

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛИТЕЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАМЕРНОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ КАЛИЙНЫХ ПЛАСТОВ*

В.А. Асанов, *Горный институт УрО РАН*
И.Л. Паньков, *Горный институт УрО РАН*
А.В. Евсеев, *Горный институт УрО РАН*
С.Ю. Лобанов, *Горный институт УрО РАН*
И.С. Ломакин, *Горный институт УрО РАН*

Безопасность подземной отработки месторождений водорастворимых руд во многом определяется интенсивностью деформирования во времени грузонесущих элементов системы разработки. Комплекс экспериментальных и теоретических исследований напряженно-деформированного состояния подрабатываемого соляного массива позволил разработать методику оценки степени длительной устойчивости междукамерных целиков.

Ключевые слова: соляные породы, ползучесть, напряженно-деформированное состояние массива, устойчивость целиков.

Введение

Обеспечение безопасных условий ведения горных работ при подземной разработке Верхнекамского калийного месторождения (ВКМКС) достигается использованием камерной системой разработки с оставлением ленточных целиков, которые должны сохранять несущую способность на весь срок службы рудника. Однако обследование состояния выработанных пространств показывает, что на отдельных участках спустя 20–30 лет наблюдаются значительные разрушения. Глубина отслоения пород в стенках целиков может достигать 1,5–2,5 м, а в кровле камер имеются обрушения потолочин и междупластий. Это ведет к интенсификации процесса сдвижения подработанных

пород. Скорости оседаний могут достигать 500 мм/год, а конечные деформации земной поверхности – 3,0–4,5 м. В этой связи обеспечение устойчивости целиков в течение всего срока службы предприятия является одним из основных условий сохранения сплошности водозащитной толщи. Практика ведения горных работ показывает, что даже при соблюдении всех требований нормативных документов при проектировании горных работ и отработке запасов происходят неблагоприятные явления, проявляющиеся в разрушении краевых частей целиков и, в ряде случаев, приводящие к нарушению сплошности водозащитной толщи и проникновению пресных вод в выработанное пространство. В таких условиях необхо-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Пермского края (грант № 13-05-96029).

дим комплексный подход к контролю устойчивости междукамерных целиков и состояния водозащитной толщи в зависимости от конкретных горно-геологических условий, физико-механических свойств пород обрабатываемых пластов, параметров ведения горных работ и времени эксплуатации выработок [1].

Методы, использованные в ходе выполнения исследований

1. Лабораторные исследования ползучести основных литологических типов соляных пород в условиях одноосного и объемного сжатия.

2. Натурные исследования напряженно-деформированного состояния и характера разрушения во времени соляных междукамерных целиков.

3. Построение реологических моделей деформирования междукамерных целиков в квазипластичных соляных породах, учитывающих их форму и структурно-текстурные особенности строения массива ВКМКС.

4. Разработка модели деформирования и сдвижения массива горных пород и земной поверхности при отработке сильвинитовых пластов.

5. Выполнение многовариантных расчетов эволюции напряженно-деформированного состояния подработанного соляного массива для различных горно-геологических условий.

6. Разработка методики экспериментально-теоретического прогноза устойчивости несущих элементов камерной системы разработки.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований

Для оценки характера деформирования соляных пород (каменная соль, красный сильвинит, пестрый сильвинит) выполнены реологические исследования при одноосном и объемном нагружении цилиндрических образцов-близнецов при различном отношении их высоты к диаметру (h/d). С целью установления базовых уровней нагружения при ползучести

предварительно проведены испытания на одноосное сжатие при стандартной скорости деформирования 1 мм/мин. По результатам испытаний получен полный комплекс прочностных и деформационных параметров соляных пород обрабатываемых пластов при квазимгновенном нагружении [2].

Длительные испытания на одноосную ползучесть выполнялись на гидравлических прессах при степенях нагружения – 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 от мгновенного предела прочности. При нагружении образцов использовались гидравлические реологические установки с максимальным усилием 150 кН. Конструкция каждого реологического пресса позволяла проводить одноосные испытания при одинаковом осевом давлении одновременно трех образцов. Исследования объемной ползучести соляных пород выполнялись по схеме нагружения Кармана ($\sigma_1 \neq \sigma_2 = \sigma_3$). Боковое давление принималось постоянным для разных образцов и составляло 0,0; 1,0; 2,5 и 5,0 МПа. Измерение продольных деформаций осуществлялось индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм, располагаемых симметрично относительно оси образца и проводимых через возрастающие промежутки времени: первые сутки – 20 мин, 1 час, 3 часа; вторые сутки – 2 раза (утром и вечером). В последующем контроль деформаций проводился один раз в сутки. На стадии затухающей ползучести регистрация деформаций осуществлялась раз в 3–5 суток. Образцы выдерживались под нагрузкой от двух до шестидесяти пяти суток.

По результатам испытаний для всех образцов строились кривые ползучести (зависимость продольной деформации от времени для разных уровней нагружения).

Обработка кривых ползучести позволила построить кривые длительной прочности (зависимости степени нагружения от времени разрушения) и провести оценку коэффициента длительной прочности. Так, значения коэффициентов длительной прочности образцов пестрого сильвинита

составили: 0,46 ($h/d = 2,0$); 0,46 ($h/d = 1,5$); 0,47 ($h/d = 1,0$). Установлено, что деформирование соляных пород во времени удовлетворительно описывается уравнением упруго-вязкой модели Максвелла вида

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta(\sigma/\sigma_{np})},$$

где $\eta(\sigma/\sigma_{np})$ – коэффициент вязкости, являющийся функцией степени нагружения.

Проведенный анализ влияния степени нагружения образцов на параметры линейно-наследственной ползучести при использовании двухпараметрического ядра Абея ($\delta t^{-\alpha}$) выявил тенденцию уменьшения величины параметра (α) с увеличением степени нагружения образцов для всех отношений h/d . В то же время в связи с недостаточной экспериментальной выборкой для параметра (δ) четкой тенденции влияния степени нагружения не наблюдается. Для исследуемых образцов интенсивность деформаций ползучести снижается с увеличением бокового давления. Для всех уровней бокового давления определен характер изменения вязкости максвелловского типа и параметров линейно-наследственной ползучести от степени нагружения. Установлено, что вязкость сильвинита в полулогарифмической системе координат с увеличением степени нагружения при различных уровнях бокового давления уменьшается по линейному закону [3].

Для выявления взаимосвязи характера деформирования породного массива в различные периоды отработки рабочих пластов со сдвижением земной поверхности заложены экспериментальные участки для долговременных наблюдений за деформированием целиков и потолочин очистных камер. Места заложения замерных станций выбраны таким образом, чтобы максимально охватить разнообразие условий ведения горных работ, обеспечить возможность долговременного наблюдения, а на земной поверхности располагались нивелирные профильные линии. Пункты измерения находились в

средней части камеры и соответствовали характерным для данного участка горно-геологическим условиям. Конструкция долговременной замерной станции представляла собой систему глубинных и контурных реперов, расположенных в одном сечении на обоих отрабатываемых пластах АБ и КрII (рис. 1) [4]. Глубинные репера закладывались на расстояние до 3,0 м от контура выработки во всех направлениях. Замерная станция предусматривала изучение процессов поперечного расслоения целиков на обоих пластах, их вертикальную деформацию, контроль расслоения кровли пласта АБ и междупластья АБ–КрII, а также определение суммарной вертикальной деформации камерного блока АБ–КрII. Измерение деформаций осуществлялось ленточным экстензометром SisGeo, предназначенным для точных (до 0,01 мм) измерений расстояний между двумя постоянно установленными точками. При обработке экспериментальных данных принято допущение, что глубинный репер, расположенный в почве нижнего отрабатываемого пласта, является неподвижным. По ре-

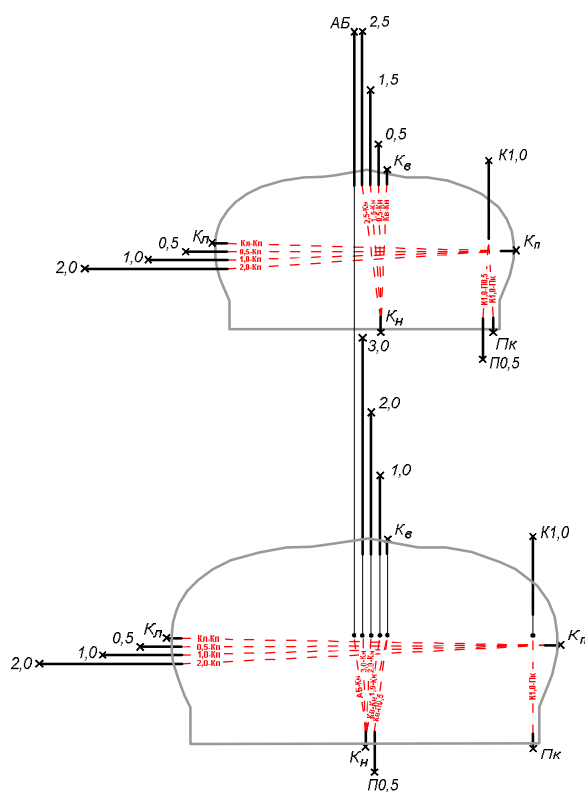


Рис. 1. Схема оборудования замерной станции

зультатам измерений получено распределение деформаций в окрестности выработки (рис. 2) [5].

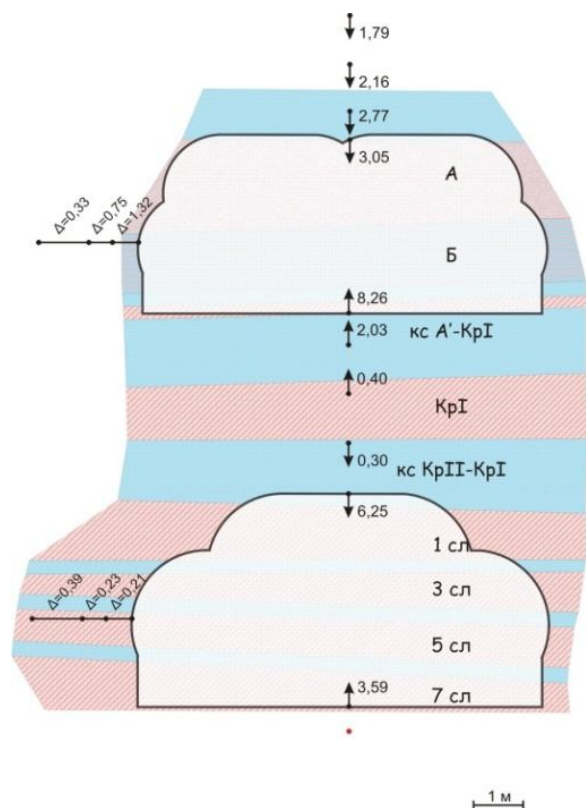


Рис. 2. Смещение точек массива за годовой период (стрелками показано направление, рядом – величина смещения, мм)

Натурные исследования показали, что с течением времени происходит расслоение междупластья, причем его деформирование идет в двух направлениях, что приводит к пучению почвы на верхнем пласте и прогибу кровли – на нижнем. Для оценки влияния выработанного пространства на земную поверхность одновременно определялись смещения реперов, установленных над экспериментальными участками. Проведение комплекса совместных исследований по изучению деформирования элементов камерной системы разработки и сдвижения земной поверхности позволило скорректировать модель деформирования соляного массива и повысить точность геомеханических расчетов сохранности водозащитной толщи (ВЗТ), которая является важным несущим элементом камерной системы разработки, обеспечивающим штатную (без-

аварийную) деятельность горнодобывающего предприятия.

Геомеханический анализ целостности ВЗТ базировался на математическом моделировании изменения напряженно-деформированного состояния подработанного соляного массива во времени, основанном на математическом описании прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности уравнениями наследственной вязкоупругости при котором значения функции ползучести определялись фактическими или прогнозными графиками нарастания оседаний земной поверхности [1]. При моделировании использовалась математическая модель массива, учитывающая установленные по данным сейсморазведочных наблюдений особенности геологического строения и состояния водозащитной толщи. Расчеты осуществлялись в двумерной упруго-пластической постановке методом конечных элементов. Связь между деформациями и напряжениями на допредельной стадии описывалась законом Гука, а предельные напряжения в области сжатия определялись критерием Кулона–Мора. Для анализа нарушения сплошности слоев водозащитной толщи в области действия растягивающих напряжений использовался предел прочности при растяжении. Выработанное пространство моделировалось средой с пониженными по отношению к породам соответствующего пласта свойствами. Степень уменьшения механических свойств определялась фактическими параметрами камерной системы разработки.

При проведении геомеханических расчетов выделенные на этапе сейсморазведочных работ природные аномалии учитывались как области с пониженными, в соответствии с установленным коэффициентом ослабления, прочностными и деформационными свойствами соляных пород. Реализация расчетной схемы по определению напряженно-деформированного состояния массива во времени осуществлялась на основе модификации метода переменных модулей упругости, опреде-

ляющих деформирование не всех элементов геологического разреза, а лишь отработанных пластов.

Преимущество данного подхода в том, что он позволяет отдельно описать временной характер деформирования всех отработанных пластов, легко учесть разницу в сроках их отработки и оценить состояние подработанного массива на произвольный момент времени. Анализ опасности нарушения сплошности водозащитной толщи под воздействием горных работ проводился по результатам локализации пластических деформаций, которые в физическом смысле трактовались как развитие трещин сдвига (в области сжатия) или трещин отрыва (в области растяжения).

Вычисления показали, что потенциально опасные по нарушению сплошности водозащитной толщи зоны приурочены к краевым частям подработанного массива и к участку максимальных оседа-

ний земной поверхности (перегиба мульды сдвижения) (рис. 3, 4).

Отметим, что часть потенциально опасных зон может сформироваться в выделенных областях сейсморазведочных аномалий. Поэтому в процессе ведения горных работ степень снижения механических свойств пород водозащитной толщи должна поэтапно уточняться по результатам режимных сейсморазведочных работ, и в соответствии с полученной информацией необходимо производить корректировку прогнозных геомеханических оценок состояния водозащитной толщи [6].

Заключение

В результате обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана комплексная методика оценки длительной устойчивости грузонесущих элементов камерной разработки сильвинитовых пластов при отра-

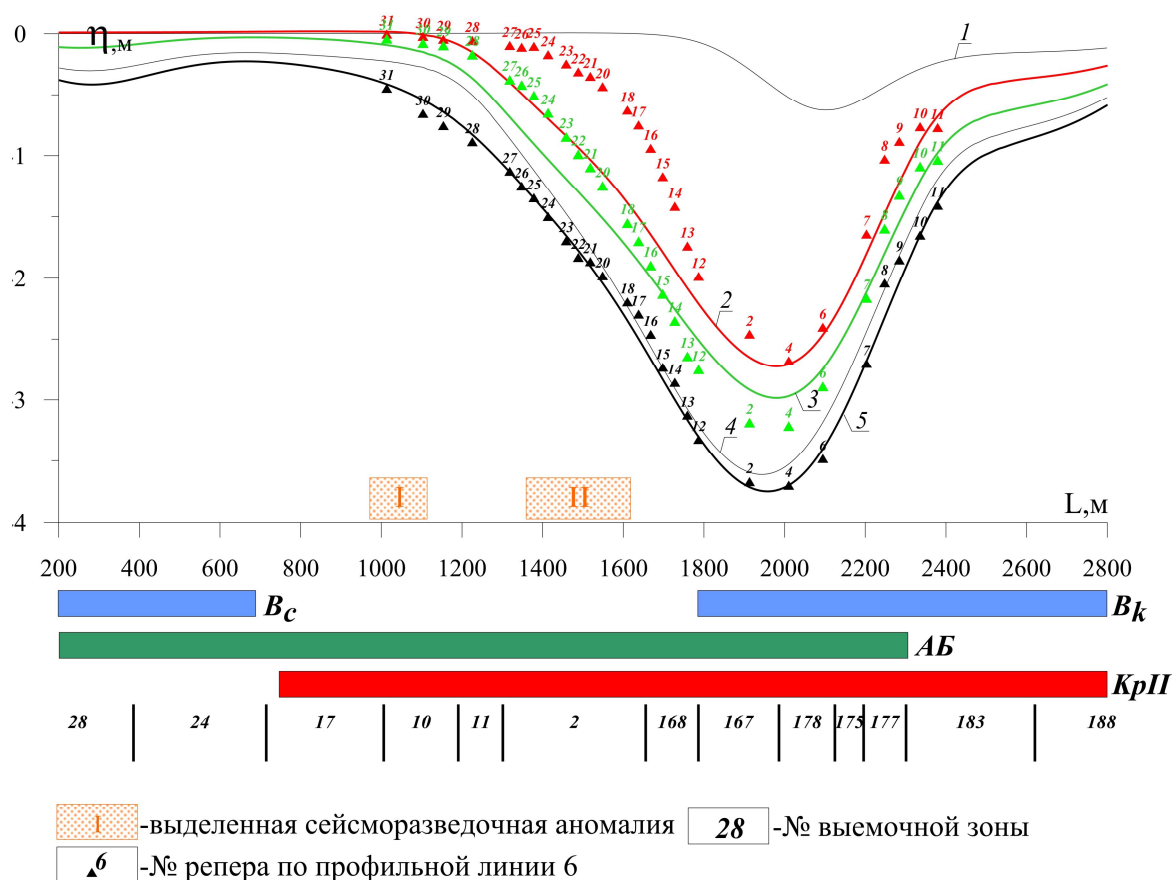


Рис. 3. Ретроспективные расчетные оседания земной поверхности вдоль меридионального профиля в южной части шахтного поля рудника СКРУ-1: 1 – на 1950 г.; 2 – на 1970 г.; 3 – на 1990 г.; 4 – 2005 г.; 5 – 2014 г.

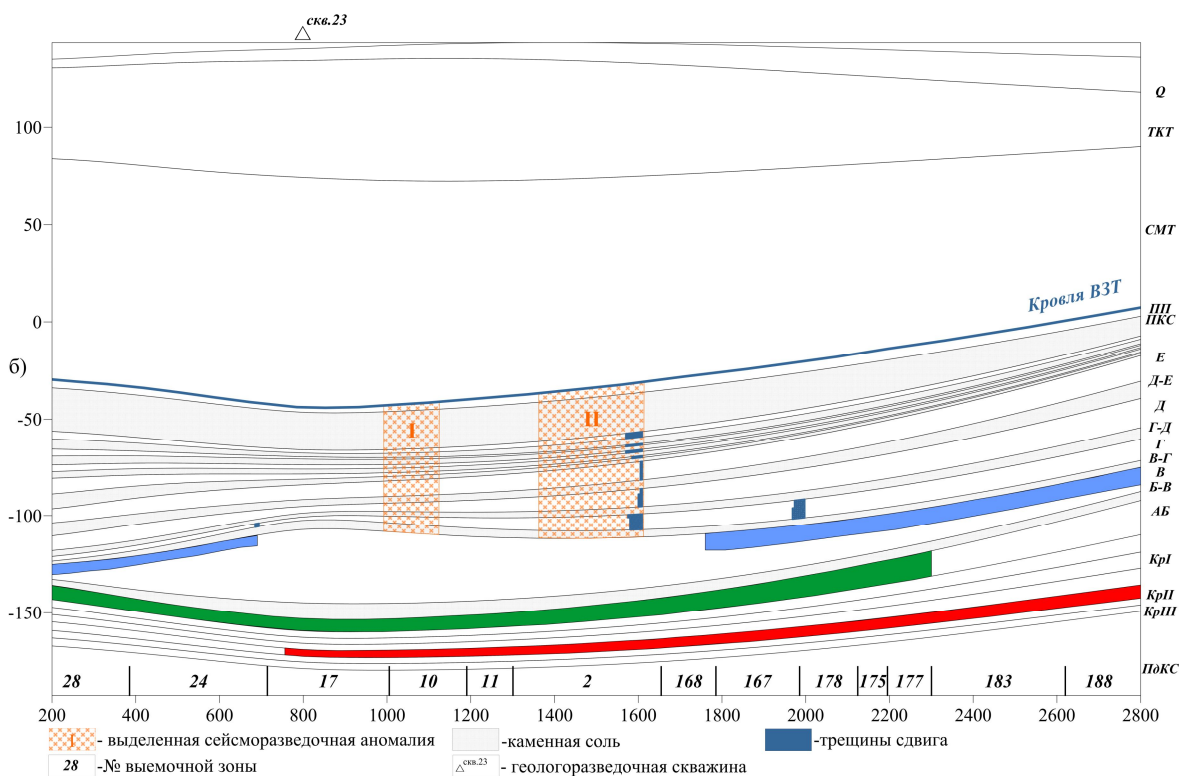


Рис. 4. Характер техногенного нарушения сплошности ВЗТ на конец процесса сдвижения

ботке запасов ВКМКС. Исходной информацией для оценки состояния междукамерных целиков и потолочин служат геолого-маркшейдерская документация, полученная в процессе эксплуатационной разведки и отработки сильвинитовых пластов, акты обследования очистных и подготовительных выработок, данные по оседаниям земной поверхности. По результатам анализа выделяются потенциально опасные участки, которые требуют более углубленного исследования их состояния. Исследования проводятся в два этапа. На первом этапе выполняются экспериментальные исследования физико-механических свойств вмещающих пород, оценка напряженного состояния

краевых частей массива, исследование характера их деформирования во времени. Данная информация используется в качестве параметрического обеспечения, позволяющего уточнить модель деформирования подрабатываемого соляного массива и критерии его разрушения. На втором этапе проводится математическое моделирование изменения напряженно-деформированного состояния подработанного соляного массива во времени с целью разработки заключения по оценке степени устойчивости элементов подземных конструкций и рекомендаций по обеспечению сохранности водозащитной толщи [7].

Библиографический список

1. Барях А.А., Асанов В.А., Самоделькина Н.А., Паньков И.Л., Телегина Е.А. Геомеханическое обеспечение защиты рудников от затопления // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 30–34.
2. Паньков И.Л., Асанов В.А., Аникин В.В., Ударцев А.А., Кузьминых В.С. Экспериментальное изучение деформирования и разрушения соляных пород // Proceedings of the VI International Geomechanics Conference. – Болгария, 2014. – С. 233–239.
3. Паньков И.Л., Асанов В.А., Ударцев А.А. Изучение влияния степени нагружения и формы образцов на деформирование соляных пород при ползучести // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 1. – С. 246–252.

4. Токсаров В.Н., Асанов В.А., Евсеев А.В., Бельтюков Н.Л., Аникин В.В. Контроль напряженного состояния и механических свойств соляных пород в природных условиях // Проблемы безопасности и эффективности освоения георесурсов в современных условиях: материалы науч.-практ. конф. – Пермь, 2014. – С. 337–341.
5. Асанов В.А., Аникин В.В., Бельтюков Н.Л., Евсеев А.В., Токсаров В.Н. Инструментальный метод контроля напряженно-деформированного состояния приконтурного массива соляных пород // Горный журнал. – 2013. – № 6. – С. 40–44.
6. Барях А.А., Лобанов С.Ю., Ломакин И.С. Анализ изменения степени нагружения междукамерных целиков во времени на Верхнекамском месторождении солей // Физ.-техн. проблемы разраб. полезных ископаемых. – 2015. – № 4. – С. 70–82.
7. Асанов В.А., Барях А.А., Токсаров В.Н., Евсеев А.В. Методика геомеханической оценки длительной устойчивости междукамерных целиков // Научно-техническое обеспечение горного производства: сб. науч. тр. ИГД им. Д.А. Кунаева. – Алматы. – Т. 87. – 2015. – С. 91–95.

**EXPERIMENTAL AND THEORETICAL RESEARCH OF LONG TERM STABILITY
OF LOAD-CARRYING ELEMENTS OF THE ROOM-AND-PILLAR SYSTEM
OF POTASH BEDS**

V.A. Asanov, I.L. Pankov, A.V. Evseev, C.Yu. Lobanov, I.S. Lomakin

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

The safety of underground mining of water-soluble ore deposits is mostly defined by the deformation intensity of load-carrying elements in time of the mining method. The complex of experimental and theoretical research of stress-strain state of the undermined salt massif allowed developing an estimation method of long term stability degree of interchamber pillars.

Keywords: salt rocks, creep, stress-strain state of a rock massif, pillar stability.

Сведения об авторах

Асанов Владимир Андреевич, доктор технических наук, заведующий лабораторией физических процессов освоения георесурсов, Горный институт УрО РАН (ГИ УрО РАН), 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78А; e-mail: ava@mi-perm.ru

Паньков Иван Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических процессов освоения георесурсов, ГИ УрО РАН; e-mail: ivpan@mi-perm.ru

Евсеев Антон Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических процессов освоения георесурсов, ГИ УрО РАН; e-mail: evseev@mi-perm.ru

Лобанов Сергей Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории механики горных пород, ГИ УрО РАН; e-mail: Lserg@mi-perm.ru

Ломакин Иван Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории механики горных пород, ГИ УрО РАН; e-mail: Lomakin@mi-perm.ru

Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АЭРО- И ГИДРОУПРУГОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНО- ГРАДИЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

С.А. Бочкарёв, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

С.В. Лекомцев, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.Ю. Фёдоров, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Представлены результаты исследований динамического поведения цилиндрических оболочек, выполненных из функционально-градиентных материалов и имеющих круговое или некруговое поперечное сечение. Решение задачи, осуществляемое с помощью метода конечных элементов, сведено к вычислению комплексных собственных значений связанной системы уравнений. Приводятся результаты численных экспериментов, направленных на оценку влияния различных факторов (граничных условий, величины объемных фракций составляющих материалов, уровня заполнения жидкостью, механической или температурной нагрузок) на спектр собственных частот, а также границы аэроупругой и гидроупругой устойчивости.

Ключевые слова: функционально-градиентный материал, цилиндрические оболочки, потенциальная жидкость, сверхзвуковое обтекание, метод конечных элементов, устойчивость, флаттер.

Элементы некоторых машиностроительных конструкций взаимодействуют с жидкой или газообразной средой, воздействие которой в зависимости от условий эксплуатации может усугубляться значительными температурными градиентами. Такого рода комбинированная нагрузка предъявляет повышенные требования к эксплуатационным свойствам изделий. В качестве одного из возможных решений, позволяющего достичь продления жизненного цикла изделия, является использование функционально-градиентных (ФГ) материалов. Эти композиты представляют собой смесь двух или более компонентов, как правило, керамики и

металла, и обеспечивают непрерывное и гладкое изменение механических и физических свойств по толщине конструкции. Они позволяют объединить преимущества керамических материалов, с их повышенной сопротивляемостью к коррозии и температурным нагрузкам, и металлов, с их высокой прочностью на разрыв. Улучшенные эксплуатационные характеристики изделий, выполненных из ФГ материалов, привлекли внимание инженеров из многих отраслей техники, что способствовало появлению обширного ряда исследований [1]. В этих работах при анализе как ненагруженных, так и подвергающихся дополнительному температурному или

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Пермского края (грант № 13-01-96049).