. 10–12 (орыс тілінде)*

10. Ковалева Л.А., Насыров Н.М., Хайдар А.М. Горизонтальды мұнай ұңғымаларының бұрғылау аймағындағы жоғары жиілікті электромагниттік қыздыруды математикалық модельдеу // Инженерлік физика журналы. 2015. Т. 77. № 6. Б. 105 (орыс тілінде)
11. Энергияны қолдану үшін кванттық есептеу және модельдеу: Шолу және перспектива / Paudel H.P. [және т. б.] //ACS Инженерлік. 2022. № 2 (3). Б. 151–196 (ағылшын тілінде)
12. Абдель Ваххаб М.А., Абдель Хафез Н.А., Эмбаби А.М. Египеттің Суэц шығанағындағы 3d статикалық резервуар мен бассейндік желдеткіш-дельта жүйесін модельдеу // Шешім. 2022. № 8. Б. 18–35 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Moldabayeva G.Z., Metaxa G.P., Alisheva Zh.N. Theoretical bases for the implementation of the processes to reduce viscosity in the conditions of natural reservation // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. 2019. No. 5 (437). 138–143 pp. (in English)
2. Kuznetsov O.L., Efimova S.A. Primenenie ul'trazvuka v neftyanoi promyshlennosti [Application of ultrasound in the oil industry], Moscow: Nedra, 1983. 192 p. (in Russian)
3. Yasin Khalili, Mohammad Ahmadi. Reservoir Modeling & Simulation: Advancements, Challenges, and Future Perspectives // Journal of Chemical and Petroleum Engineering. 2023. No. 57 (2). 343–364 pp. (in English)
4. Vliyanie ul'trazvukovoi obrabotki na reologicheskie svoistva parafinistoi nefti [Effect of Ultrasonic Treatment on the Rheological Properties of Waxy Oil], Galimzyanova A.R. [et al.], Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov [Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation]. 2024. V. 14. No. 1. 74–83 pp. (In Russian)
5. Badretdinov I.A., Karpov V.G. Klassifikatsiya metodov uvelicheniya nefteotdachi (ekonomicheskii podkhod) [Classification of methods for increasing oil recovery (economic approach)], Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika [Oil and Gas Geology. Theory and Practice]. 2014. V. 9. No. 1. 1–10 pp. (in Russian)
6. Metelev I.S., Ovchinnikov M.N., Marfin E.A. Study of Acoustic Noise during Gas Filtration through a Porous Medium //Acoustical Physics. 2019. V. 65. Issue 2. 200–207 pp. (in English)
7. Fatykhov M.A., Idrisov R.I. Degassing of a hydrocarbon fluid in a high-frequency electromagnetic field // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2007. V. 80. No. 3. 630–633 pp. (in English)
8. Fatykhov M.A., Khudaiberdina A.I. Matematicheskoe modelirovanie protsessa nagreva karbonatosoderzhashchego neftyanogo plasta pri sovmestnom vozdeistvii solyanoi kisloty i vysokochastotnogo elektromagnitnogo polya [Mathematical modeling of the heating process of carbonate-containing oil reservoirs under the combined impact of hydrochloric acid and high-frequency electromagnetic fields], Bashkirskii khimicheskii zhurnal [Bashkir Chemical Journal]. 2008. V. 15. No. 3. 29–32 pp. (in Russian)
9. Modelirovanie elektricheskogo polya. Metodicheskie rekomendatsii [Modeling of electric fields. Methodical guidelines], L.I. Alexeeva, S.A. Sverchinskaya. – Irkutsk, 2001. 10–12 pp. (in Russian)
10. Kovaleva L.A., Nasirov N.M., Khaidar A.M. Matematicheskoe modelirovanie vysokochastotnogo elektromagnitnogo nagreva prizaboinoi zony gorizontal'nykh neftyanykh skvazhin [Mathematical modeling of high-frequency electromagnetic heating of the near-wellbore zone of horizontal oil wells], Inzhenerno-fizicheskii zhurnal [Engineering Physics Journal]. 2015. V. 77. No. 6. 105 p. (in Russian)
11. Quantum computingand simulations for energy applications: Review and perspective / Paudel H.P. [et al.] // ACS Engineering. 2022. No. 2 (3). 151–196 pp. (in English)
12. Abdel Wahhab M.A., Abdel Hafez N.A., Embabi A.M. 3D-static reservoir and basin modeling of a lacustrine fan-deltaic system in the Gulf of Suez, Egypt // Pet. Res. 2022. No. 8. 18–35 pp. (in English)

Сведения об авторах:
Алишева Ж.Н., Ph.D доктор, и.о. доцента, Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан), *zhannat_86.2007@mail.ru;* https://orcid.org/0000-0003-0929-4984
Курманбаев О.С., Ph.D доктор, и.о. доцента, Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан), *olzhas_ak@list.ru,* https://orcid.org/0000-0002-4867-6910
Кумар А., магистрант, Казахский Национальный Университет им. Аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан), *palkovvodez@mail.ru;* https://orcid.org/0009-0001-6026-3625

Авторлар туралы мәліметтер:
Алишева Ж.Н., Ph.D докторы, доцент қызметін атқарушы, әл-Фараби ат. Қазақ Ұлттық Университеті (Алматы қ., Қазақстан)
Курманбаев О.С., Ph.D докторы, доцент қызметін атқарушы, әл-Фараби ат. Қазақ Ұлттық Университеті (Алматы қ., Қазақстан)
Кумар А., магистрант, әл-Фараби ат. Қазақ Ұлттық Университеті (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:
Alisheva Zh.N., Doctor Ph.D, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)
Kurmanbayev O.S., Doctor Ph.D, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)
Kumar A., Master's student, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)