

УДК 622.276+519.863

В.А. Павлов<sup>1</sup>, e-mail: avivanova@tnnc.rosneft.ru; К.Г. Лапин<sup>1</sup>; А.С. Гавришь<sup>1</sup>; Н.Н. Иванцов<sup>1</sup>; Е.Р. Волгин<sup>2</sup>; К.В. Торопов<sup>2</sup><sup>1</sup> ООО «Тюменский нефтяной научный центр» (Тюмень, Россия).<sup>2</sup> ПАО «НК «Роснефть» (Москва, Россия).

## Оценка влияния геомеханических эффектов на изменение фильтрационно-емкостных свойств в условиях слабосцементированного коллектора

В статье представлены результаты лабораторного тестирования, проведенного в целях определения упруго-прочностных свойств образцов слабосцементированных пород при насыщении различными флюидами на примере отложений покурской свиты Русского месторождения (Западная Сибирь), находящегося в разработке АО «Тюменнефтегаз» – дочернего общества ПАО «НК «Роснефть». Описана методика изучения и расчета значимых геомеханических эффектов, включающая исследования керна, построение моделей и сравнение с фактическими наблюдениями, разработанная на основании полученных данных.

Отмечено, что освоение запасов покурской свиты осложнено за счет наличия таких геологических факторов, как слабосцементированный коллектор, высоковязкая нефть, высокая неоднородность пластов, наличие газовой шапки и подстилающего водоносного горизонта. Подчеркивается, что актуальность геомеханического моделирования в целях оптимизации разработки месторождений высоковязкой нефти со слабосцементированными коллекторами обусловлена наличием таких негативных эффектов, как образование кинжальных прорывов (высокопроницаемых каналов разрушения горной породы) нагнетаемого агента в добывающие скважины, осыпание ствола скважины, изменение фильтрационных свойств в процессе разработки.

Результаты тестирования использованы при проведении численного трех- и четырехмерного связанного гидродинамико-геомеханического моделирования и сравнения с фактическими данными образования кинжального прорыва.

В рамках исследования установлено, что при смене естественного насыщения на воду прочностные свойства слабобоконсолидированных отложений были значительно (до 10 раз) ослаблены. Аналогичным образом смена флюида насыщения повлияла на величину модуля Юнга.

Сделан вывод о том, что прогнозирование образования зон разрушения пород вследствие ослабления их свойств позволит значительно расширить область применения геомеханики для проектирования разработки объектов, сходных с изученным в рамках исследования, в первую очередь представленных слабосцементированными породами.

**Ключевые слова:** высоковязкая нефть, слабосцементированный коллектор, насыщение, кинжальный прорыв, обводненность, модуль Юнга, гидродинамико-геомеханическое моделирование, прочностные свойства.

.....

V.A. Pavlov<sup>1</sup>, e-mail: avivanova@tnnc.rosneft.ru; K.G. Lapin<sup>1</sup>; A.S. Gavris<sup>1</sup>; N.N. Ivantsov<sup>1</sup>; E.R. Volgin<sup>2</sup>; K.V. Toropov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tyumen Scientific Center LLC (Tyumen, Russia).<sup>2</sup> Rosneft Oil Company PJSC (Moscow, Russia).

## Estimation of Influence of Geomechanical Effects on Change of Formation Reservoir Properties In Conditions of Slightly Cemented Reservoir

The article presents the results of laboratory tests conducted to determine elastic and strength properties of samples of slightly cemented rocks when saturated with various fluids. The samples were taken from the Pokurskaya formation of the Russkoye field (Western Siberia), which is under development by Tyumenneftegaz JSC, a subsidiary of Rosneft Oil Company PJSC. A method for studying and calculating significant geomechanical effects, including core studies, model construction and comparison with actual observations, developed on the basis of the obtained data, is described.

It is noted that the development of deposits of the Pokurskaya formation is complicated due to the presence of such geological factors as a slightly cemented reservoir, high viscosity oil, high heterogeneity of layers, the presence of a gas cap and an underlying water-bearing strata. It is emphasized that the relevance of geomechanical modeling in order to optimize the development of high-viscosity oil fields with slightly cemented reservoirs is due to the presence of such negative effects as dagger breakthroughs (highly permeable channels of rock destruction) of the injected agent into the producing wells, hole sloughing, changes in filtration properties in the development process.

The test results were used for numerical 3D and 4D coupled hydrodynamic-geomechanical modeling and comparison with the actual data of the formation of a dagger breakthrough.

As part of the study, it was found that while changing the natural saturation to water, the strength properties of slightly consolidated deposits were significantly (up to 10 times) weakened. Similarly, the change of saturation fluid affected the value of Young's modulus.

It is concluded that the prediction of the formation of zones of rock destruction due to the weakening of their properties will significantly expand the scope of geomechanics for the design and development of objects similar to those in the study, primarily represented by slightly cemented rocks.

**Keywords:** high viscosity oil, slightly cemented reservoir, saturation, dagger breakthrough, water cut, Young's modulus, hydrodynamic-geomechanical modeling, strength properties.

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность разработки методики выполнения работ по гидродинамико-геомеханическому моделированию для анализа геомеханических эффектов в слабосцементированных породах, содержащих высоковязкие нефти, для ПАО «НК «Роснефть» обусловлена значительным объемом запасов такого типа в портфеле компании. Речь, в частности, идет о таких месторождениях, как Русское, Восточно-Мессояхское, Северо-Комсомольское, Ван-Еганское (рис. 1), и др. Кроме того, целесообразность развития технологий подтверждается негативным опытом освоения аналогичных запасов на месторождениях Аляски и Канады, где на 70 % скважин были зафиксированы интенсивная обводненность и образование кинжальных прорывов (областей разрушения горной породы высокой проницаемости от нагнетательных к добывающим скважинам).

Добыча высоковязкой нефти из слабосцементированных коллекторов требует особых решений, подходов и технологий [1]. Одной из главных проблем при этом являются негативные эффекты, проявляющиеся в значительных объемах выноса твердых частиц, снижении проницаемости с изменением



Рис. 1. Расположение Русского и близлежащих месторождений со слабосцементированными коллекторами

Fig. 1. Location of Russkoye field and nearby fields with slightly cemented reservoirs

напряженного состояния и образованием кинжальных прорывов. Образование кинжального прорыва в условиях слабосцементированного коллектора, насыщенного высоковязкой нефтью, вероятнее всего, связано с воздействием комплекса факторов, в числе

которых изменение упруго-прочностных свойств пород ввиду смены насыщающего флюида и распределение напряжений в межскважинной области. Вопросы изменения упруго-прочностных свойств с точки зрения успешности процессов бурения под влиянием эффекта Ребиндера подробно описаны в [2]. В целом проблема изменения упруго-прочностных свойств горных пород под влиянием различных жидкостей является достаточно изученной с позиции расчета устойчивости ствола скважины. Многочисленные эксперименты [2–5], направленные на изучение оптимальной реологии растворов, демонстрируют значительное упрочнение пород при использовании буровых растворов на углеводородной основе, однако сложно назвать такие эксперименты систематизированными и выделить какие-либо количественные характеристики тех или иных пород. Еще одной важной проблемой является изменение проницаемости в при-скважинной области ввиду разрушения пород коллектора и выноса песка при превышении предельно допустимых режимов эксплуатации. При этом очевидно, что использование других подходов, помимо моделирования геомеханических процессов обра-

Ссылка для цитирования (for citation):

Павлов В.А., Лапин К.Г., Гаврис А.С., Иванцов Н.Н., Волгин Е.Р., Торопов К.В. Оценка влияния геомеханических эффектов на изменение фильтрационно-емкостных свойств в условиях слабосцементированного коллектора // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2019. № 10. С. 46–52.

Pavlov V.A., Lapin K.G., Gavris A.S., Ivantsov N.N., Volgin E.R., Toropov K.V. Estimation of Influence of Geomechanical Effects on Change of Formation Reservoir Properties In Conditions of Slightly Cemented Reservoir. Territorija "NEFTEGAS" [Oil and Gas Territory]. 2019;(10):46–52. (In Russ.)

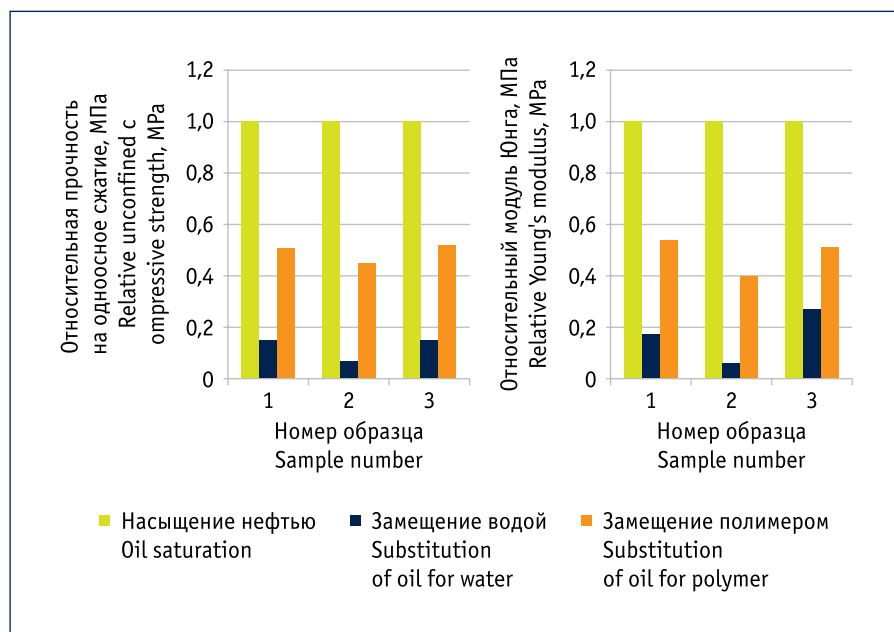


Рис. 2. Изменение упруго-прочностных свойств при насыщении различными флюидами: а) прочности на одноосное сжатие; б) относительного модуля Юнга, приведенного к измеренному на образце с естественным насыщением (нефтью)

Fig. 2. Changing of stress-related properties at saturation by various fluids: а) unconfined compressive strength; б) relative Young's modulus reduced to that measured on a sample with natural saturation (oil)

зования зон высокой проводимости, ведет к необходимости применения различных инструментов для искусственного моделирования эффектов снижения проницаемости и образования кинжальных прорывов.

В то же время возможности оптимизации путем анализа, прогноза и предотвращения негативных геомеханических эффектов не ограничиваются сферой бурения скважин, включая также разработку месторождения и определение изменения предельно допустимых депрессий при прорыве водонагнетательного фронта в добывающие скважины. Данные процессы в литературе изучены не столь подробно, однако ввиду развития направления моделирования и все более частого возникновения подобных проблем у добывающих предприятий решение этой задачи и подготовка методик для реализации соответствующих проектов являются перспективными и актуальными. Наиболее интересной задачей с точки зрения практической применимости является моделирование и прогноз изменения фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) при разработке месторождений

нефти и газа при различных величинах упруго-прочностных свойств, различиях в их динамике при смене насыщающего флюида, а также в соотношении горизонтальных напряжений и их ориентации. При этом очевидно, что для изучения таких эффектов численная модель должна быть наименее сложной, чтобы исключить влияние дополнительных артефактов. Таким образом, развитие нового направления геомеханического моделирования в целях оптимизации режимов работы скважин является одной из важнейших задач. При этом очевидно, что учет геомеханики должен начинаться с наиболее явных геомеханических эффектов, оказывающих значительное влияние на процессы разработки месторождений, эксплуатации скважин или на объемы извлекаемых ресурсов. Наиболее яркими примерами таких эффектов являются обрушение пород прискважинного пространства на добывающих скважинах и образование высокопроводимых разностей в межскважинном пространстве при закачке, что приводит к интенсивному росту обводненности и снижению объемов добычи нефти. Такие эффекты

наиболее актуальны для слабосцементированных высокопроницаемых горных пород и оказывают значительное влияние на работу как отдельно взятых скважин, так и месторождения в целом. Примером разработки высокопроницаемых слабосцементированных пластов служит разработка Покурских отложений (ПК) Русского месторождения. Причины образования кинжальных прорывов или значительного снижения продуктивности добывающих скважин описаны в литературе [6–8]. Стандартные способы адаптации работы таких скважин в гидродинамических моделях не позволяют добиться приемлемой точности или требуют для этого привлечения процессов [9], которые в рамках действующей геолого-гидродинамической модели требуют дополнительного обоснования и, как правило, не могут служить инструментом для последующих прогнозов.

В статье представлены основные результаты полноценного геомеханического моделирования с привлечением лабораторных исследований. Для моделирования использован подход, подробно описанный в [10], за исключением дополнительного параметра, включенного в процесс моделирования и заключающегося в изменении упруго-прочностных свойств пород при смене естественного насыщения пород на водонасыщенность (в результате нагнетания воды).

К числу новаций реализованного проекта относятся:

- 1) выполнение лабораторных экспериментов по оценке влияния насыщающего флюида на упругие и прочностные свойства горных пород;
- 2) расчет напряженного состояния в межскважинном пространстве с учетом изменения прочностных свойств горных пород при изменении насыщающего флюида;
- 3) использование параметров функции ослабления, а также зависимости проницаемости от разрушения, полученных в результате лабораторных экспериментов и численного моделирования, для прогнозирования продуктивности добывающих и нагнетательных скважин, на которых проявляются геомеханические эффекты, а в дальнейшем

и для профилактики негативных геомеханических эффектов при планировании новых скважин.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

Изменение упруго-прочностных свойств горных пород под влиянием различных жидкостей изучено с позиции расчета устойчивости ствола скважины. Эксперименты [2–5], направленные на изучение влияния различных буровых растворов (на водной, нефтяной основе, с различными концентрациями солей), продемонстрировали сохранение упруго-прочностных свойств на уровне, близком к естественным, при использовании растворов на углеводородной основе.

В слабосцементированных горных породах изучение данных процессов особенно важно, поскольку исходные прочностные свойства характеризуются пониженными значениями. Данные исследования наиболее актуальны для нефтяных и газовых месторождений с риском подтягивания газовой или водонефтяного контакта к добывающей скважине, а также для объектов с нагнетательными скважинами.

Для изучения обозначенных эффектов выполнены следующие исследования:

- 1) оценка изменения упругих (модуля Юнга и коэффициента Пуассона в атмосферных и пластовых условиях) и прочностных (прочность на одноосное сжатие, дифференциальная прочность при объемном сжатии) свойств на реальных образцах слабосцементированного керна при смене насыщающего флюида;
- 2) геомеханическое моделирование на секторных моделях разрушения пород в межскважинном пространстве при изменении насыщающего флюида;
- 3) связанное гидродинамико-геомеханическое моделирование реальных участков с использованием полученных параметров функции ослабления и изменения проницаемости от пластических деформаций для моделирования работы добывающих и нагнетательных скважин, в том числе в рамках сопоставления с реальными фактами прорывов;
- 4) применение верифицированных функций ослабления и изменения про-

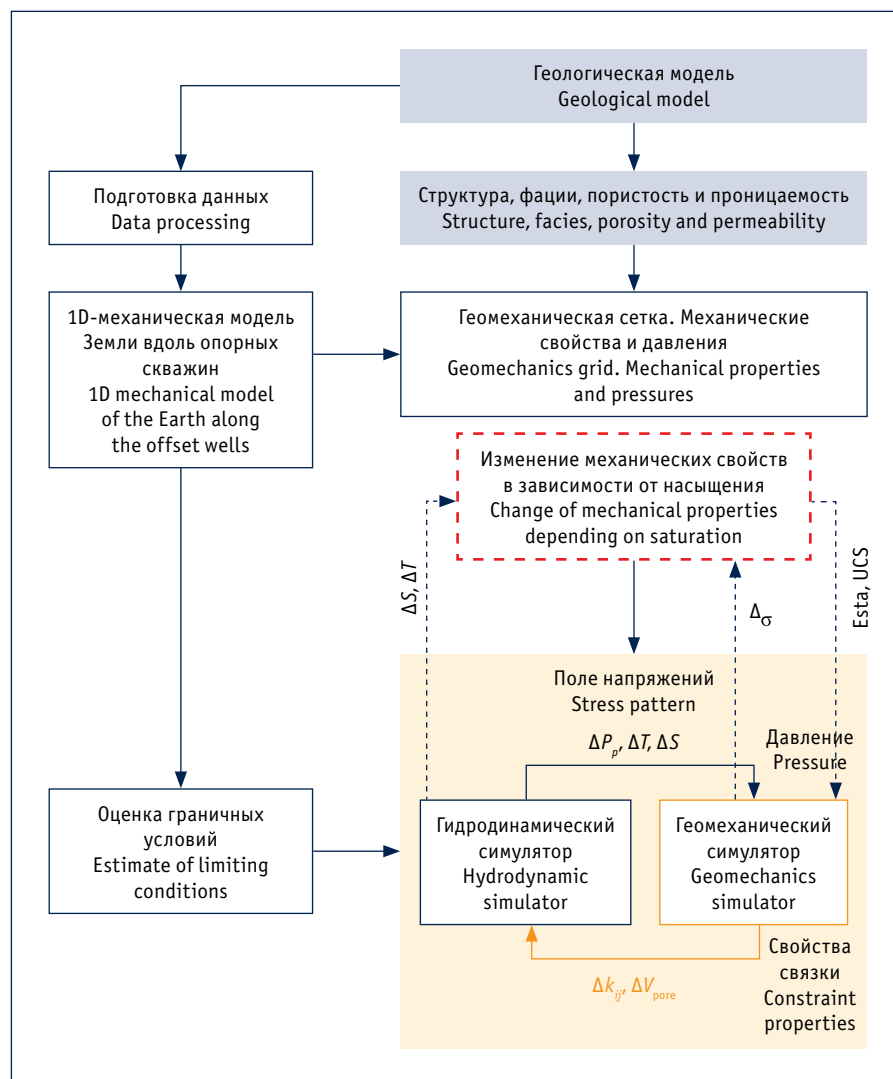


Рис. 3. Схема связанного геомеханико-гидродинамического моделирования, адаптированная к условиям слабосцементированных пород:

$\Delta S$  – изменение водонасыщенности, %;  $\Delta T$  – изменение температуры, °C;  $\Delta \sigma$  – изменение напряжений, МПа;  $\Delta P_p$  – изменение порового давления, МПа;  $\Delta k_{ij}$  – изменение проницаемости, Д;  $\Delta V_{pore}$  – изменение объема порового пространства коллектора, %

Fig. 3. Scheme of complex geomechanics-hydrodynamic modeling adapted to the conditions of slightly cemented rocks:

$\Delta S$  – water saturation change, %;  $\Delta T$  – temperature change, °C;  $\Delta \sigma$  – change of the stress, МПа;  $\Delta P_p$  – change in pore pressure, МПа;  $\Delta k_{ij}$  – permeability change, D;  $\Delta V_{pore}$  – change of the pore space volume of the reservoir, %

ницаемости при планировании работы скважин на других участках.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Было отобрано 14 образцов для проведения исследований на одноосное сжатие и 24 образца – для проведения исследований на объемное псевдотрехосное сжатие. Образцы представлены песчаниками и алевролитами. Для про-

ведения исследований определены две основные жидкости – нефть, вода. Исследования проведены по следующей схеме:

- определение динамических характеристик (скоростей пробега волн) для подтверждения сходности образцов;
- смена насыщения на воду;
- проведение тестов на одноосное сжатие или одностадийное псевдотрехосное сжатие с замером статических



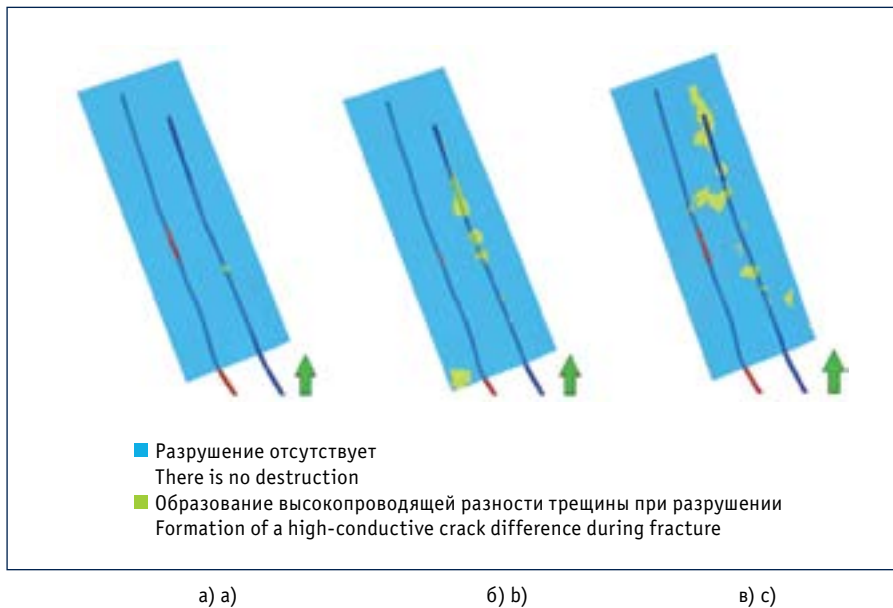


Рис. 4. Сравнение разрушаемых областей для трех случаев моделирования: а) без функции ослабления; б) с ослаблением, односторонняя связка; в) с ослаблением, двухсторонняя связка

Fig. 4. A comparison of the destroyed areas for the three cases of modeling: а) without attenuation function; б) with attenuation, unilateral constraint; в) with attenuation, bilateral constraint

и динамических упруго-прочностных величин.

На рис. 2 отражены результаты испытаний керн на одноосное сжатие при различном насыщении. Гистограммы приведены в относительных значениях, где за единицу приняты свойства естественно-насыщенных образцов. На основании полученных результатов можно заключить, что при смене насыщения с нефти на воду:

- модуль Юнга снижается в 5–10 раз;
- прочность на одноосное сжатие снижается более чем в 7–10 раз.

Результаты тестирования свидетельствуют о наличии значительного влияния насыщающего флюида на модуль Юнга и прочность на одноосное сжатие. Результаты использованы при дальнейшем связанном геомеханико-гидродинамическом моделировании в целях определения влияния изменения упруго-прочностных свойств на геомеханические процессы, приводящие к кинжальным прорывам.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Совмещенное геомеханико-гидродинамическое моделирование заключается в изучении процесса разработки

залежи с позиции расчета как фильтрационного (гидродинамического), так и напряженно-деформированного (геомеханического) состояния горной породы.

Важной задачей геомеханического моделирования в условиях слабосцементированных коллекторов является необходимость учета изменения упруго-прочностных характеристик как с изменением эффективных напряжений в пласте, так и при смене насыщающего флюида.

Процедура построения трехмерной геомеханической модели на практике несколько отличается в зависимости от используемых подходов к моделированию. Общая схема графа работ при построении 3D-геомеханической модели представлена на рис. 3.

В целом процесс построения можно разбить на четыре этапа:

- 1) построение 1D-геомеханической модели по опорным скважинам;
- 2) построение каркаса модели (3D-модели) и распространение механических свойств в межскважинном пространстве;
- 3) расчет напряженно-деформированного состояния до начала разработки;

4) расчет изменений и оценка геомеханических параметров в процессе эксплуатации скважин и разработки объекта, или 4D-двухнаправленное геомеханическое моделирование.

Основной отличительной чертой двухнаправленного связанного геомеханического моделирования является использование в связке дополнительного шага, учитывающего изменения упруго-прочностных свойств горных пород под влиянием изменения напряжений и насыщения массива горных пород различными флюидами.

На рис. 4 представлены результаты моделирования для элемента разработки, включающего нагнетательную и добывающую скважины:

- 1) в гидродинамическом симуляторе без учета разрушения породы;
  - 2) с учетом разрушения при закачке, но без передачи измененных ФЭС из геомеханики в гидродинамику (односторонняя связка);
  - 3) с учетом разрушения породы и изменением проницаемости с передачей результатов в гидродинамический симулятор (двухсторонняя связка).
- В случае двухсторонней связки в межскважинной области видно образование высокопроводящей разности (ВПР). В случае односторонней связки разрушения концентрируются в области нагнетательной скважины и не распространяются в межскважинное пространство.

### АДАПТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ К ПРОМЫСЛОВЫМ ДАННЫМ

В качестве основы для геомеханического моделирования использована гидродинамическая модель с числом ячеек 1,2 млн и размером 5×5 м. На основании имеющейся гидродинамической модели создана надстроенная геомеханическая модель в соответствии с предъявляемыми к данному типу моделирования условиями: для устранения влияния граничных эффектов модель увеличена в боковых направлениях, до поверхности и вниз для создания правильного куба с равными размерами граней. Далее с использованием имеющихся корреляций осуществлено распространение упруго-прочностных свойств

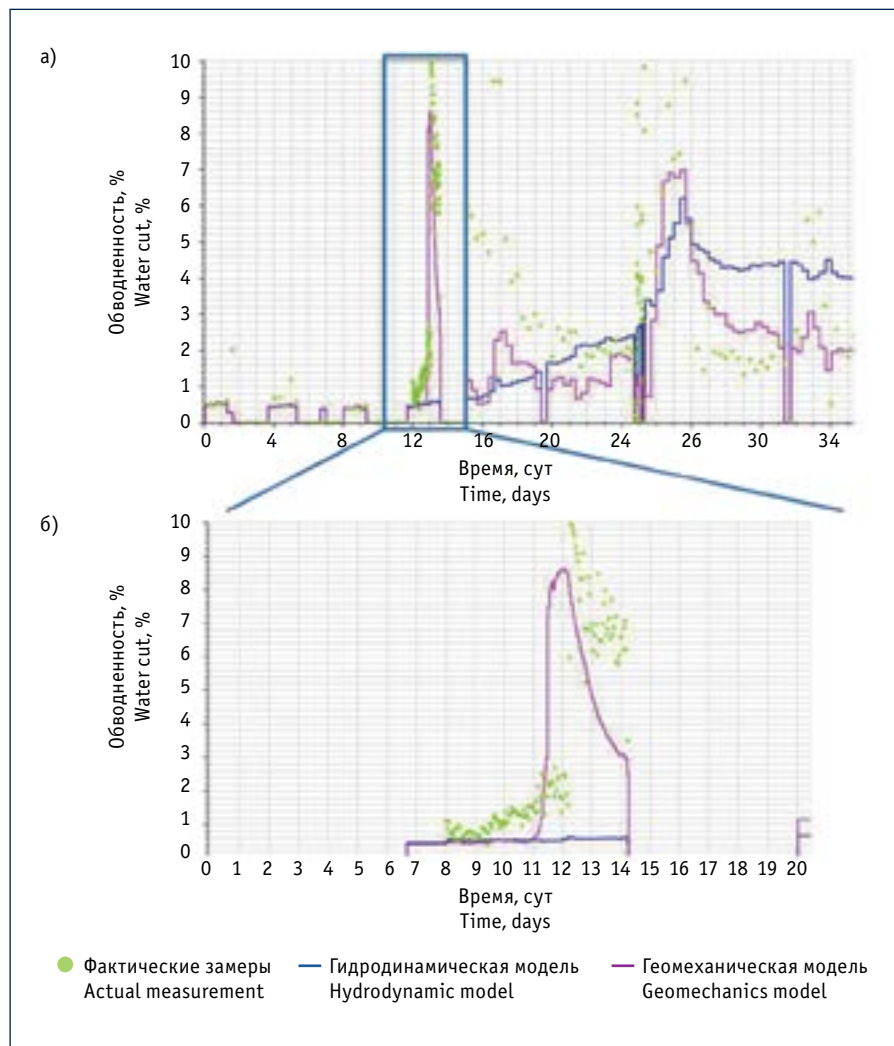


Рис. 5. Диаграммы фактической обводненности по скважине и модельных расчетов:

а) двухсторонняя связка; б) односторонняя связка

Fig. 5. Diagrams of actual well water cut and model calculations:

a) bilateral constraint; b) unilateral constraint

в межскважинное пространство, вне коллектора свойства заданы с учетом линейных функций постепенного увеличения модуля Юнга с глубиной и уменьшения коэффициента Пуассона соответственно. Куб поровых давлений создан с учетом имеющегося градиента начальных поровых/пластовых давлений в коллекторе, для оценки изменений пластовых давлений при разработке использована гидродинамическая модель.

На рис. 5 приведено сравнение фактических данных и модельных результатов. При использовании двухсторонней связки динамика обводненности по модели ближе к фактическим наблюдениям на скважине, более того,

видно, что характер обводнения и после прорыва значительно лучше описывается двухсторонней связкой. На рис. 6 представлены результаты изменения водонасыщенности и давления для гидродинамического симулятора и двухсторонней связки после образования кинжального прорыва. Место образования прорыва при моделировании соответствует результатам промысловых исследований [11].

Для повышения адаптационной и прогнозной точности моделирования необходимо учитывать специализированные исследования, замеры и методы моделирования подобных эффектов в программе планирования мероприятий разработки аналогичных объектов:

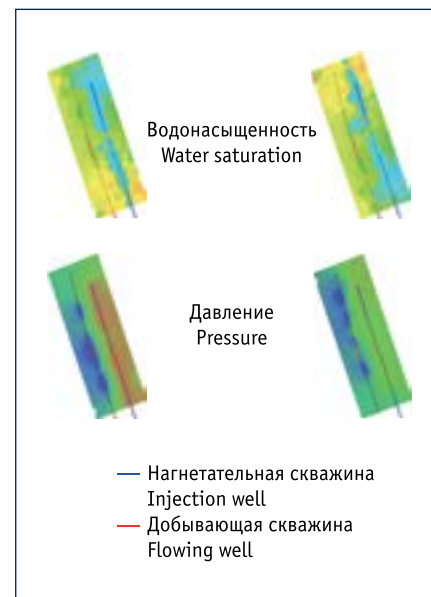


Рис. 6. Сравнение водонасыщенности и давления в момент образования кинжального прорыва (вид сверху) для гидродинамического симулятора (слева) и двухсторонней связки (справа)

Fig. 6. Comparison of water saturation and pressure at the moment of formation of the dagger breakthrough (top view) for the hydrodynamic simulator (left) and bilateral constraint (right)

- проведение лабораторных экспериментов на большей статистической выборке образцов керна материала, а также на композитных материалах (искусственных с известными свойствами) для более детального анализа эффектов ослабления прочностных свойств;
  - испытание скважин, находящихся в сходных геологических условиях, при различных режимах работы. Проведение исследований в лабораторных условиях по определению скорости образования кинжальных прорывов;
  - моделирование полученных эффектов с локальным измельчением ячеек в области наибольшего интереса и увеличением числа шагов связанного моделирования.
- Применение предложенного подхода, включающего проведение лабораторных экспериментов и численного моделирования, позволит обосновывать допустимые режимы эксплуатации скважин и минимизировать риски возникновения негативных геомеханических процессов.

При полномасштабной разработке Русского месторождения планируется бурение более 2,5 тыс. скважин, из которых 50 % составляет нагнетательный фонд. За счет оптимизации режимов работы скважин и минимизации рисков формирования кинжальных прорывов прогнозируется увеличение накопленной добычи нефти на 5 млн т.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования изменения упруго-прочностных свойств горных пород при насыщении различными флюидами, продемонстрировавшие значительное (до 10 раз) ослабление прочностных свойств в слабоконсолидированных отложениях при смене

естественного насыщения на воду. Аналогичным образом смена флюида насыщения влияет и на величину модуля Юнга.

Разработана методика изучения и расчета значимых геомеханических эффектов, включающая исследования керна, построение моделей и анализ/сравнение с фактическими наблюдениями. Прогноз образования кинжальных прорывов ввиду ослабления прочностных свойств с последующим изменением проницаемости позволяет значительно улучшить качество адаптации гидродинамической модели к реальным данным в момент образования прорыва. Полученные результаты позволяют осуществлять анализ и прогноз данных

ситуаций по моделируемому месторождению, а также определить предельно допустимые давления закачки в зависимости от конкретных условий проводки скважин и распределения ФЕС в целях минимизации геомеханических рисков (прорыв, резкое уплотнение).

В качестве перспективных для внедрения разработок на месторождениях-аналогах обозначены продуктивные интервалы ПК1 Восточно-Мессояхского, Северо-Комсомольского и Ван-Еганского месторождений высоковязкой нефти, прочностные свойства горных пород которых схожи с прочностными свойствами горных пород ПК1 Русского месторождения.

## Литература:

1. Васильев В.В., Иванцов Н.Н., Лапин К.Г. и др. Поиск новых решений для оптимизации разработки Русского месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2018. № 4. С. 46–52.
2. Карманский А.Т. Экспериментальное обоснование прочности и разрушения насыщенных осадочных горных пород: дис. ... докт. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2010. 275 с.
3. Wu B., Tan C.P., Lu N. Effect of Water-Cut on Sand Production // SPE production & operations. 2006;21(3):349–356.
4. Prahlad K.Y., Syed Sh.A., Najeeb A.a.T., Dhameen A.A. Effect of Drilling Fluid on Rock Mechanical Properties at Near-Drilling Conditions: an Implication of Fluid Design on Wellbore Stability // Materials of the Offshore Technology Conference Asia. 2016.
5. Lai B., Liang F., Zhang J., et al. Fracturing Fluid Effects on Mechanical Properties of Organic Rich Shale // Materials of the 50th U.S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium. 2016.
6. Гайдуков Л.А. Особенности эксплуатации горизонтальных скважин в неконсолидированных коллекторах с высоковязкой нефтью // Материалы Российской нефтегазовой технической конференции и выставки SPE. 2016.
7. Туленков С.В., Мачехин Д.С., Вологодский К.В. Особенности планирования, проведения и интерпретации результатов пилотных работ на Русском месторождении высоковязкой нефти (часть 1) // Нефтяное хозяйство. 2013. № 10. С. 70–73.
8. Туленков С.В., Мачехин Д.С., Вологодский К.В. Особенности планирования, проведения и интерпретации результатов пилотных работ на Русском месторождении высоковязкой нефти (часть 2) // Нефтяное хозяйство. 2013. № 11. С. 40–43.
9. Дулов В.О., Дорфман М.Б. Адаптация кинжальных прорывов воды в условиях развития вормхола в пласте // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2013. № 4. С. 30–33.
10. Frederiksen J., Hasbo R., Green K., et al. Rocks Matter: Ground Truth in Geomechanics Cook // Oilfield Review. 2007. Vol. 19. No. 3. P. 36–55.
11. Арсланов И.П. Опыт ограничения водопитока в условиях высоковязких нефтей // Инженерная практика. 2016. № 8 [Электронный источник]. Режим доступа: <https://glavteh.ru/rip-овп-высоковязкая-нефть/> (дата обращения: 25.10.2019).

## References:

1. Vasilyev V.V., Ivantsov N.N., Lapin K.G., et al. The Search for New Solutions for Russkoye Field Development Optimization. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy = Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2018;(4):46–52. (In Russ.)
2. Karmansky A.T. Experimental Substantiation of the Strength and Destruction of Saturated Sedimentary Rocks. Ph.D. thesis in Engineering Science. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg Mining University; 2010. (In Russ.)
3. Wu B., Tan C.P., Lu N. Effect of Water-Cut on Sand Production. *SPE production & operations*. 2006;21(3):349–356.
4. Prahlad K.Y., Syed Sh.A., Najeeb A.a.T., Dhameen A.A. Effect of Drilling Fluid on Rock Mechanical Properties at Near-Drilling Conditions: an Implication of Fluid Design on Wellbore Stability. *Materials of the Offshore Technology Conference Asia*; 2016.
5. Lai B., Liang F., Zhang J., et al. Fracturing Fluid Effects on Mechanical Properties of Organic Rich Shale. *Materials of the 50th U.S. Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium*; 2016.
6. Gaidukov L. Features of Horizontal Well Production in Unconsolidated Sands with High Viscosity Oil. *Materials of the SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition*; 2016. (In Russ.)
7. Tulenkov S.V., Machekhin D.S., Vologodsky K.V., et al. Planning, Execution and Interpretation of Results of Pilot Operations on Russkoye Heavy Oil Field (part 1). *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 2013;(10):70–73. (In Russ.)
8. Tulenkov S.V., Machekhin D.S., Vologodsky K.V., et al. Planning, Execution and Interpretation of Results of Pilot Operations on Russkoye Heavy Oil Field (part 2). *Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry*. 2013;(11):40–43. (In Russ.)
9. Dulov V.O., Dorfman M.B. History Matching of Water Breakthrough in Conditions of Wormholes Presence in a Reservoir. *Oborudovaniye i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa = Equipment and Technologies for Oil and Gas Industry*. 2013;(4):30–33. (In Russ.)
10. Frederiksen J., Hasbo R., Green K., et al. Rocks Matter: Ground Truth in Geomechanics Cook. *Oilfield Review*. 2007;19(3):36–55.
11. Arslanov I.R. The Experience of Limiting Water Inflow in Conditions of High Viscosity Oils. *Inzhenernaya praktika = Engineering Practice*. 2016;(8). Weblog. Available from: <https://glavteh.ru/rip-овп-высоковязкая-нефть/> [Accessed 25th October 2019]. (In Russ.)