

УДК 622.28, 622.831

А.А. Неверов, С.А. Неверов, С.Ю. Васичев

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

### **Введение**

Одной из основных задач при проектировании технологий подземной добычи является обоснование устойчивости конструктивных элементов систем разработки. Получение на начальной стадии исчерпывающей информации о их прочности, предоставляемой в наглядных геометрических и цифровых изображениях, значительно облегчает интерпретацию результатов широкому кругу специалистов, участвующих в проектировании<sup>1</sup>.

Анализ геомеханической обстановки при использовании той или иной системы разработки, как правило, проводится несколькими методами, которые позволяют прогнозировать напряженно-деформированное состояние (НДС) массива в конструктивных элементах технологий (целиках, пролете отработки, кровле и почве камер и т.д.), оценить их устойчивость при принятых параметрах выемки. Экспериментальные методы являются трудоемкими и дорогостоящими и не позволяют

емки. Их применение в научных исследованиях и проектном деле является менее дорогостоящим по сравнению с лабораторными и особенно натурными экспериментами. Тем не менее, зависимости полученных результатов при реализации той или иной математической постановки задачи (использование ряда предположений и допущений, адекватность граничных условий нагружения), требуют дополнительной проверки достоверности (верификации) экспериментальными методами.

Сочетание лабораторных (физических) и математических подходов при оценке НДС конструктивных элементов подземных геотехнологий позволяет существенно повысить степень достоверности и надежности результатов исследований. Одной из важных задач при этом является проведение качественного анализа и корректной сопоставительной оценки экспериментальных и расчетных данных, чему и посвящена настоящая публикация. В качестве объекта исследования рассмат-

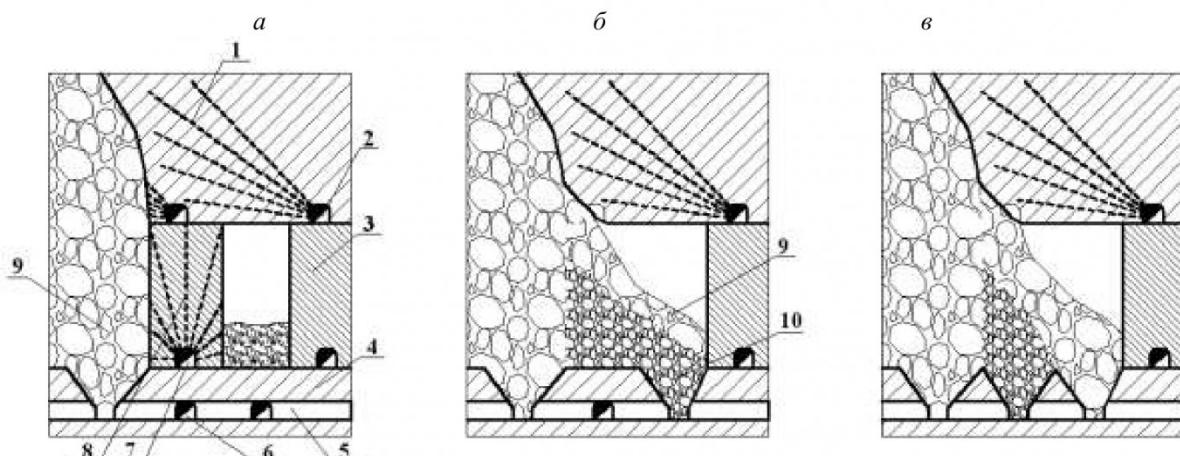


Рис. 1. Сплошная камерная система разработки с обрушением кровли: а – выемка камерных запасов; б – обрушение целика; в – выпуск руды в границах камеры и целика.

1 – породная консоль; 2 – буревой посадочный орт; 3 – рудное тело; 4 – вмещающие породы; 5 – полевой откаточный штрек; 6 – погрузочно-доставочный орт; 7 – буровой орт; 8 – буровые скважины; 9 – обрушенные породы; 10 – отбитая руда

получать информацию о состоянии большинства элементов горной геотехнологии в силу разнообразия инженерно-геологических условий месторождений.

В настоящее время современные вычислительные машины и численные методы позволяют моделировать механическое поведение массива горных пород при любой сложности способа вы-

ривания сплошная камерная система разработки с обрушением кровли (рис. 1), являющаяся базовой геотехнологией добычи руды на Николаевском полиметаллическом месторождении [1-2].

### **Конечно-элементное моделирование**

Основная идея метода конечных элементов (МКЭ) состоит в том, что любую непрерывную величину (перемещение, напряжение, деформацию, температуру и др.) можно аппроксимировать дискретной моделью, состоящей из отдельных элементов. На каждом из этих элементов опреде-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования

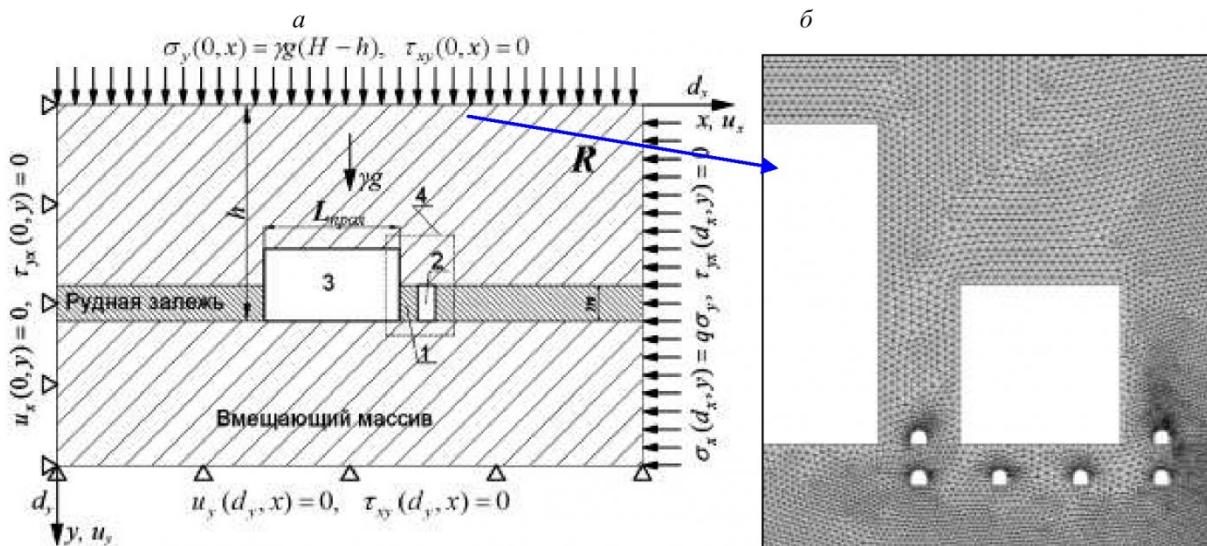


Рис. 2. Схема расчетной области (а) и фрагмент ее дискретизации (зоны исследования) на конечные элементы с учетом выработок (б): 1 – междукамерный целик; 2 – камера; 3 – выработанное пространство; 4 – область детального анализа НДС массива пород;  $t$  – мощность залежи;  $L_{\text{прол}}$  – длина пролета отработки

ляемая величина аппроксимируется кусочно-линейной, интерполирующей непрерывной функцией. В математическом плане задача состоит в приведении дифференциальных уравнений, описывающих рассматриваемую конструкцию, к системе алгебраических уравнений, решение которой дает значения искомых узловых неизвестных [3–5].

Для проведения численного эксперимента была выбрана двухмерная упругая модель. Задача рассматривалась в приближении плоской деформации вертикального сечения массива пород, что предполагает значительную протяженность исследуемого объекта (целика) по сравнению с его поперечным размером. Моделирование проводилось в условиях «прямой» постановки, то есть нагружение модели осуществлялось поверхностными усилиями на границах и распределенными по объему массовыми силами после того, как в расчетной области с имитированы выработки.

На рис. 2 приведена расчетная схема ( $R$  – прямоугольник  $0 \leq x \leq d_x$ ,  $0 \leq y \leq d_y$ ) к определению НДС массива пород при сплошной камерной выемке с основными параметрами и фрагмент ее дискретизации на конечные элементы. Краевые условия задачи приняты в соответствии с исходным тектоническим напряженным состоянием нетронутого массива пород Николаевского месторождения и представляются как сжимающие усилия и ограничения нормальных перемещений на границах расчетной области.

В расчетной области  $R$  выполнены:

$$\text{уравнения равновесия: } \sigma_{ij,j} + pF_i = 0 \quad (1)$$

$$\text{уравнения Коши: } \varepsilon_{ij} = 0,5(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

физические уравнения (закон Гука):

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \lambda\theta\delta_{ij} \quad (3)$$

и граничные условия на плоскостях (см. рис. 2); где  $\sigma_{ij}$  – компоненты тензора напряжений ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$ , и  $\tau_{xy}$  – соответственно вертикальная и горизонтальная нормальные и касательная компоненты тензора напряжений);  $pF_i = \gamma g d_{ij}$  – объемные силы;  $\gamma$  – плотность пород;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\varepsilon_{ij}$  – компоненты тензора деформаций ( $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_{xy}$  – соответственно вертикальная и горизонтальная главные линейные и угловая компоненты тензора деформаций);  $u_i$  – компоненты вектора перемещений ( $u_y$ ,  $u_x$  – вертикальная и горизонтальная компоненты вектора перемещений);  $\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y$  – относительная объемная деформация;  $G$  и  $\lambda$  – параметры Ламе  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ ,  $\lambda = \frac{E\mu}{(1-2\mu)(1+\mu)}$ ;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $q$  – коэффициент бокового давления;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $H$  – глубина разработки;  $h$  – расстояние от верхней границы модели до почвы рудной залежи.

Границы модели выбраны в соответствии с принципом Сен-Венана. Учитывая значительную глубину ведения горных работ (700–1100 м), а также для корректной сравнительной оценки с результатами оптического моделирования, часть вышележащего массива высотой 400 м заменялась соответствующей нагрузкой равной объемному весу толщи пород. В расчетах использовались следующие соотношения главных напряжений для глубины 800 м: субширотное –  $\sigma_x = 2,5\gamma H = 50$

МПа, вертикальное –  $\sigma_y = \gamma H = 20$  МПа. Рудная залежь и вмещающие породы в задачах рассматривались упругими, изотропными и однородными материалами соответственно с модулем упругости  $E_{\text{руд}} = 47$  и  $E_{\text{пор}} = 52$  ГПа, коэффициентом Пуассона  $\mu_{\text{руд}} = 0,26$  и  $\mu_{\text{пор}} = 0,24$  и объемным весом  $2,7$  т/м<sup>3</sup>. Для сравнительного геомеханического анализа были выбраны компоненты главных ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ) и максимальных касательных ( $\tau_{\max}$ ) напряжений.

### Моделирование на активных фотоупругих материалах

Среди лабораторных методов исследований НДС поляризационно-оптическое моделирование занимает особое положение [6-13]. Основанием этому является то, что этот метод – экспериментальный, а эксперимент – база и критерий любых теоретических построений. Его простота, надежность, наглядность получаемых результатов и доступность, позволяют горному инженеру освоить и изучить закономерности распределения напряжений и деформаций в элементах исследуемой геотехнологии.

Теоретическим обоснованием применения фотоупругих моделей из оптически чувствительных материалов для моделирования статических состояний и медленных процессов горной геомеханики служат положения математической теории упругости в классическом представлении (идеальная упругость материалов, однородность, изотропность, полная обратимость энергетического процесса загружения – разгрузки модели, малость относительных удлинений и сдвигов и их линейная связь с напряжениями), а также положения теории подобия.

Оптический метод позволяет моделировать и изучать упругую стадию деформирования элементов массивов и сооружений и решать на этой основе ряд прикладных задач механики горных пород, связанных с установлением общей картины НДС при разработке месторождений полезных ископаемых. С его помощью воссоздаются и определяются параметры проявлений горного давления: величины действующих напряжений, перемещений, деформаций пород и горных конструкций на разных стадиях их проведения и эксплуатации.

В основе метода лежит теорема Левин-Митчелла о независимости характера распределения напряжений в плоских моделях от упругих постоянных их характеристик при равенстве нулю равнодействующей всех приложенных внешних сил. Последнее обстоятельство позволяет при моделировании учитывать только геометрическое и силовое подобие модели и натуры. В этих случаях при одинаковых нагрузках и одинаковых геометрических формах и размерах во всех упругих, однородных и изотропных телах будет иметь место одно и то же НДС.

Главной особенностью, оптического моделирования в сравнении с другими методами является то, что геометрический и силовой масштабы выбираются независимо друг от друга. Это означает, что оптически активный материал при одном и том же геометрическом масштабе может быть одним и тем же по механическим свойствам, но подобие физического процесса деформирования в этом случае достигается за счет специального варьирования масштаба напряжений, либо за счет варьирования толщины плоских моделей.

Физическая сущность метода основана на свойстве большинства прозрачных изотропных материалов приобретать свойство оптической анизотропии при приложении к ним внешней нагрузки. Оптическая анизотропия прозрачного материала с внутренними напряжениями проявляется в эффекте искусственного двулучепреломления. На рис. 3 приведена принципиальная оптическая схема фотоупругого моделирования. Луч света от источника 1 поступает на поляризационный фильтр 2, 3 (поляризатор). Поляризационный луч проходит через нагруженную модель 4, при входе в которую разлагается на два луча, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Последние движутся по материалу модели с различными скоростями (в соответствии с напряжениями), возникающая при этом разность хода (смещение по фазе колебаний электромагнитных волн) лучей света пропорциональна разности главных напряжений, действующих в модели в точках на пути луча света:

$$\Gamma = Cd (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (4)$$

где  $\Gamma$  – оптическая разность хода, ммк;  $d$  – толщина модели, см;  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – главные нормальные напряжения, кгс/см<sup>2</sup>;  $C$  – оптический коэффициент напряжения, см<sup>2</sup>/кгс.

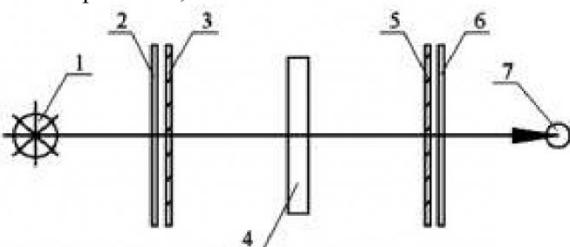


Рис. 3. Принципиальная оптическая схема фотоупругого моделирования: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – фазовая пластина (четвертьволновая); 4 – модель; 5 – фазовая пластина; 6 – анализатор; 7 – глаз исследователя

Из модели выходят два луча и попадают во второй поляризационный фильтр 5, 6 (анализатор), где их колебания складываются. Исследователь 7 видит результат сложения этих колебаний, в виде изображения окрашенного в различные цвета спектра, соответствующие той или иной разности хода лучей, создаваемой точкам и модели. При этом каждая цветная полоса (изохрома)

Таблица. Этапы моделирования

Этапы моделирования	Краткое примечание
1. Изготовление моделей	Эксперименты выполнялись на плоских моделях из оптически чувствительного материала (сшитого полистирола СД-8) размерами 235×305 мм, с соблюдением ряда критериев подобия [6-13]
2. Определение граничных условий (нагрузки и ограничения)	Исходное напряженное состояние массива при моделировании принималось в соответствии с данными геомеханических исследований на Николаевском полиметаллическом месторождении ( $\sigma_x = 2,5\gamma H = 50$ МПа, $\sigma_y = \gamma H = 20$ МПа). Объемная сила в моделях не учитывалась. Схема граничных условий показана на рис. 5
3. Нагружение моделей	Модели нагружались равномерно распределенными усилиями, которые заменились двумя точечными модулями $P_e$ (на верхней границе) и одним $P_c$ (на боковой) в соответствии с действующими напряжениями и конструкцией нагружающей кассеты в специальном термостате (рис. 4)
4. Тарировка образцов	Кроме моделей, дополнительно производилось нагружение специального тарировочного образца для определения цены полосы фотоупругого материала
5. Формирование полученных результатов	Фотографирование моделей и получение картин изохром-изолиний равных максимальных касательных напряжений осуществлялось с использованием поляризационной установки – фотоэластициметр FP
6. Разделение (определение) главных напряжений	Разделение главных напряжений в моделях производилось методом разности касательных напряжений [6] с использованием координатно-синхронного поляриметра КСП-5
7. Результаты исследований	Результаты выдаются в виде фотографий и графиков главных и максимально касательных напряжений

представляет собой геометрическое место точек с одинаковой оптической разностью хода и, следовательно, с одной и той же разностью главных нормальных напряжений  $\sigma_1 - \sigma_2$ , полуразность, которых представляет собой максимальные касательные напряжения:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (5)$$

В некоторых точках исследуемой модели в случае, когда плоскость колебания луча совпадает с направлением какого-либо из главных нормальных напряжений, двойного лучепреломления не происходит (лучи через анализатор не проходят). В результате на картинке появляются черные линии (изоклины), пересекающие цветную картинку изохром. Эти линии представляют собой геометрические места точек, в которых направления главных нормальных напряжений параллельны между собой (одинаковы).

Согласно методике [6-10], величина максимальных касательных напряжений определяется порядком полос ( $n$ ) на картине изохром и ценой полосы материала ( $\tau_0^1$ ):

$$\tau_{max} = n \frac{\tau_0^1}{d} = n \frac{\sigma_0^1}{2d} \quad (6)$$

Цена полосы материала  $\tau_0^1$  и  $\sigma_0^1$  устанавливается предварительно при растяжении или сжатии тарировочного образца.

Основная характеристика этапов проведения экспериментов и необходимое для моделирования оборудование приведены в табл.

Выбор основных размеров модели осуществля-

лся из условия, что возмущения вызванные имитацией исследуемого объекта практически затухали (исчезали) к внешнему ее контуру (принцип Сен-Венана). Моделирование проводилось методом «замораживания» (процесс нагревания и охлаждения моделей получил наименование «замораживания»). В основе последнего лежит фиксация оптической картинки при медленном охлаждении модели.

Модель нагружалась равномерно распределенными сжимающими усилиями с интенсивностью  $q_y$  и  $q_x$ . В соответствии с масштабом напряжений ( $\delta = 1:500$ ) в модели создавались пригрузки с  $\sigma_y = 0,04$  и  $\sigma_x = 0,1$  МПа. С учетом толщины модели, интенсивность распределенной нагрузки составила  $q_y = 0,4$  и  $q_x = 1,0$  кг/см. Модель помещалась в нагружаемую кассету (рис. 4) [13]. С учетом ее конструкции были определены величины грузов необходимых для нагружения. Вертикальная нагрузка на один пригрузочный рычаг составила  $P_e = 0,61$  кг, (общая  $P_{eo} = 1,22$  кг), а горизонтальная –  $P_c = 3,92$  кг. Схема нагружения представлена на рис. 5.

Для корректной расшифровки фотографий экспериментально была определена цена полосы для материала СД-8, которая составила  $\tau_0^1 = 0,16$  кг/см<sup>2</sup> или 0,016 МПа.

С учетом масштаба напряжений  $\delta = 1:500$  перепад максимальных касательных напряжений между смежными полосами изохром в переводе на натуру составил 8 МПа. Анализ картин изохром-

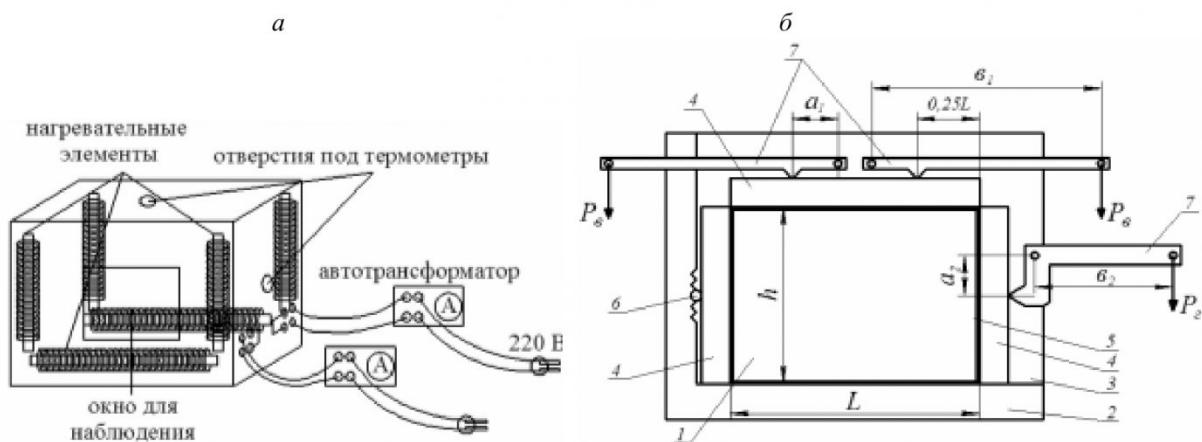


Рис. 4. Оборудование для нагружения моделей: а – термостат; б – кассета: 1 – нагружаемая модель; 2 – жесткий каркас кассеты; 3 – боковина кассеты; 4 – жесткие пластины; 5 – низкомодульные прокладки; 6 – шарнир; 7 – пригрузочные рычаги;  $h$  и  $L$  – размеры модели из оргстекла

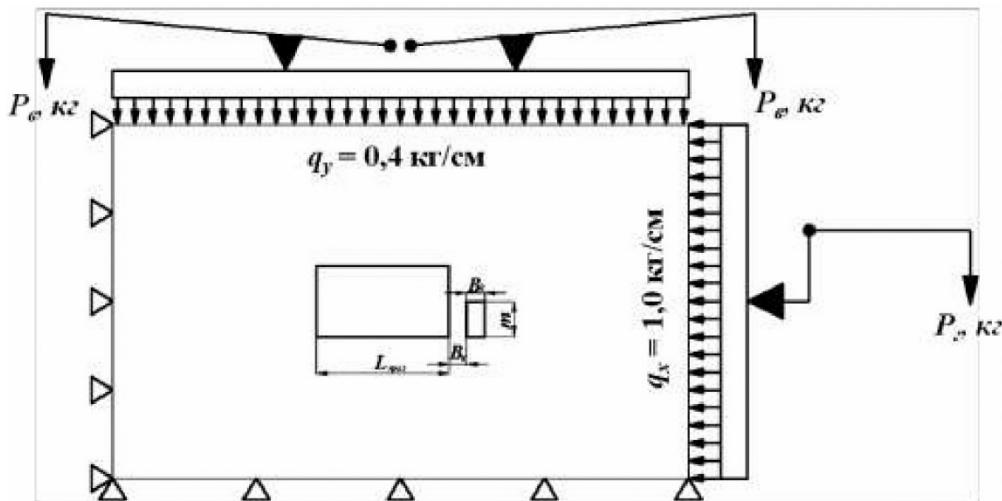


Рис. 5. Схема нагружения моделей:  $B_k$  – ширина камеры;  $B_u$  – ширина временного рудного целика;  $L_{\text{прол}}$  – длина пролета отработки

изолиний осуществлялся с использованием критерия, при котором оптическая разность хода равна нулю ( $\Gamma = 0$ ).

Фотографирование модели производилось в поле анализатора кругового полярископа (фотоэластиметр FP) с применением цифрового фотоаппарата.

В результате были получены фотографии с распределением максимальных касательных напряжений вокруг элементов исследуемой технологии.

Заключительным этапом в поляризационно-оптическом эксперименте является решение задачи о разделении напряжений, то есть определение отдельных компонент тензоров напряжений и деформаций. Для её решения используются уравнения механики деформируемого тела и численные методы. В нашем случае установление главных напряжений осуществлялось методом разности касательных напряжений, основанным на числен-

ном решении дифференциальных уравнений равновесия в прямоугольной системе координат с использованием поляриметра КСП-5 (метод компенсации).

#### Сопоставительная оценка результатов исследований

Методический подход к сравнительному анализу результатов исследований двумя выделенными методами заключается в следующем. Если результаты эксперимента и конечно-элементного расчета в анализируемой области достаточно хорошо совпадают, а именно численные решения лежат в пределах цены полосы поляризационно-оптического моделирования и погрешность в напряжениях составляет не более 15-20% в абсолютных величинах, то с высокой степенью доверия можно полагать, что данные физического и математического исследований согласуются между собой, а использованные методы, включая формулировку краевых условий достаточно кор-

ректны.



Рис. 6. Схема расположения характерных линий и точек в конструктивных элементах очистного блока

Сопоставление результатов численного расчета и экспериментальных данных, полученных на активных фотоупругих материалах, может осуществляться либо визуально по всему полю полос изохром-изолиний, полученному при фотографировании либо наблюдениями в ходе моделирования.

Качество визуального сравнения зависит от опыта наблюдателя и умения определять так называемые особые точки, в которых нормальные напряжения одинаковы по всем направлениям или, в частности, равны нулю. Последние представляют места отчета максимальных касательных напряжений, которые также равны нулю.

Ниже приводятся результаты качественной и количественной сравнительной оценки рассматриваемых методов моделирования на примере геомеханического анализа НДС элементов геотехнологии сплошной камерной выемки с обрушением кровли.

Для количественного сопоставления полученных данных численного и физического экспери-

ментов был выбран ряд характерных линий и точек в вертикальном сечении выемочного блока (рис. 6): линия 1 проходит по основанию, 2 – на уровне центрального горизонтального сечения, 3 – по кровле, 4 – в центральном сечении консоли.

На рис. 7 представлены оптическая картина экспериментального интерференционного поля (изохром-изолиний) полученного с помощью физического моделирования на активных фотоупругих материалах и вычислительное НДС конструкции методом конечных элементов при одних и тех же граничных условиях и геометрических размерах камеры и целика ( $B_k = B_u = 20$  м;  $m = 40$  м;  $L_{\text{прол}} = 150$  м; высота обрушения породной кровли  $h = m = 40$  м).

В соответствии со схемой (см. рис. 6) на рис. 8 приведены эпюры распределения напряжений в пределах исследуемой области.

Визуальное качественное сопоставление этих результатов с количественной оценкой по выбранным характерным линиям в сечении выемочного блока позволили установить относительную погрешность ( $P, \%$ ) используемых методов:

$$|P| = \frac{\sum (\sigma_i^{\text{МКЭ}} - \sigma_i^{\text{ФМ}})}{\sum \sigma_i^{\text{МКЭ}}} \times 100 \quad (7)$$

где  $\sigma_i^{\text{МКЭ}}$  – абсолютные напряжения, полученные методом МКЭ, МПа;

$\sigma_i^{\text{ФМ}}$  – абсолютные напряжения, полученные методом фотоупругости, МПа.

Методика определения ( $P, \%$ ) физического эксперимента относительно МКЭ заключалась в следующем. На выделенных характерных линиях с интервалом в 1,0 м брались точки. В каждой точке снимались напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\tau_{\max}$ , которые суммировались. При этом относительная погрешность в напряжениях для каждой линии определялась как отношение абсолютной величины погрешности между математическим и физическим моделированием к сравниваемому методу.

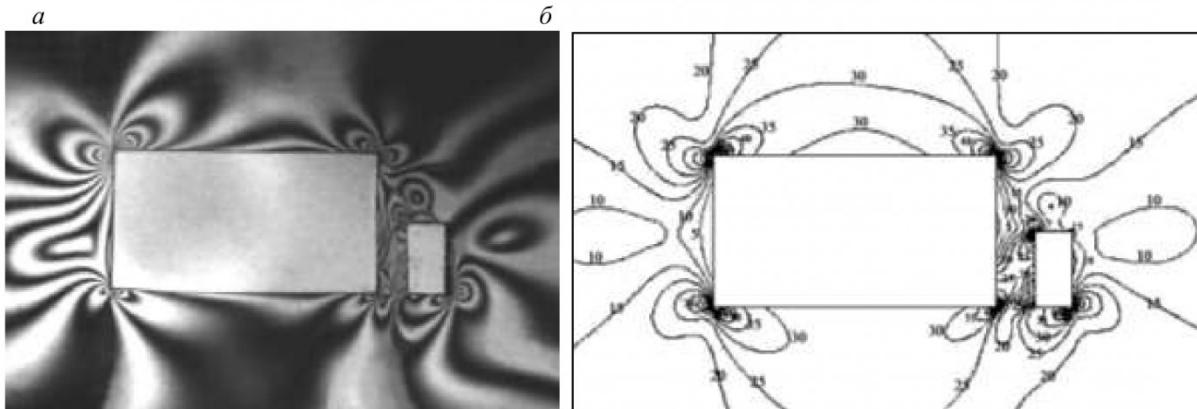


Рис. 7. Характер распределения напряжений  $\tau_{\max}$  в элементах рассматриваемой геотехнологии: а – физическое моделирование поляризационно-оптическим методом; б – численное решение МКЭ

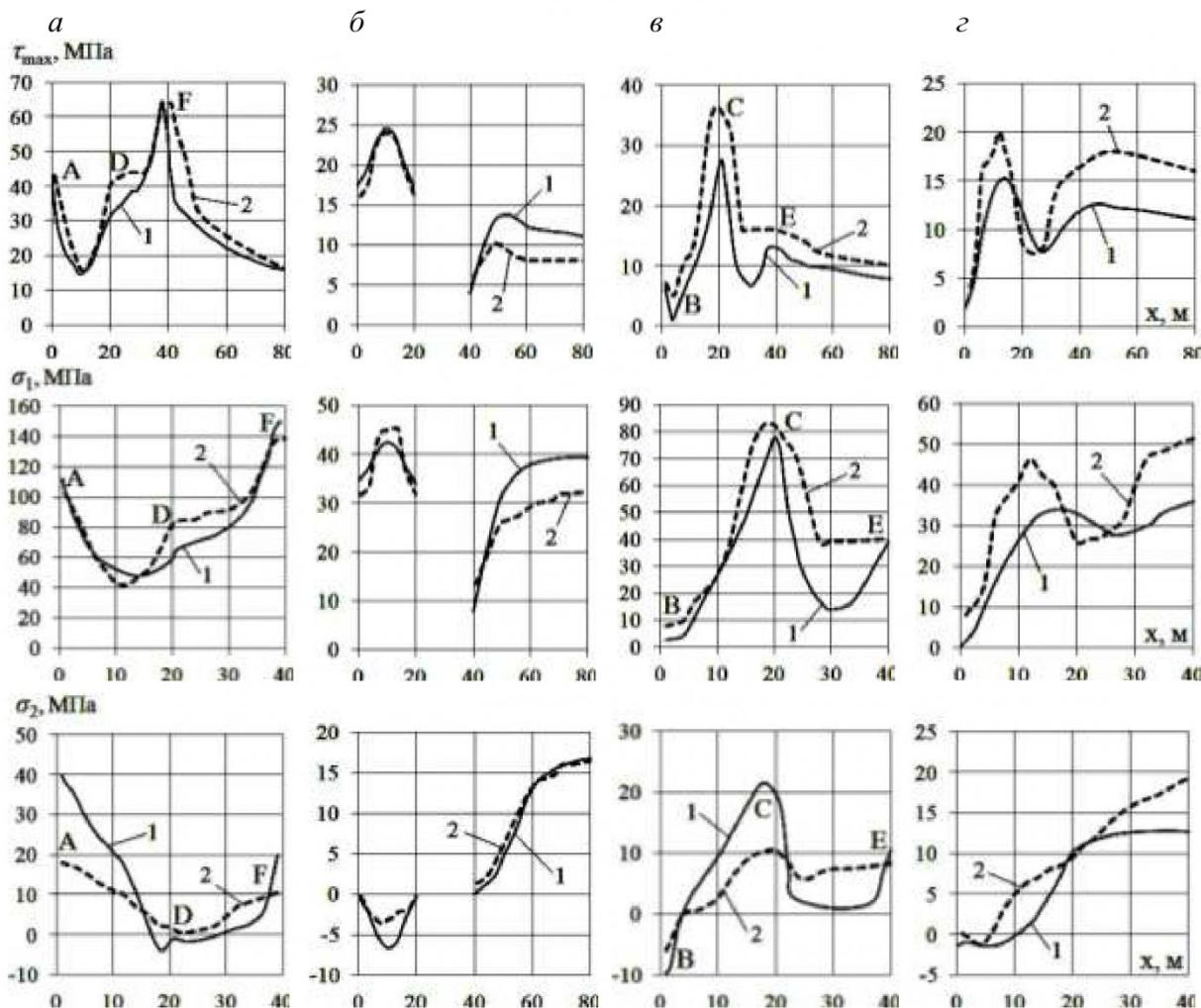


Рис. 8. Эпюры распределения напряжений в пределах очистного блока в соответствии со схемой см. рис. 6: а – в основании (линия 1); б – в центральном горизонтальном сечении (линия 2); в – в кровле (линия 3); г – в центральном сечении консоли (линия 4): 1 – результаты численного расчета МКЭ; 2 – тоже физического моделирования на активных фотоупругих материалах

В качестве иллюстраций сравнительной оценки НДС междукамерного целика в зависимости от конструктивного (геометрического) исполнения рассматриваемой геотехнологии на рис. 9 приведены качественные картины полей распределения сдвиговых усилий  $\tau_{\max}$ .

Из них следует, что: результаты численного и экспериментального исследований практически совпадают (качественно одинаковые); физическому поляризационно-оптическому моделированию, определяющему НДС в пределах рассматриваемой области, можно вполне доверять с точностью самого метода и особенно при правильном геометрическом и силовом критериях подобия.

В целом можно отметить, что почти по всем качественным и количественным параметрам физический эксперимент адекватен численному моделированию (МКЭ).

Относительная погрешность в напряжениях фотоупругого метода в сравнении с МКЭ не превышает 15-20%, что свидетельствует о достаточно

высокой степени их совпадения.

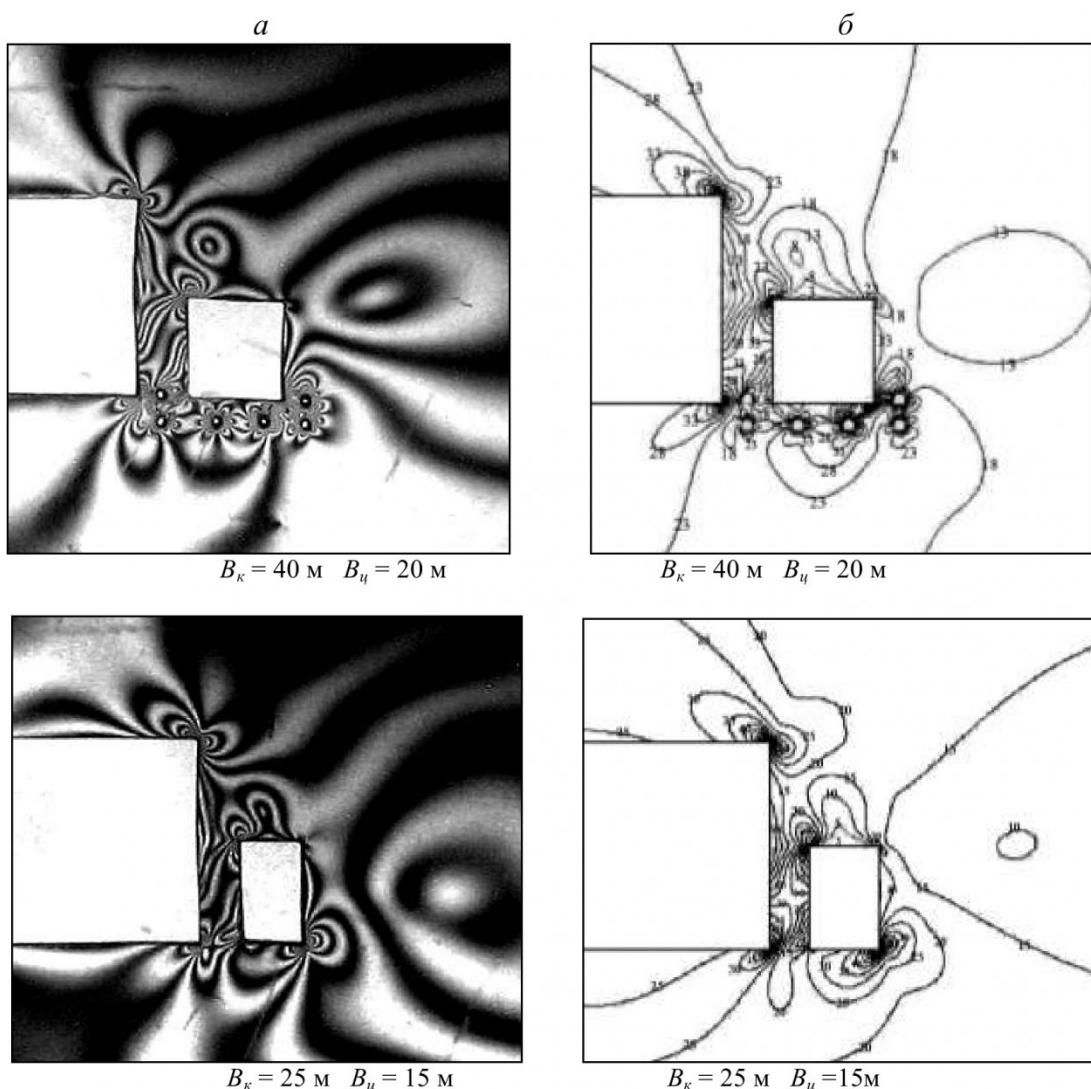
Значения напряжений, полученных поляризационно-оптическим моделированием в большинстве случаев несколько завышены.

Последнее характеризует определенный запас надежности с позиции обеспечения безопасности ведения горных работ.

Таким образом, решая геомеханические задачи математическим моделированием с использованием для их уточнения (корректировки) и проверки поляризационно-оптический метод можно получать в полнее обоснованные и хорошо согласующиеся с практикой результаты.

#### Заключение

1. Повышение надежности результатов исследований НДС конструкции (элементов подземных геотехнологий) возможно за счет рационального сочетания физического и математического моделирования. Основной акцент необходимо делать на математические методы. Физический эксперимент, как более трудоемкий и дорогостоящий,



*Рис. 9. Сравнительная оценка изменения напряжений  $\tau_{max}$  в целике в зависимости от геометрических параметров геотехнологии: а – моделирование на фотоупругих материалах; б – численное решение МКЭ*

должен использоваться для уточнения и проверки (верификации) адекватности расчетной модели конструкции и при необходимости вносить соответствующие корректировки в результаты исследований.

## 2. Использование полученных данных о НДС

массива горных пород разными методами позволяет исследователю выполнить качественное сопровождение разработок их доводки и контроля до соответствующего уровня, обеспечивающего безопасность и надежность геотехнологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарова Л. А. Освоение камерной системы разработки с обрушением кровли на Николаевском руднике / Л. А. Назарова, А. М. Фрейдин, А. А. Неверов. / ФТПРПИ. – 2005. – № 4. – С. 60-67.
2. Фрейдин А. М. Совершенствование способов выемки мощных залежей под обрушенными породами / А. М. Фрейдин, А. А. Неверов, С. А. Неверов. / Горный журнал. – 2007. – № 4. – С. 46-49.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
4. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз. – М.: Мир, 1981. – 304 с.
5. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
6. Хаимова-Малькова Р.И. Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом. – М.: Наука, 1970. – 116 с.

7. Трумбачев В.Ф. Методика моделирования массива горных пород методами фотомеханики (две части) / В.Ф. Трумбачев, О.К. Славин. – М.: изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1974, 1975.
8. Филатов Н.А. Фотоупругость в горной геомеханике / Н.А. Филатов, В.Д. Беляков, Г.А. Иевлев – М.: Недра, 1975. – 184 с.
9. Краснов В.М. К решению плоской задачи теории упругости оптическим методом // Уч. зап. ЛГУ. – Л.: изд. ЛГУ, 1944. вып 13.
10. Методические указания по применению методов фотомеханики для исследования напряженно-деформированного состояния горных пород. – Л.: изд. ВНИМИ, 1975. – 56 с.
11. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1976. – 295 с.
12. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1967.
13. Свидетельство на полезную модель № 16378. Стенд для нагружения моделей / В.А. Шалауров, В.А. Усков, В.Н. Курнаков. Бюл. № 36, 2000.

Авторы статьи:

Неверов  
Александр Алексеевич,  
к.т.н., старший научный  
сотрудник лаборатории подземной  
разработки рудных месторождений  
ИГД СО РАН  
Enail: nnn\_aa@mail.ru

Неверов  
Сергей Алексеевич,  
к.т.н., старший научный  
сотрудник лаборатории подземной  
разработки рудных месторождений  
ИГД СО РАН  
Enail: nsa\_nsk@mail.ru

Васичев  
Сергей Юрьевич,  
аспирант лаборатории  
подземной разработки рудных  
месторождений ИГД СО РАН  
Enail: labprtm@list.ru

УДК 620.16

**П.В. Бурков, С.П. Буркова, В.Ю. Тимофеев, Д.Ю. Чернявский, А.А. Ащеурова**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
УЧАСТКА МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА  
АЛЕКСАНДРОВСКОЕ – АНЖЕРО-СУДЖЕНСК  
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Основной объем нефти в России добывается на северных месторождениях Западной Сибири, Ямalo-Ненецкого автономного округа, Республики Коми, обширные территории которых заболочены и пересекаются реками, озерами и другими естественными и искусственными препятствиями. Магистральные нефтепроводы пересекают водные преграды различной протяженности. Проблема пересечения водных преград зачастую решается путем строительства подводных переходов.

Дальнейшее развитие нефтегазовой промышленности на основе мощных трубопроводов и эксплуатация их в районах со сложными природными условиями ставит задачи обеспечения контроля прочности и работоспособности этих конструкций, потому что теоретические расчеты прочности магистральных нефтепроводов, закладываемые в проекты, являются ориентировочными, и в принципе не могут учесть всех эксплуатационных факторов.

Подводные переходы магистральных нефтепроводов, несмотря на их сравнительно небольшой удельный вес в общем объеме строительства, относится к наиболее ответственным участкам этих сооружений. Поэтому к надежности подводных переходов предъявляются высокие требования, так как даже незначительные повреждения переходов с потерей герметичности приводят к тяжелым экологическим последствиям [1]. Повы-

шение надежности трубопроводов, пересекающих естественные и искусственные препятствия, становится актуальной проблемой на этапах проектирования, сооружения и эксплуатации трубопроводных систем. Весьма важно прогнозировать поведение сооруженного трубопровода под действием эксплуатационных и внешних воздействий расчетной схеме, принятой в нормах и правилах.

Магистральный нефтепровод «Александровское – Анжеро-Судженск» на своем протяжении пересекает 98 водных преград. Рассматриваемый участок пересечения нефтепровода реки, представляет собой незастроенную, заросшую смешанным лесом территорию вдоль трассы нефтепровода, и расположен на 208-ом километре нефтепровода «Александровское – Анжеро-Судженск». Пойма пересекаемой реки широкая, ровная, заболоченная, представляет собой вытянутые чередующиеся между собой невысокие гривы и болота, покрытые кустарником багульникальника и бересой средней густоты, вдоль русла отмечается кустарниково-осоковый комплекс. Заболоченность составляет русла реки составляет 20%, залесенность 90%. Русло реки на участке подводного перехода извилистое, однорукавное, песчаное. Ширина русла в межень 10-15 м, глубина 1,5-2 м.

При данных начальных условиях исследование напряженно-деформированного состояния