

УДК 528.481:622.83

К ВОПРОСУ О ВЫЧИСЛЕНИИ ПРОГНОЗНЫХ СКОРОСТЕЙ ТЕХНОГЕННЫХ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАХ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Волков В.И., Вершинина Ю.В., Волков Н.В.

*Научно-производственное объединение «Энергогазизыскания», Санкт-Петербург,
e-mail: tnvolkova@energaziz.ru, 9385228@gmail.com, volkov.nikita@yahoo.com*

В статье представлена модель расчета прогнозных величин техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры, возникающих вследствие разработки месторождений нефти и газа. Определение величин техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры предлагается выполнять с учетом материалов, полученных по результатам инженерных изысканий, а также проектных показателей разработки месторождений углеводородного сырья. Показано, что прогнозные величины природных (тектонических) и техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры должны учитываться при назначении параметров повторных маркшейдерско-геодезических измерений, выполняемых в пределах территорий месторождений углеводородного сырья (на геодинамических полигонах), в частности периодичности наблюдений, протяженности геодезических построений (геодинамических профилей и профильных линий), предельной погрешности определения скоростей техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры. Представлена формула, позволяющая назначать предельную погрешность определения скоростей техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры исходя из величины прогнозной скорости техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры. Статья может быть рекомендована геодезистам, маркшейдерам и другим специалистам, занимающимся изучением техногенных деформаций коллекторов углеводородов и приповерхностных слоев земной коры, обусловленных разработкой месторождений углеводородного сырья.

Ключевые слова: повторные маркшейдерско-геодезические наблюдения, геодинамические полигоны, нефтегазовые месторождения, техногенные смещения приповерхностных слоев земной коры, прогнозные величины техногенных смещений земной поверхности, проектные показатели разработки месторождений углеводородного сырья

ADDITIONAL COMMENTS ABOUT CALCULATING FORECASTED SPEEDS OF TECHNOGENIC EARTH'S SURFACE MOVEMENTS ON THE GEODYNAMIC POLYGONS OF OIL AND GAS FIELDS

Volkov V.I., Vershinina Yu.V., Volkov N.V.

*Research and production association «Energogazizyskaniya» ltd., St. Petersburg,
e-mail: tnvolkova@energaziz.ru, 9385228@gmail.com, volkov.nikita@yahoo.com*

The article presents a model for calculating the predicted values of the rates of technogenic displacements of the earth's surface, arising from the development of hydrocarbon deposits. It is proposed to determine the values of technogenic displacements of the earth's surface taking into account the materials of engineering research and design indicators of oil and gas field development, namely, the change in reservoir pressure, physical and mechanical properties of rocks (volume modulus of elasticity of the skeleton of rocks taking into account porosity, volume modulus of water elasticity), water-saturated and gas-saturated geometric volumes of reservoir. It is shown that the predicted values of the velocities of natural (tectonic) and technogenic displacements of the earth's surface should be taken into account when assigning the parameters of repeated surveying and geodesic observations at the geodynamic polygons of oil and gas fields, in particular, the frequency of observations, the length of geodetic structures (geodynamic profiles and profile lines), the maximum error in determining the velocities of the earth's surface displacements. A formula is presented that allows to assign a maximum error in determining the velocity of the earth's surface displacements based on the magnitude of the predicted speed of technogenic displacements of the earth's surface. The article can be recommended to geodesists, surveyors and other professionals involved in the study of technogenic deformation of reservoir layers and the earth's surface due to the development of hydrocarbon deposits.

Keywords: repeated surveying observations, geodynamic polygons, oil and gas fields, technogenic displacements of the earth's surface, forecast values of the rates of technogenic displacements of the earth's surface, design indicators of oil and gas field development

При строительстве и эксплуатации опасных производственных объектов на месторождениях углеводородного сырья в соответствии с требованиями действующих нормативных материалов [1], создаются геодинамические полигоны (ГДП). Основными методами наблюдений на ГДП нефтегазовых месторождений являются

маркшейдерские и геодезические методы (преимущественно геометрическое нивелирование), которые за редким исключением дополняются геофизическими и геохимическими исследованиями, что объясняется как требованиями нормативных материалов [1], так и объективной ситуацией.

Маркшейдерско-геодезические наблюдения за природными и техногенными деформационными процессами на месторождениях углеводородного сырья выполняются для решения задач по оценке современного состояния недр и земной поверхности, оперативного прогнозирования развития деформационных процессов, оказывающих влияние на безопасность объектов нефте- и газодобычи.

При назначении параметров повторных маркшейдерско-геодезических наблюдений [2–4] на ГДП нефтегазовых месторождений, в частности периодичности наблюдений τ , протяженности геодезических построений (геодинамических профилей и профильных линий) L , предельной погрешности определения скоростей смещений приповерхностных слоев земной коры $m_{\text{пред}}$, необходимо знать величины прогнозных скоростей $V_{\text{пр}}$ природных (тектонических) и техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры.

Оценка прогнозных скоростей природных (тектонических) смещений приповерхностных слоев земной коры $V_{\text{пр}}$ может быть выполнена по картам современных вертикальных движений земной коры, полученным по результатам комплекса геодезических, геоморфологических, геофизических и других наблюдений.

Установление прогнозных скоростей техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры $V_{\text{пр}}$, возникающих вследствие разработки нефтегазовых месторождений, может быть выполнено с использованием известных зависимостей механики коллектора углеводородов (пласта-коллектора) [5–7] на основе материалов инженерных изысканий, а также проектных показателей разработки нефтегазового месторождения. В настоящее время наиболее известными моделями расчета прогнозных значений техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры, вызванных разработкой месторождений углеводородного сырья, являются аналитические и численные модели, разработанные Ю.А. Кашниковым, С.Г. Ашихминым и др. [5]. Данные модели позволяют определить прогнозные величины техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры в зависимости от таких параметров, как падение пластового давления, физико-механические свойства горных пород, соотношение размеров коллектора и глубины его залегания [8, 9].

Целью настоящего исследования являлась разработка упрощенной модели расчета прогнозных величин техногенных

смещений приповерхностных слоев земной коры с учетом проектных показателей разработки месторождения углеводородного сырья, а также материалов, полученных по результатам инженерных изысканий.

Материалы и методы исследования

Разработка модели расчета прогнозных величин техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры проводилась на теоретическом уровне с использованием таких методов исследования, как абстрагирование, формализация, а также математическое моделирование.

Основным моментом при прогнозе техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры является определение степени уплотнения коллектора углеводородов. При изучении процесса уплотнения коллектора углеводородов принято считать [5], что деформации происходят в одноосном режиме при отсутствии или незначительном развитии горизонтальных деформаций. Сжатие коллектора углеводородов по вертикали происходит вследствие различий горного и пластового давлений, что приводит к изменению его порового ΔW и геометрического ΔV объемов.

Изменение геометрического объема ΔV коллектора углеводородов определяется исходя из следующего выражения:

$$\Delta V = S \cdot \Delta z, \quad (1)$$

где Δz – изменение эффективной мощности продуктивного коллектора; S – площадь коллектора углеводородов в плане в период максимального давления P .

Из выражения (1) следует, что вертикальная составляющая деформации коллектора углеводородов Δz может быть определена следующим образом:

$$\Delta z = \frac{\Delta V}{S}. \quad (2)$$

Изменение геометрического объема коллектора углеводородов ΔV , в свою очередь, равняется сумме изменений газонасыщенного $\Delta V_{\text{Г}}$ и водонасыщенного $\Delta V_{\text{В}}$ геометрических объемов при перепаде пластового давления ΔP :

$$\Delta V = \Delta V_{\text{Г}} + \Delta V_{\text{В}}. \quad (3)$$

Изменение газонасыщенного геометрического объема $\Delta V_{\text{Г}}$ при перепаде пластового давления ΔP можно найти по закону Гука:

$$\Delta V_{\text{Г}} = \frac{\Delta P}{Q_{\text{СК}}} V_{\text{Г}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{СК}}$ – объемный модуль упругости скелета горных пород с учетом пористости; $V_{\text{Г}}$ – текущий газонасыщенный геометрический объем.

Изменение водонасыщенного геометрического объема $\Delta V_{\text{В}}$ при перепаде пластового давления ΔP , в свою очередь, определяется из уравнения, учитывающего упругое сжатие поступившей в пласт воды:

$$\Delta V_{\text{В}} = \frac{\Delta P}{Q_{\text{В}}} V_{\text{В}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{В}}$ – объемный модуль упругости воды, учитывающий ее минерализацию; $V_{\text{В}}$ – текущий водонасыщенный геометрический объем.

Текущий газонасыщенный геометрический объем V_{Γ} определяется исходя из выражения

$$V_{\Gamma} = \frac{W_{\Gamma I}}{n}, \quad (6)$$

где $W_{\Gamma I}$ – текущий газонасыщенный поровый объем коллектора углеводородов; n – коэффициент пористости.

Текущий газонасыщенный поровый объем коллектора углеводородов $W_{\Gamma P}$ в свою очередь, вычисляется по формуле

$$W_{\Gamma I} = \frac{Q_{\Gamma I} \cdot T_{\text{пл}} \cdot K_I}{10 \cdot P_I \cdot T_{\text{СТ}}}, \quad (7)$$

где $Q_{\Gamma I}$ – текущий объем газа в пласте; $T_{\text{СТ}}$ и $T_{\text{пл}}$ – стандартная и пластовая температуры; K_I – текущий коэффициент сжимаемости газа; P_I – текущее пластовое давление.

Текущий водонасыщенный геометрический объем $V_{\text{В}}$ вычисляется по аналогичной формуле

$$V_{\text{В}} = \frac{W_{\text{В}I}}{n}, \quad (8)$$

где $W_{\text{В}I}$ – текущий водонасыщенный поровый объем коллектора углеводородов.

Текущий $W_{\text{В}I}$ водонасыщенный поровый объем коллектора углеводородов определяется как разность между общим поровым объемом коллектора углеводородов W и текущим $W_{\Gamma I}$ газонасыщенным поровым объемом, а именно:

$$W_{\text{В}I} = W - W_{\Gamma I} = W - \frac{Q_{\Gamma I} \cdot T_{\text{пл}} \cdot K_I}{10 \cdot P_I \cdot T_{\text{СТ}}}. \quad (9)$$

С учетом выражений (2), (3), (4) и (5) получим формулу для расчета прогнозных величин деформаций коллектора углеводородов в процессе эксплуатации нефтегазового месторождения:

$$\Delta z = \frac{\left(\frac{\Delta P}{Q_{\text{СК}}} V_{\Gamma} + \frac{\Delta P}{Q_{\text{В}}} V_{\text{В}} \right)}{S}. \quad (10)$$

Вышеприведенные расчеты выполнены при условии, что кровля коллектора абсолютно непроницаема, а пласт залегает горизонтально и полностью воспринимает нагрузку $h \cdot \gamma_{\text{ср}}$ от слоя вышележащих пород мощностью h со средним удельным весом $\gamma_{\text{ср}}$.

Величина прогнозной скорости техногенных вертикальных смещений приповерхностных слоев земной коры $V_{\text{пр}}$ в этом случае может вычисляться исходя из следующего выражения:

$$V_{\text{пр}} = \frac{\left(\frac{\Delta P}{Q_{\text{СК}}} V_{\Gamma} + \frac{\Delta P}{Q_{\text{В}}} V_{\text{В}} \right)}{S\tau}. \quad (11)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Вышеприведенные расчеты позволяют установить относительные оседания приповерхностных слоев земной коры в пределах территории месторождения и рассчитать прогнозные величины скоростей техногенных смещений приповерхностных слоев

земной коры $V_{\text{пр}}$, с учетом которых назначаются параметры повторных маркшейдерско-геодезических наблюдений.

Так, предельная погрешность установления скоростей техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры $m_{V_{\text{пр}}}$ назначается исходя из неравенства [2–4]:

$$m_{V_{\text{пр}}} \leq \frac{V_{\text{пр}}}{2t_{\beta}}, \quad (12)$$

где t_{β} – нормированный коэффициент, назначаемый с учетом степени надежности наблюдений на ГДП. При вероятности $\beta = 0,997$ коэффициент $t_{\beta} = 3$, при вероятности $\beta = 0,95$ коэффициент $t_{\beta} = 2$.

Исходя из выражений (11) и (12) предельные значения погрешностей установления скоростей техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры $m_{V_{\text{пр}}}$ могут назначаться в соответствии со следующим неравенством:

$$m_{V_{\text{пр}}} \leq 0,17 \frac{\left(\frac{\Delta P}{Q_{\text{СК}}} V_{\Gamma} + \frac{\Delta P}{Q_{\text{В}}} V_{\text{В}} \right)}{S\tau} \quad (13)$$

при вероятности $\beta = 0,997$, и

$$m_{V_{\text{пр}}} \leq 0,25 \frac{\left(\frac{\Delta P}{Q_{\text{СК}}} V_{\Gamma} + \frac{\Delta P}{Q_{\text{В}}} V_{\text{В}} \right)}{S\tau} \quad (14)$$

при вероятности $\beta = 0,95$.

Протяженность линий нивелирования и геодинамических профилей L назначается исходя из [3, 4] средней квадратической ошибки нивелирования на 1 км хода M , периодичности наблюдений τ и прогнозной скорости $V_{\text{пр}}$ техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры:

$$L \leq 14 \cdot 10^{-3} \frac{V_{\text{пр}}^2 \tau^2}{M^2} \quad (15)$$

при вероятности $\beta = 0,997$, и

$$L \leq 31 \cdot 10^{-3} \frac{V_{\text{пр}}^2 \tau^2}{M^2} \quad (16)$$

при вероятности $\beta = 0,95$.

С учетом выражения (11) выражения (15) и (16) примут следующий вид:

$$L \leq 14 \cdot 10^{-3} \frac{\left(\frac{\Delta P}{Q_{\text{СК}}} V_{\Gamma} + \frac{\Delta P}{Q_{\text{В}}} V_{\text{В}} \right)^2 \tau}{S^2 M^2}, \quad (17)$$

$$L \leq 31 \cdot 10^{-3} \frac{\left(\frac{\Delta P}{Q_{\text{СК}}} V_{\Gamma} + \frac{\Delta P}{Q_{\text{В}}} V_{\text{В}} \right)^2 \tau}{S^2 M^2}. \quad (18)$$

Устойчивость конструкций нивелирных пунктов $\delta H_{\text{доп}}$ к воздействиям экзогенных геомеханических процессов (морозное пучение, набухание и усадка горных пород, деформации приповерхностных слоев земной коры вследствие изменения температурного режима, давления и т.д.) должна удовлетворять следующему неравенству:

$$\delta H_{\text{доп}} \leq 0,12 V_{\text{пр}} \tau, \quad (19)$$

при вероятности $\beta = 0,997$, и

$$\delta H_{\text{доп}} \leq 0,18 V_{\text{пр}} \tau, \quad (20)$$

при вероятности $\beta = 0,95$.

С учетом выражения (11) выражения (19) и (20) примут следующий вид:

$$\delta H_{\text{доп}} \leq 0,12 \frac{\left(\frac{\Delta P}{Q_{\text{СК}}} V_{\Gamma} + \frac{\Delta P}{Q_{\text{В}}} V_{\text{В}} \right)}{S}, \quad (21)$$

$$\delta H_{\text{доп}} \leq 0,18 \frac{\left(\frac{\Delta P}{Q_{\text{СК}}} V_{\Gamma} + \frac{\Delta P}{Q_{\text{В}}} V_{\text{В}} \right)}{S}. \quad (22)$$

Выводы

Из выражений (13) и (14) следует, что предельные значения погрешностей определения скоростей техногенных смещений приповерхностных слоев земной коры $m_{\text{пр}}$ зависят от таких параметров, как физико-механические свойства горных пород (объемный модуль упругости скелета горных пород с учетом пористости $Q_{\text{СК}}$, объемный модуль упругости воды $Q_{\text{В}}$), параметров разработки месторождения (величина изменения пластового давления ΔP), водонасыщенного $\Delta V_{\text{В}}$ и газонасыщенного ΔV_{Γ} геометрических объемов коллектора углеводородов, а также от периодичности повторных наблюдений τ , площади S месторождения и необходимой надежности β определения скоростей смещений приповерхностных слоев земной коры.

Протяженность линий нивелирования и геодинимических профилей L зависит от тех же параметров и средней квадратической ошибки нивелирования на 1 км хода M .

Устойчивость конструкций нивелирных пунктов $\delta H_{\text{доп}}$ к воздействиям экзогенных

геомеханических процессов должна назначаться исходя из прогнозных величин деформаций коллектора углеводородов в процессе эксплуатации нефтегазового месторождения, а также с учетом необходимой надежности β определения скоростей смещений приповерхностных слоев земной коры.

Первоначальные (оценочные) значения предельной погрешности определения скоростей смещений приповерхностных слоев земной коры $m_{\text{пр}}$ и геодезических построений (протяженности линий нивелирования и профильных линий), назначаемые по их прогнозируемым значениям, подлежат корректировке по результатам наблюдений.

Список литературы

1. Инструкция по производству маркшейдерских работ: [РД 06-603-03: введ. 29.06.2003]. – М.: ГУП «НТЦ «Промышленная безопасность», 2003. – 120 с.
2. Волков В.И. Условия эффективного применения геодезических методов на геодинимических полигонах нефтегазовых месторождений / В.И. Волков, Н.В. Волков // Маркшейдерский вестник. – 2018. – № 2. – С. 21–25.
3. Волков В.И. Программно-целевой подход к постановке наблюдений за современными движениями земной поверхности на нефтегазовых месторождениях / В.И. Волков, Т.Н. Волкова, Ю.В. Вершинина // Маркшейдерский вестник. – 2013. – № 1. – С. 45–48.
4. Волков Н.В. О размещении, выборе конструкций и глубины заложений нивелирных пунктов на геодинимических полигонах нефтегазовых месторождений / Н.В. Волков // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – №5. – С. 54–59.
5. Кашников Ю.А. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 467 с.
6. Тупысев М.К. Оценка деформаций земной поверхности при разработке сеноманских отложений (на примере Ямбургского месторождения) / М.К. Тупысев, А.И. Никонов, Н.М. Веселова // Современная геодинимика недр и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса. – М.: ООО «Тиру», 2013. – С. 135–143.
7. Горно-геологическое обоснование и проектирование геодинимических полигонов / Арутюнов А.Е. [и др.] // Маркшейдерский вестник. – 2012. – № 4. – С. 43–51.
8. Пономарев А.С. Сопоставление механических свойств аргиллитов раннепермского возраста по результатам полевых и лабораторных испытаний / А.С. Пономарев // Вестник МГСУ. – 2013. – № 2. – С. 55–63.
9. Ощепкова И.А. Анализ влияния степени водонасыщенности на деформационные характеристики полускальных грунтов / И.А. Ощепкова, Е.Н. Сычкина // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2012. – № 2. – С. 8–16.