

## ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.0223:539.374

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ПОВРЕЖДЕННОСТИ В ОБРАЗЦАХ СОЛЯНЫХ ПОРОД, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ КЕРНА

**В. Н. Аптуков<sup>1,2</sup>, С. В. Волегов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО "Галургия", E-mail: valeriy.aptukov@uralkali.com,  
ул. Сибирская, 94, 614002, г. Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
E-mail: aptukov@psu.ru, ул. Букирева, 15, 614000, г. Пермь, Россия

Выполнено численное моделирование процессов, формирующих индивидуальную историю механического поведения и состояния образца вблизи выработки в соляных породах. Оценено влияние места взятия керна (в кровле или в боковой стенке) и времени существования выработки на уровень остаточных напряжений и поврежденности с учетом микронеоднородности образца. Показано влияние указанных факторов на механические характеристики образца, определяемые при стандартных испытаниях на сжатие.

*Соляные породы, структурно-неоднородный образец, остаточные напряжения, математическое моделирование, поврежденность*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200301

При проектировании и эксплуатации соляных рудников важное значение имеют экспериментальные данные физико-механических свойств образцов соляных пород, полученных из кернов геологических скважин и путем бурения дополнительных скважин из пройденных выработок. Последние позволяют составить локальные механические характеристики, на основе которых актуализируются текущие параметры очистных выработок, принимаются решения о мероприятиях по поддержанию капитальных выработок, видах и параметрах крепи. Породный массив в окрестности выработок в соляных породах находится в упругопластическом состоянии, а из-за процессов ползучести под действием горного давления и дополнительной концентрации напряжений претерпевает со временем структурные изменения. В совокупности со структурной микронеоднородностью пород (минеральный агрегат зерен с различными механическими свойствами, глинистые включения, поры) эти изменения отражаются на механических характеристиках породного массива в окрестности выработки. Кроме того, при изготовлении полученных из керна образцов происходит их разгрузка, в результате чего формируется поле остаточных напряжений и поврежденности.

Порода образца, испытываемого в лабораторных условиях, в течение длительного времени своего существования в массиве подвергается действию неравномерных внешних нагрузок. Эти нагрузки формируют индивидуальную историю (“память”) данного образца.

Пласты соляных пород в массиве находятся в состоянии равновесия. Под действием горного давления в них формируется сложное напряженное состояние [1]. Соляные породы представляют собой минеральные агрегаты, состоящие из зерен неправильной формы различного размера (имеющих отличные друг от друга механические свойства), межзеренных границ, иных включений, а также пор, содержащих газы и жидкость. Локальная сложная структура минерала даже в случае однородного поля макроскопических напряжений создает структурно-неоднородное поле напряжений с флуктуациями на уровне характерного размера зерна, что приводит к концентрации напряжений, появлению локальной поврежденности даже в нетронутом породном массиве [2].

Следующий этап деформирования будущего образца — изменение его состояния с течением времени под влиянием пройденной выработки. Эти изменения зависят от близости выработки и ее геометрии, расположения образца относительно выработки, времени существования выработки. По сравнению с предыдущим этапом, влияние выработки на будущий образец более существенно за счет значительного отличия его напряженного состояния от почти равномерного объемного сжатия. Известно, что в непосредственной близости от контура выработки с течением времени под действием горного давления в соляных породах накапливается поврежденность. Она была оценена экспериментально плотностным методом в зависимости от расстояния от контура выработки и времени [3]. Коэффициент разуплотнения породы достигает максимальных значений 1.02–1.07 вблизи контура выработки, приближаясь асимптотически к 1.0 на глубине 5–6 м.

Далее выполняется выбуривание керна и изготовление образца. Образец разгружается от внешних усилий, однако в нем остаются остаточные напряжения, деформации и поврежденность, может значительно увеличиться дополнительная структурная поврежденность. Также при изготовлении керна может происходить интенсивное дискование [4]. Иногда сложно выделить из керна соляных пород образец достаточной длины ввиду наличия поврежденности и присутствия глинистых прослоев, расположенных вдоль или поперек керна.

Последний этап деформирования пород — лабораторное испытание образца с “памятью”, содержащего остаточные напряжения и структурную поврежденность. Таким образом, в лабораторных испытаниях нагружается образец, имеющий сложную историю деформирования, а результаты испытаний зависят как от материала образца, так и от этой истории.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ИСТОРИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБРАЗЦА

Моделирование процесса изменения напряженно-деформированного состояния образцов разбито на несколько этапов. При моделировании породного массива и образца, состоящего из зерен, учитываются упругие и пластические деформации, а также деформации ползучести и поврежденность, согласно принятому деформационному критерию разрушения [5]. Математическая постановка задачи [6, 7] включает в себя:

— уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0, \quad x_i \in \Omega, \quad (1)$$

— граничные условия в напряжениях

$$\sigma_{ij} n_j = p_i^*, \quad x_i \in S_p, \quad (2)$$

— граничные условия в перемещениях

$$u_i = u_i^*, \quad x_i \in S_u, \quad (3)$$

— уравнения Коши

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad x_i \in \Omega, \quad (4)$$

— уравнения линейной упругости

$$\varepsilon_{ij}^e = e_{ij}^e + \varepsilon^e \delta_{ij} = \frac{1}{2G} S_{ij} + \frac{1}{3K} p \delta_{ij}, \quad x_i \in \Omega, \quad (5)$$

— уравнения пластичности

$$\varepsilon_{ij}^p = e_{ij}^p = \psi(e_u^p) S_{ij}, \quad x_i \in \Omega, \quad (6)$$

— уравнения ползучести

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^{cr}}{dt} = f(\sigma_u, e_u^{cr}, t) \frac{S_{ij}}{\sigma_u}, \quad x_i \in \Omega. \quad (7)$$

Здесь  $F_i$  — компоненты вектора объемных сил;  $(\dots)_{,j}$  — частная производная по  $x_j$ ;  $n_j$  — компоненты вектора нормали к поверхности тела;  $p_i^*$ ,  $u_i^*$  — заданные компоненты вектора поверхностных нагрузок и вектора перемещений на поверхностях  $S_p$  и  $S_u$ ;  $K, G$  — объемный и сдвиговой модуль;  $\psi(e_u^p)$  — функция деформационного упрочнения от второго инварианта тензора пластических деформаций;  $f(\sigma_u, e_u^{cr}, t)$  — функция, описывающая особенности ползучести соляных пород;  $\Omega$  — область моделирования;  $\sigma_u = (3/2 S_{ij} S_{ij})^{1/2}$  — интенсивность напряжений;  $e_u^{cr} = (3/2 e_{ij}^{cr} e_{ij}^{cr})^{1/2}$  — интенсивность деформаций ползучести.

В (1)–(7) по повторяющимся индексам осуществляется операция суммирования. Предполагается, что тензор полных деформаций  $\varepsilon_{ij}$  аддитивно представлен упругими  $\varepsilon_{ij}^e$ , пластическими  $\varepsilon_{ij}^p$  деформациями и деформациями ползучести  $\varepsilon_{ij}^{cr}$ . Тензоры напряжений и деформаций разложены на сумму шаровой  $p\delta_{ij}$ ,  $\varepsilon\delta_{ij}$  и девиаторной  $S_{ij}$ ,  $e_{ij}$  частей.

Все варианты задач, рассмотренных ниже, решались методом конечных элементов в пакете ANSYS в двухмерной плоской и осесимметричной постановке. Используются опции Rate Independent, Isotropic Hardening Plasticity, Mises Plasticity, Multilinear для расчетов пластичности и Rate Dependent, Creep, Implicit для расчетов ползучести.

На первом этапе моделируется естественное состояние породного массива в течение времени выхода напряжений и деформаций в стационарное состояние (50–80 лет) на заданной глубине, которое является однородным для однородных образцов. При наличии двухфазной структуры возникают структурные напряжения, отличающиеся от номинального горного давления.

Расчетная область представляет однородный породный массив, соответствующий по свойствам обрабатываемому сильвиниту. Граничные условия — отсутствие нормальных перемещений на вертикальных границах области и на нижней горизонтальной границе  $u_n^* = 0$ . Учитывается собственный вес материала породного массива  $F_z = -\gamma$ ,  $\gamma$  — удельный вес.

Для найденного значения уровня напряжений решается задача оценки естественного поля структурных напряжений в будущем образце, расположенном в сильвините. Как показывают расчеты, в соляных породах коэффициент бокового распора  $\lambda = 1$  [1]. В качестве материалов двухфазной структуры образца (межзеренные границы не учитывались) приняты галит (модуль упругости 10 ГПа, прочность 25 МПа) и сильвин (модуль упругости 8 ГПа, прочность 20 МПа). Деформационное упрочнение за пределами упругости учитывалось на основании экспериментальных данных, представленных в [1].

Распределение и геометрия зерен по сечению образца диаметром 40 мм и высотой 80 мм предполагается случайным (равномерное распределение), средний размер зерна  $\sim 3$  мм. Образец в рамках осесимметричной постановки (рассматривается 1/4 образца, рис. 1) нагружается с одного торца и внешней боковой поверхности горным давлением  $q_o$  ( $p_n^* = q_o$  при  $r = R$  или  $z = h/2$ ), на противоположном торце и оси симметрии заданы условия отсутствия нормальных перемещений ( $u_n^* = 0$  при  $r = 0$  или  $z = 0$ ). На рис. 1 показаны три этапа нагружения образцов, причем верхние изображения соответствуют образцам, взятым из кровли, нижние — из боковой стенки. Несмотря на однородное поле напряжений, в образце возникают структурные напряжения, обусловленные его двухфазной структурой. Естественное напряженно-деформированное состояние будущего образца сохраняется для использования в качестве начального состояния на следующем этапе.

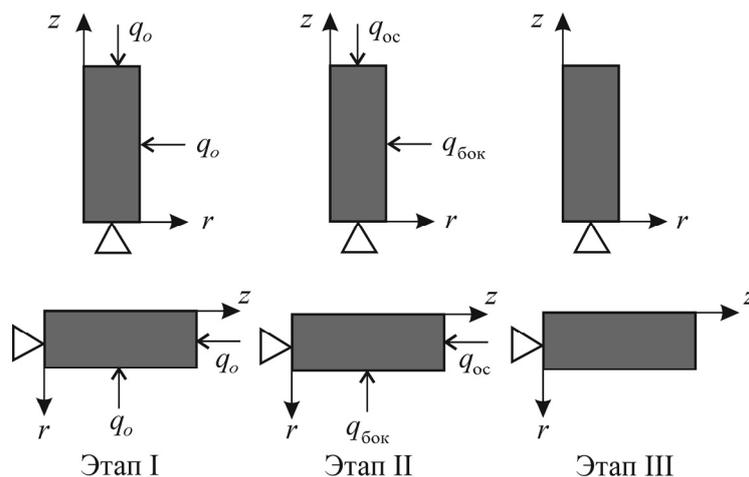


Рис. 1. Этапы нагружения образцов, взятых из кернов в кровле и бортах выработки

На втором этапе нагружения моделируется влияние пройденной выработки на напряженно-деформированное состояние будущего образца, расположенного вблизи выработки, с течением времени. Первоначально решается плоская 2D-задача о состоянии одиночной выработки с учетом полученного естественного поля напряжений в породном массиве. В силу наличия вертикальной плоскости симметрии, проходящей через центр выработки, рассматривается ее половина. На рис. 2 представлен фрагмент расчетной схемы и поле горизонтальных напряжений через 30 лет после прохождения выработки на глубине 350 м. Граничные условия на вертикальных и нижней горизонтальной границе: отсутствие нормальных перемещений  $u_n^* = 0$ . Граничные условия на верхней горизонтальной границе: задана вертикальная распределенная нагрузка  $\sigma_y = -q_1$ ,  $q_1$  — давление оставшегося (до дневной поверхности) породного массива на верхнюю границу расчетной области. Также учитывается собственный вес породного массива.

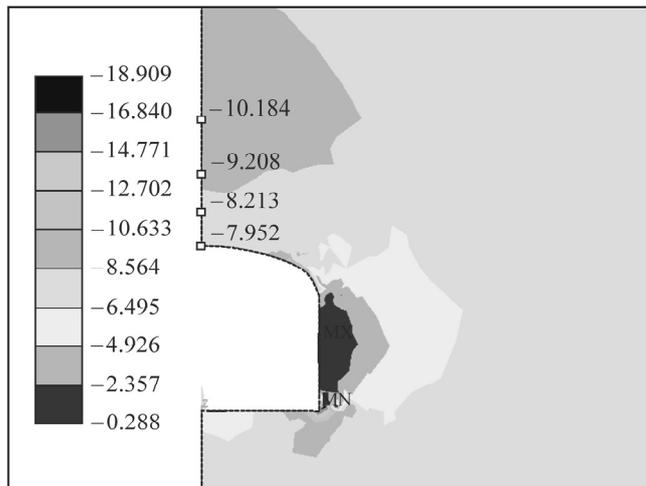


Рис. 2. Фрагмент расчетной схемы. Поле горизонтальных напряжений (МПа) в окрестности одиночной выработки при  $T=30$  лет и  $H=350$  м

Проведена серия расчетов с различным отношением ширины к высоте выработки. На рис. 3а показаны относительные (к величине горного давления  $\gamma H$ ,  $\gamma$  — средний удельный вес вышележащих пород,  $H$  — расстояние центра выработки до дневной поверхности) вертикальные (штриховая линия) и горизонтальные (сплошная линия) напряжения над кровлей выработки на различном относительном расстоянии  $L/h$  от кровли ( $h$  — высота выработки). Видно, что над кровлей выработки относительные вертикальные напряжения (штриховые кривые) разгружаются и не превышают для данной выработки 0.9 (1 год) и 0.6 (30 лет) на расстоянии, равном высоте выработки. Относительные горизонтальные напряжения значительны 1.2–1.6 в первые 10 лет, а к 30 годам релаксируют до 0.7–0.8.

Аналогичные зависимости для боковой части выработки отражены на рис. 3б ( $a$  — ширина выработки). Картина напряжений здесь следующая: вертикальные напряжения превышают горное давление, горизонтальные — разгружаются, с течением времени напряжения релаксируют. Результаты, представленные на рис. 3, соответствуют общим представлениям и экспериментальным данным о постепенном выравнивании напряжений в окрестности выработки в местах их наибольшей концентрации, а также смещению максимума напряжений вглубь массива [8].

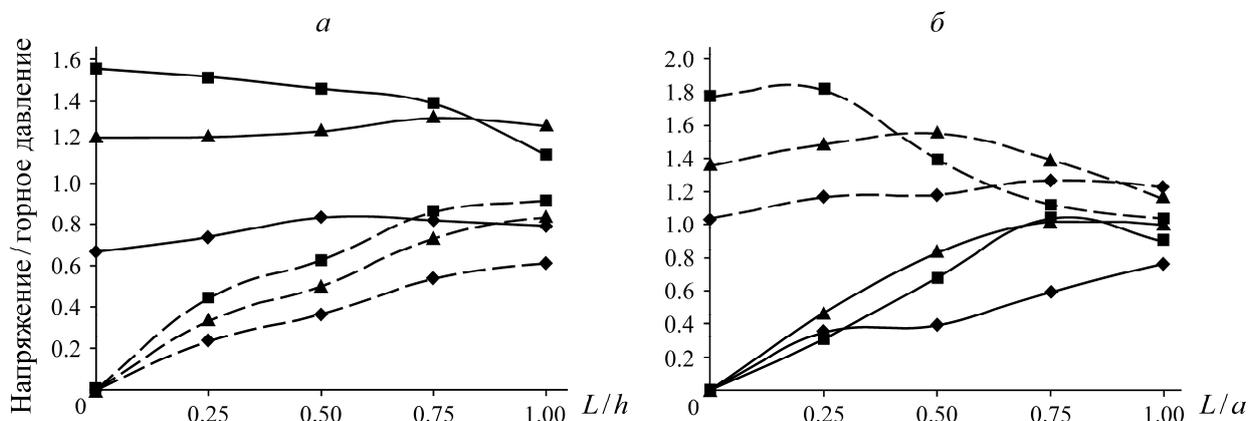


Рис. 3. Зависимость вертикальных и горизонтальных напряжений от относительного расстояния от кровли (а) и от стенки (б) выработки:  $\blacklozenge$  — 1 год;  $\blacktriangle$  — 10 лет;  $\blacksquare$  — 30 лет

На втором этапе также решаются задачи о напряженно-деформированном состоянии будущих образцов с учетом их двухфазной структуры и влияния пройденной выработки. Граничные условия зависят от ряда факторов: времени, прошедшего после прохождения выработки; отношения ширины к высоте выработки; расстояния от расположения образца до контура выработки; ориентации образца (кровля или почва).

Горное давление (первый этап) на границах образца  $q_0$  заменяется на осевое  $q_{oc}$  и боковое  $q_{бок}$  напряжение, которые определены согласно предварительной оценке напряжений в окрестности выработки (рис. 3):  $p_r^* = q_{бок}$  при  $r = R$ ,  $p_z^* = q_{oc}$  при  $z = h/2$  (рис. 1, этап II).

Выполнены расчеты для двух кернов — вертикального, пройденного в кровле, и горизонтального — в стенке выработки. Каждый из кернов отбирался в выработках, пройденных 1 год, 10 и 30 лет назад, на расстоянии 1 и 3 м от контура выработки. Оценка напряженного состояния вблизи контура выработки в различные периоды времени ее существования проведена на примере выработки, пройденной в сильвинитовом пласте на глубине 350 м. Ширина выработки 5.1 м, высота — 3.8 м. Массивы рассчитанных напряжений и деформаций будущих образцов после прохождения выработки сохраняются для использования в качестве начального состояния на следующем этапе.

На третьем этапе моделируется выемка керна из кровли и боковой стенки выработки путем разгрузки образцов (рис. 1, этап III):  $p_r^* = 0$  при  $r = R$ ,  $p_z^* = 0$  при  $z = h/2$ . Рассмотрим результаты оценки состояния образцов, взятых из вертикального керна в кровле выработки. У образцов, взятых в течение 1 года после прохождения выработки на глубине 1 и 3 м, отсутствует начальная поврежденность, растягивающие горизонтальные (боковые) напряжения не превышают 1.0 МПа, а вертикальные (осевые) — 1.3 МПа. Если образцы берутся через 10 лет после прохождения выработки, растягивающие остаточные напряжения возрастают до 2.3 МПа (1 м) и 2.1 МПа (3 м), в образцах присутствует небольшая поврежденность.

Для образцов, взятых из кровли через 30 лет после прохождения выработки, растягивающие остаточные напряжения возрастают до 4.9 МПа (1 м) и 3.7 МПа (3 м). Естественная поврежденность образцов после выпиливания из керна достаточно высокая (рис. 4, левая вертикальная граница — ось симметрии). На рис. 4, 5 полное разрушение ячейки материала (зерна) соответствует значению шкалы, равному 1 и ниже (0–1), частичное разрушение материала зерен отражено уровнями шкалы 2–5, неповрежденный материал показан уровнем шкалы более 5 (светлый фон). Деформационный критерий разрушения описан в [5]. Для образцов, взятых из горизонтального керна в боковой стенке выработки в течение 1 года после прохождения выработки, поврежденность практически отсутствует, остаточные напряжения не превышают 1.3 МПа. В образцах десятилетнего срока существования выработки появляется поврежденность, уровень остаточных напряжений достигает 3.0 МПа. Для образцов, взятых из боковой стенки через 30 лет после прохождения выработки, растягивающие остаточные напряжения возрастают до 4.5 МПа (1 м) и 2.7 МПа (3 м). Естественная поврежденность образцов после выпиливания из керна несколько меньше, чем для вертикального керна (рис. 5, верхняя горизонтальная граница — ось симметрии).

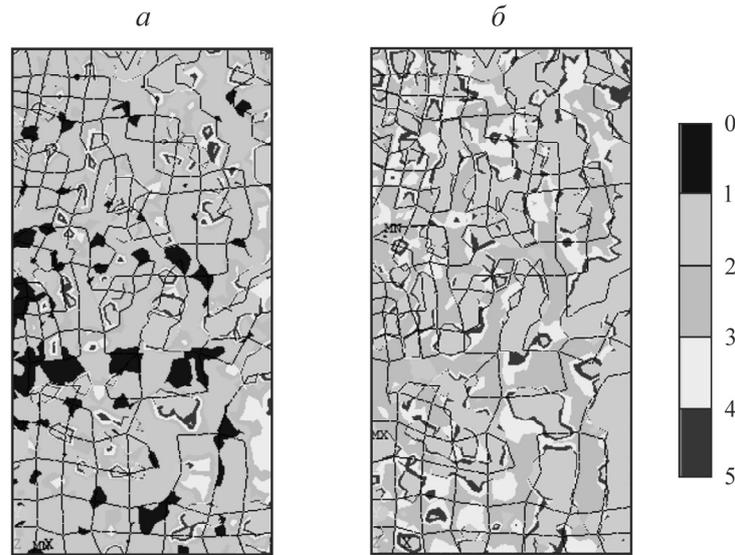


Рис. 4. Естественное поле поврежденности образцов в кровле выработки при  $T=30$  лет: *а* — 1 м; *б* — 3 м. Количество кристаллов — 218

Значения остаточных напряжений в образце после вырезки керна зависят от времени существования выработки, ориентации керна (горизонтальный или вертикальный) и расстояния образца от контура выработки. Интенсивность остаточных напряжений в образце для 30-летней выработки достигает 2.0 МПа, для 10-летней — 1.1 МПа. Остаточные напряжения складываются с дополнительными напряжениями при дальнейшем испытании образца при сжатии и влияют на экспериментальную кривую “напряжение – деформация”. Но еще большее влияние на измеряемые механические свойства оказывает накопленная в образце естественная поврежденность.

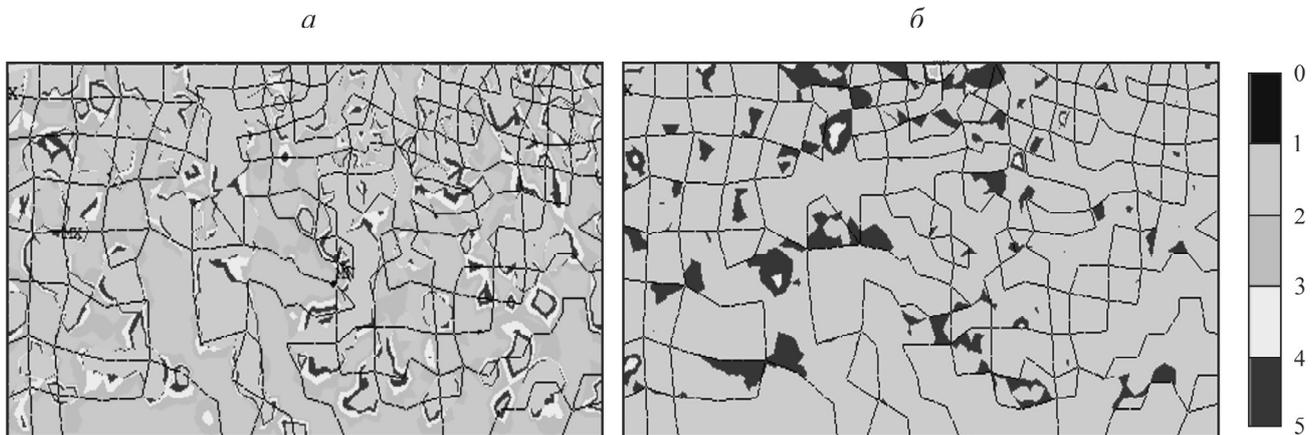


Рис. 5. Естественное поле поврежденности образцов в боковой стенке выработки при  $T=30$  лет: *а* — 1 м; *б* — 3 м

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭТАПА ЛАБОРАТОРНОГО НАГРУЖЕНИЯ ОБРАЗЦА С ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Последний этап нагружения — моделирование эксперимента по сжатию образца в лабораторных условиях. Предполагается, что на торцах образца, контактирующих с траверсой пресса, реализуется сильное трение (отсутствие проскальзывания в плоскости траверсы):

$p_r^* = 0$  при  $r = R$ ,  $u_z = u_z^*$ ,  $u_r = 0$  и при  $z = h/2$ . Нагружение образца при расчете осуществляется в виде пошагового увеличения осевого перемещения  $u_z^*$  на одном из торцов, при этом суммарное усилие на торец (среднее осевое напряжение  $\sigma_z^{cp}$ ) образца определяется по осевым напряжениям из решения задачи на каждом шаге осевого перемещения.

На рис. 6 показаны примеры расчетных кривых “напряжение – деформация” при сжатии образцов с различной длительностью этапа II (рис. 1), т. е. различным временем существования выработки до получения образца. Отмечается значимое влияние времени существования выработки на прочностные характеристики образца, получаемые из стандартных опытов на сжатие. Прочность снижается в 1.5 раза для образца, изготовленного из керна 30-летней выработки, по сравнению с только что пройденной выработкой. Еще более сильное влияние оказывает время существования выработки на предельную деформацию, соответствующую уровню максимального среднего напряжения. В данном примере она снижается с 1.5 % (только что пройденная выработка) до 0.9 % (10 лет) и до 0.4 % (30 лет). Также заметно влияние времени существования выработки на остаточную прочность образца.

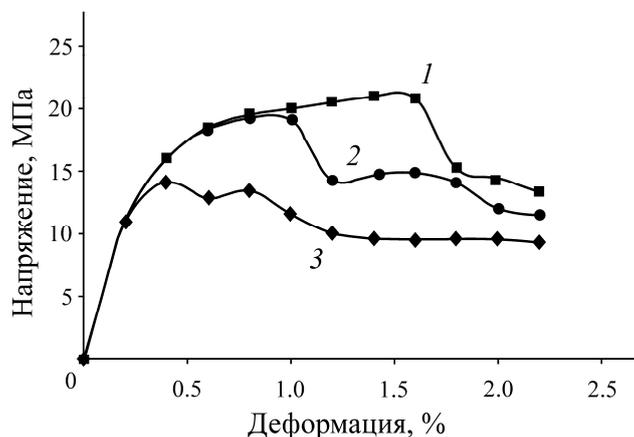


Рис. 6. Расчетные кривые “напряжение – деформация” при сжатии образцов, вырезанных из керна сразу после прохождения выработки (1), после 10 лет существования выработки (2) и после 30 лет (3)

## ВЫВОДЫ

Осуществлено численное моделирование всей истории изменения механического состояния образца: естественное напряженное состояние с учетом двухфазной структуры сильвинита; техногенное напряженное состояние, обусловленное прохождением выработки; состояние разгрузки при выбуривании керна; напряженно-деформированное состояние образца при сжатии на прессе испытательной машины. Показано влияние истории деформирования образца на итоговые диаграммы стандартных испытаний на сжатие, в том числе на предел прочности и предельную деформацию. Наличие естественной структурной поврежденности и остаточных напряжений образцов соляных пород оказывает влияние на результаты лабораторных испытаний (механических или фильтрационных) и должно учитываться при оценке несущей способности кровли выработок, целиков, технологических междупластий, различных горнотехнических сооружений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Константинова С. А., Аптуков В. Н.** Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород. — Новосибирск: Наука, 2013. — 192 с.
2. **Зильбершмидт В. Г., Зильбершмидт В. В., Наймарк О. Б.** Разрушение соляных пород. — М.: Наука, 1992. — 144 с.
3. **Габдрахимов И. Х., Константинова С. А.** Ползучесть каменной соли // Разработка соляных месторождений. — Пермь: ППИ, 1973. — С. 126–129.
4. **Макаров А. Б.** Практическая геомеханика. — М.: Горн. книга, 2006. — 391 с.
5. **Аптуков В. Н.** Деформационный критерий разрушения образцов соляных пород // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 39–45.
6. **Работнов Ю. Н.** Механика деформируемого твердого тела. — М.: Наука, 1979. — 744 с.
7. **Качанов Л. М.** Основы теории пластичности. — М.: Наука, 1969. — 420 с.
8. **Константинова С. А., Мисников В. А.** Некоторые результаты электрометрических исследований состояния массива каменной соли в окрестности околоствольных выработок Верхнекамских калийных рудников // ФТПРПИ. — 1982. — № 2. — С. 33–37.

*Поступила в редакцию 10/II 2020*

*После доработки 13/III 2020*

*Принята к публикации 29/V 2020*