

## ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЮБИНГОВОЙ КРЕПИ ПРИ ТАМПОНИРОВАНИИ ОКОЛОСТВОЛЬНОГО МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

<sup>1</sup>Николайчик М. А., <sup>1</sup>Журавков М. А.

*Белорусский государственный университет, Минск*

**Введение.** Проходка шахтного ствола и возведение сложной системы его крепления требует решения целого ряда специальных геотехнических задач. При этом, вследствие уникальных особенностей породной толщи, в которой проходят ствол, невозможно выполнить полную «стандартизацию» решаемых задач. В каждом случае проходки ствола возникает большой набор индивидуальных и «уникальных» задач, требующих нестандартного подхода и построения специальных модельных задач. Данные задачи можно условно разделить на два типа: задачи, связанные с оценкой напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «крепь ствола – вмещающий массив», а также задачи оценки состояния конструкций крепи в целом или ее отдельных элементов.

В данной статье рассматривается задача исследования напряженно-деформированного состояния тюбинговой крепи на этапе ее возведения. При этом учитывается технологический процесс нагнетания тампонажного раствора в околоствольный массив горных пород.

**Постановка задачи.** После возведения передовой бетонной крепи, вдоль ствола по направлению «снизу-вверх» возводится тюбинговая крепь, представляющая собой систему из чугунных колец, каждое из которых, в свою очередь, состоит из 15 секторов (рис. 1). В пространство между тюбинговыми кольцами и передовой крепью подается бетон. И затем, через специальные отверстия (шпуры) в околоствольный массив для гидроизоляции производится нагнетание тампонажного раствора (портландцемент).

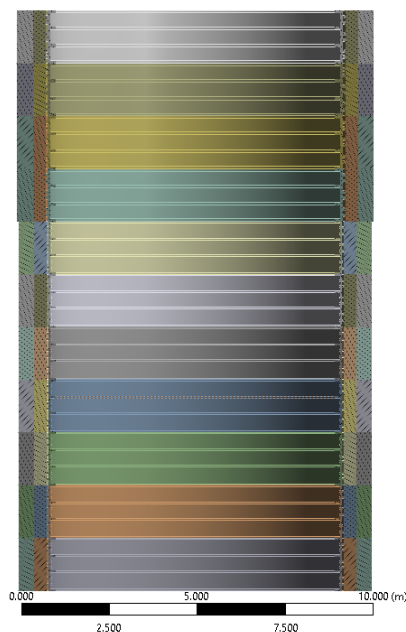


Рис. 1. Сечение ствола с крепью (тюбинговая крепь, передовая бетонная крепь, затюбинговый бетон)

Целью модельных исследований является изучение состояния тубинговой крепи при различных режимах подачи тампонажного раствора.

Свойства затубингового бетона С25/30 и передовой крепи С30/37, а также чугуна СЧ 25 отображены в табл. 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, ГПа	Коэф. Пуассона	Предел прочности на растяжение, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа
Чугун СЧ 25	7200	100	0,22	297	1000
Бетон С25/30	2400	32,5	0,16	1,8	39,3
Бетон С30/37	2430	34,5	0,16	2	45,8

**Граничные условия.** Итак, основная цель исследований стоит в определении НДС тубинговой крепи и бетона в затубинговом пространстве при нагнетании тампонажного раствора. При этом расчет НДС передовой крепи под воздействием вмещающего массива не производится. Поэтому граничные условия на внешней поверхности затубингового бетона принимаются в виде ограничения нормальных перемещений на данной поверхности. На боковые поверхности тубингов и затубинговый бетон действует давление, которое определяется давлением закачки тампонажного раствора. Учитывается вес тубинговой колонны, а также бетона в затубинговом пространстве. Условная расчетная схема с граничными условиями приведена на рис. 2.

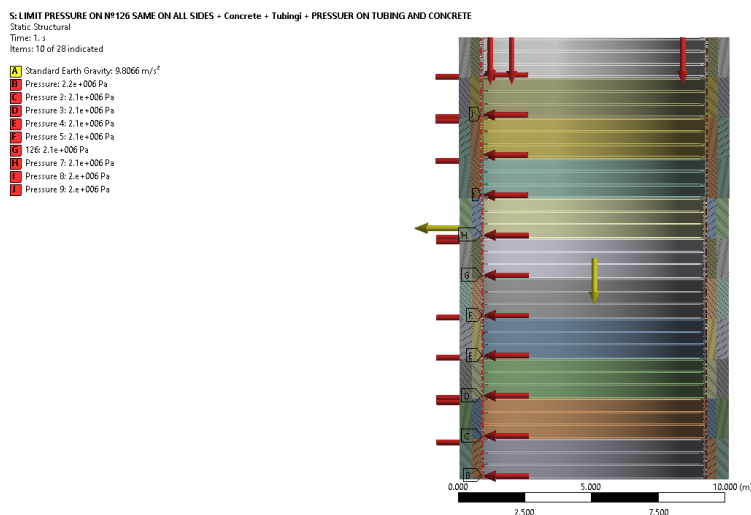


Рис. 2. Расчетная схема с граничными условиями рассматриваемой задачи

**Оценка прочности.** Обобщенная оценка НДС исследуемой системы выполнялась путем изучения значений коэффициента Надаи-Лодэ  $\mu_\sigma$  [1] для каждого элемента конечно-элементной сетки.

Напомним, что параметр Надаи-Лодэ характеризует объемное напряженное состояние в деформируемых телах:

– если  $\mu_\sigma \in [-1; -0,5]$  – соответствует состоянию обобщенного растяжения;

– если  $\mu_\sigma \in [-0,5; 0,5]$  – соответствует состоянию обобщенного сдвига;

– если  $\mu_\sigma \in [0,5; 1]$  – соответствует состоянию обобщенного сжатия.

Далее, в зависимости от вида объемного напряженного состояния, проверяется выполнение следующих критериев прочности [2]:

$$|\sigma_1| < \sigma_{tens}, \quad (1)$$

$$|\sigma_3| < \sigma_{comp}. \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_1$  – первое главное напряжение;  $\sigma_3$  – третье главное напряжение;  $\sigma_{tens}$  – предел прочности на растяжение;  $\sigma_{comp}$  – предел прочности на сжатие.

В силу того, что рассматриваемые материалы (бетон и чугун) хрупки и имеют низкий предел прочности на растяжение, то данные критерии вполне подходят для оценки прочности.

Далее приведены некоторые результаты комплексных модельных исследований.

**Равномерно распределенная нагрузка на тубинговую крепь.** Исследовалось состояние тубинговых колец и затубингового бетона при различных уровнях воздействия на них равномерно распределенного давления. На рис. 3 и 4 в качестве примера приведены результаты моделирования при воздействии давления с интенсивностью величиной 3,1 МПа (рабочее давление нагнетания раствора для тубингов рассматриваемого типа).

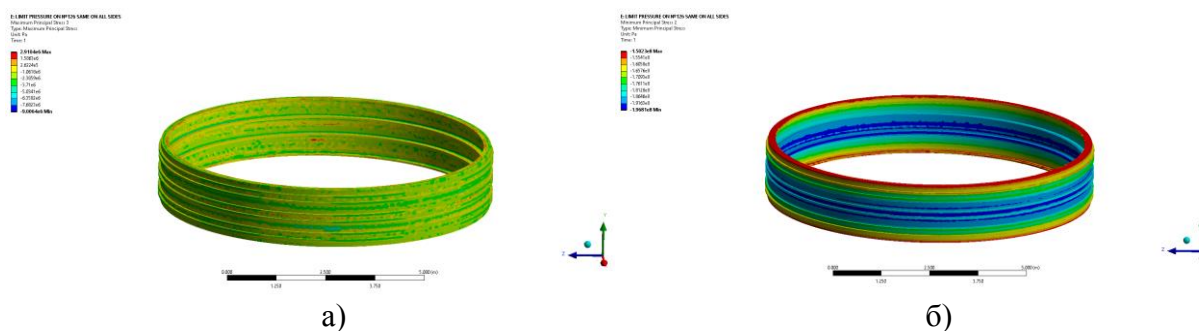


Рис. 3. Распределение главных напряжений в тубинговом кольце при равномерно распределенном давлении величиной 3,1 Мпа: а) первое главное напряжение; б) третье главное напряжение

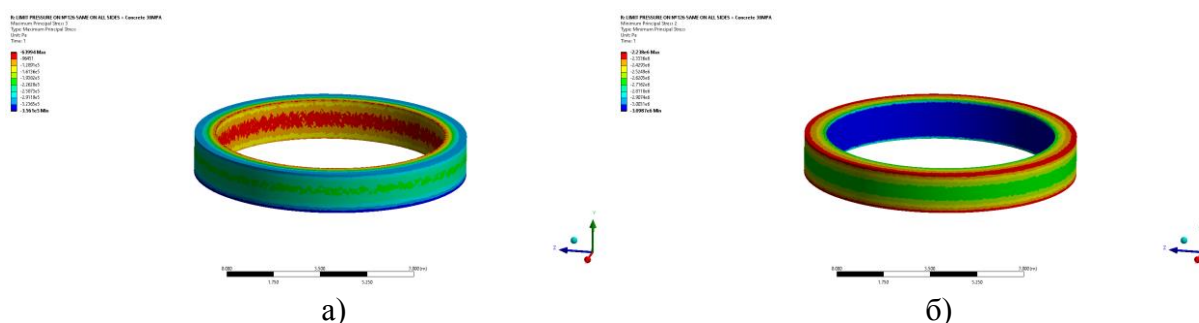


Рис. 4. Распределение главных напряжений в затубинговом бетоне при равномерно распределенном давлении интенсивности 3,1 Мпа: а) первое главное напряжение; б) третье главное напряжение

Отметим, что при данном уровне распределенной нагрузки области предельного состояния в тубинговых кольцах не формируются.

Выполненные модельные расчеты по определению величины критической нагрузки при которой может иметь место разрушение тьюбингового кольца при равномерном распределении нагрузки по всей его поверхности показали, что интенсивность распределенной нагрузки должна составлять не менее 15 МПа, рис. 5–6. При этом напряжения в затьюбинговом бетоне не достигают критических значений.

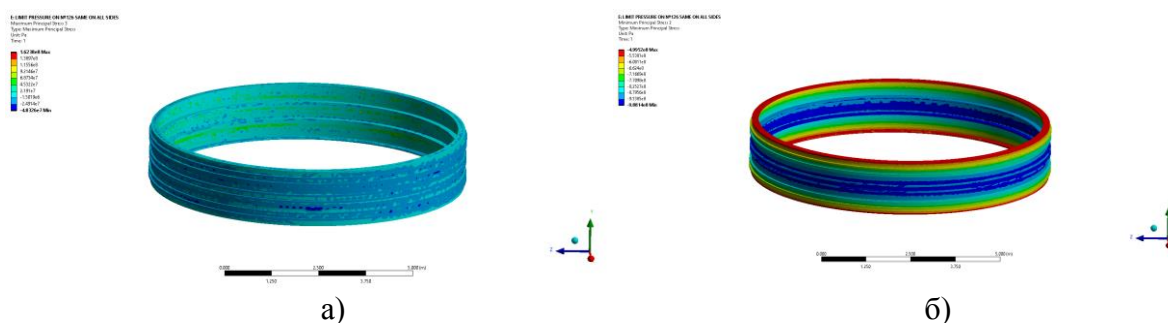


Рис. 5. Распределение главных напряжений в тьюбинговом кольце при равномерно распределенном давлении 15 МПа: а) первое главное напряжение; б) третье главное напряжение

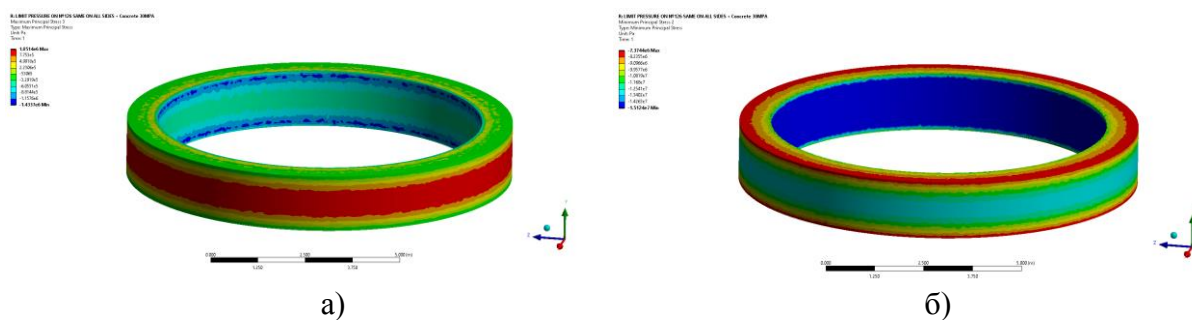


Рис. 6. Распределение главных напряжений в затьюбинговом бетоне при равномерно распределенном давлении 15 МПа: а) первое главное напряжение; б) третье главное напряжение

**Неравномерно распределенная нагрузка.** Оценим НДС тьюбингового кольца при неравномерном распределении нагрузки, действующей по его граничной поверхности.

Принималась расчетная схема следующего типа: на 14 из 15 тьюбингов в кольце действует равномерно распределенная нагрузка одной интенсивности, а на последний тьюбинг действует нагрузка интенсивности большой величины.

На следующих рис. 7–9 приведены отдельные результаты модельных расчетов при различных уровнях интенсивности действующих нагрузок.

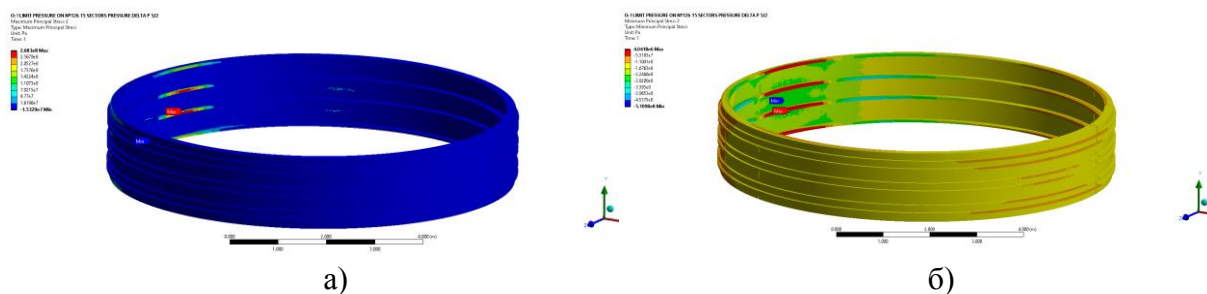


Рис. 7. Напряжения в тьюбинговом кольце при равномерном распределении давления величиной 2 МПа и наличии тьюбинга с давлением интенсивности 5 МПа: а) первое главное напряжение; б) третье главное напряжение

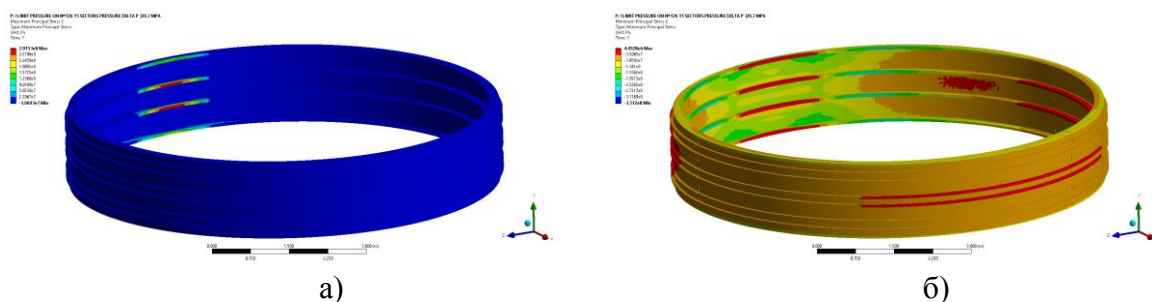


Рис. 8. Напряжения в тубинговом кольце при равномерном распределении давления величиной 0,7 МПа и наличии тубинга с давлением интенсивности 3 МПа: а) первое главное напряжение; б) третье главное напряжение

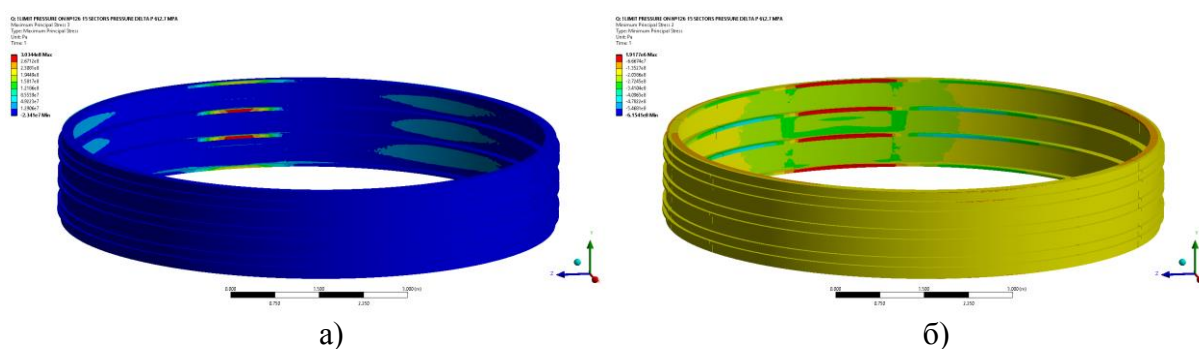


Рис. 9. Напряжения в тубинговом кольце при равномерном распределении давления величиной 2,7 МПа и наличии тубинга с давлением интенсивности 6 МПа: а) первое главное напряжение; б) третье главное напряжение

Как следует из расчетов, практически в каждом из рассмотренных случаев в тубинговом кольце появляются зоны с напряжениями растяжения, превышающими предел прочности, в тоже время, зон с напряжениями сжатия, величина которых превышает предел прочности, не наблюдается. Отметим также, что, помимо упомянутых, расчеты выполнялись для ситуаций при давлениях с интенсивностями 3,5 и 7 МПа, 4 и 8 МПа и других.

В результате анализа и обобщения модельных исследований показано, что вероятность возникновения локальных зон разрушения можно охарактеризовать коэффициентом неравномерности распределения давления по контуру тубингового кольца. С увеличением величины максимального давления на одно из колец, коэффициент неравномерности распределения давления, приводящего к предельному состоянию, уменьшается. Так, например, при давлениях соответственно 0,7 МПа и 3 МПа  $k = 3 / 0,7 = 4,29$ ; при давлениях 2,1 МПа и 5 МПа –  $k = 5 / 2,1 = 2,4$ ; при давлениях 2,7 МПа и 6 МПа –  $k = 6 / 2,7 = 2,2$ ; при давлениях 4 МПа и 8 МПа –  $k = 8 / 2 = 2$ .

**Выводы.** Рассмотрена задача исследования прочности тубинговой крепи на этапе ее возведения с учетом тампонирования околоствольного массива. Обобщенная оценка напряженного состояния системы «околоствольный массив-крепление ствола» выполнялась путем изучения значений коэффициента Надаи–Лоде для каждого элемента конечно-элементной сетки. В зависимости от значения данного коэффициента использовался определенный критерий предельного состояния для оценки прочности конструкции.

Результаты исследований показывают, что при обеспечении равномерного распределения давления по поверхности тубинговых колец в процессе нагнетания тампонаж-

ного раствора, предельное состояние в тубинговой крепи наступает при больших значениях давления, значительно превышающих технологически возможное при нагнетании тампонажа.

Вместе с тем, разрушение в тубинговом кольце может наступить при относительно небольших интенсивностях давления в случае неравномерности его распределения по контуру кольца. Численное моделирование позволило определить закономерности наступления предельного состояния в тубинговой крепи в зависимости от разности в величинах интенсивности давлений, действующих на тубинговое кольцо. Для такой оценки введен коэффициент неравномерности распределения давления. Показано, что при повышении максимального давления, действующего на отдельный тубинг, коэффициент неравномерности уменьшается. Соответственно, чем выше максимальное давление на отдельный участок тубингового кольца, тем меньшая разница давлений с соседними тубингами необходима, чтобы возникло предельное состояние в тубинге. Данные результаты могут быть использованы при выборе режима и параметров технологического процесса нагнетания раствора для обеспечения безопасного тампонирования окрестного массива.

***Благодарность.** Работа выполнена в рамках НИР кафедры теоретической и прикладной механики БГУ №756/21 «Разработать математические модели и методы решения новых классов краевых задач механики сплошных сред применительно к актуальным современным проблемам науки и техники», ГПНИ «Конвергенция», задание 1.8.01.1.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колмогоров, В. Напряжения, деформации, разрушение / В. Колмогоров // Металлургия, 1970. – 229 с.
2. Васильев, Л. М. Механика образования форм разрушения образцов горных пород при их сжатии / Л. М. Васильев [и др.] // Днепро: ИМА-пресс, 2018. – 176 с.

*Поступила: 31.01.2021*