

Особенности определения деформационных характеристик горных пород пластов продуктивных залежей

М.К. Тупысев

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, Россия

E-mail: m.tupysev@mail.ru

Аннотация. Показаны нагрузки, действующие на образцы горных пород в пластовых условиях. Приведены схемы основных видов экспериментальных установок для исследования керна и методы моделирования пластовых условий на них. Дана оценка динамики развития области нарушения первоначального геодинамического равновесия над разрабатываемой залежью.

Ключевые слова: исследование кернового материала, деформационные характеристики горных пород, разработка месторождений углеводородов, контроль техногенных деформационных процессов.

Для цитирования: Тупысев М.К. Особенности определения деформационных характеристик горных пород пластов продуктивных залежей // Актуальные проблемы нефти и газа. 2022. Вып. 1(36). С. 90–97. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-36.art5>

Результаты исследования кернового материала являются главным прямым источником информации о фильтрационно-емкостных, физических, прочностных свойствах горных пород исследуемых пластов, их вещественного состава и пр. При проведении исследований, данные которых могут быть использованы для прогнозирования поведения продуктивных пластов нефтегазовых залежей в процессе их разработки, в том числе при рассмотрении деформационных процессов, возникает потребность в моделировании пластовых условий.

На рис. 1 представлена схема, показывающая направления сил, действующих на образец керна, смоделированы пластовые условия продуктивного пласта. При исследовании вертикального столбика керна, изготовленного таким образом, чтобы направление его оси было перпендикулярно плоскости продуктивного пласта (см. рис. 1а), сжимающей нагрузкой, действующей на торцы керна, является

горное давление (P_r) на глубине отбора образца горных пород. Горное давление уравнивается пластовым давлением в поровом пространстве керна ($P_{пл}$) и реакцией горных пород (R) на действующее горное давление:

$$P_r = P_{пл} + R. \quad (1)$$

По всей окружности керна действует сжимающее давление, называемое давлением бокового распора ($P_б$), которое зависит от упругих свойств горных пород [1, 2] и является функцией горного давления:

$$P_б = K_б P_r,$$

где $K_б$ – коэффициент бокового распора, рассчитываемый по формуле:

$$K_б = \mu / (1 - \mu),$$

где μ – модуль поперечной деформации или коэффициент Пуассона.

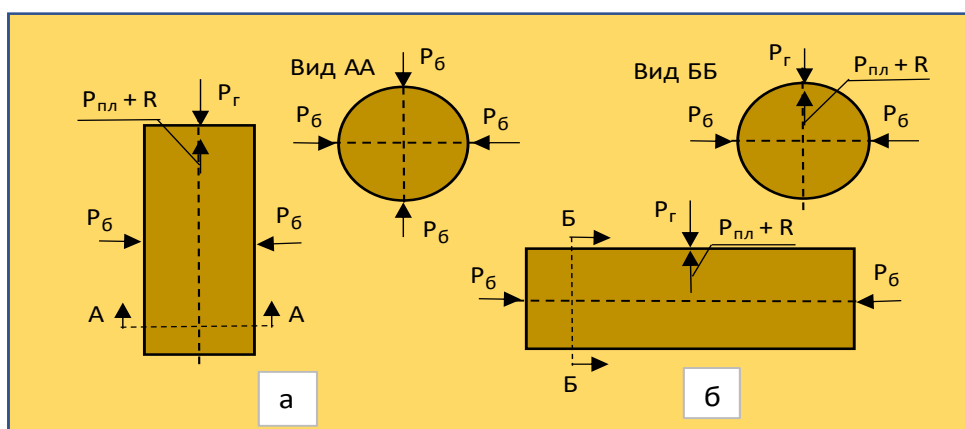


Рис. 1. Схема сил, действующих на образец горных пород в условиях продуктивной залежи:
 а – вертикальный образец, б – горизонтальный образец

Порядок определения коэффициента Пуассона определен ГОСТ 28985-91 [3].

Для горизонтального столбика керна, изготавливаемого из образца горных пород в плоскости залегания продуктивного пласта (см. рис. 1б), горное давление (P_g) действует на верхнюю плоскость керна, оно в этом направлении уравнивается пластовым (поровым) давлением ($P_{пл}$) и реакцией горных пород пласта (R). На торцы керна и на его боковые поверхности в плоскости залегания действует давление бокового распора ($P_б$).

Таким образом, при моделировании пластовых условий (при использовании вертикального керна) с целью определения деформационных характеристик горных пород рассматриваемого продуктивного пласта необходимо в процессе доведения пластового давления флюида в поровом пространстве керна и горного давления, направленного на торцы керна, до условий исследуемого пласта создавать сжимающее давление (давление обжима), действующее по всей боковой поверхности и уравнивающее давление бокового распора.

Поскольку коэффициент Пуассона для горных пород значительно меньше единицы (для песчаников $\mu = 0,13$, $K_б = 0,14$ [1]), то и создаваемое боковое сжимающее давление должно быть меньше горного (для нашего примера – для песчаников – $P_б = 0,14 P_g$).

Перед исследованием керна первоначально находится в атмосферных условиях, важным условием является синхронное доведение действующих на керна нагрузок (пластового давления флюида, горного давления и сжимающего бокового давления) до пластовых значений. Для такой синхронизации предлагается следующая последовательность действий:

- для заданной точки продуктивного пласта (глубины отбора керна) определяется коэффициент превышения горного давления над пластовым ($K_{гп} = P_g / P_{пл}$) и коэффициент бокового распора ($K_б$);

- при каждом шаге повышения пластового давления $\Delta P_{пл}$ горное давление увеличивают на величину $\Delta P_g = K_{гп} \Delta P_{пл}$;

- сжимающее боковое давление увеличивают на величину $\Delta P_б = K_б \Delta P_g$.

Далее при моделировании дренирования продуктивного пласта пластовое давление снижается при отборе пластового флюида из порового пространства керна.

Согласно формуле (1) при снижении пластового давления увеличивается реакция пласта на действующее горное давление. Это увеличение нагрузки называется эффективным давлением, оно сравнимо для исследуемых горных пород с погружением на дополнительную глубину с соответствующим увеличением горного

давления [4]. На каждом шаге снижения пластового давления в поровом пространстве керна необходимо увеличивать давление обжима (дополнительно к созданному в конце процесса приведения керна к начальным пластовым условиям) на величину $\Delta P_6 = K_6 \Delta P_{пл.}$

На рис. 2 приведена типовая схема установки для исследования керна, позволяющая создавать необходимые осевые нагрузки (имитация горного давления) и давление обжима [5].

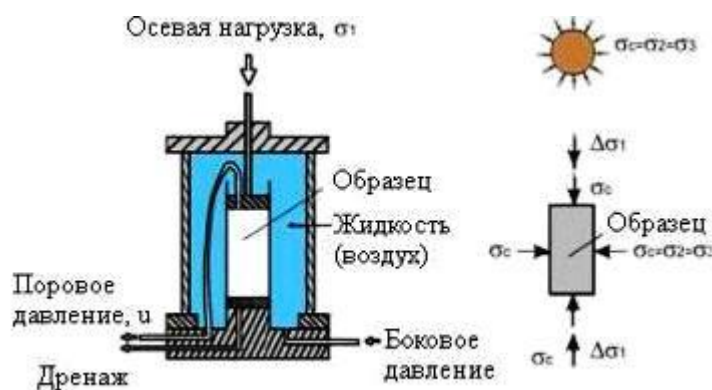
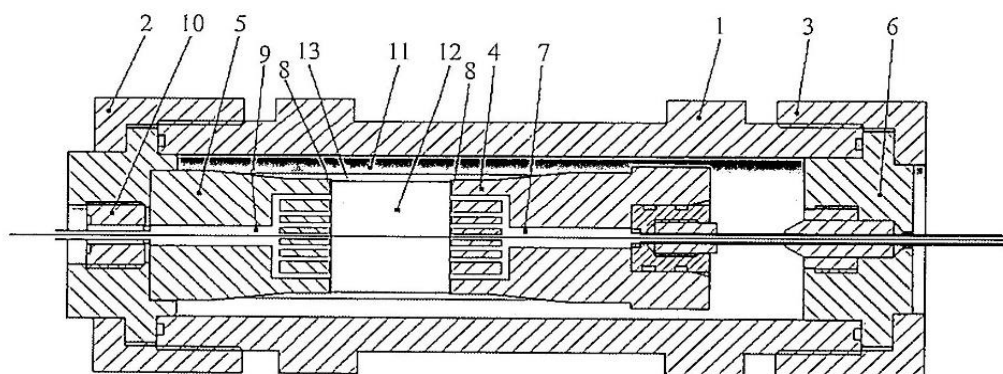


Рис. 2. Схема установки для исследования керна с возможностью создания заданных осевой нагрузки и бокового давления [5]

Известны установки, в которых керн помещается в резиновую манжету, при проведении исследований создается его всестороннее обжатие, в том числе и на торцы с одинаковым усилием, под которым понимается моделирование пластовых условий. На рис. 3 приведена схема одного из вариантов изготовления кернодержателя такой установки – ПУМА-650 [6]. Определение фильтрационно-емкостных свойств горных пород на этих установках вполне допустимо, однако исследования их деформационных характеристик (например, сжимаемости) при моделировании эффективных нагрузок за

счет снижения пластового давления в поровом пространстве керна дают искаженные результаты. Как показано выше, давление бокового обжима зависит от горного давления и величины снижения пластового давления, по значению оно составляет некоторую часть этих величин, определяемую коэффициентом бокового распора (в примере $K_6 = 0,14$). При создании величин бокового обжима, равными горному давлению, искусственно завышается устойчивость керна к продольной деформации, в результате определяемый, например, коэффициент сжимаемости горных пород занижается.



- 1 – корпус кернодержателя; 2, 3 – крышки кернодержателя; 4, 5 – измерительные поршни;
 6 – шток кернодержателя; 7 – трубка для подвода порового давления в образец;
 8 – сетка подачи порового давления; 9 – трубка выхода порового давления; 10 – уплотнение;
 11 – вода, создающая обжим; 12 – испытуемый образец; 13 – резиновая манжета

Рис. 3. Схема кернодержателя второго типа установки ПУМА-650 [6]

При использовании таких данных для оценочных расчетов деформации горных пород пластов разрабатываемых залежей получаются заниженные результаты оседания земной поверхности, дополнительных осевых нагрузок, действующих на обсадные колонны скважин и пр.

Все рассуждения по экспериментальному исследованию деформационных характеристик горных пород, приведенные выше, относятся к вертикальным образцам керна (см. рис. 1а).

При использовании горизонтальных образцов керна, как показано на рис. 1б, распределение сил, действующих на рассматриваемый образец горных пород, таково, что в экспериментальной установке привести керн к пластовым условиям начала и процесса разработки продуктивной залежи невозможно. Такой вариант изготовления образцов горных пород продуктивных пластов может быть использован для определения фильтрационно-емкостных свойств и, преимущественно, для исследования горизонтальной (плоскопараллельной) фильтрации пластовых флюидов, так как это происходит в условиях реальных продуктивных пластов.

Определяемые деформационные характеристики горных пород продуктивной залежи в лабораторных условиях по керновому материалу являются точечными характеристиками разреза скважины. Для определения рассматриваемой характеристики горных пород всего разреза продуктивной залежи необходим полный вынос керна в процессе бурения скважины и соответствующий комплекс лабораторных исследований. В работе [7] показана возможность определения средней сжимаемости горных пород коллекторов всего разреза продуктивной залежи в процессе ее разработки по результатам фиксации оседания земной поверхности около рассматриваемой скважины по формуле:

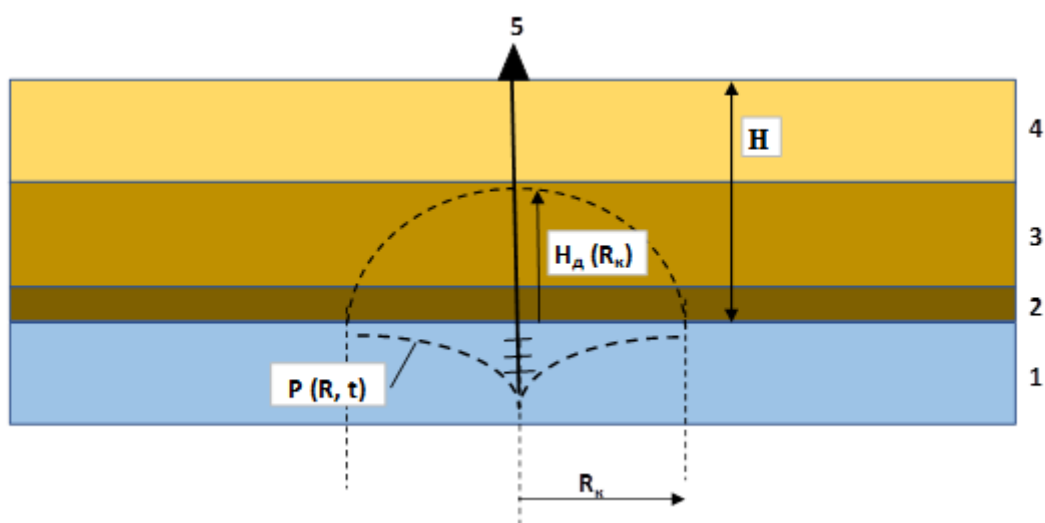
$$\beta_{сж} = \Delta H / \Delta P H_n,$$

где $\beta_{сж}$ – средняя сжимаемость горных пород продуктивных пластов; ΔH – величина оседания земной поверхности, приравненная к величине деформации дренируемых пластов; ΔP – величина снижения пластового давления; H_n – толщина продуктивных пластов.

Такой способ определения деформационной характеристики продуктивных пластов возможен при наличии на месторождении углеводородов специального геодинамического полигона, позволяющего получать информацию об изменении высотного положения земной поверхности в процессе разработки залежи по сравнению с начальным уровнем (до разработки). При таких наблюдениях деформационных процессов, происходящих в

дренируемых пластах продуктивной залежи и фиксируемых на земной поверхности, допускается синхронность опускания кровли залежи и земной поверхности.

Для уточнения деталей этого процесса на рис. 4 показана схема изменения пластового давления около скважины во время ее работы и влияния его динамики на первоначальное геодинамическое равновесие в горных породах выше залежи.



1 – продуктивная залежь, 2 – покрывка залежи,
3, 4 – горные породы от покрывки до дневной поверхности,
5 – эксплуатационная скважина

Рис. 4. Схема изменения пластового давления в призабойной зоне работающей скважины и области нарушения первоначального геодинамического равновесия в горных породах выше дренируемой залежи

Пластовое давление в призабойной зоне работающей скважины (5) изменяется от забойного до пластового на некотором расстоянии от забоя скважины – $P(R, t)$, образуя, так называемую, «депрессионную воронку». Радиус влияния скважины (радиус контура питания – R_k) пропорционален времени работы скважины. По мере изменения пластового давления нарушается первоначальное геодинамическое равновесие в горных породах продуктивной залежи (1),

описываемое уравнением (1). Горные породы покрывки залежи (2) и вышележащие (3, 4) также реагируют на это нарушение, начинается деформация дренируемых продуктивных пластов под действием возникающего эффективного давления. Деформация продуктивных пластов не сразу приводит к оседанию вышележащих горных пород до земной поверхности, поскольку они имеют некоторую несущую способность, зависящую от их прочностных свойств.

Над забоем работающей скважины возникает область нарушения первоначального геодинамического равновесия с растущим радиусом, равным R_k , и высотой H_d , соизмеримой с R_k . При достижении радиуса контура питания скважины некоторого критического значения высота области нарушения геодинамического равновесия достигает значения глубины залежи H , после этого возникает возможность фиксации деформации пластов разрабатываемой залежи на поверхности.

В реальных условиях разработка месторождений углеводородов ведется определенным фондом эксплуатационных скважин, расположенных на площади месторождения. При работе скважин их контуры питания соединяются, поэтому зоны нарушения первоначального геодинамического равновесия с некритическими радиусами в отдельных скважинах преобразуются в единую область развития деформационных процессов дренируемых пластов, которые могут быть зафиксированы на поверхности и служить материалом для оценки деформационных процессов, происходящих в залежи (месторождении).

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Совершенствование методов моделирования, лабораторных и промысловых исследований для создания новых технологий эффективного экологически чистого извлечения углеводородов в сложных горно-геологических условиях», № 122022800272-4).

Литература

1. Гиматудинов Ш.К. Физика нефтяного и газового пласта: Учебник для вузов. М.: Недра, 1971. 312 с.
2. Попов А.Н., Головкина Н.Н., Исмаков Р.А. Определение коэффициента бокового распора пористых горных пород по промысловым данным // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2005. № 2. С. 12. http://www.ogbus.ru/files/ogbus/authors/Popov/Popov_1.pdf (Дата обращения 11.04.2022).
3. ГОСТ 28985-91. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 11 с.

Выводы

1. Деформационные характеристики горных пород, определяемые на керновом материале с использованием установок, на которых пластовые условия моделируются всесторонним обжатием, имеют заниженные значения.

2. При моделировании на керновом материале деформационных процессов, происходящих в продуктивной залежи при ее разработке, давление бокового обжатия керна должно определяться по значению горного и эффективного давлений с учетом упругих свойств горных пород (коэффициента Пуассона).

3. Результаты контроля за деформационными процессами в разрабатываемой залежи по данным замера изменения высотного положения земной поверхности описывают пластовые условия при достижении размеров области нарушения первоначального геодинамического равновесия (изменения начального пластового давления) в залежи, соизмеримых с глубиной залегания рассматриваемой залежи.

4. *Петренко В.И., Ильченко Л.И., Канашиук В.Ф.* О механизме просадки земной поверхности при добыче жидких и газообразных полезных ископаемых // Советская геология. 1983. № 7. С. 109–117.

5. Методическое пособие по учебной геологической практике. М.: Московский государственный строительный университет, 2014. 306 с.

6. *Жуков В.С., Люгай Д.В.* Определение фильтрационно-емкостных и упругих свойств и электрических параметров образцов горных пород при моделировании пластовых условий. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2016. 56 с.

7. *Тупысев М.К.* Особенности контроля за разработкой газовых месторождений на поздней стадии // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2016. Вып. 1(13). С. 14. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art14>

Determination of deformation characteristics of rocks of productive reservoirs

M.K. Tupysev

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: m.tupysev@mail.ru

Abstract. The loads acting on rock samples under reservoir conditions are shown. The schemes of the main types of experimental installations for core research and methods for modeling reservoir conditions on them are given. An assessment of the dynamics of the development of the area of violation of the initial geodynamic equilibrium over the developed deposit is given.

Keywords: study of core material, deformation characteristics of rocks, development of hydrocarbon deposits, control of technogenic deformation processes.

Citation: *Tupysev M.K.* Determination of deformation characteristics of rocks of productive reservoirs // Actual Problems of Oil and Gas. 2022. Iss. 1(36). P. 90–97. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2022-36.art5> (In Russ.).

References

1. *Gimatudinov Sh.K.* Physics of oil and gas reservoir: Textbook for universities. Moscow: Nedra, 1971. 312 p. (In Russ.).
2. *Popov A.N., Golovkina N.N., Ismakov R.A.* Determination of the coefficient of lateral dissection of porous rocks according to field data // Electronic Scientific Journal Oil and Gas Business. 2005. No. 2. P. 15. http://www.ogbus.ru/files/ogbus/authors/Popov/Popov_1.pdf (Accessed on 11.04.2022).
3. GOST 28985-91. Rocks. Method for determination of deformation characteristics under uniaxial compression. Moscow: Standards Publishing House, 2004. 11 p. (In Russ.).
4. *Petrenko V.I., Ilchenko L.I., Kanashuk V.F.* On the mechanism of subsidence of the Earth's surface during the extraction of liquid and gaseous mineral resources // Sovetskaya Geologiya. 1983. No. 7. P. 109–117. (In Russ.).
5. Handbook on geological training practice. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 2014. 306 p: (In Russ.).
6. *Zhukov V.S., Lyugai D.V.* Determination of filtration-capacitive and elastic properties and electrical parameters of rock samples in the modeling of reservoir conditions. Moscow: Gazprom VNIIGAZ, 2016. 56 p. (In Russ.).
7. *Tupysev M.K.* Aspects of gas field development control on late stages // Georesources, Geoenergetics, Geopolitics. 2016. Iss. 1(13). P. 14. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art14> (In Russ.).