

Контроль динамики техногенных напряжений в горных породах пластов, в том числе покрышки, при создании и эксплуатации подземных хранилищ газа

М.К. Тупысев

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: m.tupysev@mail.ru

Аннотация. Показана динамика техногенных напряжений, возникающих при создании и эксплуатации подземных хранилищ газа в водонасыщенных пластах. Обосновано развитие локальные нагрузок, возникающих около скважин, которые значительно больше региональных, действующих по всей площади подземных хранилищ газа. Сделан вывод о возможном нарушении герметичности заколонного пространства скважин в результате действия выявленных нагрузок.

Ключевые слова: подземные хранилища газа, деформационные процессы, техногенные напряжения, надежность скважин.

Для цитирования Тупысев М.К. Контроль динамики техногенных напряжений в горных породах пластов, в том числе покрышки, при создании и эксплуатации подземных хранилищ газа // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып.2(25). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-25.art12>

При создании подземных хранилищ газа (ПХГ) одним из важных факторов является сохранение герметичности геологической структуры, выбранной для ПХГ.

В работе [1] допустимые давления (уже на стадии нагнетания газа) в создаваемом ПХГ оценивались с точки зрения теории гидроразрыва пласта-покрышки и выявленной взаимосвязи между текущим пластовым давлением в ПХГ, максимально допустимым давлением нагнетания газа и репрессией на пласт. Надежность покрышек при создании газохранилищ в водоносных пластах исследована в работе [2], но уже в зависимости от фракционного состава слагающих их горных пород и наличия в них разбухающих минералов.

На основании исследования влияния динамики пластового давления в коллекторах при создании и функционировании ПХГ на изменение толщины этих коллекторов и высотного положения земной поверхности по площади ПХГ, получены формулы для определения исследуемых величин [3, 4], показана важность данных исследований, в том числе визуальной констатации таких явлений в результате создания на ПХГ геодинамических полигонов [5, 6].

В результате исследований дано объяснение причин возникновения в горных породах пластов ПХГ и его покрышки вертикальных нагрузок. Покажем, что в результате вертикальных подвижек в пластах горных пород покрышки возникают растягивающие и сжимающие нагрузки, направленные вдоль напластования горных пород (латерали).

На рис. 1 показана схема данных процессов. Если первоначально элемент горных пород покрышки ПХГ имел длину l , то после повышения давления в объекте хранения в процессе создания ПХГ (после закачки газа и в результате поднятия покрышки и всех горных пород до земной поверхности) на величину Δh рассматриваемый элемент будет иметь длину L , то есть размер элемента, равный длине катета, становится равным длине гипотенузы. В результате простых вычислений определяем относительное удлинение элемента горных пород покрышки ПХГ:

$$\Delta L / l = (L - l) / l = (1 + (\Delta h/l)^2)^{1/2} - 1. \quad (1)$$

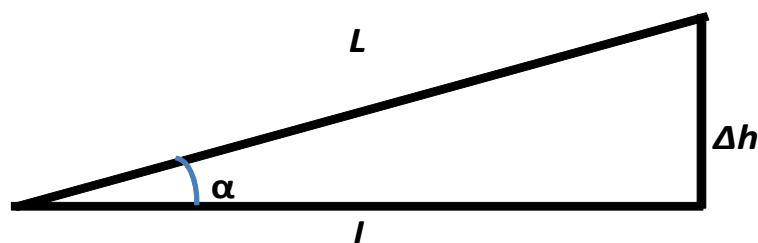


Рис. 1. Схема деформации кровли коллектора ПХГ при изменении в нем пластового давления: Δh – изменение толщины коллектора, l – начальная длина элемента покрышки ПХГ, L – длина этого элемента после изменения пластового давления в ПХГ, α – изменение угла наклона элемента покрышки ПХГ в результате деформации коллектора ПХГ

Аналогично можно рассматривать процесс снижения пластового давления в ПХГ и опускания земной поверхности – только в этом случае будет происходить сжатие горных пород покрышки. Как известно, горные породы имеют более высокие прочностные характеристики при сжатии и значительно меньшие – при растяжении, поэтому при оценке прочностных свойств горных пород покрышек наиболее показательны процессы растяжения.

По закону Гука напряжения σ , возникающие в упругом материале, пропорциональны его относительной деформации ε и модулю нормальной упругости E (модулю Юнга) этого материала:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon. \quad (2)$$

В нашем случае $\varepsilon = \Delta L / l$. Значение модуля Юнга является табличной величиной, но для горных пород его величина не однозначна, поскольку горные породы чаще представлены смесью различных минералов. Так, например, глины, которые чаще всего выступают в качестве покрышки создаваемых ПХГ, содержат в своем составе различное количество песчаника. Поэтому для оценки прочностных свойств (несущей способности) горных пород покрышки предпочтительней проведение первоначальных лабораторных исследований на образцах кернового материала, ориентированного в направлении напластования, с моделированием знакопеременных растягивающих и сжимающих нагрузок. По результатам таких экспериментов определяется модуль Юнга по замеряемым относительной деформации и прилагаемому напряжению. По мере увеличения этих величин определяется предельно допустимая относительная деформация рассматриваемого материала покрышки (фиксируемые параметры на момент разрушения образца). Далее по известным физическим параметрам пластов-коллекторов ПХГ (толщины, коэффициенты сжимаемости слагающих их горных пород) и изменениям пластового давления можно определить деформацию этих пластов, которую приравнивают к изменению высотного положения поверхности земли над ПХГ. Для этих определений также предпочтительнее иметь физические параметры пластов-коллекторов, определенные на основании лабораторных исследований кернового материала этих пластов, но на образцах, ориентированных по толщине пластов [3].

Для определения относительной деформации покрышки по формуле (1) используется разность изменения высотного положения в точках покрышки с максимальным изменением пластового давления (это в первую очередь депрессионные и репрессионные воронки в призабойной зоне скважин, расчетные значения давления и деформации коллекторов на заданном расстоянии от скважины) и расстояние между ними, как первоначальная длина элемента покрышки ПХГ. Определяемые таким образом относительные деформации сравниваются с результатами экспериментальных исследований кернового материала и с полученными в результате их проведения допустимыми значениями относительных деформаций.

При наличии геодинамического полигона на исследуемом ПХГ величины изменения высотного положения поверхности земли над ПХГ определяются более достоверно – на основе натуральных измерений [5, 6]. В данном случае при расчетах относительных деформаций используются результаты измерений в точках расположения

реперов геодинамического полигона. Эти расчеты будут носить уже не локальный характер, а региональный, охватывать площадь расположения геодинамического полигона на ПХГ.

При использовании геодинамических полигонов в качестве средства контроля следует учитывать некоторые особенности, связанные с реагированием фиксируемого изменения высотного положения поверхности земли над ПХГ на динамику пластового давления в его газовой залежи. При закачке газа вокруг нагнетательных скважин создаются репрессивные воронки давления, поэтому пластовое давление меняется как по площади ПХГ, так и по толщине газовой залежи. Аналогичная картина наблюдается при отборе газа только в результате образования вокруг эксплуатационных скважин депрессионных воронок. Поэтому наиболее информативными на геодинамических полигонах являются замеры, проводимые после окончания циклов закачки или отбора газа по истечении максимально возможного времени, за которое прекращаются перетоки пластовых флюидов и стабилизируется пластовое давление. Эти замеры, как показано в работе [3], могут быть использованы для определения коэффициента сжимаемости (растяжения) горных пород пластов газовой залежи, реагирующих на изменение в них пластового давления. Определяемые параметры горных пород пластов могут быть использованы для участков ПХГ, не охваченных сетью геодинамического полигона.

При получении расчетных или фактических данных об изменении высотного положения точек земли над ПХГ (или газовым месторождением) обычно строятся карты мульды осадки или подъема земной поверхности [7]. По этим картам относительные деформации горных пород покрышки ПХГ могут быть оценены по данным любых точек соседних изолиний построенных карт.

При отсутствии кернового материала и соответствующих исследований прочностных свойств горных пород покрышки ПХГ вычисляемые и определяемые нагрузки (воспринимаемые этими горными породами в результате проявления описанных техногенных процессов) сравнивают с известными табличными данными по прочностным свойствам горных пород или с результатами, полученными на каком-либо ПХГ с аналогичными горными породами.

Следует отметить тот факт, что горные породы коллекторов ПХГ, особенно в призабойной зоне, в процессе создания и эксплуатации ПХГ испытывают растягивающие и сжимающие нагрузки как по вертикали (по толщине пластов), так и по горизонтали, чем

объясняется интенсивное разрушение горных пород коллекторов и вынос их материала совместно с добываемым газом.

Это объясняется тем, что как уже указывалось выше, основное изменение пластового давления (при отборе и закачке газа) происходит в призабойной зоне. Пропорционально изменению пластового давления происходит деформация пластов-коллекторов. Например, в работе [7] была определена величина смещения земной поверхности в период закачки газа в ПХГ – 7 см, что соответствует относительной деформации $5,8 \cdot 10^{-5}$ (следует отметить, что авторами работы за относительную деформацию принимается отношение величины смещения к расстоянию, на котором произошло это смещение – что соответствует тангенсу образующегося угла наклона поверхности; определяемая таким образом относительная деформация близка к этой характеристике, определяемой по формуле (1), если рассматриваются большие расстояния между точками замера изменения толщин пластов-коллекторов). Эти определенные величины соответствуют изменению пластового давления на конец цикла закачки газа по всей площади ПХГ. Но для обеспечения закачки газа на забое скважин поддерживается давление, превышающее пластовое на величину репрессии, допустим, равную 10% от пластового давления. Этому превышению пластового давления соответствует дополнительное изменение толщины пластов-коллекторов на $7 \cdot 0,1 = 0,7$ см. Принимаем, что репрессия на пласт снижается в два раза на расстоянии 1 м от забоя скважины. Тогда относительная деформация пластов-коллекторов и покрышки ПХГ в призабойной зоне, определяемая по формуле (1), составит всего $2,4 \cdot 10^{-5}$, для удаленной зоны от скважины будет еще меньше, поскольку пластовое давление снижается более равномерно (без скачков), как и отношение $\Delta h/l$ из формулы (1).

Такие же, но сжимающие нагрузки действуют на рассматриваемые элементы ПХГ при отборе газа. Можно предполагать, что за счет пластических свойств горных пород покрышки ПХГ растягивающие и сжимающие нагрузки первоначально распространяются не на всю толщину покрышки, но в результате циклических воздействий происходит расширение зоны (толщины) воздействия на горные породы покрышки ПХГ и тампонажный материал обсадной колонны.

Таким образом, при исследовании рассматриваемых нагрузок следует различать растягивающие и сжимающие нагрузки, возникающие при изменении пластового давления в ПХГ по площади ПХГ – региональные нагрузки, а в призабойной зоне скважин

(в период закачки и отбора газа) – локальные нагрузки. Нагрузки (локальные), возникающие в призабойной зоне, значительно выше, чем нагрузки, возникающие по площади ПХГ (региональные), которые определяются в результате вычисления или замера изменения толщин пластов-коллекторов (высотного положения поверхности земли).

При создании и эксплуатации ПХГ необходимо учитывать то, что собираемый фактический материал о горных породах разреза ПХГ, например, керновый материал, носит локальный характер, характеризует места расположения скважин. На геологической структуре, выбранной для ПХГ, могут присутствовать участки с меньшими прочностными свойствами покрышки, как наиболее важного, уже отмеченного нами фактора надежности данной структуры. В данном случае имеются в виду разломы горных пород (в результате каких-либо тектонических явлений, выявляемые обычно геофизическими исследованиями), а также места с измененным составом горных пород покрышки. Поэтому на стадии создания ПХГ при закачке газа в него, когда на покрышку действуют наиболее опасные растягивающие нагрузки, особенно важны наблюдения за возможной разгерметизацией покрышки в отмеченных местах с меньшими прочностными свойствами и перетоком газа в пласты-коллекторы, расположенные выше покрышки.

Кроме того, как отмечалось в работе [8], при развитии техногенных деформационных процессов в результате изменения пластового давления в залежи на границе пластов с разными физическими свойствами, например, между покрышкой залежи (в нашем случае ПХГ) и вышележащим пластом, возникают касательные знакопеременные напряжения. Такие напряжения совместно с выявленными растягивающими и сжимающими нагрузками (особенно в призабойной зоне) являются совокупными причинами возможного растрескивания горных пород пластов от газовой залежи ПХГ до поверхности земли, в том числе разгерметизации покрышки ПХГ и тампонажного материала обсадных колонн эксплуатационных скважин.

Выполненные исследования совместно с результатами, полученными в более ранних работах, позволяют сделать следующие выводы:

1. Определение деформации пластов-коллекторов газовой залежи в процессе создания и эксплуатации ПХГ дает возможность оценивать растягивающие или сжимающие нагрузки, действующие на его покрышку.

2. Причиной возможной разгерметизации покрышки, а также тампонажного материала (часто – цемент) обсадных колонн скважин являются знакопеременные

растягивающие и сжимающие нагрузки (преимущественно в призабойной зоне) – локальные нагрузки, действующие на тампонажный материал как по вертикали, так и по горизонтали.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Обоснование инновационных экологически чистых технологий разработки месторождений УВ в сложных горно-геологических условиях на основе 3D-компьютерного моделирования, лабораторных экспериментов и опытно-промысловых исследований», № АААА-А19-119022090096-5).

Литература

1. Исаева Н.А., Михайловский А.А. Исследование максимального допустимого давления нагнетания газа в пласты-коллекторы // Газовая промышленность. 2011. № 4. С. 55–57.

2. Семенов Е.О. Оценка экранирующей способности глинистых пород и критерии их герметичности при создании газохранилищ в водоносных пластах // Газовая промышленность. 2012. № S(684). С. 19–23.

3. Тупысев М.К. Особенности проявления техногенных деформационных процессов при создании и эксплуатации ПХГ // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 4(23). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art26>

4. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. М.: Недра, 2004. 262 с.

5. Арутюнов А.Е., Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Никонов А.И. Производственный мониторинг подземных хранилищ газа с целью обеспечения их геодинамической безопасности // Геодинамика в решении экологических проблем развития нефтегазового комплекса: Материалы IV Междунар. совещ. Т. 2. М.: ИРЦ Газпром, 2004. С. 54–63.

6. Ярыгин Г.А., Лукьянов О.В., Гизатуллин А.Р., Кузьмин Ю.О., Никонов А.И., Тюрин А.Л. Обоснование и проектирование геодинамического полигона на Шатровском ПХГ // Газовая промышленность, 2012. № S(684). С. 66–70.

7. Никонов А.И., Тупысев М.К., Шаповалова Е.С., Яковлева О.П. Оценка геолого-геодинамических последствий на разрабатываемых нефтегазовых месторождениях // Нефтепромысловое дело. 2015. № 12. С. 62–66.

8. *Тупысев М.К.* Техногенные деформационные процессы при разработке газовых месторождений / Обзорная информация. Серия «Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений». М.: ИРЦ Газпром, 1997. 28 с.

Technogenic stresses dynamics control in rock formations, including cap rocks, during development and operation of underground gas storage facilities

M.K. Tupysev

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: m.tupysev@mail.ru

Abstract. The dynamics of man-made stresses arising during the establishment and operation of underground gas storage facilities in saturated formations is examined. The development of local loads near the wells, which are much larger than regional loads operating across the square to underground gas storage facilities, is justified. The conclusion about possible violation of tightness of the casing string-borehole space wells as a result of the identified activities is made.

Keywords: underground storage facilities, deformation processes, technogenic stresses, well reliability.

Citation: *Tupysev M.K.* Technogenic stresses dynamics control in rock formations, including cap rocks, during development and operation of underground gas storage facilities // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 2(25). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-25.art12> (In Russ.).

References

1. *Isaeva N.A., Mikhaylovsky A.A.* Studying the maximum permissible gas discharge pressure into reservoir beds // Gas Industry. 2011. No. 4. P. 55–57. (In Russ.).
2. *Semenov E.O.* Evaluation of screening ability of clay rocks and the criteria for their tightness when creating storage in aquifers // Gas Industry. 2012. No. S(684). P. 19–23. (In Russ.).
3. *Tupysev M.K.* Features of technogenic deformation processes in the creation and operations of underground gas storages // Actual Problems of Oil and Gas. 2018. Iss. 4(23). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art26> (In Russ.).
4. *Kuz'min Yu.O., Zhukov V.S.* Recent geodynamics and variations of physical rock properties. Moscow: Nedra, 2004. 262 p. (In Russ.).
5. *Arutynov A.E., Zhukov W.S., Kuz'min Yu.O., Nikonov A.I.* Production monitoring of underground gas storage facilities with a view to ensuring geodynamic safety // Geodynamics in solving ecological problems in oil and gas complex development: Proceedings of the 4th International Workshop. Vol. 2. Moscow: RPI Gazprom, 2004. P. 54–63. (In Russ.).
6. *Yarygin G.A., Lukyanov O.V., Gizatulin Yu.O., Kuz'min Yu.O., Nikonov A.I., Tyurin A.L.* Rationale and design of geodynamic polygon on Shatrovskoe UGS // Gas Industry. 2012. No. S(684). P. 66–70. (In Russ.).

7. *Nikonov A.I., Tupysev M.K., Shapovalova E.S., Yakovleva O.P.* Assessment of geological and geodynamic implications on oil and gas fields being developed // *Oilfield Engineering*. 2015. No. 12. P. 62–66. (In Russ.).

8. *Tupysev M.K.* Technogenic deformation processes during development of gas fields / *Survey information. Development and operation of gas and gas condensate fields*. Moscow: RPI Gazprom, 1997. 28 p. (In Russ.).