



УДК 622.276.04(261.24)

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2020

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШЕЛЬФА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ)

Н.А. Лядова, П.И. Клыков, А.А. Предеин

Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми (614015, Россия, г. Пермь, ул. Пермская, 3а)

NUMERICAL SOLUTION OF GEOMECHANICS PROBLEMS (THE CASE OF THE BALTIC SEA OFFSHORE FIELD)

Nadezhda A. Liadova, Pavel I. Klykov, Andrei A. Predein

PermNIPIneft branch of LUKOIL-Engineering LLC in Perm (3a Permskaya st., Perm, 614015, Russian Federation)

Получена / Received: 17.02.2020. Принята / Accepted: 15.04.2020. Опубликовано / Published: 15.06.2020

Ключевые слова:

геомеханика, расчет напряженного состояния, метод конечных элементов, устойчивость ствола скважины, поровое давление, давление обрушения пород, давление поглощения, давление гидроразрыва, горизонтальное бурение, шельф балтийского моря.

Рассматриваются результаты геомеханического моделирования для решения задач в области обеспечения безаварийной проводки скважин. Необходимо построить численную 3D-геомеханическую модель для исследуемого месторождения с последующим расчетом устойчивости эксплуатационных скважин. Район работ расположен на шельфе Балтийского моря. Помимо краткой характеристики месторождения приведены результаты сбора и аудита исходных данных для моделирования. Рассмотрена методика одномерного геомеханического моделирования на опорных скважинах, в том числе определение динамических и статических упругопрочностных характеристик пород, расчет порового давления, вертикального и горизонтального напряжений. Получены и проанализированы расчеты устойчивости скважин по результатам 1D-геомеханического моделирования. Далее анализируются результаты трехмерного геомеханического моделирования: определение границ и построение структурного каркаса модели, тестирование геометрии, наполнение сетки механическими свойствами, а также расчет полного тензора напряжений методом конечных элементов (МКЭ). Проведено сопоставление результатов 1D- и 3D-моделирования. Таким образом, построена численная 3D-геомеханическая модель для исследуемого месторождения. Следующим этапом работ был расчет устойчивости стволов скважин для планируемых скважин. Дополнительно рассчитаны кубы градиентов давления поглощения бурового раствора, давления обрушения и гидроразрыва пород при различных зенитных углах и азимутах бурения. Разработаны рекомендации для безаварийного строительства скважин на исследуемом месторождении, в том числе по сопровождению и обновлению геомеханической модели в режиме реального времени в процессе бурения скважин. Полученные результаты и методика выполнения работ могут быть использованы при проектировании и строительстве скважин на других месторождениях с учетом региональных особенностей.

Key words:

geomechanics, stress calculation, finite element method, wellbore stability, pore pressure, rock caving pressure, absorption pressure, hydraulic fracturing pressure, horizontal drilling, Baltic Sea offshore.

The results of geomechanical simulation for problem-solving in the provision of accident-free well-drilling are considered. There is a need to develop a numerical 3D geomechanical model for the field under study with the subsequent stability calculation of producing wells. The operations area is located offshore in the Baltic Sea. Further to a brief description of the field, the results of collection and audit of initial data for the simulation are presented. A method of one-dimensional geomechanical simulation on reference wells was studied, including determination of dynamic and static elastic strength characteristics of rocks, calculation of pore pressure, and vertical and horizontal stress. Well stability calculations based on the 1D geomechanical simulation results were obtained and analysed. Next, the results of three-dimensional geomechanical simulation were analysed: determination of limits and development of the model's structural framework, geometry testing, filling the grid with mechanical properties, as well as calculation of the total stress tensor by finite element method (FEM). The results of 1D and 3D modeling were compared. From there, a numerical 3D geomechanical model for the field under study was developed. The next step was to calculate wellbore stability for projected wells. Additionally, volumes of pressure gradients of drilling mud absorption, rock caving and hydraulic fracturing at various inclination angles and drilling directions were calculated. Recommendations have been developed for accident-free well construction in the field under study, including real-time support and update of the geomechanical model during drilling. The results obtained and the operations method can be used in the design and construction of wells in other fields subject to regional specifics.

Лядова Надежда Алексеевна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заместитель генерального директора – директор (тел.: +007 342 233 67 81, e-mail: nadezhda.lyadova@pnn.lukoil.com).

Клыков Павел Игоревич – главный специалист отдела концептуального моделирования скважин (тел.: +007 342 233 67 81, e-mail: Pavel.Klykov@pnn.lukoil.com). Контактное лицо для переписки.

Предеин Андрей Александрович – начальник отдела концептуального моделирования скважин (тел.: +007 342 233 62 65, e-mail: Andrej.Predein@pnn.lukoil.com).

Nadezhda A. Liadova (Scopus ID 36712086700) – PhD in Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Deputy General Director – Director (tel.: +007 342 233 67 81, e-mail: nadezhda.lyadova@pnn.lukoil.com).

Pavel I. Klykov (Scopus ID 57142417500) – Chief Specialist of the Conceptual well Modeling Department (tel.: +007 342 233 67 81, e-mail: Pavel.Klykov@pnn.lukoil.com). The contact person for correspondence.

Andrei A. Predein (Scopus ID 35791342300) – Head of the Conceptual Well Modeling Department (tel.: +007 342 233 62 65, e-mail: Andrej.Predein@pnn.lukoil.com).

Введение

Одной из особенностей морского бурения являются большие капитальные затраты на строительство скважин в сравнении с бурением на суше. В свою очередь, опыт ведения буровых работ на шельфе Балтийского моря говорит о наличии осложнений различного характера (осыпи и обвалы стенок скважин, поглощения бурового раствора и др.). При этом время и материалы, затраченные на ликвидацию осложнений, значительно увеличивают и без того высокие экономические затраты. Мировая практика свидетельствует о том, что одним из обязательных условий для успешного и безаварийного строительства горизонтальных скважин в сложных горно-геологических условиях является наличие 3D-геомеханической модели как основы для разработки проектных решения для эксплуатационного бурения [1–14]. В статье представлена методика выполнения и результаты работ по построению 3D-геомеханической модели одного из месторождений шельфа Балтийского моря. Исследование основано на принципах нефтегазовой геомеханики [15–19].

Исходные данные

Район работ расположен на шельфе Балтийского моря. Принадлежность к тектонической области – сложно построенное антиклинальное поднятие в центральной части Западно-Куршского вала Куршской впадины. Представляет собой куполовидную складку субмеридиального простирания, осложненную с востока разрывным нарушением амплитудой 20–50 м. Продуктивная часть разреза представлена терригенными отложениями кембрийской системы (Є). На месторождении пробурены три поисково-оценочные скважины. Исходная информация для построения 3D-геомеханической модели следующая:

- данные геоинформационной системы (ГИС): промежуточные записи ГИС, сводный планшет и результаты интерпретации;
- данные по бурению скважин: отчеты по бурению, суточные рапорты, итоговые отчеты, результаты опробования и испытаний;
- сейсмический материал: отчеты, карты структурных горизонтов в глубинном и временном домене, сейсмический куб амплитуд, скоростей, а также результаты инверсии;
- профили проектных скважин, координаты проектных точек;
- геологическая модель месторождения: разломы, структурные поверхности, кубы свойств (пористость, проницаемость и т.д.).

Необходимо отметить, что модель выполнена в пределах продуктивной части. Вышележащие породы / интервалы не моделировались, в рамках

геомеханического моделирования данные интервалы будут достроены с использованием специализированного программного обеспечения.

Осуществлен качественный и количественный анализ вышеперечисленных параметров. В интервалах отсутствия данных ГИС рассчитаны синтетические кривые. Исходные данные подготовлены для построения геомеханической модели.

В опорных скважинах произведен обширный отбор керн в продуктивной части разреза. Отбор в вышележащих интервалах не производился. Программа предусматривала проведение акустических исследований образцов породы в атмосферных и пластовых условиях. Исследования на определение упругопрочностных свойств пород разрушающими методами не производились. Отсутствие полного комплекса исследований керн создает определенность при расчете статических упругопрочностных свойств.

Построение 1D-геомеханической модели

Модель распространения по разрезу упругопрочностных свойств пород является основной входной информацией для расчета устойчивости стенок ствола скважины. Модель механических свойств представляет собой численное представление горных и пластовых давлений, тектонических напряжений, механических и прочностных свойств пород, включая их деформационные параметры. Расчет основывается на данных геофизических исследований, результатах тестирования керн на механические свойства, с учетом геологической информации и калибруется с помощью тестов и замеров на скважинах и данных буровых событий.

Динамические упругопрочностные характеристики пород

К динамическим упругопрочностным характеристикам породы относятся модули Юнга, объемного сжатия, сдвига и коэффициент Пуассона, которые определяют реакцию породы на кратковременные нагрузки, такие как прохождение акустических волн. Основными данными для расчета динамических характеристик являются скорости продольной и поперечной волн, а также плотность пород. Эти параметры среды связаны с упругими свойствами следующим образом.

Динамический модуль Юнга рассчитывается следующим образом:

$$E_{dynamic} = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)},$$

где V_p , V_s – скорости продольной и поперечной волны соответственно, м/с.

Динамический коэффициент Пуассона:

$$\nu_{dynamic} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)},$$

где V_p , V_s – скорости продольной и поперечной волны, соответственно, м/с.

Достоинством определения модулей упругости по данным каротажа является непрерывность профиля этих параметров по глубине и высокая разрешающая способность (для опорных скважин доступен шаг 0,2–0,4 м).

В опорных скважинах осуществлена запись акустического каротажа. Кривые акустического каротажа были откалиброваны на фактические замеры «скорость / медленность», полученные на керновом материале в пластовых условиях. Недостающий каротаж поперечной волны восстановлен на основании многовариантных регрессий.

Статические упругопрочностные характеристики пород

Статические упругопрочностные свойства – это свойства породы, которые определяют реакцию самой породы при высокоамплитудных, длительных и необратимых деформациях, происходящих в том числе и при нарушении устойчивости стенок скважины (снятие нагрузки за счет выбуривания породы). Для большинства пород статические упругопрочностные свойства значительно отличаются от динамических.

К статическим упругопрочностным свойствам относятся статический модуль Юнга (Est), статический коэффициент Пуассона ($PRst$), предел прочности на сжатие (UCS), предел прочности на разрыв (TS), угол внутреннего трения (FA) и когезия (CS).

Для перехода от динамических упругопрочностных свойств к статическим используются корреляции (уравнения связи), полученные при интерпретации результатов тестирования керна. В данном случае применялись корреляционные зависимости, полученные на соседних месторождениях-аналогах, откалиброванные на фактические замеры.

Расчет напряжений

Вертикальное напряжение среды определяется весом вышележащих пород и толщи воды. Вес высчитывается из произведения плотности породы/воды и ускорения свободного падения

$$OBG(z) = g \int_0^z \rho dz,$$

где $OBG(z)$ – вертикальное напряжение, Па; ρ – удельная плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; z – глубина по вертикали, м.

Для расчета минимального и максимального горизонтального напряжения использованы классические формулы пороупругой модели [15]:

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha\sigma_p) + \alpha\sigma_p + \frac{Est}{1-\nu^2}\epsilon_h + \frac{\nu Est}{1-\nu^2}\epsilon_H,$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu}(\sigma_v - \alpha\sigma_p) + \alpha\sigma_p + \frac{Est}{1-\nu^2}\epsilon_H + \frac{\nu Est}{1-\nu^2}\epsilon_h,$$

где Est – статический модуль Юнга, Па; ν – статический коэффициент Пуассона, ед.; ϵ_H , ϵ_h – деформации в направлении максимального и минимального горизонтальных напряжений соответственно, ед.; σ_v – вертикальное напряжение (вес вышележащих пород), Па; σ_p – минимальное эффективное горизонтальное напряжение, Па; α – константа Био.

Расчет минимального горизонтального напряжения в скважинах проведен с использованием данных акустического каротажа и рассчитанных профилей статических упругопрочностных свойств, пластового давления и вертикального напряжения.

Для калибровки рассчитанных профилей минимального горизонтального напряжения были использованы результаты проведенных LOT и ELOT (тестов на гидроразрыв породы).

Моделирование устойчивости стенок скважины

Обрушение стенок ствола скважины может быть вызвано сдвиговыми или разрывными разрушениями пород за счет дисбаланса напряжений, концентрирующихся вокруг скважины.

В ходе расчетов устойчивости выполняется расчет концентрации напряжений на стенке скважины (радиальное, тангенциальное / кольцевое и осевое) и проверяется выполнение условия разрушения породы (использовался критерий Мора – Кулона) [20–22].

Для наклонной скважины распределение напряжений на стенке будет зависеть не только от величины главных напряжений, но и от траектории скважины относительно направления главных напряжений.

Результаты расчета устойчивости ствола скважины представляют собой сводный график градиента пластового давления, градиентов обрушения, поглощения раствора и гидроразрыва пласта.

Построение 3D-геомеханической модели

В качестве границ геомеханической модели определен полигон, который включает в себя разрывные нарушения, разведочные скважины и планируемые местоположения размещения эксплуатационных скважин. Разработан алгоритм построения 3D-геомеханической модели. На рис. 1 представлена блок-диаграмма процессов, выполняемых при построении модели для исследуемого месторождения.

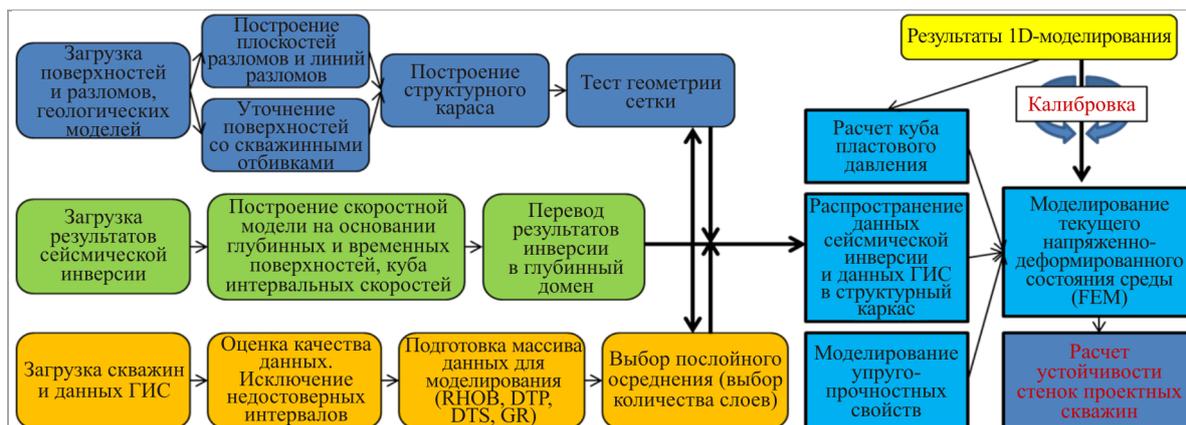


Рис. 1 Блок-диаграмма процесса построения 3D-геомеханической модели

В начале построения модели параллельно проходили три процесса: 1) анализ каротажных скважинных данных и подготовка их к внесению в структурный каркас для последующего распространения в межскважинное пространство (выбор послойного представления разреза); 2) подготовка сейсмических данных для их использования при распространении скважинных данных в межскважинном пространстве; 3) корректировка имеющихся структурных поверхностей, создание дополнительных поверхностей и формирование поверхностей из переданных линий разломов для создания корректного структурного каркаса.

Далее происходит увязка в один процесс результатов приведенных параллельных процессов, формируется структурный каркас, полностью наполненный данными, необходимыми для расчета механических свойств, – плотность, скорости акустических продольных и поперечных волн. Производится расчет кубов упругопрочностных свойств внутри структурного каркаса и оценка качества с полученными данными по 1D-геомеханическому моделированию.

Методом конечных элементов с заданием граничных условий выполняется расчет полного тензора напряжений, деформаций в каждой ячейке 3D-геомеханической модели. Проверяется сходимость результатов моделирования с данными 1D-геомеханических расчетов по опорным скважинам. В последующем этапе результаты численного моделирования использовались для расчетов устойчивости стволов эксплуатационных скважин. Примененный для моделирования метод основан на нагружении модели вертикальным напряжением (рассчитывается исходя из веса каждой вышележащей ячейки) и региональными горизонтальными напряжениями. Каждая ячейка нагружаемой модели содержит механические свойства (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, прочность на сжатие и растяжение, угол внутреннего трения), а также имеет свое значение плотности. При этом ячейки модели жестко связаны, и деформация

каждой из них рассчитывается исходя не только из ее упругопрочностных свойств, но и из свойств окружающих ячеек. Таким образом, модель является не набором отдельных независимых элементов, а представляет собой единую систему.

Построение 3D-модели напряженного состояния включает в себя четыре основных этапа.

Построение структурного каркаса (сетки)

Построение структурной модели практически полностью идентично построению аналогичной модели для подсчета запасов или гидродинамического моделирования. Единственной отличительной особенностью структурной модели для геомеханического моделирования является необходимое требование ее высокого качества. Это означает, что сетка для геомеханического моделирования не может содержать «вывернутых» ячеек (ячеек с отрицательным объемом), а также все ячейки должны быть выпуклыми.

При построении структурного каркаса проведена увязка структурных поверхностей с данными отбиток на скважинах с последующим контролем по данным ГИС.

По завершению построения структурных карт оценено качество разломов. Из геологической модели разлом расположен в области построения 3D-геомеханической модели, однако он прослежен только в интервале продуктивного горизонта. На основании сейсмической информации данный разлом был достроен выше вплоть до его затухания. Имплементация разлома в модель производится на этапе задания свойств. Прослеживаются ячейки, имеющие пересечение с разломом, и далее ячейкам задаются свойства самого разлома. Фактически таким образом моделируется область разрушения вокруг разлома, которая также учитывается во время проведения расчетов.

Таким образом, формируется структурный каркас с размерностью ячеек по горизонтали

100×100 м с числом слоев 2203 штуки. Число ячеек около 9 млн штук.

Тестирование геометрии каркаса

Качество структурной сетки весьма значимо для геомеханического моделирования, так как проблемы с геометрией ячеек при численном моделировании вызывают появление неестественных зон концентрации напряжений. Для проведения этого теста земная поверхность и/или уровень моря модели задавались ровной плоскостью, в каждой ячейке задаются одинаковые механические свойства и деформации. Ожидается, что заданные деформации, приложенные к границам модели, будут переданы без искажений во внутренние ячейки модели.

После проведения расчетов по тестированию геометрии проверялись следующие условия:

- в модели без учета вмещающей среды отсутствуют растягивающие напряжения;
- значения рассчитанных деформаций внутри модели также остаются в пределах заданных;
- отсутствуют вращения векторов горизонтальных напряжений, то есть рассчитанные направления должны соответствовать заданным, в данном случае минимальное напряжение имеет направление 140–320° и максимальное горизонтальное напряжение – 50–230°.

Результаты теста по проверки геометрии сетки показали отсутствие влияния используемой сетки на формируемые напряжения. Полученные значения деформаций по площади и по рассчитанному кубу не отличаются от заданных, отсутствуют растягивающие напряжения в модели. Направление минимального горизонтального напряжения сохраняется внутри модели по результатам численных расчетов в соответствии с граничными условиями.

Наполнение сетки механическими свойствами

Механические свойства породы могут быть распространены подобно любым другим петрофизическим параметрам среды методами геостатистики по данным геологической модели с использованием данных каротажа или напрямую рассчитаны из результатов инверсии данных сейсморазведки. При этом можно распространять как напрямую упругопрочностные параметры, так и петрофизические параметры, из которых упругопрочностные параметры рассчитываются. В связи с тем что в районе моделирования имеется ограниченное количество скважин с полным комплексом оригинальных данных ГИС для расчета геомеханических свойств, именно исходные данные

(DTP, DTS, RHOV, GR) были определены как базовые для распространения в межскважинном пространстве.

Для распространения свойств в межскважинном пространстве необходимо использовать сейсмические данные для учета латеральных изменений среды. Для этих целей применялись сейсмические кубы, в частности, исследуемую площадь покрывали амплитудный куб в глубинном домене, куб интервальных скоростей в глубинном домене, кубы P -, S -импеданса и отношения V_p/V_s во временном домене. В качестве подложки при распространении свойств использовался куб интервальных скоростей в глубинном домене и P -импеданса, переведенный из временного в глубинный домен с использованием пар поверхностей «глубина / время».

Таким образом, для моделирования механических свойств в межскважинном пространстве были решены следующие задачи:

- оценено качество сведений ГИС для масштабирования данных в структурную сетку (выполнено в рамках 1D-моделирования);
- построена скоростная модель и осуществлен перевод данных сейсмической инверсии в глубинный домен;
- проведено масштабирование данных сейсмической инверсии в структурную сетку;
- выполнено моделирование данных плотности, гамма-каротажа и интервального времени пробега продольной и поперечной волн в межскважинном пространстве методами геостатистики;

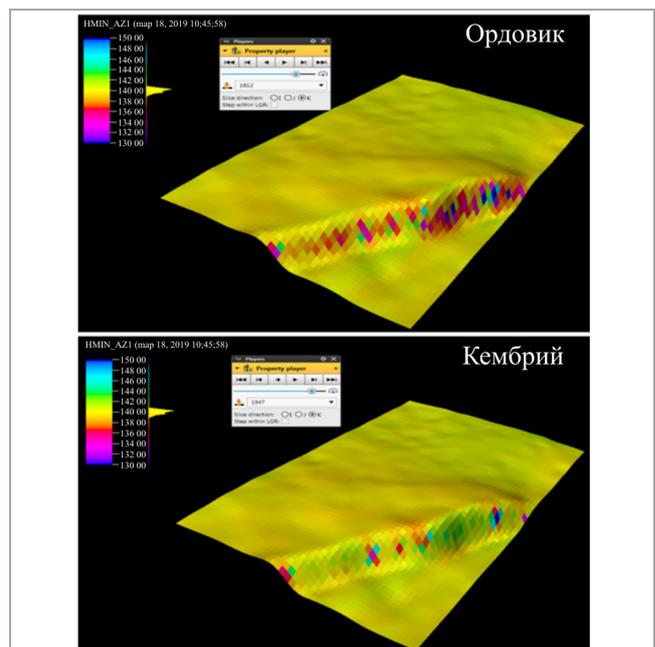


Рис. 2. Ориентация минимального горизонтального напряжения

- рассчитаны кубы упругопрочностных параметров на основании зависимостей, определенных на этапе одномерного геомеханического моделирования.

Расчет напряжений методом конечных элементов

Напряжения, в отличие от механических свойств породы, представляют собой характеристику всей геологической среды как единой системы. В такой системе поведение одного элемента определяется не только его свойствами, но и зависит от всей вмещающей среды и действующих на нее нагрузок. В связи с этим напряжения не могут быть рассчитаны с использованием методов геостатистики, и для их моделирования необходимо применение других математических алгоритмов. В данном проекте для расчета напряженного состояния был использован метод конечных элементов [23–30]. Используя кубы упругопрочностных свойств: модуля Юнга, коэффициента Пуассона, угла внутреннего трения, прочностных на одноосное сжатие и растяжение, рассчитанных по корреляциям, определенным из кубов плотности, скоростей пробега продольной и поперечной волн, полученных методами геостатистики из скважинных данных, – построена 3D-геомеханическая модель.

В результате расчета методом конечных элементов для каждой ячейки были определены все компоненты действующего на нее тензора напряжений. Пример рассчитанного направления минимального горизонтального напряжений для одного из слоев ячеек внутри пласта Ордовика и Кембрия приведен на рис. 2. Направление напряжений выдержано по всей площади и составляет $\sim 140^\circ$ для минимального горизонтального напряжения. Вращение напряжений приурочено к приразломной части.

Применение результатов геомеханического моделирования

На основании построенной 3D-модели (механических свойств, куба пластовых давлений, а также результатов расчета напряженного состояния среды) произведен расчет кубов градиента поглощений, градиента гидроразрыва и градиента обрушений для различных азимутов и углов вскрытия каждого слоя модели. На рис. 3 представлено распределение средних значений градиента обрушения в интервале Ордовика в зависимости от угла и азимута вскрытия. Далее на основании геомеханического моделирования оптимизированы траектория и конструкция скважин, а также выполнен расчет устойчивости стволов

проектных эксплуатационных скважин. На рис. 4 приведен пример такого расчета для одной из скважин исследуемого месторождения. Разработаны рекомендации по рецептуре и параметрам бурового раствора, что, в свою очередь, оказывает решающее влияние на безаварийное строительство скважин [31–38]. В дальнейшем геомеханическая модель может быть использована для решения задач эффективной разработки месторождения, в том числе планирования гидроразрыва пласта [39–46].

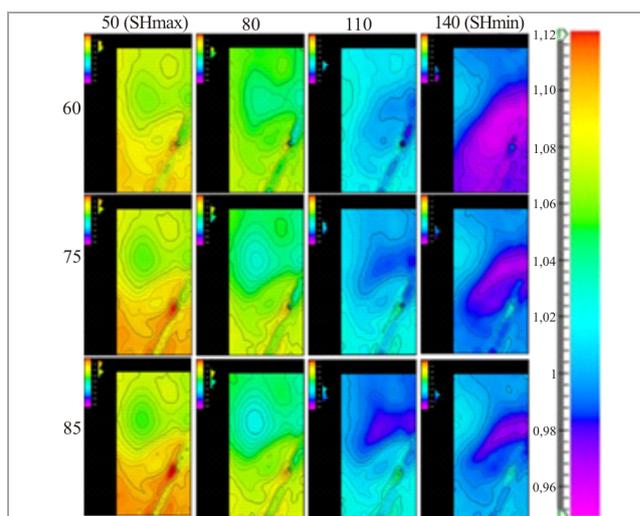


Рис. 3. Распределение средних значений градиента обрушения в интервале Ордовика в зависимости от угла и азимута вскрытия

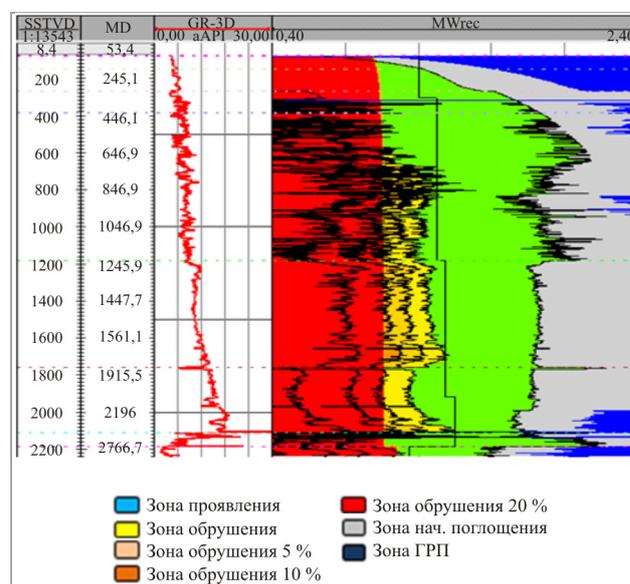


Рис. 4. Расчет устойчивости стенок скважины

Заключение

Рассмотренные в данной статье методики позволили разработать численную трехмерную геомеханическую модель одного из месторождений

шельфа Балтийского моря. На основании 3D-модели осуществлены проектные решения на строительство эксплуатационных скважин. Выполнен расчет устойчивости для плановых траекторий. Определены градиенты порового давления, давления обрушения, поглощения и гидроразрыва, установлено безопасное окно плотности бурового раствора для всех скважин. Скорректирована траектория и конструкция скважин для обеспечения наиболее безопасных условий бурения и заканчивания. Разработаны требования к параметрам бурового раствора для обеспечения стабильности ствола скважины. Перечисленные результаты достигнуты благодаря использованию принципов геомеханического моделирования.

Библиографический список

1. Fischer K., Henk A. Generating and Calibrating 3D Geomechanical Reservoir Models // 75th EAGE conference & exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013. – 2013. – № 75. – P. 348.
2. Byoung Yoon Park, Sobolik R. Steven, Courtney G. Herrick geomechanical model calibration using field measurements for a petroleum reserve // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2018. – № 3. – P. 925–943.
3. Henk A., Fischer K., Winter I. Prediction of tectonic stresses and fracture networks with geomechanical reservoir models // Berichte – Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. Forschungsbericht. – 2014. – № 725. – P. 205.
4. Создание 4D-геомеханической модели для определения влияния разработки месторождения на геометрию трещин ГРП / В. Павлов, Е. Корельский, К. Бутула, А. Клубин, Д. Максимов, А. Зиновьев, Д. Задворнов, О. Грачев // SPE 1822020-RU. – 2016.
5. Построение трехмерной геомеханической модели месторождения на Сахалинском шельфе с целью планирования многостадийного гидроразрыва пласта / М.Р. Ганаева, С.С. Суходанова, Р.Р. Халиулин, Р.Р. Халиулин // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 108–111.
6. Разработка геолого-геомеханической модели турней-фаменского объекта Гагаринского месторождения / Ю.А. Кашников, Д.В. Шустов, С.Ю. Якимов, С.Г. Ашихмин, В.Л. Воеводкин // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 2. – С. 50–54.
7. Предеин А.А., Клыков П.И. Построение геомеханической модели и расчет устойчивости ствола скважины на примере одного из месторождений Пермского края // Бурение и нефть. – 2016. – № 4.
8. Geomechanical wellbore stability analysis for the reservoir section in J-NC186 oil field / Т.М. Albukhari, G.K. Beshish, M.M. Abouzbeda, A.Madi // Tunisian Society for Rock Mechanics. – 2018. – P. 179–193.
9. Ашихмин С.Г., Кухтинский А.Э. Моделирование напряженно-деформированного состояния необсаженной скважины // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 99–104.
10. Геомеханическое моделирование как неотъемлемая часть комплексного подхода к строительству скважин в сложных горно-геологических условиях / О.В. Гаршина, А.А. Предеин, П.И. Клыков, П.А. Хвоцин, И.Л. Некрасова // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 5. – С. 28–33.
11. Расчет устойчивости ствола скважины для предотвращения осложнений в бурении / С.В. Лукин, С.В. Есипов, В.В. Жуков, Ю.В. Овчаренко, А.Ю. Хомутов, Т.Н. Шевчук, И.В. Сусялков // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 70–73.
12. Развитие геомеханического моделирования в России / В.А. Павлов, М.А. Лушев, Е.П. Корельский, П.Г. Ласкин // Технологии нефти и газа. – 2017. – № 6. – С. 3–9.
13. Разработка корпоративного геомеханического симулятора для моделирования устойчивости ствола скважины / А.Р. Давлетова, В.В. Киреев, С.Р. Кнутава, А.В. Пестриков, А.И. Федоров // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 6. – С. 88–92.
14. Митяев М.Ю., Белозеров Б.В., Лукин С.В. Расчет направлений осей максимальных напряжений по данным гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 70–71.
15. Zoback M. Reservoir geomechanics. – Cambridge University Press, 2007. – 505 p.
16. Petroleum related rock mechanics / E. Fjaer, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen, R. Risness // Developments in Petroleum Science. – Vol. 33. – 346 p.
17. Hoek E., Brown E.T. Underground excavations in rock. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980. – 527 p.
18. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М.: Недра, 2007. – 467 с.
19. Reservoir geomechanics in carbonates / O. Hamid [et al.] // SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference / Society of Petroleum Engineers. – Manama, 2017.
20. Coulomb yield criterion in rock plastic mechanics / Wang Hongcai, Zhao Weihua, Sun Dongsheng, Guo Binbin Mohr // Acta Geophysica Sinica. – 2012. – № 12. – P. 4231–4238.
21. Al-Ajml A.M. Zimmerman R.W. Stability analysis of vertical boreholes using the mogi-coulomb failure criterion // Int. J. Rock Mechanics & Mining Science. – 2006. – Vol. 43. – P. 1200–1211.
22. Ewy R.T. Wellbore stability predictions by use of a modified Lade criterion // SPE 56862-PA. – 1999. – P. 85–91.

23. Гладышев С.В., Попов С.Н., Шустов Д.В. Прогноз напряженно-деформированного состояния горного массива методом конечных элементов при разработке Шершневого месторождения нефти на основе трехмерной геологической модели // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2008. – № 3. – С. 44–54.
24. Шустов Д.В., Ермашов А.О. Прогноз сдвижений и деформаций горного массива Тишинского месторождения методами конечных и дискретных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 5. – С. 89–96.
25. Сашурин А.Д., Балек А.Е. Совершенствование методики натурных замеров напряженно-деформированного состояния больших участков горного массива // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 105–120.
26. Оценка напряженно-деформированного состояния нетронутого массива на месторождении Жаман-Айбат / В.А. Асанов, В.Н. Токсаров, Н.А. Самоделькина, Н.Л. Бельтюков, А.А. Ударцев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 12. – С. 56–66. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.7
27. Некрасов С.В., Андрейко С.С. Вычислительная схема оценки напряженно-деформированного состояния кусочно-однородной трехмерной упругой среды на основе непрямого метода граничных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 16. – С. 86–97. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.16.10
28. Zhou Bo, Sun Bo, Xue Shifeng extended finite element method for fracture mechanics of rock // Journal of China University of Petroleum, Edition of Natural Science. – 2016. – № 4. – P. 121–126.
29. Discussion on the fracture of layered rock mass based on the finite element method / Xu Ke, Dai Junsheng, Fu Xiaolong, Ren Qiqiang, Liu Congning, Zhao Yun // Journal of Geomechanics. – 2015. – № 3. – P. 330–340.
30. Pryhorovska T.O., Chaplinskiy S.S., Kudriavtsev I.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits // Petroleum Exploration and Development. – 2015. – № 6. – P. 812–816.
31. Середин В.В., Паршина Т.Ю. Изменение масс связанной воды в глинах при сжатии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16, №1. – С. 23–32. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.3
32. Изменение состава и структуры терригенных пород под воздействием буровых растворов / И.Л. Некрасова, К.П. Казымов, А.А. Предеин, П.А. Хвошин, П.И. Клыков, О.В. Гаршина, Б.М. Осовецкий, Н.Е. Молоштанова, В.М. Жданов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 6. – С. 37–43.
33. Хуббатов А.А., Гайдаров А.М., Норов А.Д., Гайдаров М.М-Р Ингибирующие буровые растворы и устойчивость глинистых пород // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 5. – С. 64–67.
34. Природа сужения ствола скважин при вскрытии солей большой толщины / С.Н. Горонович, Т.В. Кожина, А.Н. Олейников, Д.Г. Бельский // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 1. – С. 41–43.
35. Николаев Н.И., Леушева Е.Л. Повышение эффективности бурения твердых горных пород // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 3. – С. 68–71.
36. Study and application of oil-based drilling fluids for horizontal drilling / Wu Bin, Wang Jian, Shu Fuchang, Xiang Xingjin, Nie Mingshun // Journal of Oil and Gas Technology. – 2014. – № 2. – P. 101–104.
37. Caenn Ryen The history of drilling fluids, classified by date ranges // Oil-Industry History. – 2018. – № 1. – P. 160–161.
38. Horizontal well drilling fluid technologies in Well MBHW610 of Mobei Field / Wu Yicheng, Zhao Li, Yu Jiashui, Li Jing, Liu Xuebin, Chen Xin, Hu Hengzhu // Journal of Oil and Gas Technology. – 2014. – № 6. – P. 100–103.
39. Пеньков Г.М., Карманский Г.М., Петраков Д.Г. Исследование зависимостей между физико-механическими свойствами песчаника и скоростью прохождения упругих волн // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 27–36. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.3
40. Оценка устойчивости стенок скважин в условиях отсутствия достоверной информации о геомеханических характеристиках пород / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, Д.В. Шустов, С.Е. Чернышов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 41–43.
41. Геомеханические условия эффективного применения кислотного гидроразрыва пластов / А.Н. Ибрагимов, В.Г. Салимов, Р.Р. Ибатуллин, А.В. Насыбуллин, О.В. Салимов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 7. – С. 32–36.
42. Геомеханический анализ условий развития трещины повторного гидроразрыва пласта / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, О.Ю. Сметанников, Д.В. Шустов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 44–47.
43. Опыт создания ориентированной трещины гидроразрыва пласта на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / Ю.А. Кашников, С.Г. Аших-

мин, С.С. Черепанов, Т.Р. Балдина, Е.В. Филиппов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 40–43.

44. Cambou Bernard, Darve Félix, Nicot François Particle methods in geomechanics // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2019. – № 5. – P. 831–832.

45. The Role of Geomechanics in Unconventional Shale Gas Reservoir Performance / A. Domonik, P. Lukaszewski, A. Bobrowska, P. Wilczyński // Goldschmidt Conference. – 2016. – № 26. – P. 695.

46. Spokas K., Peters C.A., Pyrak-Nolte L.J. Modeling geomechanical deformation in reactive fractures Performance // Goldschmidt Conference. – 2016. – № 26. – P. 2934.

References

1. Fischer K., Henk A. Generating and Calibrating 3D Geomechanical Reservoir Models. *75th EAGE conference & exhibition incorporating SPE EUROPEC*, 2013, no. 75, 348 p.
2. Byoung Yoon Park, Sobolik R. Steven, Courtney G. Herrick Geomechanical Model Calibration Using Field Measurements for a Petroleum Reserve. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, no. 3, pp. 925-943.
3. Henk A., Fischer K., Winter I. Prediction of tectonic stresses and fracture networks with geomechanical reservoir models. *Berichte – Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. Forschungsbericht*, 2014, no. 725, 205 p.
4. Pavlov V., Korel'skii E., Butula K., Kliubin A., Maksimov D., Zinov'ev A., Zadvornov D., Grachev O. Sozdanie 4D-geomekhanicheskoi modeli dlia opredeleniia vliianiia razrabotki mestorozhdeniia na geometrii treshchin GRP [Creation of a 4D geomechanical model to determine the effect of field development on the fracture geometry]. *SPE 1822020-RU*, 2016.
5. Ganaeva M.R., Sukhodanova S.S., Khaliulin R.R., Khaliulin R.R. Postroenie trekhmernoii geomekhanicheskoi modeli mestorozhdeniia na Sakhalinskom shel'fe s tsel'iu planirovaniia mnogostadiinogo gidrorazryva plasta [Sakhalin offshore oilfield hydraulic fracturing optimization by building a 3D geomechanical model]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2018, no. 6, pp. 108-111.
6. Kashnikov Iu.A., Shustov D.V., Iakimov S.Iu., Ashikhmin S.G., Voevodkin V.L. Razrabotka geologo-geomekhanicheskoi modeli turnei-famenskogo ob'ekta Gagarinskogo mestorozhdeniia [Creating of geological geomechanical model of Tournaisian-Famennian object of Gagarinskoye oil field]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2013, no. 2, pp. 50-54.
7. Predein A.A., Klykov P.I. Postroenie geomekhanicheskoi modeli i raschet ustoichivosti stvola skvazhiny na primere odnogo iz mestorozhdenii Permskogo kraia [Geomechanical model and borehole stability prediction for one of the fields of perm region]. *Burenii i neft'*, 2016, no. 4.
8. Albukhari T.M., Beshish G.K., Abouzbeda M.M., Madi A. Geomechanical wellbore stability analysis for the reservoir section in J-NC186 oil field. *Tunisian Society for Rock Mechanics*, 2018, pp. 179-193.
9. Ashikhmin S.G., Kukhtinskii A.E. Modelirovanie napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia neobsazhennoi skvazhiny [Simulation of stress-deformed state of open well]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2014, no. 11, pp. 99-104.
10. Garshina O.V., Predein A.A., Klykov P.I., Khvoshchin P.A., Nekrasova I.L. Geomekhanicheskoe modelirovanie kak neot'emlemaia chast' kompleksnogo podkhoda k stroitel'stvu skvazhin v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviakh [Geomechanical modeling as an integral part of an integrated approach to well construction in difficult mining and geological conditions]. *Neftpromyslovoe delo*, 2017, no. 5, pp. 28-33.
11. Lukin S.V., Esipov S.V., Zhukov V.V., Ovcharenko Iu.V., Khomutov A.Iu., Shevchuk T.N., Susliakov I.V. Raschet ustoichivosti stvola skvazhiny dlia predotvrascheniia oslozhnenii v bureanii [Borehole stability prediction to avoid drilling failures]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2016, no. 6, pp. 70-73.
12. Pavlov V.A., Lushev M.A., Korel'skii E.P., Laskin P.G. Razvitie geomekhanicheskogo modelirovaniia v Rossii [The development of geomechanical modeling in Russia]. *Tekhnologii nefi i gaza*, 2017, no. 6, pp. 3-9.
13. Davletova A.R., Kireev V.V., Knutova S.R., Pestrikov A.V., Fedorov A.I. Razrabotka korporativnogo geomekhanicheskogo simulatora dlia modelirovaniia ustoichivosti stvola skvazhiny [Development of corporate geomechanics simulator for wellbore stability modeling]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2018, no. 6, pp. 88-92.
14. Mitiaev M.Iu., Belozarov B.V., Lukin S.V. Raschet napravlenii osei maksimal'nykh napriazhenii po dannym gidrorazryva plasta [Calculation of the directions of the axes of maximum stresses according to hydraulic fracturing]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2015, no. 8, pp. 70-71.
15. Zoback M. Reservoir geomechanics. Cambridge University Press, 2007, 505 p.
16. Fjaer E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R. Petroleum related rock mechanics. *Developments in Petroleum Science*, 33, 346 p.
17. Hoek E., Brown E.T. Underground excavations in rock. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980, 527 p.
18. Kashnikov Iu.A., Ashikhmin S.G. Mekhanika gornyykh porod pri razrabotke mestorozhdenii uglevodorodnogo syr'ia [Rock mechanics in the development of hydrocarbon deposits]. Moscow: Nedra, 2007, 467 p.
19. Hamid O. et al. Reservoir geomechanics in carbonates. *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers*. Manama, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2118/183704-MSpdf>

20. Hongcai Wang, Wei-Hua Zhao, Dongsheng Sun, Binbin Guo. Mohr-Coulomb yield criterion in rock plastic mechanics. *Acta Geophysica Sinica*, 2012, no. 12, pp. 4231-4238.
21. Al-Ajml A.M., Zimmerman R.W. Stability Analysis of Vertical Boreholes Using the Mogi-Coulomb Failure Criterion. *Int. J. Rock Mechanics & Mining Science*, 2006, vol. 43, pp. 1200-1211.
22. Ewy R.T. Wellbore stability predictions by use of a modified Lade criterion. *SPE 56862-PA*, 1999, pp. 85-91.
23. Gladyshev S.V., Popov S.N., Shustov D.V. Prognoz napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia gornogo massiva metodom konechnykh elementov pri razrabotke Shershnevskogo mestorozhdeniia nefiti na osnove trekhmernoii geologicheskoi modeli [Forecast of the stress-strain state of the rock mass using the finite element method in the development of the Shershnevsky oil field based on a three-dimensional geological model]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2008, no. 3, pp. 44-54.
24. Shustov D.V., Ermashov A.O. Prognoz sdvizhenii i deformatsii gornogo massiva Tishinskogo mestorozhdeniia metodami konechnykh i diskretnykh elementov [Forecast of displacement and deformations of rock mass at tishinskiy deposit by final and discrete elements]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2012, no. 5, pp. 89-96.
25. Sashurin A.D., Balek A.E. Sovershenstvovanie metodiki naturnykh zamerov napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia bol'shikh uchastkov gornogo massiva [Improvement of field measurement of stress-deformed state of the large massif parts]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2014, no. 11, pp. 105-120.
26. Asanov V.A., Toksarov V.N., Samodelkina N.A., Bel'tiukov N.L., Udartsev A.A. Otsenka napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia netronutogo massiva na mestorozhdenii Zhaman-Aibat [Evaluation of stressed-deformed state of virgin rock at zhaman-aibat deposit]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2014, no. 12, pp. 56-66. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.7
27. Nekrasov S.V., Andreiko S.S. Vychislitel'naiia skhema otsenki napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia kusochnoodnorodnoi trekhmernoii uprugoi sredy na osnove nepriamogo metoda granichnykh elementov [Computational scheme of evaluating strain-stress state of piecewise-homogeneous three-dimensional elastic environment based on indirect method of boundary elements]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2015, no. 16, pp. 86-97. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.16.10
28. Zhou Bo, Sun Bo, Xue Shifeng Extended finite element method for fracture mechanics of rock. *Journal of China University of Petroleum, Edition of Natural Science*, 2016, no. 4, pp. 121-126.
29. Ke Xu, Junsheng Dai, Xiaolong Fu, Qiqiang Ren, Congning Liu, Yun Zhao. Discussion on the fracture of layered rock mass based on the finite element method. *Journal of Geomechanics*, 2015, no. 3, pp. 330-340.
30. Pryhorovska T.O., Chaplinskiy S.S., Kudriavtsev I.O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, no. 6, pp. 812-816.
31. Seredin V.V., Parshina T.Iu. Izmenenie mass svyazannoi vody v glinakh pri szhatii [Mass change of bound water in clays under compression]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2017, vol. 16, no. 1, pp. 23-32. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.3
32. Nekrasova I.L., Kazymov K.P., Predein A.A., Khvoshchin P.A., Klykov P.I., Garshina O.V., Osovetskii B.M., Moloshtanova N.E., Zhdanov V.M. Izmenenie sostava i struktury terrigenykh porod pod vozdeistviem burovnykh rastvorov [Change of the composition and texture of terrigenous rocks under the influence of drilling fluids]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefiannykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2017, no. 6, pp. 37-43.
33. Khubbatov A.A., Gaidarov A.M., Norov A.D., Gaidarov M.M.-R. Ingibiruiushchie burovnye rastvory i ustoiчивost' glinistykh porod [The inhibiting drilling muds and stability of clay rocks]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2015, no. 5, pp. 64-67.
34. Goronovich S.N., Kozhina T.V., Oleinikov A.N., Bel'skii D.G. Priroda suzheniia stvola skvazhin pri vskrytii solei bol'shoi tolshchiny [The nature of the restriction borehole at the opening of thick salt]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no. 1, pp. 41-43.
35. Nikolaev N.I., Leusheva E.L. Povyshenie effektivnosti bureniia tverdykh gornykh porod [Increasing of hard rocks drilling efficiency]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2016, no. 3, pp. 68-71.
36. Bin Wu, Jian Wang, Fuchang Shu, Xingjin Xiang, Mingshun Nie. Study and application of oil-based drilling fluids for horizontal drilling. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, no. 2, pp. 101-104.
37. Caenn Ryen The history of drilling fluids, classified by date ranges. *Oil-Industry History*, 2018, no. 1, pp. 160-161.
38. Yicheng Wu, Li Zhao, Jiashui Yu, Jing Li, Xuebin Liu, Xin Chen, Hengzhu Hu. Horizontal well drilling fluid technologies in Well MBHW610 of Mobei Field. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, no. 6, pp. 100-103.
39. Pen'kov G.M., Karmanskii G.M., Petrakov D.G. Issledovanie zavisimosti mezhdu fiziko-mekhanicheskimi svoistvami peschanika i skorost'iu prokhozheniia uprugikh voln [Study of the relationships between physical and mechanical properties of the sandstone and velocity of elastic waves]. *Vestnik Permskogo natsional'*

nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. *Geologiya. Neftgazovoe i gornoe delo*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 27-36. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.3

40. Kashnikov Iu.A., Ashikhmin S.G., Shustov D.V., Chernyshov S.E. Otsenka ustoychivosti stenok skvazhin v usloviyakh otsutstviya dostovernoi informatsii o geomekhanicheskikh kharakteristikakh porod [Evaluation of borehole stability with lack of reliable information about geomechanical characteristics of rocks]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2015, no. 1, pp. 41-43.

41. Ibragimov A.N., Salimov V.G., Ibatullin R.R., Nasybullin A.V., Salimov O.V. Geomekhanicheskie usloviya effektivnogo primeneniya kislotnogo gidrorazryva plastov [Geomechanical conditions of successful acid fracturing applications]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no. 7, pp. 32-36.

42. Kashnikov Iu.A., Ashikhmin S.G., Smetannikov O.Iu., Shustov D.V. Geomekhanicheskii analiz uslovii razvitiia treshchiny povtornogo gidrorazryva plasta [Geo-

mechanics research of oriented refracturing development conditions]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no. 6, pp. 44-47.

43. Kashnikov Iu.A., Ashikhmin S.G., Cherepanov S.S., Baldina T.R., Filippov E.V. Opyt sozdaniia orientirovannoi treshchiny gidrorazryva plasta na mestorozhdeniiakh OOO "LUKOIL-PERM" [The experience of creating an oriented hydraulic fracture in the fields of LLC "LUKOIL-PERM"]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no. 6, pp. 40-43.

44. Cambou Bernard, Darve Félix, Nicot François Particle methods in geomechanics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2019, no. 5, pp. 831-832.

45. Domonik A., Lukaszewski P., Bobrowska A., Wilczyński P. The Role of Geomechanics in Unconventional Shale Gas Reservoir Performance. *Goldschmidt Conference*, 2016, no. 26, 695 p.

46. Spokas K., Peters C.A., Pyrak-Nolte L.J. Modeling geomechanical deformation in reactive fractures Performance. *Goldschmidt Conference*, 2016, no. 26, 2934 p.

Просьба сослаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Лядова Н.А., Клыков П.И., Предеин А.А. Численное решение задач геомеханики (на примере месторождения шельфа Балтийского моря) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т.20, №2. – С.226–236. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.2.3

Please cite this article in English as:

Liadova N.A., Klykov P.I., Predein A.A. Numerical solution of geomechanics problems (the case of the Baltic sea offshore field). *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2020, vol.20, no.2, pp.226-236. DOI: 10.15593/2224-9923/2020.2.3