

## **ПРОЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ ОБСАДНЫХ КОЛОНН ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗОК ГИДРОРАЗРЫВА**

Гайдайчук В.В.

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Худолий С.Н., Шлюнь Н.В.

Национальный транспортный университет  
г. Киев, Украина

**АНОТАЦІЯ:** В роботі розглядається задача математичного моделювання напружено-деформованого стану конструкції обсадної колони під впливом різних навантажень методом скінчених елементів. Показана можливість виникнення напружень і переміщень в цементному кільці, що перевищують допустимі значення. Результати можуть бути використані при проектуванні конструкцій обсадних колон.

**АННОТАЦИЯ:** В работе рассматривается задача математического моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции обсадной колонны под воздействием различных нагрузок методом конечных элементов. Показана возможность возникновения напряжений и перемещений в цементном кольце, превышающих допустимые значения. Результаты могут быть использованы при проектировании конструкций обсадных колон.

**ABSTRACT:** The problem of mathematical modeling of stress-strain state of the casing structure under various loads by finite element method is considered in the work. The possibility of occurrence of stresses and displacements in the cement ring, exceeding the permissible values is shown. The results can be used when designing structures of the casing.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** скважина, обсадная труба, цементное кольцо, гидроразрыв.

## **ВВЕДЕНИЕ**

При строительстве и эксплуатации скважин по добыче нефти и газа происходят аварии с катастрофическими последствиями для окружающей среды. Одной из основных причин таких аварий является потеря герметичности конструкций обсадных колонн, которая происходит вследствие некачественного цементирования или разрушения цементного кольца под действием нагрузок, возникающих во время строительства и эксплуатации скважины. Наиболее опасными для цементного кольца являются нагрузки, возникающие после его затвердения: при гидроразрыве либо комбинация внешнего и внутреннего давлений, которая вызывает максимальные касательные напряжения в нем.

### **КОНСТРУКТИВНАЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СХЕМЫ НИЗА СКВАЖИНЫ**

В запланированном состоянии конструкция низа скважины включает стальную трубчатую обсадную колонну, вставленную концентрически в цилиндрическую полость скважины. Пространство между внешней поверхностью обсадной колонны и стенкой скважины заполняется цементным раствором, который при затвердевании превращается в цементный камень. В качестве горной породы рассмотрено два варианта: аргиллит и карбонат. Для расчетов задавались следующие геометрические параметры: диаметр трубы 168,3 мм, толщина стенки 8,9 мм; диаметр скважины 220 мм.

### **МАТЕРИАЛЫ, ПОРОДА И ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Для численного моделирования выделен фрагмент породы размером 5,2 м×5,2 м, находящийся вокруг конструкции скважины и содержащий слой разуплотненной породы на расстоянии до 0,5 м от центра скважины [1].

Присутствие разуплотненного слоя породы обусловлено релаксацией материала горной породы после проходки скважины, которая приводит к деформации породы внутрь скважины. Последующая проходка боковой армированной поверхности породоразрушающего инструмента убирает излишки сдеформировавшегося материала породы, приводя скважину к номинальному диаметру и уравновешенному состоянию. Как показано в [1, 2], напряжения в окрестности скважины затухают приблизительно на расстоянии четырёх радиусов скважины, с чем и связан выбор размера разуплотненной области. Упругие свойства разуплотненной горной породы подбирались из условия равновесия стенки скважины под

действием внутреннего гидростатического давления промывочной жидкости 339 атм. и внешнего давления, действующего на выделенный для расчета фрагмент породы (было выбрано два варианта 306 атм. и 324 атм.). Таким образом, было решено четыре задачи равновесия стенки скважины (перемещения узлов порядка  $10^{-7}$  м) при действии на выделенный фрагмент породы по внутреннему контуру давления 339 атм. и соответствующего давления по внешнему контуру:

При моделировании пластических деформаций, для упрощения вычислений все материалы предполагались билинейными. Для таких материалов разгрузка осуществляется по линейному закону с модулем упругости как на первом линейном участке. Модули упругости при сжатии и растяжении считались одинаковыми. Применялся критерий пластичности Мизеса [3]. Свойства материалов были приняты следующими:

Сталь  $E = 2,06E+11$  Па;  $\mu = 0,3$ ;  $\sigma_T = 350000000$ , Па.

Аргиллит  $E = 1,0E+10$  Па;  $\mu = 0,335$ ;  $\sigma_T = 184000000$ , Па.

Карбонат  $E = 2,32E+10$  Па;  $\mu = 0,314$ ;  $\sigma_T = 184000000$ , Па.

Цемент  $E = 1,35E+10$  Па;  $\mu = 0,25$ ;  $\sigma_T = 10000000$ , Па.

## ПРИНЯТЫЕ НАГРУЗКИ

Давление в колонне при распаковке и гидроразрыве  $P_{вн.рас.} = 524$  атм. Давление за колонной на забое  $P_{гс.зак.} = 455$  атм. При освоении и эксплуатации давление в колонне на забое  $P_{заб} = 115$  атм. Давление за колонной (верхний проницаемый горизонт)  $P_{пл} = 306$  атм.

Расчет бокового горного давления. Средняя плотность вышележающей породы  $\rho_n = 2500$  кг/м<sup>3</sup>. Средний коэффициент Пуассона  $\nu = 0,314$ .  $k = \nu / (1 - \nu) = 0,4577$ . Глубина скважины по вертикали  $H = 2950$  м. Горное давление  $\sigma_z = \rho_n g H = 2500 * 9,81 * 2950 = 72348750$  Па. Боковое горное давление  $\sigma_x = k \sigma_z = 33115900$  Па = 324 атм.

## МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НИЗА СКВАЖИНЫ

Моделирование упруго-пластического деформирования системы осуществляется на основе уравнений теории упругости и пластичности. Они включают уравнения равновесия, нелинейные уравнения состояния (диаграммы нагружения) и уравнения кинематики, которые связывают относительные деформации и перемещения. При помощи метода конечных элементов система дифференциальных уравнений в частных производных приводится к системе нелинейных алгебраических уравнений, которые затем решаются методом Ньютона совместно с методом продолжения по

параметру. Далее по найденным значениям перемещений узлов конечных элементов подсчитываются упругие и пластические относительные деформации и напряжения.

## **КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ НИЗА СКВАЖИНЫ**

Поскольку конструкция крепи скважины моделируется идеальной круговой трубой, концентрически размещенной в скважине идеального кругового сечения, то предполагается, что геометрия скважины обладает симметрией, поэтому рассматривается четверть модели с условиями симметрии.

Также принято предположение о состоянии плоской деформации выделенного фрагмента. Это позволило применить для моделирования плоские конечные элементы типа плоская деформация – двумерный элемент, реализующий состояние плоской деформации ( $\epsilon_z = 0$ , где ось  $z$  направлена по нормали к плоскости элемента), то есть условие постоянства толщины элемента. Толщина элементов была принята 1 м.

При моделировании предполагалось жесткое сцепление между трубой и цементом, а также между цементом и породой. Выбор такой модели контакта поверхностей объясняется тем, что рассматривалась нелинейная статическая задача поиска установившегося состояния равновесия, при которой не берутся во внимание переходные процессы, такие как возникновение зазоров между контактирующими поверхностями вследствие разных скоростей их деформаций, а также сокращение этих зазоров до полного исчезновения вследствие последующей релаксации.

## **ВЫВОДЫ**

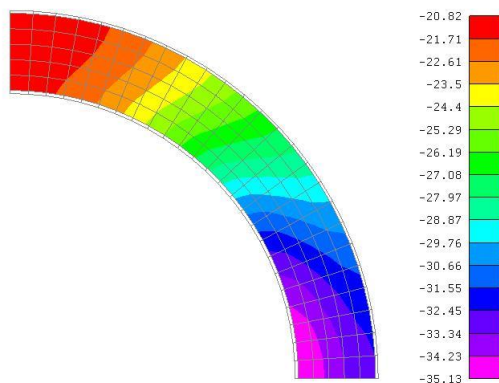
В результате численного моделирования исследовано влияние упругих свойств породы, внешнего давления на перемещения стенки обсадной трубы на различных этапах освоения и эксплуатации скважины.

Напряженно-деформированное состояние цементного кольца при гидроразрыве приведено на рис. 1. На этом рисунке горизонтальная ось  $X$ , а вертикальная – ось  $Y$ . Начало координат находится в центре поперечного сечения. На рис. (а), приведены проекции вектора внутренних напряжений на ось  $X$ , на этих же рисунках можно проследить и проекции этого вектора на ось  $Y$  для элементов, повернутых на  $90^\circ$ , поскольку задача симметричная.

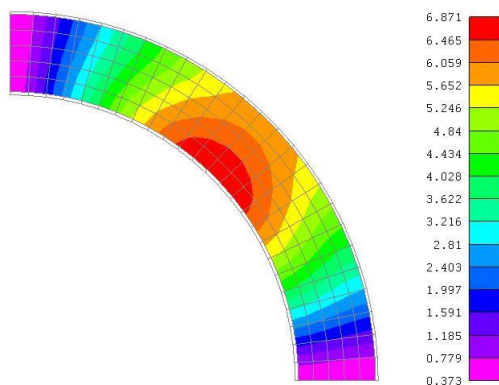
Описанная выше математическая модель позволила также сделать следующие выводы о качественном изменении перемещений трубы.

Положение рассматриваемого сечения над пакером или под пакером после затвердения цемента влияет не существенно (разница в переме-

щениях не более 2 мкм). Но для случая над пакером цементный камень может быть в напряженном состоянии, так как разгрузка стенок скважины (за счет падения давления от 455 до 306 атм.) будет происходить после формирования твердой структуры цементного камня.



а



б

Рис. 1. Распределение нормальных  $\sigma_x$  (а) и касательных  $\tau_{xy}$  (б) напряжений (МПа) в цементе при гидроразрыве ( $D_{\text{труб.}} = 168,3$  мм,  $\delta_{\text{труб.}} = 8,9$  мм, порода – аргиллит, внешнее давление 324 атм.)

При уменьшении внешнего давления с 324 атм. до 306 атм. и внутреннем давлении 339 атм., перемещения трубы при гидроразрыве и эксплуатации уменьшаются, остаточные перемещения трубы при гидроразрыве также уменьшаются.

При уменьшении жесткости породы, перемещения трубы при гидроразрыве и эксплуатации увеличиваются, остаточные перемещения трубы при гидроразрыве уменьшаются.

Таким образом, при смежном размещении двух пластов с существенно различными упругими свойствами, деформации цементного камня в них также будут различны и разница между ними может превышать допустимые значения (рис. 2).

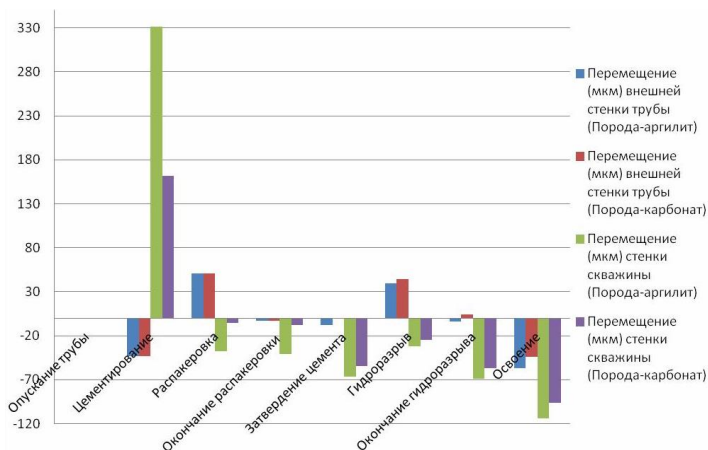


Рис. 2. Перемещения элементов конструкции скважины на различных этапах ее заканчивания и эксплуатации для различных пород

## ЛИТЕРАТУРА

1. Середа Н.Г. Бурение нефтяных и газовых скважин / Н.Г. Середа, Е.М. Соловьев. - М.: Недра, 1988. - 360 с.
2. Булатов А.И. Формирование и работа цементного камня в скважине / А.И. Булатов. - М.: Недра, 1990. - 409 с.
3. Будников В.Ф. Проблемы механики бурения и заканчивания скважин / В.Ф. Будников, А.И. Булатов, П.П. Макаренко - М.: Недра, 1996. - 495 с.

## REFERENCES

1. Sereda N.G. & Soloviov E.M. (1988). Burenie neftyanuh i gazovuh skvazin [Drilling oil and gas wells]. - Moscow: Nedra. - 360 p [in Russian].
2. Bulatov A.I. (1990). Formirovanie i rabota tsementnogo kamnya v skvazine [The formation and operation of a cement stone in the well]. Moscow: Nedra. - 409 p. [in Russian].
3. Budnikov V.F., Bulatov A.I. & Makarenko P.P. (1996). Problemu mehaniki burenia i zakanchivania skvazin [Problems of drilling and completion of wells]. Moscow: Nedra. - 495 p. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 20.07.2016 г.