

УДК 551.244

DOI 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art25

**ЗОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВ ПО УРОВНЮ
ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ УЧЕТА СОВРЕМЕННЫХ
ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ И
ЛИКВИДИРОВАННЫЕ СКВАЖИНЫ**

Никонов А.И.

Институт проблем нефти и газа РАН

E-mail: nikson59@rambler.ru

Аннотация. В работе обсуждается деформационная модель уплотнения порового и трещинно-порового коллектора при уменьшении в нем давления и ее связь с параметрами оседания земной поверхности над разрабатываемым месторождением углеводородов. Показано, что развитие критических деформаций в породах продуктивных пластов будет происходить на стадии падающей добычи. Опасный уровень относительных деформаций может оказывать дополнительное разрушающее воздействие на элементы конструкции скважины и герметизирующие материалы. На основе геодинамического мониторинга земной поверхности можно производить оценку зональной неоднородности продуктивного пласта по степени изменения его проницаемости и перераспределения остаточных запасов.

Ключевые слова: геодинамические процессы, разработка месторождения нефти и газа, ликвидация скважин.

**OIL AND GAS TERRITORIES ZONING BY THE SURFACE DEFORMATION
DEGREE FOR THE REGISTRATION OF RECENT GEODYNAMIC IMPACT ON
PRODUCING AND ABANDONED WELLS**

Nikonov A.I.

Oil and Gas Research Institute RAS

E-mail: nikson59@rambler.ru

Abstract. This paper discusses the deformation model of compaction of pore and fractured porous reservoirs while reducing pressure in it and relationship between the model and parameters of the ground surface subsidence over the developing hydrocarbon field. It is shown that occurrence of critical deformations in rocks within productive layers will take place at the stage of declining production. The level of these relative deformations can have an additional destructive effect on the elements of

the well construction and sealing materials. Basing on geodynamic monitoring of the Earth's surface it will be possible to evaluate zonal heterogeneity of reservoir in accordance with degree of change in its permeability and redistribution of residual reserves.

Keywords: geodynamic processes, oil and gas fields development, wells plugging and abandonment.

В настоящее время особую актуальность приобретает проблема ликвидации нефтяных и газовых месторождений России на завершающей стадии их эксплуатации. На балансе добывающих предприятий сегодня находится значительное количество (более 10 тысяч) законсервированных и подлежащих ликвидации скважин.

Необходимо отметить, что эксплуатация месторождений на этапе падающей добычи происходит в сложных физико-геологических условиях, которые определяются низкими пластовыми давлениями в залежи, высокой степенью ее заводненности, уменьшением или увеличением пористости и проницаемости пород коллекторов, растворением и вымыванием цементаобразующих минералов пород, изменением физико-механического состояния пород коллектора, разрушением пород призабойной зоны скважин, изменением температурного режима в пласте и другими факторами [1, 2]. Вышеперечисленные факторы, а также проведение ремонтных работ на скважинах, находящихся в эксплуатации 10–15 лет и более, приводят к высокому износу оборудования, конструктивных элементов и герметизирующих материалов скважин. Также известно, что на стадии ликвидации месторождений углеводородов (УВ) часто происходит переформирование их остаточных запасов с образованием зон повышенных пластовых давлений, которые могут располагаться в районах ликвидированных скважин. В данных условиях материалы технического оснащения добывающих и нагнетательных скважин, по сравнению с таковыми у разведочных и наблюдательных, подвергаются наибольшему физическим и физико-химическим воздействиям.

Разработка инновационных научно-технологических методов ликвидации скважины как горной выработки для обеспечения ее герметичности в течение длительного времени не может быть осуществлена без учета техногенных геодинамических процессов, происходящих в породах осадочного чехла [3, 4], а также современной геодинамики разломных зон [5].

В данной статье рассматриваются техногенные геодинамические процессы, которые могут повлиять на напряженно-деформированное состояние горного массива, расположенного над разрабатываемым месторождением УВ, и создать дополнительные нагрузки на горную выработку и материалы, обеспечивающие ее устойчивость и герметичность.

Процессы деформации земной поверхности при разработке нефтегазовых месторождений являются давно известным фактором как у нас в стране, так и за рубежом [3]. Данные процессы зафиксированы с помощью методов повторных геодезических измерений, на основе которых получают величину вертикальной деформации земной поверхности над месторождением. Эти измерения показывают, что величина оседания земной поверхности на нефтяных и газоконденсатных месторождениях может достигать значений в интервале от 0,8 до 4–6 м [6], что отвечает уровню относительных деформаций земной поверхности в интервале 10^{-5} – 10^{-3} . При разработке проектов бурения и ликвидации скважин, а также проектов обустройства месторождений эти дополнительные деформационные воздействия не учитываются в нормативных документах. Например, в нормативных документах по строительству зданий и сооружений относительные деформации на уровне 10^{-4} являются критическими и способны приводить к аварийным ситуациям на инженерных сооружениях. Аномальные оседания земной поверхности на нефтегазовых месторождениях порядка 2–6 м, согласно литературным источникам, являются довольно редкими и часто вызваны интенсивным физико-химическим воздействием на горные породы продуктивных пластов. Несмотря на то, что большинство разрабатываемых месторождений характеризуются величиной оседания земной поверхности от 0,8 до 1,5 м, вертикальная составляющая относительных деформаций горных пород оценивается на уровне 10^{-5} – 10^{-4} , что является существенной дополнительной нагрузкой на ствол скважин, расположенных в этих зонах. Уровень данных относительных деформаций при разработке нефтегазовых месторождений достигается, в основном, на стадии падающей добычи за счет снижения давления в продуктивном пласте и сжатия порового пространства пород, но иногда и на поздней стадии при поддержании стабильно высокого уровня добычи.

Данные процессы вызывают изменение структуры земной поверхности, над месторождением формируется обширное оседание, приводящее к изменению напряженно-

деформированного состояния горных пород, гидродинамических параметров водоносных горизонтов и герметичности «покрышек».

Для учета и контроля аномальных деформаций в массиве горных пород над месторождением в работе [7] представлена схема (рис. 1) последовательного учета уровня относительных деформаций земной поверхности при его разработке. Данный подход позволяет на основе расчетных методов и наблюдаемых параметров оседания проводить зонирование территории по степени деформационного воздействия на земную поверхность.

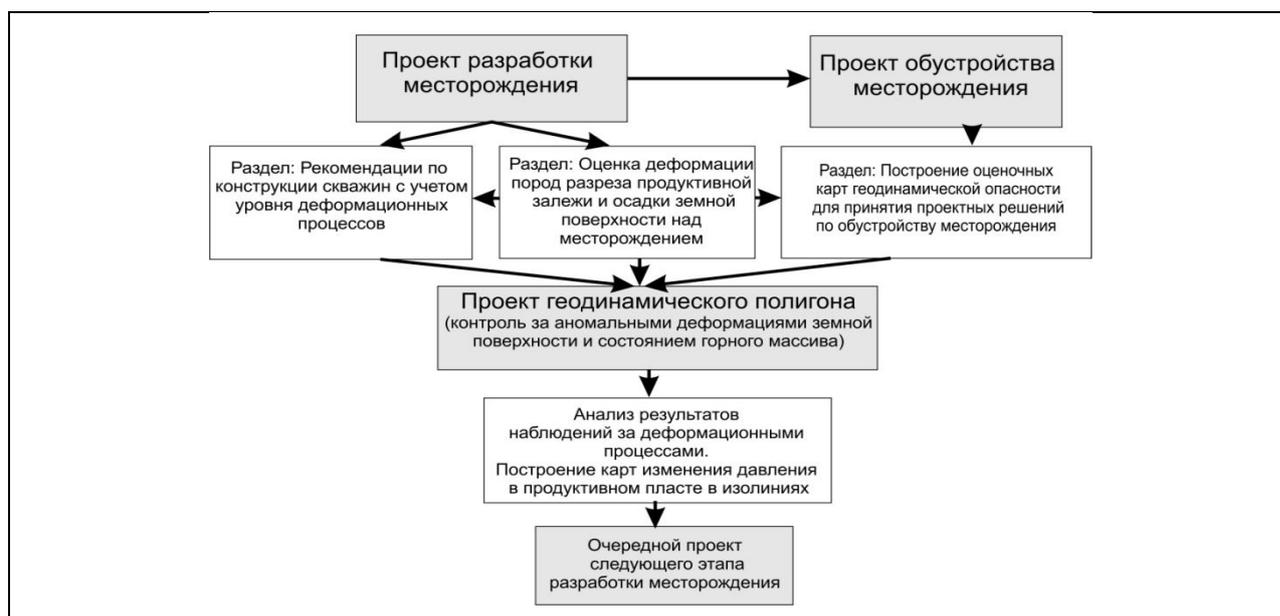


Рис. 1. Блок-схема контроля и учета геодинамических процессов при проектировании и разработке месторождений с целью надежной и долгосрочной ликвидации скважин

Выявление предварительных границ опасных зон наземной поверхности с уровнем относительных деформаций 10^{-5} – 10^{-4} на стадии проектирования разработки месторождения может осуществляться на основе расчетных методов [8], а на последующих стадиях разработки – с помощью методов геодинамического мониторинга (РД 07-603-03 Инструкция по производству маркшейдерских работ).

На примере территории Ямбургского месторождения продемонстрируем методический подход выявления зон с опасным уровнем относительных деформаций земной поверхности. Для получения параметров оседания земной поверхности над Ямбургским месторождением при разработке сеноманской залежи использовались разведочные и эксплуатационные скважины, в которых определены параметры толщины

коллектора, значение его пористости, сжимаемости порового пространства и величина пластового давления на начальной и текущей стадиях разработки [9]. На основе этих данных была построена модель зоны обширного оседания земной поверхности, максимальная величина которого с учетом веса вышележащих пород составила 0,98 м. На рис. 2, а приведена структурная карта кровли сеноманского горизонта с границами площадного распространения газовойодяного контакта по геолого-геофизическим данным. На рис. 2, б представлена расчетная модель оседания земной поверхности над месторождением, которая на рис. 2, а показана красной пунктирной линией.

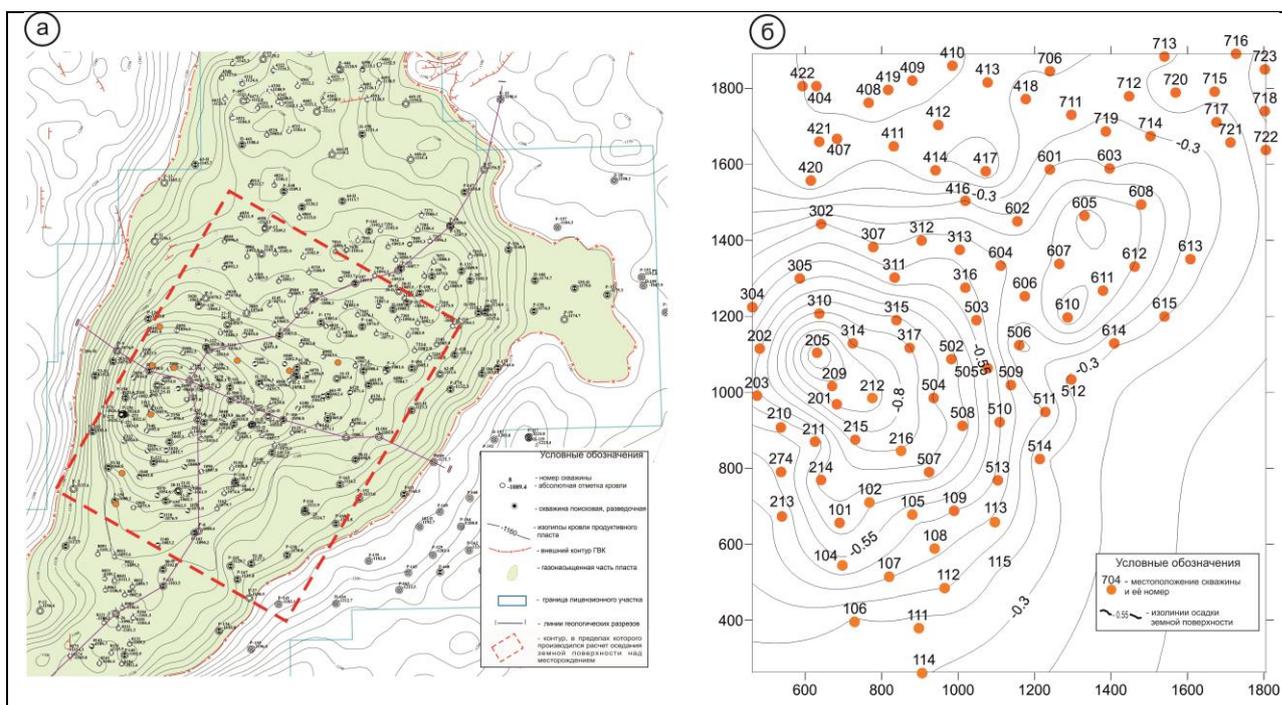


Рис. 2. Структурная карта кровли продуктивного пласта (а) и модель обширной осадки земной поверхности (б) на период окончания разработки сеноманской залежи

Для оконтуривания областей с опасным уровнем относительных деформаций (10^{-5} – 10^{-3}) на рис. 3, а приведены вектора, длина которых отражает значение угла наклона земной поверхности. В пределах области максимального оседания выявляются градиентные зоны наклона земной поверхности с уровнем относительных деформаций 10^{-3} – 10^{-5} . Ниже, на рис. 3, б, представлена объемная модель площадного распределения уровней относительных деформаций оседания земной поверхности (карта светофор), где красным цветом представлена область со значениями 10^{-3} , желтым цветом – область со значениями 10^{-4} , а зеленым цветом – область со значениями 10^{-5} .

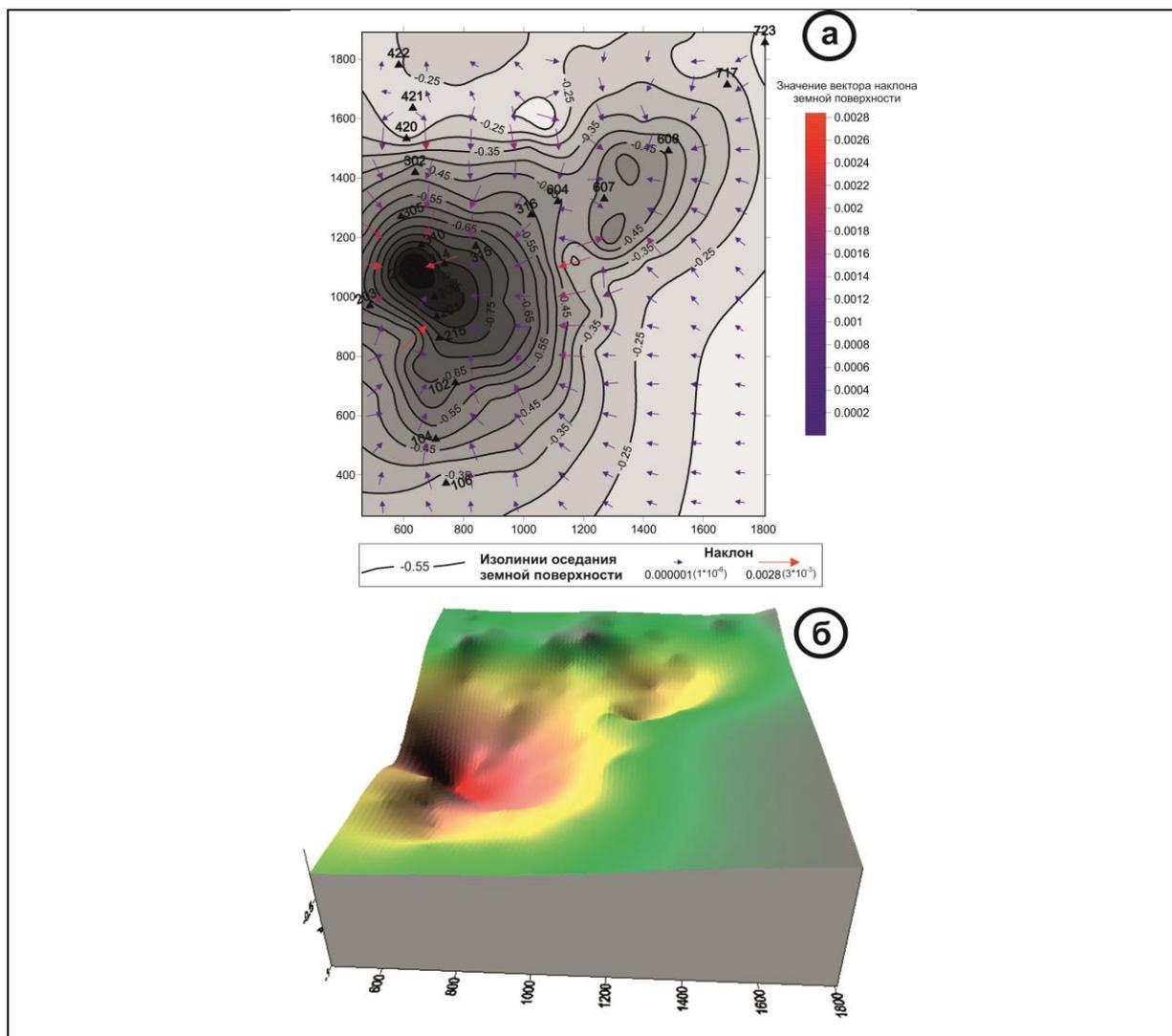


Рис. 3. Модель оседания земной поверхности над Ямбургским месторождением на период окончания его разработки: а – плоская; б – объемная

Поскольку на Ямбургском месторождении отсутствует традиционная наблюдательная геодезическая сеть, состоящая из профилей, пересекающих месторождение по его длинной оси и в крест ее простирания, то сравнить данные натурных наблюдений с модельными построениями вертикальных деформаций земной поверхности не представляется возможным. Однако, по результатам исследований [10], выполненных на Ямбургском месторождении в период с 2011 по 2015 г., характеризующихся остановками промыслов по отбору газа из сеноманской залежи в связи с сезонным изменением спроса на газ, авторами была построена карта пластового давления в залежи. Данная карта построена на основе данных перераспределения пластового давления и дренируемых остаточных запасов, что позволяет сравнить области

падения пластового давления по площади сеноманского продуктивного горизонта с моделью оседания земной поверхности для стадии падающей добычи, поскольку области максимального падения пластового давления должны соответствовать областям максимального уплотнения пород коллектора. Для Ямбургского месторождения в целом сеноманская залежь является сводовой, пластово-массивного типа, водоплавающей. Она представлена песчаными, песчаноалевритовыми, глинистоалевритовыми породами и характеризуется высокими значениями открытой пористости (до 30%), а среднее значение проницаемости по керну составляет $0,68 \text{ мкм}^2$.

Для качественного сравнения пространственного положения зон максимального оседания земной поверхности с картой распределения динамики пластового давления на ней оставлены изобары, характеризующие не локальные участки, а общее распределение пластового давления в залежи (рис. 4, а).

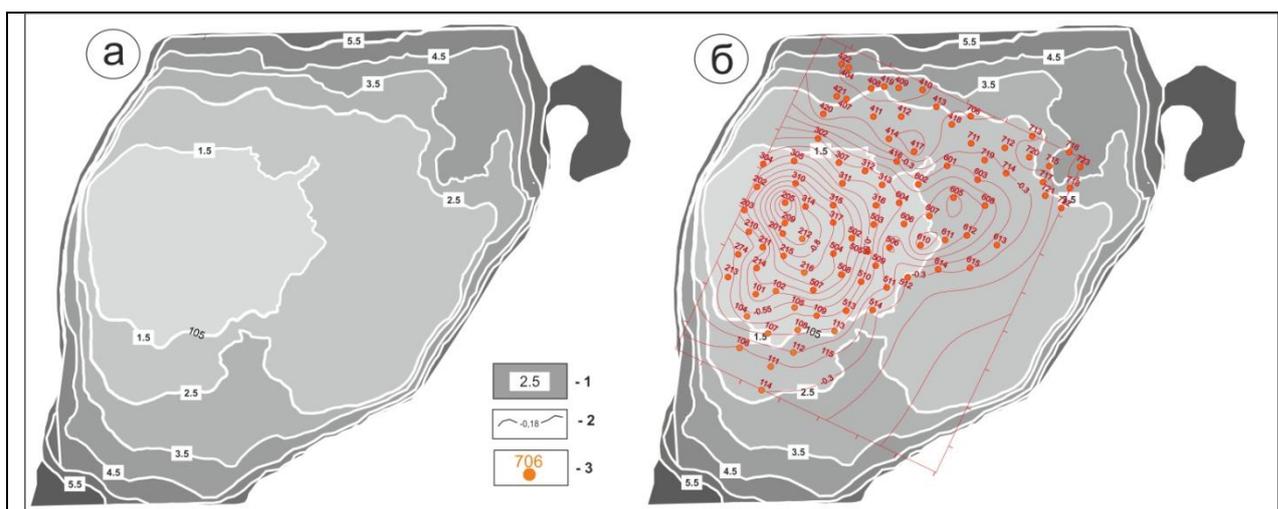


Рис. 4. Карта динамики пластового давления в период падающей добычи при разработке сеноманской залежи (а) и сопоставление модели оседания земной поверхности с областями падения пластового давления (б). 1 – изобары пластового давления, МПа; 2 – изолинии оседания земной поверхности над месторождением; 3 – скважина и ее номер

Из сопоставления карт (рис. 4, б) распределений динамического пластового давления и оседания земной поверхности хорошо видно, что области максимального оседания земной поверхности совпадают с областями минимального давления в залежи и соответствуют пространственному расположению изобар пластовых давлений и изолиниям деформации земной поверхности.

Необходимо также отметить, что для нефтяных, нефтегазовых, газоконденсатных, газовых месторождений, имеющих терригенный, карбонатный

или карбонатно-терригенный коллектор, основным показателем величины оседания земной поверхности будут являться показатели поровой и порово-трещинной сжимаемости пород и величина падения пластового давления во времени. Одной из важных проблем для прогноза величины оседания земной поверхности является достоверность определения коэффициента поровой сжимаемости пород, которая в основном оценивается с помощью расчетных и гидродинамических (гидропрослушивание) методов, очень редко – путем лабораторных исследований. Для большинства средних и крупных месторождений, характеризующихся неоднородным физико-геологическим строением залежей, имеющих интервал нефтегазоносности от 20 до 200 м и глубину залегания от 1 до 4 км, довольно трудно на основе единичных определений поровой сжимаемости пород дать ее характер изменения в залежи. В пределах данных месторождений должен быть организован геодинамический мониторинг процессов оседания земной поверхности.

Несмотря на проблемы в определении коэффициентов сжимаемости пор, на большинстве месторождений зафиксирована явная закономерность уплотнения пород коллекторов при снятии пластового давления в залежи.

Например, для разрабатываемых месторождений Терско-Сунженской нефтегазоносной области показано [11], что величина скорости оседания, обусловленная упругой деформацией вышележащих пород при снижении пластового давления, для карбонатных и гранулярных коллекторов находится в диапазоне 1–30 мм/год.

В работе [12] продемонстрирована связь уменьшения проницаемости пород при снятии пластового давления с уменьшением коэффициентов продуктивности скважин, что приводит к повышению зональной неоднородности продуктивного пласта по степени проницаемости.

Также, по мнению авторов [13], одной из наиболее важных проблем для 3D-гидродинамического моделирования, особенно карбонатных залежей, является достоверное определение проницаемости, раскрытости и азимутального направления естественных трещин. По данным для месторождений Пермского края [13], определение сжимаемости естественных трещин коллектора на основе методов гидропрослушивания и трассирующих индикаторов показало, что коэффициент сжимаемости трещин изменяется от $0,6 \times 10^{-2}$ до $3,48 \times 10^{-2} \text{ МПа}^{-1}$, а коэффициент

сжимаемости пор карбонатных пород попадает в интервал значений от $0,1 \times 10^{-4}$ до 6×10^{-4} МПа⁻¹.

Проведенные исследования по оценке формирования обширного оседания земной поверхности над разрабатываемыми месторождениями показывают, что из известных месторождений, на которых проводились повторные геодезические наблюдения, большинство имеют максимальное оседание от 0,8 до 1,5 м. Данный уровень изменения отметок рельефа земной поверхности скажется на месторождениях, расположенных в зонах многолетнемерзлых пород в связи с образованием участков подтопления и заболачивания, что приведет к нарушению теплового баланса грунтовых условий и активизации геокриологических процессов.

Исходя из расчетных и наблюдаемых данных следует, что уровень относительных деформаций в зонах максимального оседания земной поверхности определяется значениями в диапазоне 10^{-5} – 10^{-3} и характеризуется как критический.

Выводы

1. На основе результатов исследований по оценке деформационного воздействия техногенных геодинамических процессов, связанных с формированием обширного оседания земной поверхности над разрабатываемым месторождением, можно констатировать, что разведочные и наблюдательные, ликвидированные и законсервированные скважины, участвующие в разработке месторождения с начала его освоения, а также наклонные скважины добывающего фонда в зонах с критическими относительными деформациями горных пород подвержены дополнительному деформационному воздействию, уровень которого необходимо учитывать в проектах по бурению и ликвидации скважин.

2. Зонирование территории по уровню деформирования земной поверхности на основе комплекса геодинамических, лабораторных, геофизических и гидродинамических методов для газоконденсатных, газовых, а также нефтяных месторождений, разработка которых на определенной стадии ведется на естественном режиме, позволяет выявить зоны критических деформаций, уменьшения пористости и проницаемости пород коллекторов, а также относительного роста неоднородности продуктивного пласта по степени его проницаемости.

3. Использование моделей зонирования продуктивных пластов по степени деформационного воздействия на них на стадии падающей добычи позволит судить об

особенностях обводнения скважин и о перераспределении остаточных запасов в периферийных участках залежи.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Научное обоснование новых экологически чистых технологий разработки месторождений углеводородов в сложных горно-геологических условиях на основе 3D-компьютерных экспериментов», № АААА-А16-116022510270-1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Добровольский А.П., Кутыкова М.В. Актуальные проблемы ликвидации объектов капитального строительства на завершающем этапе разработки нефтяных месторождений // *Соврем. пробл. науки и образования*. 2014. № 1. С. 298–307.
2. Григулецкий В.Г. Обводнение месторождений – коренной вопрос современности Российской нефтегазовой отрасли // *Нефтесервис*. 2007. № 2. С. 35–40.
3. Никонов А.И., Тупысев М.К., Шаповалова Е.С., Юрова М.П. Геодинамические факторы техногенной оценки воздействия на ландшафт при разработке нефтегазовых месторождений // *Нефтепромысловое дело*. 2014. № 12. С. 51–56.
4. Никонов А.И., Тупысев М.К., Шаповалов Е.С., Яковлева О.П. Оценка эколого-геодинамических последствий на разрабатываемых нефтегазовых месторождениях // *Нефтепромысловое дело*. 2015. № 12. С. 62–66.
5. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика разломных зон: разломообразование в реальном масштабе времени // *Geodynamics&Tectonophysics*. 2014. Т. 5, № 2. С. 401–443.
6. Никонов А.И. Современные подходы к решению вопросов эколого-промышленной безопасности объектов нефтегазового комплекса // *Территория Нефтегаз*. 2013. № 8. С. 88–95.
7. Никонов А.И., Тупысев М.К. Учет геодинамических факторов при ликвидации нефтегазовых скважин // *Нефтепромысловое дело*. 2018. № 9. С. 53–56.
8. Кузьмин Ю.О. Относительные деформации изгиба земной поверхности и оценка геодинамической опасности объекта // *Маркшейдер.вестн.* 2015. № 5. С. 47–52.
9. Никонов А.И., Тупысев М.К., Веселова Н.М. Оценка деформации земной поверхности при разработке сеноманской залежи (на примере Ямбургского месторождения) // *Современная геодинамика недр и эколого-промышленная*

безопасность объектов нефтегазового комплекса: материалы Всерос. конф. М., 2013. С. 135–143.

10. Красовский А.В., Меркулов А.В., Сопнев Т.В., Кожухарь Р.Л., Лысов А.О., Бялик А.О. Анализ эффективности летних остановок промыслов на сеноманской залежи Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения для оптимизации разработки на заключительной стадии // Газовая пром-сть. 2017. № 12. С. 58–61.

11. Керимов И.А., Гайсумов М.Я., Ахматханов Р.С. К вопросу о деформации коллекторов нефти и газа в условиях ТСНО // Вестн. АН Чечен. Респ. 2012. № 1. С. 47–58.

12. Ерофеев А.А., Мордвинов В.А. Изменение свойств призабойной зоны скважин в процессе разработки Бобриковской залежи Уньвинского месторождения // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. № 5. С. 57–62.

13. Мартюшев Д.А., Лекомцев А.В., Котоусов А.Г. Определение раскрытости и сжимаемости естественных трещин карбонатной залежи Логовского месторождения // Вестн. ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. № 16. С. 61–69.