

4
НОМЕР

БОНЦ

ISSN 2304-9081

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ
On-line версия журнала на сайте
<http://www.elmag.uran.ru>



2017
ГОД ЭКОЛОГИИ
В РОССИИ

БЮЛЛЕТЕНЬ

ОРЕНБУРГСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА УРО РАН



2017

УЧРЕДИТЕЛИ

УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РАН
ОРЕНБУРГСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР УРО РАН

© М.Ю. Нестеренко, А.В. Цвяк, 2017

УДК 550.348.422

М.Ю. Нестеренко, А.В. Цвяк

ТЕХНОГЕННЫЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЕВОДОРОДОВ

Оренбургский научный центр УрО РАН (Отдел геоэкологии), Оренбург, Россия

Представлено описание модели напряженно-деформированного состояния геосреды месторождения углеводородов, по которой методом конечных элементов выполнен расчет оседаний земной поверхности. Предложена методика построения геодинамических полигонов на месторождениях углеводородов с использованием сейсмологической сети и GNSS-станций.

Ключевые слова: месторождения углеводородов, геодинамика, сейсмика

M.U. Nesterenko, A.V. Tsviak

TECHNOGENIC GEODYNAMIC PROCESSES AT DEVELOPED HYDROCARBON DEPOSITS

Orenburg Scientific Center, UrB RAS (Department of Geoecology), Orenburg, Russia

The description of the model of the stress-strain state geoenvironment hydrocarbon fields, for which the finite element method calculated the subsidence of the earth's surface. The technique of construction of geodynamic polygons hydrocarbon fields using seismological network and GNSS-stations.

Keywords: hydrocarbon deposits, geodynamics, seismic.

Введение

В результате интенсивной добычи нефти и газа в верхней части земной коры развиваются опасные техно-природные геодинамические процессы и повышается сейсмическая активность.

Для реализации положений Закона РФ «О недрах» «Инструкцией по производству маркшейдерских работ» на месторождениях нефти и газа предусмотрено создание систем наблюдений (геодинамические полигоны) за геодинамическими и геомеханическими процессами.

Необходимость создания геодинамических полигонов (ГДП) на месторождениях углеводородов (УВ) подтверждается значительным увеличением на них сейсмической активности (рис.). Зарегистрированная на месторождениях УВ плотность выделившейся сейсмической энергии на несколько порядков выше выделившейся сейсмической энергии за их пределами [1, 2].

Выполненные исследования геодинамической и сейсмической актив-

ности на территории нефтегазодобывающего Южного Предуралья показывают, что сейсмическая активность связана с резким падением пластового давления и формированием гидродинамических воронок и тектоническими нарушениями в земной коре в районе месторождений УВ [2, 3].

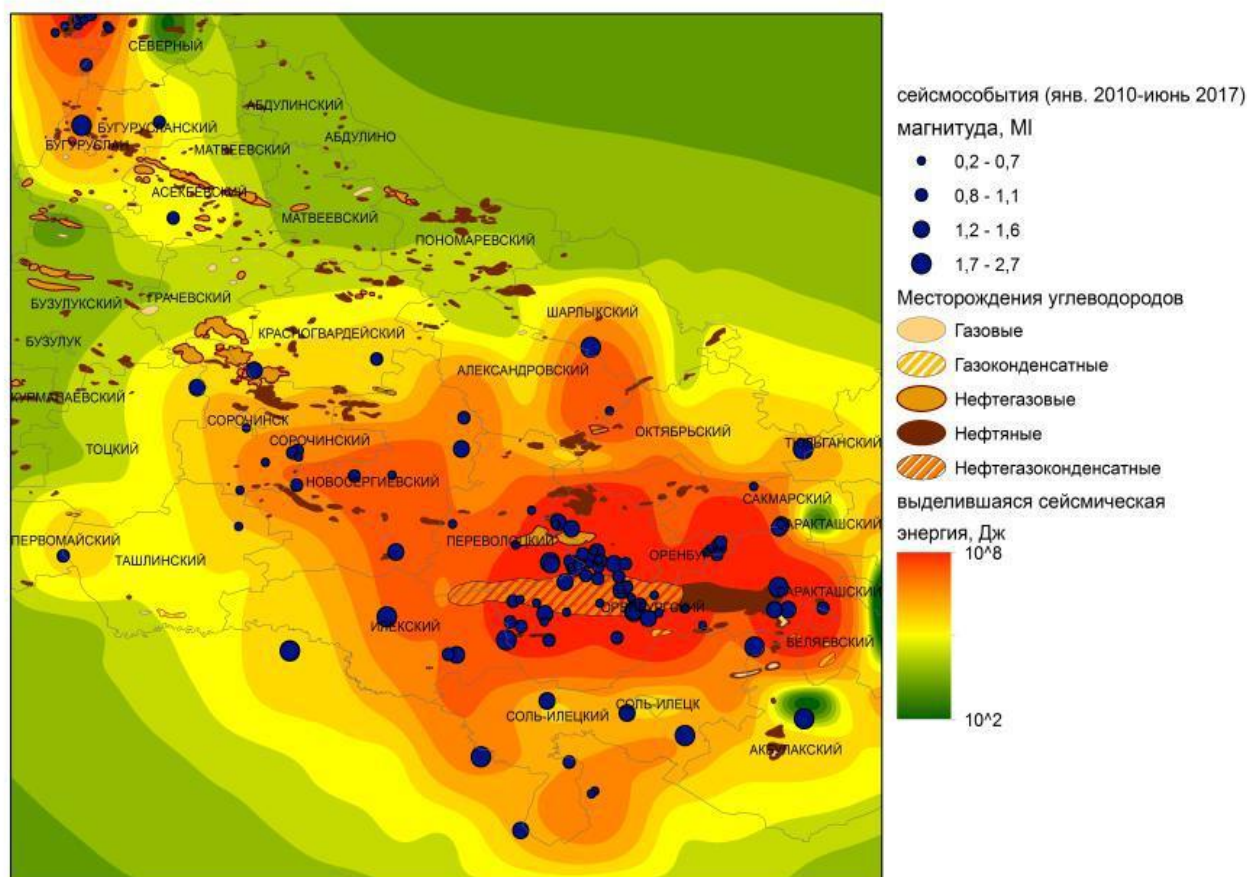


Рис. Карта-схема месторождений УВ, распределения сейсмических событий и выделившейся сейсмической энергии в Южном Предуралье на юго-востоке Восточно-Европейской платформы в 2010 - 2017 гг.

При создании ГДП важным является моделирование и прогнозирование напряженно-деформированного состояния (НДС), уровня геодинамической активности геологической среды месторождения и оценка адекватности построенных моделей и прогнозов. Основные и наиболее опасные формы этих геодинамических процессов – сильные деформации земной поверхности на площадях, достигающих нескольких тысяч км², деформации наземных сооружений, разрыв коммуникаций, слом обсадных колонн скважин, заболачивание и затопление опускающихся участков земной поверхности и т.п.

Одним из направлений прогнозирования является построение модели НДС и расчет максимально возможных оседаний земной поверхности с последующей проверкой расчетов с помощью геодезических измерений.

Модель напряженно-деформированного состояния геологической среды месторождений УВ.

Существует множество механических моделей горных массивов, построенных на моделях механики сплошных сред. Наиболее распространенной моделью при оценке максимальных оседаний является шатровая модель грунта.

Шатровые модели достаточно полно описывают динамику грунта. Наиболее известной моделью из этого класса является модифицированная модель Sam Clay. В этой модели область упругого состояния ограничивается не только поверхностью, описываемой критерием Кулона-Мора, но также дополнительной эллиптической поверхностью «шатра» [4].

При разработке нефтегазовых месторождений происходят процессы объёмного сжатия пор, что вызывает уплотнение коллекторов. В общем случае эта величина зависит от падения давления в пластах, мощности коллектора, физико-механических свойств пород и коллекторов.

В силу того, что углеводородные месторождения имеют значительные размеры, при рассмотрении процесса уплотнения полагают, что коллекторы деформируются в одноосном режиме (одномерное уплотнение) – это означает, что в горизонтальном направлении деформации незначительны или отсутствуют. В связи с этим способность породы к уплотнению характеризуют коэффициентом одномерного уплотнения c_M , который определяется в одометрических испытаниях [4]. Предполагается, что поровое давление не должно изменяться, либо нагрузка должна возрасти медленно.

Изменение порового давления при добыче УВ по сути является нагрузкой на матрицу коллектора в соответствии с принципом эффективных напряжений [4].

Исходя из определения c_M , можно найти одномерное уплотнение упругого изотропного коллектора [4]:

$$\Delta c = c_M h \alpha \Delta p = \frac{(1 + \nu_B)(1 - 2\nu_B)}{E_B(1 - \nu_B)} \left(1 - \frac{E_B(1 - 2\nu_G)}{E_G(1 - 2\nu_B)} \right) h \Delta p \quad (1)$$

Для расчета максимально возможной величины оседаний земной поверхности нами разработана программа на основе формулы (1) для ЭВМ, реализующая метод конечных элементов. Метод конечных элементов является

сеточным методом, предназначенным для решения задач микроуровня, для которого модель объекта задается системой дифференциальных уравнений в частных производных с заданными краевыми условиями:

$$LV+P=0, \quad V(\Gamma) = V_{\Gamma}$$

Здесь L - дифференциальный оператор, V - фазовая переменная - неизвестная функция, которую следует найти, P - величина, независящая от V . $V(\Gamma) = V_{\Gamma}$ – граничное условие первого рода (Дирихле), то есть на границе задано значение фазовой переменной.

При расчете деформаций земной поверхности на эксплуатируемых месторождениях УВ в качестве неизвестной функции V целесообразно взять функцию величины оседаний в каждой точке земной поверхности. $V(\Gamma) = V_{\Gamma}$ – граничное условие первого рода определяется величиной деформаций на нижней границе месторождения (подошве самого нижнего продуктивного пласта). В случае пренебрежения вспучиванием подстилающих месторождения горных пород в результате резкого снижения пластового давления и формирования разности литостатического и пластового давлений, можно задать $V(\Gamma) = V_{\Gamma} = 0$.

Метод конечных элементов основан на разбиении сплошной среды на отдельные области – конечные элементы, в пределах которых ищется приближенное решение. В качестве конечных элементов рассматривается относительно однородный элемент земной коры в форме прямоугольного параллелепипеда, для которого рассчитывается величина уплотнения по формуле (1). По вертикали разбиение среды на конечные элементы определяется слоями пород, а по горизонтали – блоково-разломной структурой и свойствами пород геологической среды в районе месторождения.

В соответствии с предложенной моделью рассчитаны возможные деформации на Байтуганском месторождении. Байтуганское месторождение нефти расположено в северо-западной части Оренбургской области на границе с Самарской областью. Байтуганское месторождение является многопластовым, продуктивные пласты залегают на глубине от 700 до 1200 м. Форма коллектора Байтуганского месторождения в плане близка к эллипсу площадью 16х6 км², то есть имеет место осесимметричная задача, поэтому может быть применена двухмерная модель.

Исходной основой для построения геолого-физической модели место-

рождения является геологическая характеристика и сводный геологический разрез. Массив горных пород месторождения УВ слагает множество различных по составу пластов. Для достоверного моделирования деформационного процесса расчетная схема должна по возможности наиболее полно соответствовать реальному массиву. В то же время детальное воспроизведение всех типов пород на расчетной схеме привело бы к значительному усложнению расчета и росту затрат машинного времени без повышения точности оценок в связи со значительной неопределенностью контактов пород и их физико-механических свойств.

В связи с этим при составлении расчетной схемы месторождения целесообразно учитывать только основные, укрупненные элементы геологического разреза, состоящие из сходных по физико-механическим свойствам породных образований. Толщины соответствующих слоев задавались согласно данным скважин.

В качестве исходного материала для оценки оседаний земной поверхности на Байтуганском месторождении использованы вертикальные геологические разрезы и структурные карты по каждому продуктивному пласту, сводный геолого-геофизический разрез, стратиграфическая колонка, а также данные о физико-механических свойствах горных пород.

Оседание земной поверхности при уплотнении коллекторов при текущем падении пластового давления может быть оценено сверху величиной 89,7 мм. Оседания такой величины, распределенные по большой площади месторождения, не оказывают в настоящее время заметного влияния на состояние промышленных и гражданских сооружений и объектов инфраструктуры нефтепромыслов. Относительные вертикальные деформации составят $0,09\text{м}/10000\text{м}=0,1 \times 10^{-4}$.

Расчет максимально возможных оседаний земной поверхности.

Максимальные оседания поверхности при уплотнении коллекторов при максимальном уровне падения давления по пластам и результаты расчетов оседаний приведены в таблице 1.

Максимальное расчетное оседание в центральной части Байтуганского месторождения достигает 427,5 мм. Вычисление вертикальных смещений земной поверхности было выполнено для условий установившегося пластового давления в зоне размещения эксплуатационных скважин.

Таблица 1. Результаты расчета максимальной величины оседаний земной поверхности на Байтуганском месторождении

Пласт	Коэффициент поперечных деформаций ν	Принятия пористость, доля	Этаж нефтеносности, м	Коэффициент сжимаемости	Падение пластового давления ΔP , МПа	dh, мм (в центральной части пласта)
A ₄	0,21	0,13	44,2	0,001923	5,6	72,8
C _{1s}	0,21	0,14	50	0,001923	5,6	215,6
B ₂	0,3	0,19	23,9	0,001923	7,0	81,8
B ₁	0,21	0,11	43	0,001923	6,67	57,3
Суммарное оседание на поверхности, мм						427,5

Следует отметить, что полученные значения оседаний земной поверхности носят предварительный, оценочный характер и могут изменяться при изменениях параметров и режимов разработки месторождения и поступлении более точных данных о физико-механических свойствах горных пород. При расчете не учитывалось влияние на энергетику пласта технологии ППД. Применение ППД вызывает резкие изменения в напряженно-деформированном состоянии пластов и земной коры в районе месторождения и приводит к раскачиванию и дестабилизации геосистемы.

Закачка воды в продуктивные пласты с целью поддержания и восстановления пластового давления используется очень широко по всему миру. Наличие порового давления снижает прочность грунта и сдвигает его к зоне разрыва. Это означает, что интенсивная закачка воды в соответствии с законом Кулона-Мора способствует тангенциальным подвижкам, плоскости смещения которых способны повредить, а в крайнем случае и срезать стволы добывающих скважин, приводя к частичной или полной разгерметизации эксплуатируемой залежи УВ.

Данное явление наиболее изучено на примере эксплуатации нефтяного месторождения Rangely oil field (США, штат Колорадо), где, специально для его изучения, была развернута сейсмическая сеть из 14 вертикальных сейсмометрических станций, регистрирующих последствия интенсивной закачки воды в нагнетательные скважины для увеличения нефтеотдачи.

В результате более чем трёхлетнего мониторинга получены статистически значимые доказательства явной корреляции сейсмической активности с темпами заводнения [5].

Оценка адекватности построенных моделей.

Оценка адекватности построенных моделей может быть выполнена с помощью повторных измерений сдвижений земной поверхности. Существует ряд методов контроля движений земной поверхности при разработке месторождений полезных ископаемых. Традиционно используются маркшейдерско-геодезические наблюдения по реперам профильных линий по методике нивелирования I-II классов для определения оседаний поверхности и измерения длин линий между реперами для определения горизонтальных сдвижений и деформаций. Однако в связи с большой площадью территории месторождений УВ, применение данных методов дорогостояще и занимает весьма продолжительное время и имеет свойство накопления ошибки при увеличении числа ходов.

Для определения горизонтальных и вертикальных сдвижений точек земной поверхности целесообразно использовать спутниковые наблюдения с применением глобальных навигационных спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO).

Применение данного подхода накладывает определенные требования к точности измерений и условиям, в которых они выполняются. В соответствии с инструкцией по нивелированию допускается погрешность в измерениях II класса не более 2 мм, III класса – 5 мм и IV класса – 10 мм [6].

В соответствии с технической документацией производителей GNSS-приемников при измерениях достигается точность по вертикали $3,5 \text{ мм} + 0,4 \text{ ppm}$, по горизонту – $3 \text{ мм} + 0,1 \text{ ppm}$. При этом условия, в которых выполняются измерения могут существенно изменить точность. Наиболее значимым является применение спутникового нивелирования для наблюдения за вертикальными деформациями на месторождениях нефти и газа в условиях переотраженного сигнала.

В условиях Байтуганского и ряда других месторождений, где выполняются основные критерии, требуемые для создания системы наблюдений за движением земной поверхности – населенные пункты расположены на территории горного отвода месторождения, наличие разломных зон, использование системы ППД, достаточным и более эффективным будет выполнение мониторинга геодинамических процессов с использованием сейсмологической сети.

Выводы

Сейсмологический мониторинг позволяет регистрировать геодинамические процессы в недрах с оценкой их глубины непрерывно. При этом в случае аномально высокой сейсмической активности для выявления точных просадок земной поверхности за годовой период целесообразно применение метода сети GNSS-наблюдений.

Решение задач мониторинга и прогнозирования геодинамических процессов в районах нефтегазодобычи возможно на основе разработанного Отделом геоэкологии Оренбургского научного центра УрО РАН комплексного подхода мониторинга геодинамических процессов и сейсмической активности с использованием данных о геологическом и тектоническом строении районов месторождений углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеренко М.Ю. Геоэкология недр нефтегазоносных районов Южного Предуралья. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 135 с.
2. Нестеренко Ю.М., Соколов А.Г., Нестеренко М.Ю. Особенности тектоники и геодинамики отложений кунгурского яруса на месторождениях углеводородов Южного Предуралья. Литосфера. 2014. 3: 132-139.
3. Нестеренко М.Ю., Никифоров С.Э. Опыт ведения сейсмологических наблюдений на геодинамических полигонах нефтегазовых месторождений Южного Предуралья. Нефть, газ и бизнес. 2014. 10: 24-29.
4. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. М.: Недра, 2007. 486с.
5. Suckale J. Induced seismicity in hydrocarbon fields. , Advances in Geophysics, 2009, 51, 55–106.
6. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов ГКИНП (ГНТА)-03-010-03. М.: ЦНИИГАИК, 2004.

Поступила 3.11.2017

(Контактная информация: Нестеренко Максим Юрьевич – доктор геолого-минералогических наук, зав. лабораторией Отдела геоэкологии ОНЦ УрО РАН; e-mail: n_mu@mail.ru;

Цвяк Алексей Владимирович – кандидат технических наук, с.н.с. Отдела геоэкологии ОНЦ УрО РАН; адрес: 460014, г. Оренбург, ул. Набережная, д. 29, о/с 14; или а/я 59; Тел./факс (3532) 77-06-60; e-mail: tsviak@rambler.ru)

LITERATURA

1. Nesterenko M.Ju. Geojekologija neдр neftegazonosnyh rajonov Juzhnogo Predural'ja. Ekaterinburg: UrO RAN, 2012. 135 s.
2. Nesterenko Ju.M., Sokolov A.G., Nesterenko M.Ju. Osobennosti tektoniki i geodina-miki otlozhenij kungurskogo jarusa na mestorozhdenijah uglevodorodov Juzhnogo Predu-ral'ja. Litosfera. 2014. 3: 132-139.

3. Nesterenko M.Ju., Nikiforov S.Je. Opyt vedenija sejsmologicheskikh nabljudenij na geodinamicheskikh poligonah neftegazovyh mestorozhdenij Juzhnogo Predural'ja. Neft', gaz i biznes. 2014. 10: 24-29.
4. Kashnikov Ju.A., Ashihmin S.G. Mehanika gornyh porod pri razrabotke mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ja. M.: Nedra, 2007. 486s.
5. Suckale J. Induced seismicity in hydrocarbon fields. , Advances in Geophysics, 2009, 51, 55–106.
6. Instrukcija po nivelirovaniju I, II, III i IV klassov GKINP (GNTA)-03-010-03. M.: CNIIGAİK, 2004.

Образец ссылки на статью:

Нестеренко М.Ю., Цвяк А.В. Техногенные геодинамические процессы на разрабатываемых месторождениях углеводородов. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2017. 4. 8 с. [Электр. ресурс] (URL:<http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2017-4/Articles/MUN-2017-4.pdf>).