УДК 532.546

Д.В. Хлопцов

УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКРЫТОГО СТВОЛА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СКВАЖИН ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ УГЛЕВОДОРОДОВ С РАЗЛИЧНОЙ ТРАЕКТОРИЕЙ

Рассмотрены проблема обеспечения устойчивости открытого ствола скважины на стадии ее бурения и критические состояния ствола скважины. Установлены условия и характер разрушения стенок скважин и прискважинного массива в зависимости от уровня его начального напряженного состояния, прочностных свойств вмещающих горных пород и удельного веса бурового раствора. Предложены диаграммы устойчивости открытого ствола скважины для количественной оценки максимальной и минимальной плотностей бурового раствора, обеспечивающих устойчивость стенок скважины. Рекомендации могут быть использованы при проектировании скважин, прогнозе геолого-технологических осложнений, планировании мероприятий по предотвращению осложнений и аварийных ситуаций, а также мероприятий и работ по ликвидации их последствий.

Ключевые слова: скважина, хранение газа, устойчивость, геомеханические процессы, критическое состояние, напряжение, буровой раствор, подземные хранилища газа, бурение, открытый ствол скважины.

Основным подземным сооружением при разработке газовых месторождений, обеспечивающим добычу и хранение газа, является скважина. Общие закономерности геомеханических процессов в окрестности скважин, формирующих их критические состояния, являются характерными и для других подземных сооружений.

С учетом существующих в теории строительных сооружений методических подходов, в качестве критических состояний конструкций скважин принимаются такие состояния, при которых скважины перестают удовлетворять заданным эксплуатационным требованиям или требованиям при их строительстве.

Наступление критических состояний может быть обусловлено различными причинами, в зависимости от которых следует рассматривать две группы критических состояний. Первая

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 238–246.
© 2017. Д.В. Хлопцов.

группа включает критические состояния, наступающие в результате потери несущей способности конструкций скважин, т.е. разрушения при силовом воздействии с учетом неблагоприятного влияния внешней среды. Вторая группа – в результате непригодности конструкций скважин к нормальной эксплуатации по технологическим условиям.

Исходя общих методических подходов к анализу критических состояний подземных сооружений, критические состояния конструкций скважин должны рассматриваться в течении всего периода их существования – при строительстве и эксплуатации [1]. В процессе бурения скважин основными являются критические состояния первой группы, т.е. разрушение конструкции скважины при силовом воздействии и неблагоприятном влиянии окружающего породного массива и наполнителя скважины. Под разрушением конструкции скважины в процессе бурения следует понимать разрушение породных стенок от влияния напряженно-деформированного состояния окружающего породного массива или горного давления, что препятствует продолжению буровых работ.

Оценка критических состояний конструкций подземных сооружений, в том числе и скважин, включают разработку расчетной схемы и выбор методов исследования критических состояний.

В настоящее время при исследовании геомеханических процессов в породных массивах, окружающих подземные сооружения, используются две расчетные схемы: в полных напряжениях [1, 2, 3, 4] и в дополнительных напряжениях [5].

Расчетная схема в полных напряжениях, которая применяется давно, предполагает нагружение вмещающего подземное сооружение породного массива на внешних, бесконечно удаленных границах силами, имеющими место на глубине заложения подземного сооружения. В результате определяется полное напряженно-деформированное состояние в окрестности подземного сооружения, которое затем используется для оценки критических состояний конструкций подземных сооружений. Такая расчетная схема адекватно отражает геомеханические процессы, если горная выработка (подземное сооружение) существует в породном массиве до его нагружения.

В действительности, горная выработка образуется в уже нагруженном породном массиве, что учитывается расчетной схемой в дополнительных напряжениях, которая применяется сравнительно недавно и представляет нагружение породного масси-

ва «снимаемой» с контура выработки нагрузкой, эквивалентной напряженному состоянию ненарушенного выработкой массива на глубине заложения подземного сооружения. В результате определяется дополнительное напряженно-деформированное состояние в окрестности подземного сооружения, адекватно отражающее технологию сооружения горной выработки. В этом смысле расчетная схема в дополнительных напряжениях является более прогрессивной.

Методы исследования критических состояний можно классифицировать следующим образом: учитывающие только минимальную и максимальную компоненты главных напряжений; учитывающие все компоненты главных напряжений в виде инвариантов тензора напряжений. При использовании первого метода исследований не учитывается среднее по величине главное напряжение, которое в породном массиве оказывает упрочняющее воздействие, т.е. снижает риск наступления критических состояний. Кроме того, применение первого метода исследований предусматривает предварительный анализ напряженного состояния по определению минимального и максимального главных напряжений, что как правило, осложняет расчеты. Метод исследования в инвариантах тензора напряжений лишен указанных недостатков.

Бурение скважин сопровождается перераспределением напряжений в прискважинном массиве, процессами деформирования и разрушения стенок скважин и прилегающих пород. Процессы деформирования и разрушения могут проявляться в кавернообразовании на стенках скважины, ее овализации и заплывании, а также трещинообразовании на стенках в результате гидроразрыва пород, что негативно сказывается на технико-экономических показателях бурения, приводит к неудовлетворительному качеству последующей цементации, другим нежелательным последствиям, вплоть до аварийных ситуаций [6, 7, 8, 9, 10].

Развитие процессов деформирования и разрушения вмещающих пород, определяющее устойчивость стенок скважины, зависит от геологического строения породного массива, его начального напряженного состояния, механических свойств вмещающих пород, а также ориентации скважины относительно главных осей тензора начальных напряжений (рис. 1) [11].

Одним из способов управления состоянием стенок скважины и близлежащих пород при бурении является надлежащий подбор плотности бурового раствора [12].

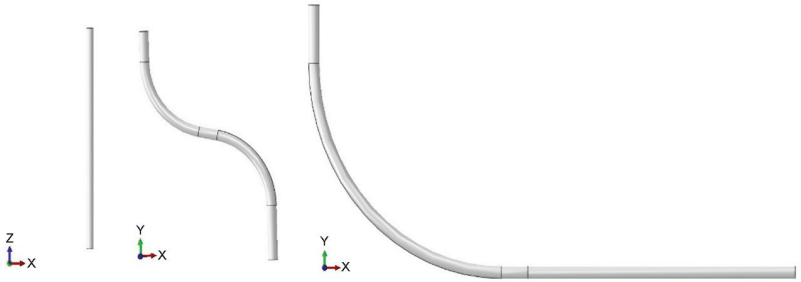

Рис. 1. Траектории скважин при разработке месторождений и эксплуатации подземных хранилищ

Однако, простое увеличение плотности не решает проблему, т.к. помимо экономических аспектов («граммы» плотности стоят недешево), существуют еще и соображения технического порядка, заставляющие использовать растворы с минимально возможной плотностью (циркуляция раствора, производительность бурения, возможные потери бурового раствора в трещинах гидроразрыва при высокой плотности раствора). Для подбора оптимальной для данного интервала глубин плотности бурового раствора, т.е. минимальной, обеспечивающей устойчивое состояние ствола скважины, необходимы прогнозные оценки возможности и характера разрушения стенок скважины и прискважинного массива, полученные в результате аналитических или численных геомеханических расчетов.

Для вертикальной скважины или вертикального участка скважины минимальная и максимальная плотности бурового раствора, т.е. интервалы ее изменения, обеспечивающие устойчивость открытого ствола в сечении на глубине h, могут быть определены по диаграммам, полученным по результатам аналитических расчетов и представленным на рис. 2, 3, 4 и 5, где γ и $\gamma_р$ – соответственно объемный вес вышележащих пород и бурового раствора; λ – коэффициент бокового распора; $\sigma_{сж}$ и δ – соответственно предел прочности на одноосное сжатие и угол внутреннего трения вмещающих пород в рассматриваемом сечении скважины.

При относительной плотности бурового раствора $\gamma_р/\gamma \leq (\gamma_р/\gamma)_{min}$ реализуется разрушение стенок скважины с образованием поверхностей скольжения и трещин, ориентированных в окружном направлении, т.е. параллельно стенкам. Следствием чего в случае пластичных пород является уменьшение диаметра скважины (заплывание) с возможным прихватом бурового инстру-

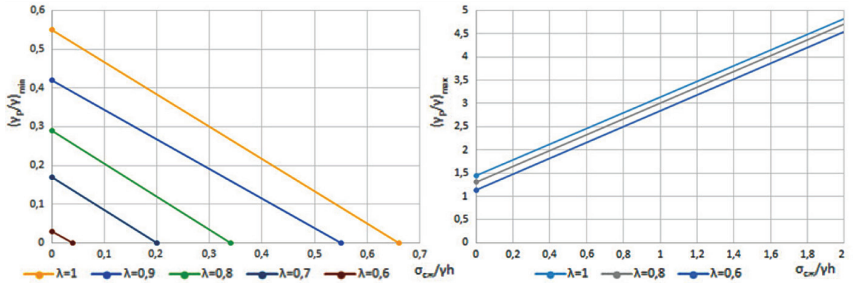

Рис. 2. Интервал изменения плотности бурового раствора, обеспечивающей устойчивость открытого ствола скважины, для угла внутреннего трения пород δ = 20°

мента. В случае крепких пород разрушение реализуется с нарушением сплошности массива, что приводит к увеличению диаметра скважин (кавернообразованию) и также может является причиной прихвата бурового инструмента.

При относительной плотности бурового раствора $\gamma_p/\gamma \geq (\gamma_p/\gamma)_{max}$ разрушение стенок скважины происходит с образованием поверхностей скольжения и трещин, ориентированных в радиальном направлении. В случае пластичных пород это приводит к увеличению диаметра скважин (кавернообразованию), в крепких породах – к появлению трещин гидроразрыва с поглощением бурового раствора.

В случае горизонтальной скважины или горизонтального участка скважины устойчивость открытого ствола обеспечивается при более высокой минимальной плотности бурового раствора. Для определения минимальной плотности бурового раствора могут быть использованы диаграммы, построенные по результатам численных расчетов и представленные на рис. 5.

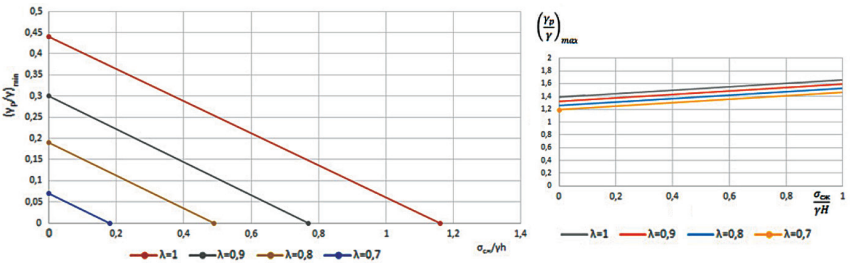

Рис. 3. Интервал изменения плотности бурового раствора, обеспечивающей устойчивость открытого ствола скважины, для угла внутреннего трения пород δ = 25°

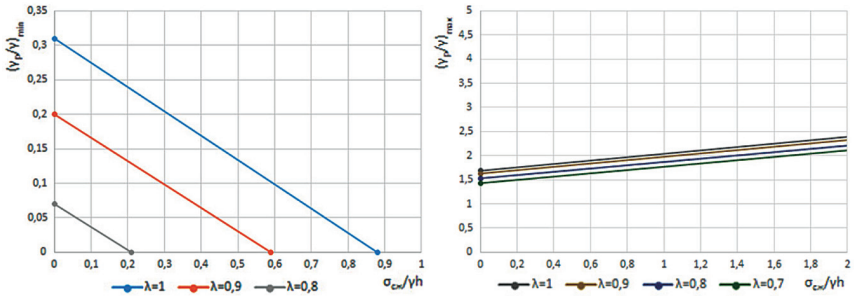

Рис. 4. Интервал изменения плотности бурового раствора, обеспечивающей устойчивость открытого ствола скважины, для угла внутреннего трения пород δ = 30°

Максимальная плотность бурового раствора, обеспечивающая устойчивость открытого ствола скважины, одинакова как для вертикального, так и для горизонтального участков скважины. Таким образом, для определения максимальной плотности бурового раствора при бурении горизонтальной скважины можно использовать диаграммы, приведенные на рис. 2–5.

В случае наклонного участка скважины коэффициент анизотропии начального напряженного состояния массива λ_α, характеризующий неравнокомпонентность начального напряженного состояния массива в плоскости, перпендикулярной оси скважины, определяется из геометрических соображений $\lambda_\alpha = \lambda/(\sin\alpha + \lambda\cos\alpha)$, где α – угол отклонения оси скважины от вертикали, λ – коэффициент бокового распора в породном массиве.

При плотности бурового раствора $\gamma_p/\gamma \le (\gamma_p/\gamma)_{min}$ область неупругих деформаций формируется в направлении действия максимального по величине начального напряжения при дополнительном объемном растяжении (разуплотнении) пород. Для

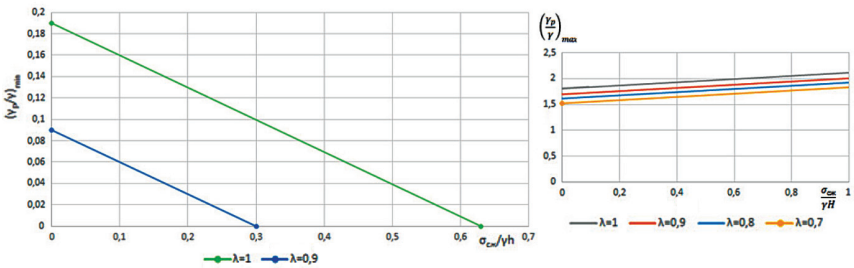

Рис. 5. Интервал изменения плотности бурового раствора, обеспечивающей устойчивость открытого ствола скважины, для угла внутреннего трения пород δ = 35°

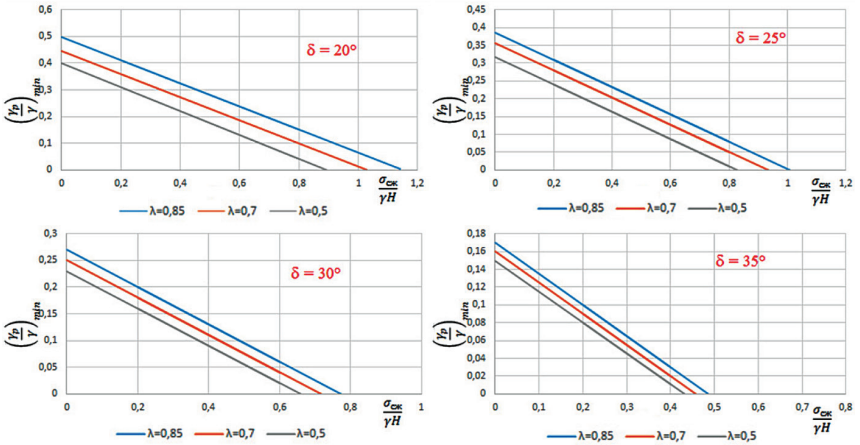

Рис. 6. Изменение минимальной плотности бурового раствора, обеспечивающей устойчивость открытого ствола горизонтальной скважины

крепких пород неупругое деформирование реализуется с нарушением сплошности и формированием трещин отрыва в тангенциальном направлении, что приводит к овализации скважины в направлении действия максимального по величине начального напряжения. Для пластичных пород типа глин неупругое деформирование, происходящее в форме пластического течения без нарушения сплошности, приводит к овализации скважины в направлении действия минимального по величине начального напряжения.

При плотности бурового раствора $\gamma_р/\gamma \geq (\gamma_р/\gamma)_{max}$ область неупругих деформаций формируется в направлении действия минимального по величине начального напряжения при дополнительном объемном сжатии (уплотнении) пород. В случае крепких пород неупругое деформирование реализуется с формированием трещин гидроразрыва в радиальном направлении, т.е. направлении действия минимального по величине начального напряжения. Для пластичных пород неупругое деформирование, происходящее без нарушения сплошности, приводит к овализации скважины в направлении действия минимального по величине начального напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мори В., Фурментро Д.* Механика горных пород применительно к проблемам разведки и добычи нефти: перевод с английского и французского. – М.: Мир, 1994. – 416 с.

2. *Cheatham J. B.* Wellbore Stability// Journal of Petroleum Technology. June, 1984. pp. 889–896.
3. *Youquan Y., Yongen C., Zhaowei Ch. et al* Theoretical solution of casing loading under non-uniform ground stress field // Acta Petrolei Sinica. – 2006. – Vol. 27. – pp. 133–138.
4. *Саркисов Г. М.*, *Сароян А. Е.*, *Бурмистров А. Г.* Прочность крепления стенок нефтяных скважин. – М.: Недра, 1977. – 144 с.
5. *Хлопцов В. Г.* Оценка устойчивости подземных резервуаров // Газовая промышленность. – 2002. – № 2. – С. 70–73.
6. *Zhongmao W.* The casing damage mechanisms and its control in oil and water wells. Beijing. – N.Y: Petroleum Industry Press, 1994.
7. *Jun F., Boqian Y., Huaiwen Zh. et al* Analysis of surface loading on casing and cement sheath under nonuniform geologic stress // Journal of the University of Petroleum. China. – 1997. – Vol. 21. – pp. 46–48.
8. *Шеберстов Е. В.*, *Ковалев А. Л.*, *Рыжов А. Е.*, *Коваленко Ю. Ф.* Оценка прочности открытого ствола скважин методами физического и математического моделирования // Газовая промышленность. – 2012. – № 2. – С. 24–28.
9. *Карев В. И.*, *Коваленко Ю. Ф.* Геомеханика нефтяных и газовых скважин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (2). – С. 448–450.
10. *Zhang J.* Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes // International journal of rock mechanics and mining sciences. – 2013. – № 60. – pp. 160–170.
11. *Губайдулин А. Г.*, *Могучев А. И.* Смещение стенок наклонно-направленных скважин при воздействии тектонических напряжений // Газовая промышленность. – 2015. – № 12. – С. 122–126
12. *Кук Д., Гроукок Ф., Го Ц., Ходер М., Э. ван Орт* Повышение устойчивости ствола скважины для предупреждения и ликвидации поглощения бурового раствора // Нефтегазовое обозрение. – 2011. – № 4. – С. 37–49. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Хлопцов Дмитрий Валерьевич – аспирант,
МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: dkhloptsov@gmail.com.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2017. No. 4, pp. 238–246.

UDC 532.546

D.V. Khloptsov

STABILITY OF HYDROCARBONS UNDERGROUND STORAGES' UNCASED WELLS WITH DIFFERENT TRAJECTORIES

Production well constitutes an important and expensive civil engineering structures linking earth's surface with a layer of the collector in the development of oil and gas fields and underground gas storage in porous structures with production-capacity in underground storage of oil and gas in rock salt. The stability of the borehole, i.e., the implementation of forementioned functions is determined by the ability of structural elements to perceive the internal

load and the external load from the enclosing rock mass without excessive deformation and without being destroyed.

The sustainability of the well is one of the priority scientific and technical tasks at oil and gas production and underground storage. The task of ensuring the stability of the borehole occurs at the stage of drilling, which is accompanied by processes of deformation and fracture of the borehole walls and adjacent rock. The article deals with the problem of ensuring the stability of the open wellbore at the stage of drilling.

The article considers critical conditions of the wellbore. The conditions and nature of destruction of the wellbore and near-wellbore array are established depending on the level of the initial stress state, the strength properties of enclosing rocks and of the specific weight of drilling mud. Chart of stability of the open wellbore to quantify the maximum and minimum densities of the drilling mud ensuring the stability of the borehole walls is proposed.

Recommendations can be used in the design of wells, forecast of geological complications, planning of measures on prevention of complications and emergencies, as well as activities and liquidation of their consequences.

Key words: well, gas storage, stability, geomechanical processes, critical status, voltage, mud, underground gas storage, drilling, open hole well.

AUTHOR

Khloptsov D.V., Graduate Student, e-mail: dkhloptsov@gmail.com,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Mori V., Furmentro D. *Mekhanika gornykh porod primenitel'no k problemam razvedki i dobychi nefti*: perevod s angliyskogo i frantsuzskogo (Rock mechanics applied to problems of exploration and oil production: translation from English and French), Moscow, Mir, 1994, 416 p.

2. Cheatham J. B. Wellbore Stability. *Journal of Petroleum Technology*. June, 1984. pp. 889–896.

3. Youquan Y., Yongen C., Zhaowei Ch. Theoretical solution of casing loading under non-uniform ground stress field. *Acta Petrolei Sinica*. 2006. Vol. 27. pp. 133–138.

4. Sarkisov G. M., Saroyan A. E., Burmistrov A. G. *Prochnost' krepleniya stenok neftyanykh skvazhin* (The strength of attachment of the walls of oil wells), Moscow, Nedra, 1977, 144 p.

5. Khloptsov V. G. *Gazovaya promyshlennost'*. 2002, no 2, pp. 70–73.

6. Zhongmao W. *The casing damage mechanisms and its control in oil and water wells*. Beijing. N.Y: Petroleum Industry Press, 1994.

7. Jun F., Boqian Y., Huaiwen Zh. Analysis of surface loading on casing and cement sheath under nonuniform geologic stress. *Journal of the University of Petroleum. China*. 1997. Vol. 21. pp. 46–48.

8. Sheberstov E. V., Kovalev A. L., Ryzhov A. E., Kovalenko Yu. F. *Gazovaya promyshlennost'*. 2012, no 2, pp. 24–28.

9. Karev V. I., Kovalenko Yu. F. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011, no 4 (2), pp. 448–450.

10. Zhang J. Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2013, no 60, pp. 160–170.

11. Gubaydulin A. G., Moguchev A. I. *Gazovaya promyshlennost'*. 2015, no 12, pp. 122–126.

12. Kuk D., Groukok F., Go Ts., Khoder M., E. van Ort. *Neftegazovoe obozrenie*. 2011, no 4, pp. 37–49.