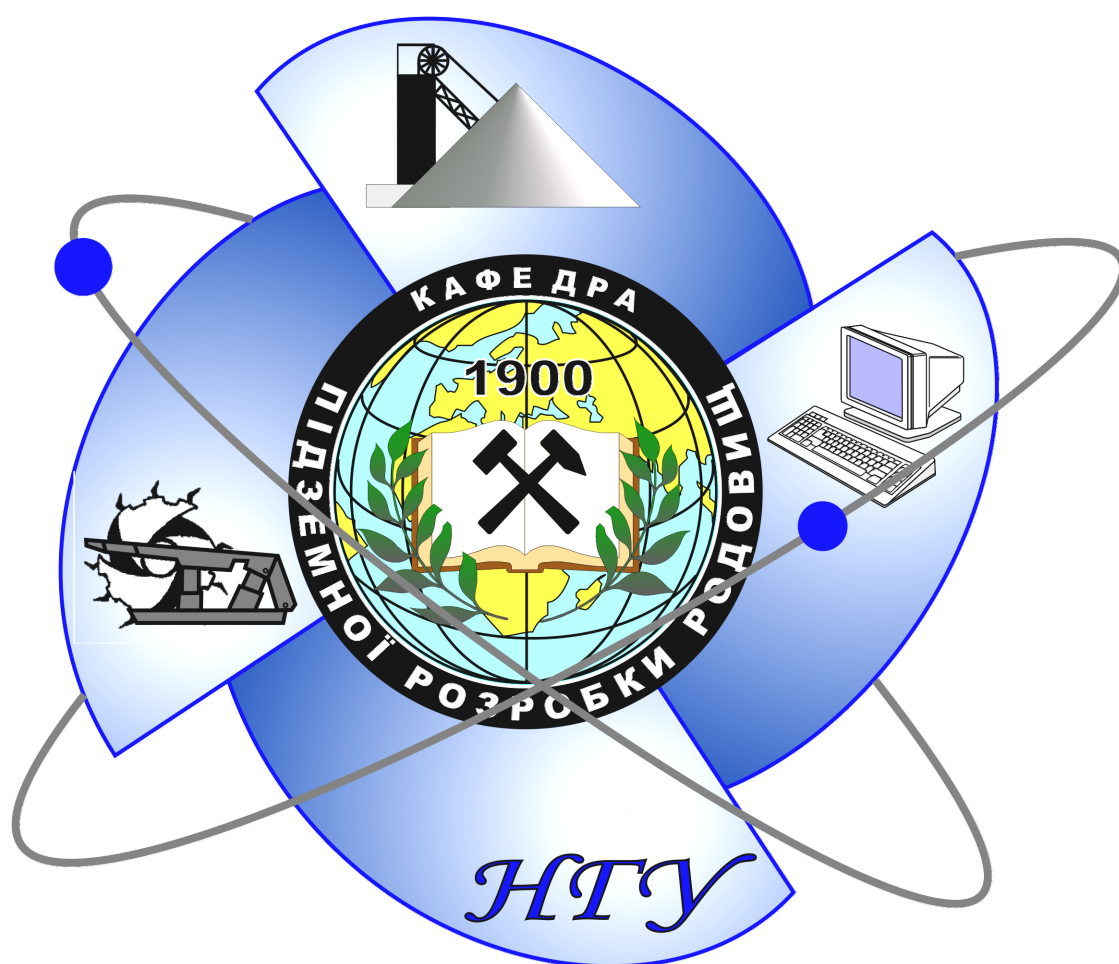


**В.И. Бондаренко, М.А. Ильяшов,  
И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев**

# **ПРОГНОЗ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ В СЛОИСТОМ МАССИВЕ СЛАБЫХ ПОРОД**



**Днепропетровск – 2008**

**В.И. Бондаренко, М.А. Ильяшов,  
И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев**

**ПРОГНОЗ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА  
ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ В СЛОИСТОМ  
МАССИВЕ СЛАБЫХ ПОРОД**

**Монография**

**Системные технологии  
Днепропетровск – 2008**

УДК 622.28:622.831

Бондаренко В.І., Ілляшов М.О., Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Фомичов В.В. **Прогноз переміщень контура пластової виробки в шаруватому масиві слабких порід**. Монографія. – Дніпропетровськ: «Системні технології», 2007. – 193 с. – Російською мовою.

Друкується відповідно до рішення вченої ради Національного гірничого університету.

В монографії викладений аналіз процесу розвитку епюри переміщень контура пластової виробки, що розташована у шаруватому суттєво неоднорідному масиві слабких гірських порід. Встановлено залежності впливу механічних характеристик шарів порід (з урахуванням повних діаграм їх деформування) на зміщення будь-якої ділянки контура виробки та проведений порівняльний аналіз цих закономірностей з рекомендаціями нормативних методик прогнозу проявів гірського тиску. Встановлено нелінійність та особливості впливу геометричних параметрів типових перетинів виробки з кріпленням серій КМП-А3 та КШПУ на розвиток епюри переміщень її периметру. На базі кореляційно-дисперсійного аналізу результатів багатofакторного комп'ютерного моделювання геомеханічних процесів навколо пластової виробки отримана низка рівнянь регресії щодо розрахунку переміщень на основних ділянках периметра виробки, що характеризують її експлуатаційну придатність.

Монографія може бути корисною для наукових співробітників проектних і науково-дослідних інститутів гірничодобувної галузі, інженерно-технічних працівників шахт і виробничих об'єднань, а також студентів гірничих вищих навчальних закладів і факультетів.

Друкується за авторською редакцією.

Рецензенти: В.І. Бузило, д-р техн. наук, проф.

О.М. Москальов, д-р техн. наук, проф.

ISBN 966-8421-35-3

© Бондаренко В.І., Ілляшов М.О., 2008

© Ковалевська І.А., Симанович Г.А., 2008

© Фомичов В.В., 2008

© Системні технології, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

В отдельных публикациях авторы изложили результаты исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» при линейной связи напряжений и деформаций в ее элементах. Учет упруго-пластических свойств вмещающего породного массива осуществлен линейной аппроксимацией реальной диаграммы деформирования породы (на стадии  $\sigma \leq \sigma_{сжс}$ ) с помощью модуля деформации, что широко практикуется в горнотехнических расчетах.

На первом этапе проанализированы все основные факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние системы и дана им оценка в соответствии с горно-геологическими и горнотехническими условиями, например, шахт Западного Донбасса. Для этого выполнено геомеханическое обоснование модели по ряду главных исходных параметров и диапазонов их вариации [1]:

- глубина расположения пластовой выработки и ее размещение относительно угольного пласта;

- структура углевмещающей толщи близлежащих породных слоев, интервал изменения их механических характеристик и свойств угольного пласта;

- горнотехнические параметры пластовой выработки: форма и размеры, тип и параметры крепи, закрепного пространства и их механические характеристики;

- исследование НДС тестовых геомеханических моделей на предмет обоснования их размеров по условию стабилизации компонент напряжений на границах модели в соответствии с исходным негидростатическим состоянием;

- тестирование геомеханических моделей на предмет качественного соответствия их НДС современным представлениям и резуль-

татам исследований процессов сдвижения породного массива в окрестности горной выработки;

– обоснование условий контакта по плоскостям напластования породных слоев углевмещающей толщи.

Общеизвестно, что наиболее применимые численные методы решения подобного класса сложных геомеханических задач, несмотря на высокую их точность, не обладают общностью этого решения. Поэтому необходим методологический подход к решению данной задачи, целью которого является поиск сочетания условия наиболее широкой области применимости результатов исследований с условием минимально допустимого объема вычислений по перебору различных вариантов сочетания геометрических, механических и силовых параметров системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки». При этом второе условие выполнить достаточно сложно, так как для повышения адекватности результатов решения реальным горно-геологическим и горнотехническим условиям необходимо анализировать большое количество переменных параметров во всем диапазоне их вариации. Поэтому на втором этапе исследований [1] выполнено геомеханическое обоснование структуры углевмещающей толщи пород в окрестности пластовой выработки, наиболее адекватно отражающей горно-геологические условия угольных пластов шахт Западного Донбасса. Получено НДС ряда моделей структуры углевмещающей толщи при переменных механических характеристиках породных слоев и разной глубине разработки. По результатам расчетов НДС обоснована наиболее адекватная модель структуры углевмещающей толщи [1].

На третьем этапе исследованы закономерности изменения НДС системы, вызванные вариацией деформационных характеристик породных слоев в установленном для условий Западного Донбасса интервале [1].

Четвертый этап посвящен закономерностям изменения НДС

системы с ростом глубины расположения пластовой выработки. Одновременно для разных глубин оценено влияние деформационных характеристик близлежащих породных слоев. Определены тенденции формирования зоны предельного состояния пород в кровле, боках и почве выработки от перечисленных геомеханических параметров, а также от прочностных характеристик породных слоев [1].

Таким образом, проведенные исследования в квазиупругой постановке составили первую часть моделирования геомеханических процессов в окрестности пластовой выработки [1]. При наступлении предельного состояния дальнейшее описание процесса сдвижения углевещающей толщи осуществлено по полной диаграмме деформирования породы, которая в соответствии с современными представлениями включает стадии разупрочнения и «руинного» разрушения, что и составило предмет исследований в книге [2].

Следует отметить, что попытка описания геомеханических систем, имеющих существенную неоднородность геометрических и механических параметров ее элементов, приводит к чрезвычайной громоздкости конечных уравнений (как правило, в виде рядов с достаточно большим количеством удерживаемых членов) и необходимости численных методов их решения, а для получения зависимостей в замкнутом виде приходится прибегать к корреляционно-дисперсионному анализу обширного массива дискретных расчетов. Поэтому, с развитием вычислительной техники все более перспективными представляются численные методы исследования геомеханических систем (методы конечных, граничных, дискретных элементов и т.п.) со сложной пространственной геометрией и существенной механической неоднородностью входящих элементов. Однако, многообразие получаемых решений говорит о практической универсальности метода конечных элементов для задач геомеханики и перспективности развития данного метода исследований.

# 1 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ГЕОМЕХАНИКИ

## 1.1 Общие положения метода конечных элементов для решения пространственных задач геомеханики в упругой постановке

Рассмотрим пространственную область, представляющую собой упругое тело, в правой прямоугольной системе координат  $Ox_1x_2x_3$  [3].

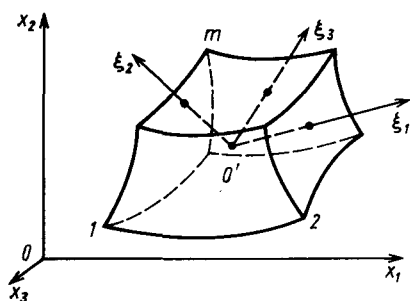


Рис. 1.1 – Общий вид конечного элемента

Расчленим область расчетной схемы на конечные элементы, каждый из которых в общем случае представляет собой многогранник, ограниченный криволинейными поверхностями (рис. 1.1).

Таким образом, получаем некоторую композицию из  $N_8$  конечных элементов, соединенных в  $N_p$  точках, называемых узлами. Пронумеруем последовательно узлы и конечные элементы расчетной области.

Свяжем с  $p$ -м конечным элементом локальную систему координат  $O'\xi_1\xi_2\xi_3$ . Со стороны смежных конечных элементов на  $p$ -й реакции  $N_{1\xi}^p, N_{2\xi}^p, \dots, N_{m\xi}^p$  положительные направления компонент которых совпадают с положительными направлениями локальных осей  $O'\xi_k$  ( $k=1, 2, 3$ ).

Обозначим  $U_{1\xi}^p, U_{2\xi}^p, \dots, U_{m\xi}^p$  векторы обобщенных перемещений узлов  $p$ -го конечного элемента, предположив, что положительные направления компонент этих векторов совпадают с положительными направлениями локальных осей  $O'\xi_k$  ( $k=1, 2, 3$ ).

Вследствие линейности задачи можно установить однозначную зависимость между обобщенными реакциями  $N_{1\xi}^p, N_{2\xi}^p, \dots, N_{m\xi}^p$  и перемещениями  $U_{1\xi}^p, U_{2\xi}^p, \dots, U_{m\xi}^p$  узлов  $p$ -го конечного элемента. В общем случае эта зависимость имеет вид

$$N_{\xi}^p = [R_{\xi}^p] U_{\xi}^p + Q_{\xi}^p. \quad (1.1)$$

Здесь

$$N_{\xi}^p = \begin{Bmatrix} N_{1\xi}^p \\ N_{2\xi}^p \\ \dots \\ N_{m\xi}^p \end{Bmatrix}; \quad U_{\xi}^p = \begin{Bmatrix} U_{1\xi}^p \\ U_{2\xi}^p \\ \dots \\ U_{m\xi}^p \end{Bmatrix}; \quad Q_{\xi}^p = \begin{Bmatrix} Q_{1\xi}^p \\ Q_{2\xi}^p \\ \dots \\ Q_{m\xi}^p \end{Bmatrix}; \quad (1.2)$$

$$[R_{\xi}^p] = \begin{bmatrix} r_{11\xi}^p & r_{12\xi}^p & \dots & r_{1m\xi}^p \\ r_{21\xi}^p & r_{22\xi}^p & \dots & r_{2m\xi}^p \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1\xi}^p & r_{m2\xi}^p & \dots & r_{mm\xi}^p \end{bmatrix}, \quad (1.3)$$

где  $Q_{\xi}^p$  и  $[R_{\xi}^p]$  – вектор и матрица реакций  $p$ -го конечного элемента в локальной системе координат  $O'\xi_1\xi_2\xi_3$ .

Столбцы матрицы  $[R_{\xi}^p]$  представляют собой обобщенные усилия в узлах конечного элемента, обусловленные единичными обобщенными перемещениями этих узлов при отсутствии внешних нагрузок на конечный элемент. Согласно (1.1)  $Q_{\xi}^p$  – векторы узловых обобщенных усилий, обусловленных поверхностными и массовыми механическими нагрузками, действующими на  $p$ -й конечный элемент, при нулевых обобщенных перемещениях этого элемента [3, 4].

Предположим, что перемещения в любой точке элемента определяет вектор:

$$u(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [F(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]U_{\xi}, \quad (1.4)$$



где

$$[F(\xi_1, \xi_2, \xi_3)] = [F_{1\xi} \quad F_{2\xi} \quad \dots \quad F_{m\xi}]. \quad (1.5)$$

Матрицы  $[F_{i\xi}(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]$ , размерность которых совпадает с размерностью вектора  $U_{i\xi}$ , являются функциями координат; вектор  $U_\xi$  есть вектор обобщенных узловых перемещений рассматриваемого конечного элемента.

Функции  $[F_{1\xi}]$ ,  $[F_{2\xi}]$ , ...,  $[F_{m\xi}]$  должны быть выбраны так, чтобы при подстановке координат  $i$ -го узла в соотношение (1.4) компоненты вектора  $u(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  принимали значения компонент вектора  $U_{i\xi}$  обобщенных перемещений  $i$ -го узла рассматриваемого конечного элемента ( $i=1, 2, \dots, m$ ).

Предположим, что функции  $F_{i\xi}(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) известны, т.е. известна зависимость (1.4) для каждого конечного элемента [4].

Обобщенные деформации  $\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  в любой точке конечного элемента всегда связаны с обобщенными перемещениями этой точки дифференциальной зависимостью

$$\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [L] \cdot u(\xi_1, \xi_2, \xi_3), \quad (1.6)$$

где  $[L]$  – дифференциальная матрица, определяемая для каждой конкретной задачи согласно теории упругости.

Подставив соотношение (1.4) в зависимость (1.6), получаем

$$\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [B(\xi_1, \xi_2, \xi_3)] U_\xi, \quad (1.7)$$

где

$$[B(\xi_1, \xi_2, \xi_3)] = [L] \cdot [F(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]. \quad (1.8)$$

Соотношение (1.7) связывает обобщенные деформации в любой точке конечного элемента с узловыми обобщенными перемещениями

этого элемента. Так как функции  $[F_{i\xi}(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]$  ( $i=1, 2, \dots, m$ ) считаем известными, то с учетом соотношения (1.8) можно определить матрицу  $[B(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]$  простым дифференцированием.

Для упругого материала обобщенные напряжения связаны с обобщенными деформациями соотношением

$$\sigma(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [D] \cdot \{\varepsilon(\xi_1, \xi_2, \xi_3) - \varepsilon_t\}, \quad (1.9)$$

где  $[D]$  – алгебраическая матрица (матрица упругости), определяемая для каждой конкретной задачи согласно теории упругости;  $\varepsilon_t$  – начальная деформация. Подставив (1.7) в (1.9), получаем соотношение

$$\sigma(\xi_1, \xi_2, \xi_3) = [D][B(\xi_1, \xi_2, \xi_3)]U_\xi - [D]\varepsilon_t, \quad (1.10)$$

связывающее обобщенные напряжения в любой точке рассматриваемого конечного элемента с обобщенными узловыми перемещениями этого элемента.

Потенциальная энергия деформации конечного элемента [5]

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T \sigma dV, \quad (1.11)$$

где  $V$  – объем конечного элемента.

Подставив соотношения (1.7) и (1.10) в формулу (1.11) и учитывая, что

$$\varepsilon^T = U_\xi^T [B]^T \quad (1.12)$$

получим

$$\Pi = \frac{1}{2} U_\xi^T \left( \int_V [B]^T [D] [B] dV \right) U_\xi - \frac{1}{2} U_\xi^T \int_V [B]^T [D] \varepsilon_t dV. \quad (1.13)$$

Предположим, на конечный элемент действуют обобщенные поверхностные  $q_\xi(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  и объемные  $p_\xi(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  нагрузки, положительные направления компонент которых совпадают с положи-

тельными направлениями локальных осей  $O'\xi_k$  ( $k=1, 2, 3$ ). Тогда работа внешних сил, сил инерции и реакций, приложенных к узлам рассматриваемого конечного элемента:

$$P = \frac{1}{2} U_{\xi}^T N_{\xi} + \frac{1}{2} \int_V u_{\xi}^T \left( p_{\xi} - \rho \frac{\partial^2 u_{\xi}}{\partial \tau^2} \right) dV, \quad (1.14)$$

где  $A$  – площадь поверхности, конечного элемента;  $\rho$  – плотность материала;  $\tau$  – время.

Подставив соотношения (1.1) и (1.4) в (1.14), получаем

$$P = \frac{1}{2} U_{\xi}^T \left\{ \begin{array}{l} [R_{\xi}] U_{\xi} + Q_{\xi} - \int_V [B]^T [D] \epsilon_i dV - \\ - \int_V [F]^T \rho [F] \frac{\partial^2 u_{\xi}}{\partial \tau^2} dV + \int_V [F]^T p_{\xi} dV \end{array} \right\}. \quad (1.15)$$

Приравняв работу внешних нагрузок и реакций (1.15) потенциальной энергии деформации (1.13), находим матрицу реакций

$$[R_{\xi}] = \int_V [B]^T [D] [B] dV; \quad (1.16)$$

матрицу масс

$$[m_{\xi}] = \rho \int_V [F]^T [F] dV \quad (1.17)$$

и вектор

$$Q_{\xi} = Q_{p_{\xi}} + Q_{q_{\xi}}, \quad (1.18)$$

где  $Q_{p_{\xi}}$  – вектор, обусловленный действием массовых нагрузок:

$$Q_{p_{\xi}} = - \int_V [F]^T p_{\xi} dV; \quad (1.19)$$

$Q_{q_{\xi}}$  – вектор, обусловленный действием поверхностных нагрузок

$$Q_{q_{\xi}} = - \int_V [F]^T q_{\xi} dV. \quad (1.20)$$

Матрицы  $[B]$  и  $[F]$  в общем случае являются функциями коор-

динат  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  и  $\xi_3$ . Интегрирование выражений (1.16)-(1.17) и (1.19)-(1.20) позволяет вычислить определяющие матрицы и векторы для конечных элементов.

## 1.2 Обобщенная постановка задачи с учетом реологических свойств пород

Согласно соотношениям (1.10), (1.16) для вычисления матрицы реакций  $R_\xi$  необходимо знать матрицу упругости  $[D]$ . Предположим, что рассматриваемая расчетная область имеет свойства ортотропного материала, причем оси ортотропии совпадают с локальными осями  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $\xi_3$  конечного элемента [6]. Тогда зависимость между деформациями

$$\varepsilon = [\varepsilon_{11} \quad \varepsilon_{22} \quad \varepsilon_{33} \quad \varepsilon_{12} \quad \varepsilon_{23} \quad \varepsilon_{31}]^T \quad (1.21)$$

и напряжениями

$$\sigma = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \tau_{12} \quad \tau_{23} \quad \tau_{31}]^T \quad (1.22)$$

имеет вид

$$\varepsilon = [C]\sigma, \quad (1.23)$$

где

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix}. \quad (1.24)$$

Здесь  $\sigma_{ij}$ ,  $\tau_{ij}$  – компоненты тензора напряжений;  $E_i$  – модули упругости;  $\nu_{ij}$  – коэффициенты Пуассона;  $G_{ij}$  – модули сдвига.

При этом должны быть выполнены соотношения  $E_i \nu_{ji} = E_j \nu_{ij}$ .

Из выражения (1.23) следует, что

$$\sigma = [D]\varepsilon, \quad (1.25)$$

где  $[D] = [C]^{-1}$  – матрица упругости ортотропного материала.

Предположим, что порода ведет себя как вязкоупругий материал, а его поведение описывается линейными наследственными соотношениями Больцмана-Вольтерра с интегральными разностными ядрами [7], подчиняющимися условию замкнутого цикла. Тогда физические свойства породы могут быть описаны с помощью комплексного модуля

$$\tilde{E} = E_R + iE_I, \quad (1.26)$$

действительная и мнимая составляющие которого определяются формулами

$$E_R = (1 - \Gamma_c)E; \quad E_I = \Gamma_s E, \quad (1.27)$$

где  $\Gamma_c$  и  $\Gamma_s$  – косинус- и синус- преобразования Фурье ядра  $R[t]$ :

$$\Gamma_c = \int_0^{\infty} R(z) \cos \omega z dz; \quad \Gamma_s = \int_0^{\infty} R(z) \sin \omega z dz. \quad (1.28)$$

Предположим также, что объемная деформация чисто упругая, т. е. модуль объемного сжатия является постоянной величиной:

$$\frac{\tilde{E}}{1 - 2\tilde{\nu}} = \frac{E}{1 - 2\nu}. \quad (1.29)$$

Тогда комплексный коэффициент Пуассона

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{2} - \frac{(1 - 2\nu)\tilde{E}}{2E} \quad (1.30)$$

и комплексный модуль сдвига

$$\tilde{G} = \frac{\tilde{E}}{2(1 + \tilde{\nu})}. \quad (1.31)$$

Таким образом, формально можно считать, что для вязкоупругих тел справедливы физические соотношения линейной теории упругости, в которых упругие константы заменены их комплексными аналогами.

Поведение нелинейно-упругого материала описывается соотношениями теории малых упруго-пластических деформаций Ильюшина [8]. При этом зависимость между интенсивностями напряжений

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6\tau_{12}^2 + 6\tau_{23}^2 + 6\tau_{31}^2} \quad (1.32)$$

и деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\begin{aligned} &(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + \\ &+ \frac{3}{2}(\varepsilon_{12}^2 + \varepsilon_{23}^2 + \varepsilon_{31}^2) \end{aligned}} \quad (1.33)$$

описывается функцией  $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i)$ , не зависящей от типа напряженно-го состояния, поэтому для ее определения используем диаграмму растяжения образцов материала. По этой диаграмме и по формулам, приведенным в работе [8], получаем

$$\sigma_i = \sigma; \quad \varepsilon_i = \varepsilon - \frac{(1 - 2\nu)\sigma}{3E}. \quad (1.34)$$

При этом секущий и касательный модули

$$E_l = \frac{\sigma_i(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i}, \quad E_d = \frac{d\sigma_i(\varepsilon_i)}{d\varepsilon_i}. \quad (1.35)$$

Введя обозначения  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ ;  $\sigma_0 = (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3$ ;  $K = E/[3(1 - 2\nu)]$ , согласно теории малых упруго-пластических деформаций [6] получим

$$\sigma_0 = 3K\varepsilon_0; \tau_{12} = \frac{\sigma_i}{3\varepsilon_i} \varepsilon_{12}; \sigma_{11} - \sigma_0 = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_{11} - \varepsilon_0) \left( \overset{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3}{\leftarrow} \right), \quad (1.36)$$

откуда

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{1}{9K} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{E_l} \left( \sigma_{11} - \frac{\sigma_{22}}{2} - \frac{\sigma_{33}}{2} \right); \\ \varepsilon_{12} &= \frac{3}{E_l} \tau_{12} \quad \left( \overset{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3}{\leftarrow} \right). \end{aligned} \quad (1.37)$$

Линеаризуем эти зависимости с помощью метода Ньютона-Рафсона [9]. Для этого представим выражение (1.23) в виде

$$\varepsilon + \delta\varepsilon = \varepsilon + [C]\delta\sigma, \quad (1.38)$$

где

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial \sigma_{11}} & \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial \sigma_{22}} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_{11}}{\partial \tau_{31}} \\ \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial \sigma_{11}} & \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial \sigma_{22}} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_{22}}{\partial \tau_{31}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \varepsilon_{31}}{\partial \sigma_{11}} & \frac{\partial \varepsilon_{31}}{\partial \sigma_{22}} & \dots & \frac{\partial \varepsilon_{31}}{\partial \tau_{31}} \end{bmatrix}.$$

Считая два последующих приближения достаточно близкими, с учетом соотношений  $\varepsilon^{(s+1)} = \varepsilon^{(s)} + \delta\varepsilon$ ;  $\sigma^{(s+1)} = \sigma^{(s)} + \delta\sigma$  из (1.38) получим итерационные соотношения [7, 9]

$$\varepsilon^{(s+1)} = \varepsilon^{(s)} + [C^{(s)}] (\sigma^{(s+1)} - \sigma^{(s)}). \quad (1.39)$$

Определим элементы матриц  $[C^{(s)}]$ , опустив для простоты индекс  $s$ , соответствующий номеру итерации. Согласно выражениям (1.37)

$$[C] = \frac{1}{9K} [C_0] + \frac{1}{2E_l} [C_l] + [C_\sigma], \quad (1.40)$$

где

$$[C_0] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad [C_l] = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 \end{bmatrix};$$

$$c_{\sigma_{jk}} = \frac{\partial}{\partial \sigma_k} \left( \frac{1}{E_l} \right) S_j; \quad S_1 = \sigma_{11} - \frac{1}{2} \sigma_{22} - \frac{1}{2} \sigma_{33} \quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3);$$

$$S_4 = 3\tau_{12}; \quad S_5 = 3\tau_{23}; \quad S_6 = 3\tau_{31}.$$

Учитывая выражение для интенсивности напряжений (1.32) и обозначения (1.22), (1.35), находим

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \sigma_1} \left( \frac{1}{E_l} \right) &= \frac{\partial}{\partial \sigma_{11}} \left( \frac{1}{E_l} \right) = \frac{d}{d\sigma_i} \left( \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \sigma_{11}} = \left( \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\varepsilon_i}{d\sigma_i} - \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i^2} \right) \times \\ &\times \frac{2\sigma_{11} - \sigma_{22} - \sigma_{33}}{2\sigma_i} = \left( \frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) \frac{S_1}{\sigma_i^2} \quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3); \\ \frac{\partial}{\partial \sigma_4} \left( \frac{1}{E_l} \right) &= \frac{\partial}{\partial \tau_{12}} \left( \frac{1}{E_l} \right) = \frac{d}{d\sigma_i} \left( \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau_{12}} = \left( \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\varepsilon_i}{d\sigma_i} - \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i^2} \right) \times \\ &\times \frac{3\tau_{12}}{\sigma_i} = \left( \frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) \frac{S_4}{\sigma_i^2} \quad (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3); \quad (4 \rightarrow 5 \rightarrow 6). \end{aligned} \quad (1.41)$$

Таким образом, элементы матрицы  $[C_\sigma]$  в соотношении (1.40) вычисляем по формуле

$$c_{\sigma_{jk}} = \frac{S_j S_k}{\sigma_i^2} \left( \frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right). \quad (1.42)$$

Из соотношений (1.39) следует, что

$$\varepsilon^{(s+1)} = [C^{(s)}] \sigma^{(s+1)} + \varepsilon', \quad (1.43)$$

где  $\varepsilon' = \varepsilon^{(s)} - [C^{(s)}] \sigma^{(s)}$ .



В нулевом приближении, когда  $E_l^{(0)} = E_d^{(0)} = 3E/[2(1+\nu)]$ ;  $\varepsilon^{(0)} = 0$ ;  $\sigma^{(0)} = 0$ , элементы матрицы  $[C_\sigma]$  в соотношении (1.40) согласно (1.42) тождественно равны нулю, и матрица  $C^{(0)}$  переходит в матрицу (1.24) упругости для изотропного материала.

Соотношение, обратное (1.43), имеет вид

$$\sigma^{(s+1)} = [D^{(s)}] \varepsilon^{(s+1)}, \quad (1.44)$$

где  $[D^{(s)}] = [C^{(s)}]^{-1}$ .

### 1.3 Решение плоской задачи геомеханики в упруго-пластической постановке

Принципиальный подход к решению плоской задачи геомеханики, изложенный в предыдущем параграфе, позволяет получить решение на основе следующих аналитических соотношений – при плоском напряженном состоянии векторы деформаций (1.21) и напряжений (1.22) имеют вид  $\varepsilon = [\varepsilon_{11} \varepsilon_{22} \gamma]^T$ ;  $\sigma = [\sigma_{11} \sigma_{22} \tau]^T$ , а интенсивности напряжений (1.32) и деформаций (1.33) определяются соотношениями (1.34). Однако такой подход не учитывает ряд особенностей поведения материала расчетной области.

Предположим, что материал нелинейно-упругий и справедлива теория малых упруго-пластических деформаций [10, 11], вместо основных соотношений (1.37) получаем

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= (\sigma_{11} + \sigma_{22})/(9K) + (\sigma_{11} - \sigma_{22}/2)/E_l \quad (1 \leftrightarrow 2); \\ \varepsilon_{33} &= -\frac{1-\alpha}{1+2\alpha}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}); \quad \gamma = 2\tau/E_l, \end{aligned} \quad (1.45)$$

где  $\alpha = \frac{2E_l}{9K}$ .

Линеаризация соотношений (1.45) с помощью метода Ньютона-

Рафсона приводит к формуле (1.39), в которой элементы матрицы  $[C^{(s)}]$  можно определить последовательным дифференцированием компонент вектора деформаций по компонентам вектора напряжений:

$$c_{ij}^{(s)} = \left( \frac{\partial \varepsilon(i)}{\partial \sigma(i)} \right)^s. \quad (1.46)$$

Опустив для простоты индекс  $s$  из (1.46), получим

$$\begin{aligned} c_{11} &= \frac{1}{9K} + \frac{1}{E_l} + \frac{\partial}{\partial \sigma_{11}} \left( \frac{1}{E_l} \right) S_{11} \quad (1 \leftrightarrow 2); \\ c_{12} &= \frac{1}{9K} - \frac{1}{2E_l} + \frac{\partial}{\partial \sigma_{22}} \left( \frac{1}{E_l} \right) S_{11} \quad (1 \leftrightarrow 2); \\ c_{13} &= \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{1}{E_l} \right) S_{11} \quad (1 \leftrightarrow 2); \quad c_{31} = 3\tau \frac{\partial}{\partial \sigma_{11}} \left( \frac{1}{E_l} \right) \quad (1 \leftrightarrow 2); \\ c_{31} &= \frac{3}{E_l} + 3\tau \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{1}{E_l} \right), \end{aligned} \quad (1.47)$$

где  $S_{11} = \sigma_{11} - \sigma_{22}/2 \quad (1 \leftrightarrow 2)$ .

Учитывая соотношения для секущего и касательного модулей, а также для интенсивности напряжений

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{22}^2 + 3\tau^2},$$

получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \sigma_{11}} \left( \frac{1}{E_l} \right) &= \frac{\partial}{\partial \sigma_i} \left( \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \sigma_{11}} = \frac{2\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2\sigma_i} \left( \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\varepsilon_i}{d\sigma_i} - \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i^2} \right) = \\ &= \frac{S_{11}}{\sigma_{11}^2} \left( \frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) (1 \leftrightarrow 2); \quad \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{1}{E_l} \right) = \frac{\partial}{\partial \sigma_i} \left( \frac{\varepsilon_i}{\sigma_i} \right) \frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau} = \frac{3\tau}{\sigma_i^2} \left( \frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right). \end{aligned} \quad (1.48)$$

Окончательно на  $s$ -м приближении согласно методу Ньютона-Рафсона имеем

$$\begin{aligned}
c_{11} &= \frac{1}{9K} + \frac{1}{E_l} + \frac{S_{11}^2}{\sigma_i^2} \left( \frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) \quad (1 \leftrightarrow 2); \\
c_{21} = c_{12} &= \frac{1}{9K} - \frac{1}{2E_l} + \frac{S_{11}S_{22}}{\sigma_i^2} \left( \frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right); \\
c_{13} = c_{31} &= 3\tau \frac{S_{11}}{\sigma_i^2} \left( \frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right) \quad (1 \leftrightarrow 2); \quad c_{33} = \frac{3}{E_l} + \frac{9\tau^2}{\sigma_i^2} \left( \frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_l} \right).
\end{aligned} \tag{1.49}$$

Для определения элементов матрицы  $[C^{(s+1)}]$  на  $(s+1)$ -м приближении с помощью метода Ньютона-Рафсона необходимо знать лишь компоненты вектора деформаций  $\boldsymbol{\varepsilon}^{(s)}$  из предыдущего приближения и зависимость  $\sigma_i(\boldsymbol{\varepsilon}_i)$ . Действительно, зная эти компоненты, по итерационным формулам

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{2E_l^{p-1}}{(9K)}; \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^p = -\frac{1-\alpha}{1+2\alpha}(\boldsymbol{\varepsilon}_{11} + \boldsymbol{\varepsilon}_{22}); \\
\boldsymbol{\varepsilon}_i^p &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\boldsymbol{\varepsilon}_{11} - \boldsymbol{\varepsilon}_{22})^2 + (\boldsymbol{\varepsilon}_{22} - \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^p)^2 + (\boldsymbol{\varepsilon}_{33}^p - \boldsymbol{\varepsilon}_{11})^2 + \frac{3}{2}\gamma^2}; \\
E_l^p &= \frac{\sigma_i(\boldsymbol{\varepsilon}_i^p)}{d\boldsymbol{\varepsilon}_i^p}; \quad E_d^p = \frac{d\sigma_i(\boldsymbol{\varepsilon}_i^p)}{d\boldsymbol{\varepsilon}_i^p}; \\
\sigma_{11}^p &= 2E_l^p(\boldsymbol{\varepsilon}_{11} - \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^p)/3 \quad (1 \leftrightarrow 2); \quad \tau^p = E_l^p \gamma
\end{aligned} \tag{1.50}$$

определяем секущий  $E_l^{(s)}$  и касательный  $E_d^{(s)}$  модули, а также напряжения  $\sigma_{11}^{(s)}$ ,  $\sigma_{22}^{(s)}$ ,  $\tau^{(s)}$ . В качестве нулевого приближения при реализации процесса (1.50) выбираем  $E_l^0 = 3E/[2(1+\nu)]$ .

Вычислив элементы матрицы  $[C^{(s)}]$  (1.46), получаем соотношения типа (1.39) и, решив их относительно напряжений, находим

$$\boldsymbol{\sigma}^{(s+1)} = [D]\boldsymbol{\varepsilon}^{(s+1)} + \boldsymbol{\sigma}_0, \tag{1.51}$$

где  $[D] = [C^{(s)}]^{-1}$ ;  $\boldsymbol{\sigma}_0 = \boldsymbol{\sigma}^{(s)} - [D]\boldsymbol{\varepsilon}^{(s)}$ .

Исходя из того, что напряжения и деформации постоянны в любой точке элемента, имеем

$$\varepsilon = [B]U_\xi; \quad \sigma = [D][B]U_\xi. \quad (1.52)$$

Подставив (1.52) в (1.51), находим

$$\sigma^{(s+1)} = [D][B]U^{(s+1)} + \sigma_0 \quad (1.53)$$

Умножим обе части полученного равенства на  $Ah[B]^T$ :

$$Ah[B]^T \sigma^{(s+1)} = Ah[B]^T [D][B]U^{(s+1)} + Ah[B]^T \sigma_0, \quad (1.54)$$

где  $A$  – общая площадь треугольника;  $h$  – толщина элемента.

В соответствии с (1.16) матрица реакций для треугольного конечного элемента имеет вид

$$[R_\xi] = Ah[B]^T [D][B]. \quad (1.55)$$

Произведение следует рассматривать как вектор обобщенных реакций конечного элемента [4, 12], а произведение – как вектор реакций на  $(s+1)$ -м приближении, обусловленный наличием вектора (1.51). С учетом сказанного зависимость (1.54) можно записать в виде:

$$N = [R^{(s+1)}] U^{(s+1)} + Q_0^{(s+1)}. \quad (1.56)$$

В результате система уравнений на  $(s+1)$ -м приближении принимает вид

$$[P^{(s+1)}] \Delta^{(s+1)} = T - Q^{(s+1)}, \quad (1.57)$$

где  $T$  – вектор узловых нагрузок, постоянный для всех приближений (остальные компоненты изменяются от приближения к приближению).

#### **1.4 Решение задачи геомеханики с использованием объемных конечных элементов**

Рассмотрим трехмерную континуальную область, расчетную схему которой можно представить в виде композиции из четырех-, пя-

ти- и шестигранных конечных элементов [5, 9, 13]. На любой узел в конструкции в общем случае может быть наложено три жестких (или упругих) линейных связи. В качестве внешних воздействий принимаем сосредоточенные узловые силы и массовые нагрузки.

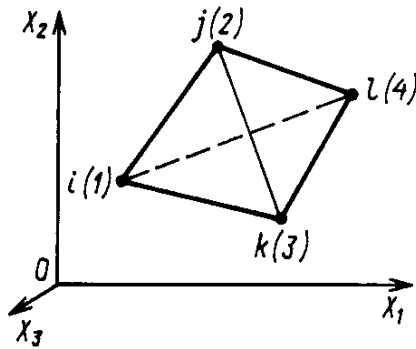


Рис. 1.2 – Объемный конечный элемент

На рис. 1.2 показан четырехгранный (тетраэдральный) конечный элемент  $ijkl$  в глобальной системе координат  $Ox_1x_2x_3$ . Обход узлов  $ijkl$  следует выполнять против часовой стрелки, если смотреть со стороны последнего узла  $l$ . Компоненты перемещения произвольной точки элемента с координатами  $x_1, x_2$  и  $x_3$  можно представить в виде вектора

$$u = [u_x \quad u_y \quad u_z]^T. \quad (1.58)$$

Перемещения узловых точек обозначим  $u$  с индексом, соответствующим рассматриваемому узлу, например

$$u_m = [u_{xm} \quad u_{ym} \quad u_{zm}] \quad (m = i, j, k, l). \quad (1.59)$$

Полный вектор узловых перемещений элемента

$$U = [U_i^T \quad U_j^T \quad U_k^T \quad U_l^T]^T. \quad (1.60)$$

Координаты узловых точек образуют матрицу

$$[C] = \begin{bmatrix} 1 & x_{1i} & x_{2i} & x_{3i} \\ 1 & x_{1j} & x_{2j} & x_{3j} \\ 1 & x_{1k} & x_{2k} & x_{3k} \\ 1 & x_{1l} & x_{2l} & x_{3l} \end{bmatrix}. \quad (1.61)$$

Линейную аппроксимацию поля перемещений обеспечивают полиномиальные зависимости

$$u = [\alpha][1 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T, \quad (1.62)$$

где  $[\alpha]$  – матрица постоянных коэффициентов, значения которых можно найти в результате решения системы линейных алгебраических уравнений, полученных из соотношений (1.62) подстановкой узловых перемещений (1.59) и координат узловых точек (1.61):

$$[\alpha] = [\alpha_{ij}]_{3,4} = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3]^T. \quad (1.63)$$

Систему уравнений (1.62) с учетом (1.61) и (1.63) можно записать в виде

$$\begin{aligned} u_x &= [u_{xi} \quad u_{xj} \quad u_{xk} \quad u_{xl}]^T = [C]\alpha_1; \\ u_y &= [u_{yi} \quad u_{yj} \quad u_{yk} \quad u_{yl}]^T = [C]\alpha_2; \\ u_z &= [u_{zi} \quad u_{zj} \quad u_{zk} \quad u_{zl}]^T = [C]\alpha_3, \end{aligned} \quad (1.64)$$

откуда искомые коэффициенты

$$\alpha_1 = [C]^{-1}u_x; \quad \alpha_2 = [C]^{-1}u_y; \quad \alpha_3 = [C]^{-1}u_z. \quad (1.65)$$

Матрица, обратная  $[C]$ :

$$[C]^{-1} = [C_{ij}]_{4,4} / |C|, \quad (1.66)$$

где  $|C| = 6V$  – определитель матрицы  $[C]$ , равный шести объемам  $V$  тетраэдрального элемента;  $C_{ij}$  – алгебраическое дополнение элемента  $c_{ij}$  в матрице  $[C]$ , т. е. взятый с множителем  $(-1)^{i+j}$  определитель, полученный из  $[C]$ , вычеркиванием  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца. В результате вычислений получаем

$$[C]^{-1} = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} a_i & -a_j & a_k & -a_l \\ b_i & -b_j & b_k & -b_l \\ c_i & -c_j & c_k & -c_l \\ d_i & -d_j & d_k & -d_l \end{bmatrix}, \quad (1.67)$$

где

$$\begin{aligned}
 a_i = \bar{C}_{11} &= \begin{vmatrix} x_{1j} & x_{2j} & x_{3j} \\ x_{1k} & x_{2k} & x_{3k} \\ x_{1l} & x_{2l} & x_{3l} \end{vmatrix}; & b_i = \bar{C}_{12} &= \begin{vmatrix} 1 & x_{2j} & x_{3j} \\ 1 & x_{2k} & x_{3k} \\ 1 & x_{2l} & x_{3l} \end{vmatrix}; \\
 c_i = \bar{C}_{13} &= \begin{vmatrix} 1 & x_{1j} & x_{3j} \\ 1 & x_{1k} & x_{3k} \\ 1 & x_{1l} & x_{3l} \end{vmatrix}; & b_i = \bar{C}_{14} &= \begin{vmatrix} 1 & x_{1j} & x_{2j} \\ 1 & x_{1k} & x_{2k} \\ 1 & x_{1l} & x_{2l} \end{vmatrix}.
 \end{aligned} \tag{1.68}$$

Остальные элементы матрицы (1.67) можно получить круговой перестановкой индексов в формулах (1.68).

В результате получаем формулу, связывающую узловые перемещения (1.60) с координатами и перемещениями произвольной точки элемента:

$$u = \begin{bmatrix} A_i & 0 & 0 & -A_j & 0 & 0 & A_k & 0 & 0 & -A_l & 0 & 0 \\ 0 & A_i & 0 & 0 & -A_j & 0 & 0 & A_k & 0 & 0 & -A_l & 0 \\ 0 & 0 & A_i & 0 & 0 & -A_j & 0 & 0 & A_k & 0 & 0 & -A_l \end{bmatrix} U, \tag{1.69}$$

где  $A_m = (a_m + b_m x_1 + c_m x_2 + d_m x_3)/(6V)$  ( $m \rightarrow i, j, k, l$ ).

Так как вектор деформаций для произвольной точки элемента

$$\varepsilon = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{zx}]^T \tag{1.70}$$

связан с перемещениями (1.58) зависимостями

$$\varepsilon = \left[ \frac{\partial u_x}{\partial x_1} \frac{\partial u_y}{\partial x_2} \frac{\partial u_z}{\partial x_3} \frac{\partial u_x}{\partial x_2} + \frac{\partial u_y}{\partial x_1} \frac{\partial u_y}{\partial x_3} + \frac{\partial u_z}{\partial x_2} \frac{\partial u_z}{\partial x_1} + \frac{\partial u_x}{\partial x_3} \right]^T, \tag{1.71}$$

то после дифференцирования получим соотношение

$$\varepsilon = [B]U, \tag{1.72}$$

где

$$[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & -b_j & 0 & 0 & b_k & 0 & 0 & -b_l & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & -c_j & 0 & 0 & c_k & 0 & 0 & -c_l & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & -d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & -d_l \\ c_i & b_i & 0 & -c_j & -b_j & 0 & c_k & b_k & 0 & -c_l & -b_l & 0 \\ 0 & d_i & 0 & 0 & -d_j & 0 & 0 & d_k & 0 & 0 & -d_l & 0 \\ d_i & 0 & b_i & -d_j & 0 & -b_j & d_k & 0 & b_k & -d_l & 0 & -b_l \end{bmatrix}.$$

Так как матрица  $[B]$  не зависит от текущих координат, для тетраэдрального элемента

$$[R] = [B]^T [D][B]V. \quad (1.73)$$

Здесь  $[D]$  – матрица упругости порядка 6, ненулевые элементы которой для изотропного материала равны:

$$\begin{aligned} d_{11} = d_{22} = d_{33} &= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \\ d_{12} = d_{21} = d_{13} = d_{31} = d_{23} = d_{32} &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \\ d_{44} = d_{55} = d_{66} &= \frac{E}{2(1+\nu)}. \end{aligned} \quad (1.74)$$

При действии массовых (объемных) нагрузок  $p = [p_1 \ p_2 \ p_3]^T$ , положительные направления которых совпадают с положительными направлениями глобальных осей  $X_1, X_2, X_3$  необходимо учитывать вектор реакций

$$Q_p = \frac{1}{4}V [p_1 p_2 p_3 \ p_1 p_2 p_3 \ p_1 p_2 p_3 \ p_1 p_2 p_3]^T. \quad (1.75)$$

После компоновки разрешающей системы уравнений и ее решения получаем все компоненты узловых перемещений конструкции, а по ним – любые параметры НДС. В частности, вектор деформаций (1.71) определяем по формуле (1.72), вектор напряжений



$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]^T \quad (1.76)$$

– по формуле

$$\sigma = [D]\varepsilon. \quad (1.77)$$

При вычислении характеристик напряженного состояния (1.76) пяти- и шестигранных конечных элементов можно разбить их на составляющие четырехгранники, вычислить для них по формуле (1.77) соответствующие напряжения и усреднить их сумму.

### 1.5 Обобщенная модель запредельного поведения пород

Трудности, возникающие при численной реализации задач сложного нагружения конструкций, обусловлены, в основном, тем, что уравнения состояния, описывающие поведение и разрушение материала расчетной области, являются нелинейными дифференциальными уравнениями неявного вида. Математически задача формулируется как нелинейная краевая задача по пространственным координатам и задача Коши по параметру нагружения (времени) [14-17].

При решении задач такого класса широко применяют итерационные методы, сводящие решение исходной задачи к последовательности решений нелинейных краевых задач на временных слоях. Наибольшее распространение получили одношаговые методы (приращений, прогноза и коррекции). В настоящее время применяют также многошаговые методы (методы Адамса), хотя они не являются самостартующими [9, 15]. При этом используют как явные, так и неявные схемы.

При численном решении задач такого класса крайне важными являются вопросы устойчивости решения ввиду жесткости уравнений. Не менее важны и вопросы достоверности полученных результатов, т. е. вопросы точности и сходимости решения.

Применение схем более высоких порядков для повышения точности решения в большинстве случаев приводит к его неустойчивости, а уменьшение порядка схем для получения устойчивого решения не позволяет найти достоверное решение даже при очень малых шагах. Кроме того, уменьшение шага с некоторого его значения приводит к увеличению погрешности.

Предлагаемый шаговый метод численного решения задач сложного нагружения конструкции разработан исходя из условия обеспечения точности и устойчивости решения, а также экономичности. Рассмотрим основные положения и уравнения предложенной модели неупругого поведения пород горного массива.

Физическая модель поведения породы основана на допущении об однородности и сплошности каждого слоя; в процессе неупругого деформирования в нем может возникать деформационная анизотропия [15]. Порода может быть чувствительна к виду напряженного состояния, т. е. иметь различные характеристики неупругого поведения и разрушения, например при растяжении, сжатии и сдвиге.

Тензор деформации можно представить в виде суммы тензоров упругой деформации, не зависящей от истории нагружения определяющейся конечным состоянием процесса, и неупругой деформации, зависящей от процесса нагружения:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^H. \quad (1.78)$$

Упругие деформации при изменении напряжений следуют обобщенному закону Гука, т. е. для тензора скоростей упругой деформации справедливы уравнения

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^e = \frac{1}{E} [\dot{\sigma}_{ij} - \nu(3\dot{\sigma}\delta_{ij} - \dot{\sigma}_{ij})], \quad (1.79)$$

где  $E$ ,  $\nu$  – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Текущему моменту времени процесса нагружения в пространстве составляющих тензора напряжений соответствует поверхность нагружения, разделяющая области упругого и неупругого состояний.

Поверхность нагружения может изотропно расширяться или сужаться, смещаться и изменять форму в процессе нагружения. Начальная поверхность нагружения может иметь форму, отличную от поверхности Мизеса, и стягиваться в точку. Текущая поверхность нагружения определяется процессом нагружения.

Вследствие смещения поверхности нагружения, которое описывается тензором смещения (добавочных напряжений), уравнение поверхности нагружения зависит от инвариантов тензора активных напряжений, составляющие которого отсчитываются от центра поверхности задаваемого тензором смещения. Зависимость поверхности нагружения от первого инварианта тензора напряжений позволяет описать неупругое изменение объема, т. е. деформацию разрыхления. Неупругое изменение объема пренебрежимо мало по сравнению с остальными деформациями практически для всех материалов расчетной схемы, поэтому принимают, что поверхность нагружения зависит только от второго и третьего инвариантов девиатора активных напряжений:

$$f[I_2(D_\sigma^*), I_3(D_\sigma^*)] = 0. \quad (1.80)$$

Зависимость поверхности нагружения от третьего инварианта позволяет описать изменение формы поверхности нагружения и рассмотреть материалы, чувствительные к виду напряженного состояния. Уравнение поверхности нагружения принимают в виде

$$f(\sigma_{ij}) = I_2(D_\sigma^*) - C^2/3 = 0, \quad (1.81)$$

где  $I_2(D_\sigma^*) = s_{ij}^* s_{ij}^* / 2$ ;  $s_{ij}^* = s_{ij} - \alpha_{ij}$ ;  $s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}$ ;  $\sigma = \sigma_{ij} / 3$ .

Тензор  $\alpha_{ij}$  характеризует смещение поверхности нагружения, скаляр  $C$  соответствует радиусу поверхности. Смещение  $\alpha_{ij}$  и радиус  $C$  являются функционалами процесса нагружения, причем радиус  $C$  зависит от третьего инварианта девиатора активных напряжений.

Для радиуса поверхности нагружения принято уравнение

$$\dot{C} = q_\varepsilon \dot{\varepsilon}_{I^*}^N + q_\mu \dot{\mu}_* - q_R, \quad (1.82)$$

причем

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{I^*}^N &= (2\dot{\varepsilon}_{ij}^N \dot{\varepsilon}_{ij}^N / 3)^{1/2}; & \varepsilon_{I^*}^N &= \int \dot{\varepsilon}_{I^*}^N dt; \\ \dot{\mu}_* &= n_{ij} \dot{s}_{ij}^* / \sigma_I^*; & \sigma_I^* &= (3s_{ij}^* s_{ij}^* / 2)^{1/2}; \\ n_{ij} &= \frac{27s_{ik}^* s_{jk}^*}{2(\sigma_I^*)^2} - 3\mu_* \frac{3s_{ij}^*}{2\sigma_I^*} - 3\delta_{ij}; & & \\ \mu_* &= \frac{27I_3(D_\sigma^*)}{2[3I_2(D_\sigma^*)]^{3/2}}; & I_3(D_\sigma^*) &= s_{ij}^* s_{jk}^* s_{ki}^* / 3, \end{aligned} \quad (1.83)$$

где  $q_\varepsilon, q_\mu, q_R$  – параметры, подлежащие экспериментальному определению;  $\varepsilon_{I^*}^N$  – длина дуги неупругой деформации;  $\mu_*$  – параметр вида активного напряженного состояния ( $\mu_* \in [-1, 1]$ ; при сжатии  $\mu_* = -1$ , при сдвиге  $\mu_* = 0$ , при растяжении  $\mu_* = 1$ );  $\sigma_I^*$  – интенсивность активных напряжений.

Первое и третье слагаемые в уравнении (1.82) описывают упрочнение и разупрочнение, второе – изменение радиуса поверхности при изменении вида напряженного состояния. Знак параметра  $q_\varepsilon$  зависит от вида материала: для циклически упрочняющихся материалов  $q_\varepsilon > 0$ ; для стабильных  $q_\varepsilon = 0$ ; для разупрочняющихся  $q_\varepsilon < 0$ . Пара-

метр  $q_R$  характеризует механические свойства при отдыхе, отжиге.

Используя свойства пород, установленные экспериментально при скоростях деформирования, при которых эффекты, связанные с длительностью процесса, пренебрежимо малы, т. е. при пластическом деформировании, а также результаты испытаний при установившейся ползучести, параметры  $q_\varepsilon$ ,  $q_\mu$ ,  $q_R$  можно выразить через функции  $C_p$  и  $P_c$  [13, 14, 17]:

$$\begin{aligned}
 q_\varepsilon &= \frac{\partial C_p}{\partial \varepsilon_{I^*}^N}; & q_\mu &= \frac{\partial C_p}{\partial \mu_*} q + \frac{\partial C_{p0}}{\partial \mu_*} (1 - q); \\
 q_R &= q_\varepsilon P_c; & q &= \frac{C - C_{p0}}{C_p - C_{p0}}; & \frac{\partial C_{p0}}{\partial (\cdot)} &= \frac{\partial C_p}{\partial (\cdot)} \Big|_{\varepsilon_{I^*}^N=0}; \\
 C_{p0} &= C_p \Big|_{\varepsilon_{I^*}^N=0}; & C_p &= C_p(\mu_*, \varepsilon_{I^*}^N); & P_c &= P_c(\mu_*, C, \omega).
 \end{aligned} \tag{1.84}$$

Экспериментально определяемые функции  $C_p$  и  $P_c$  можно аппроксимировать следующими выражениями:

$$C_p = \begin{cases} C_p^0 + C_p^- - C_p^0 \left| \mu_* \right|^{n_\mu}, & \text{если } -1 \leq \mu_* < 0; \\ C_p^0 + (C_p^+ - C_p^0) \left| \mu_* \right|^{n_\mu}, & \text{если } 0 \leq \mu_* \leq 1; \end{cases} \tag{1.85}$$

$$P_c = P_{c0} \left| C - C_{p0} \right|^{n_c} (1 - \omega)^{-m\omega}, \tag{1.86}$$

где  $C_p^- = C_p^-(\varepsilon_{I^*}^N)$ ;  $C_p^0 = C_p^0(\varepsilon_{I^*}^N)$ ;  $C_p^+ = C_p^+(\varepsilon_{I^*}^N)$ ;  $P_{c0} = P_{c0}(\mu_*)$ ;  
 $n_c = n_c(\mu_*)$ .

Функции  $P_{c0}$  и  $n_c$  от переменной  $\mu_*$  можно также аппроксимировать степенной зависимостью вида (1.85).

Следует отметить, что функция  $P_c$  зависит от меры повреждения  $\omega$ , а функция  $C_{p0}$  может быть тождественно равна нулю.

Принимают трехчленную структуру уравнений для смещения

поверхности нагружения, т. е. разложение девиатора скоростей смещения (добавочных напряжений) осуществляют по компонентам трех девиаторов – скоростей неупругой деформации, добавочных напряжений и неупругих деформаций [17]:

$$\dot{a}_{ij} = \frac{2}{3} g \dot{\varepsilon}_{ij}^N + \left( \frac{2}{3} g_\varepsilon \varepsilon_{ij}^N + g_a a_{ij} \right) \dot{\varepsilon}_{I^*}^N - \left( \frac{2}{3} g_\varepsilon^R \varepsilon_{ij}^H + g_a^R a_{ij} \right). \quad (1.87)$$

Функции  $g$ ,  $g_\varepsilon$ ,  $g_a$ ,  $g_\varepsilon^R$ ,  $g_a^R$  можно определить по функциям  $E_{a0}$ ,  $\beta$ ,  $\tilde{\sigma}_a$ ,  $P_a$ , полученным в результате испытаний в условиях пластического деформирования и установившейся ползучести:

$$\begin{aligned} g &= E_{a0} + \beta \tilde{\sigma}_a; & g_\varepsilon &= \beta E_{a0}; & g_a &= -\beta; \\ g_\varepsilon^R &= g_\varepsilon P_a; & g_a^R &= g P_a / a_N + g_a P_a, \end{aligned} \quad (1.88)$$

где  $E_{a0} = E_{a0}(\mu_a)$ ;  $\beta = \beta(\mu_a)$ ;  $\tilde{\sigma}_a = \tilde{\sigma}_a(\mu_a)$ ;  $P_a = P_a(\mu_a, a_I, \omega)$ ;  $a_I$  – интенсивность добавочных напряжений;  $\mu_a$  – параметр вида добавочного напряженного состояния ( $\mu_* \in [-1, 1]$ ; при сжатии  $\mu_a = -1$ , при сдвиге  $\mu_a = 0$ , при растяжении  $\mu_a = 1$ ):  $\mu_a = 12,5 I_3(D_a) / \sqrt{3 I_2(D_a)^3}$ ;  $I_2(D_a) = a_{ij} a_{ij} / 2$ ;  $I_3(D_a) = a_{ij} a_{jk} a_{ki} / 3$ .

Функции  $E_{a0}$ ,  $\beta$ ,  $\tilde{\sigma}_a$ ,  $P_a$  можно аппроксимировать (как и функции  $C_p$ ,  $P_c$ ) выражениями

$$E_{a0} = \begin{cases} E_{a0}^0 + (E_{a0}^- - E_{a0}^0) \left| \mu_a \right|^{n_{\mu_a}}, & \text{если } -1 \leq \mu_* < 0; \\ E_{a0}^0 + (E_{a0}^+ - E_{a0}^0) \left| \mu_a \right|^{n_{\mu_a}}, & \text{если } 0 \leq \mu_* \leq 1; \end{cases} \quad (1.89)$$

$$P_a = P_{a0} (a_I)^{n_a} (1 - \omega)^{-m_\omega}, \quad (1.90)$$

где  $(E_{a0} \xrightarrow{\beta}; E_{a0} \xleftarrow{\tilde{\sigma}_a})$ ;  $P_{a0} = P_{a0}(\mu_a)$ ;  $n_a = n_a(\mu_a)$ .

Аналогично функции  $P_{a0}$ ,  $n_a$  от переменной  $\mu_a$  можно аппрок-

симировать степенными зависимостями типа (1.89).

Неупругие деформации зависят от истории нагружения и являются функционалами процесса. Считают, что поле скоростей неупругих деформаций в пространстве напряжений имеет потенциал. Тогда, приняв в качестве потенциала функцию (1.81), получают тензор скоростей неупругой деформации в виде

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^N = \frac{\frac{3}{2} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}}{\sqrt{\frac{3}{2} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}} \frac{\partial f}{\partial \sigma_{mn}}}} \dot{\varepsilon}_{I^*}^N = \frac{3n_{ij}^*}{2n_I^*} \dot{\varepsilon}_I^N, \quad (1.91)$$

где

$$\begin{aligned} n_{ij}^* &= s_{ij}^* - 2q_\mu n_{ij} / 3; & n_I^* &= \sqrt{3n_{ij}^* n_{ij}^* / 2}; \\ n_{ij} &= \frac{27s_{ik}^* s_{jk}^*}{(\sigma_N^*)^2} - 3\mu_* \frac{3s_{ij}^*}{2\sigma_N^*} - 3\delta; & \mu_* &= \frac{27I_3(D_\sigma^*)}{2[3I_2(D_\sigma^*)]^{3/2}}; \\ I_2(D_\sigma^*) &= s_{ij}^* s_{ij}^* / 2; & I_3(D_\sigma^*) &= s_{ij}^* s_{jk}^* s_{ki}^* / 3. \end{aligned} \quad (1.92)$$

Используя зависимости (1.81)-(1.83), (1.87), (1.91) и (1.92), можно получить уравнения для интенсивности скоростей неупругой деформации

$$\dot{\varepsilon}_{I^*}^N = \frac{1}{E_*} \left[ \frac{3n_{ij}^* \dot{\sigma}_{ij}}{2n_N^*} + B^R \right], \quad (1.93)$$

где

$$\begin{aligned} E_* &= \sigma_N^* q_\varepsilon / n_N^* + g + g_\varepsilon \varepsilon_I^{N^*} + g_a a_N^*; \\ B^R &= \sigma_N^* q_R / n_N^* + g_\varepsilon^R \varepsilon_I^{N^*} + g_a^R a_I^*; \\ \dot{\varepsilon}_{I^*}^N &= n_{ij}^* \varepsilon_{ij}^N / n_N^*; & a_I^* &= 1,5n_{ij}^* a_{ij} / n_N^*. \end{aligned}$$

Уравнение (1.93) связывает интенсивность скоростей неупругой деформации и скорости напряжений. Аналогично можно получить за-

висимость интенсивности скоростей неупругой деформации от скоростей деформаций.

Поверхность нагружения разделяет области упругого и неупругого состояний [7]. Если точка, изображающая какое-либо состояние, находится внутри поверхности нагружения, то это состояние упругое, хотя в нем могут происходить процессы возврата механических свойств пород (изменение радиуса и смещения поверхности нагружения). Если изображающая точка принадлежит поверхности нагружения, оно может быть как упругим (предельное состояние), так и неупругим. Условия упругого и неупругого состояний, полученные из условий принадлежности изображающей точки поверхности нагружения и положительности приращения накопленной неупругой деформации, имеют вид

$$\sigma_I^* < C \vee n_{ij}^* \dot{\epsilon}_{ij}^I \leq 0; \quad \sigma_N^* = C \wedge n_{ij}^* \dot{\epsilon}_{ij}^N > 0. \quad (1.94)$$

Предлагаемая математическая модель неупругого поведения пород горного массива имеет следующие особенности:

- деформация имеет упругую и неупругую составляющие (условного разделения неупругой деформации на деформации пластичности и ползучести нет);
  - поверхность нагружения может смещаться, расширяться или сужаться и изменять форму;
  - трехчленная структура уравнений для смещения поверхности нагружения обуславливает снижение ограничений на возможные траектории сложного нагружения;
  - зависимость уравнений, описывающих запредельное поведение породы, от меры повреждения позволяет рассматривать разупрочнение материала при ползучести, т. е. третью стадию ползучести;



- математическая модель учитывает зависимость разрушения от вида напряженного состояния;

- основу расчетно-экспериментального метода определения материальных функций модели составляет обработка экспериментальных кривых, не связанная с определением пределов текучести и других величин с какими-либо допусками на деформации, что обычно вносит неоднозначность в получаемые результаты.

Аналитическое интегрирование уравнений предельного поведения для простейших стационарных режимов нагружения приводит к известным критериям малоциклового усталости и длительной прочности.

### **1.6 Теории пластичности и ползучести в задачах геомеханики при сложном нагружении**

При оценке предельного состояния пород для описания процессов неупругого деформирования (пластичности и ползучести) материала при сложном нагружении широко применяют общую математическую теорию пластичности Ильюшина [8], различные варианты теорий пластического течения и ползучести. Однако для выбора варианта теории пластичности или ползучести необходимо предварительно выявить область их применимости с учетом реального процесса нагружения [7, 10, 15]. Границы этой области можно определить путем сопоставления результатов расчета (по различным теориям) и эксперимента при сложном нагружении для широкого спектра траекторий.

Приведем уравнения рассматриваемых вариантов теорий в векторном виде. Компоненты векторов напряжений  $N$  и деформаций  $E$  согласно теории Ильюшина связаны с тензорами напряжений  $\sigma_{ij}$  и деформаций  $\varepsilon_{ij}$  формулами

$$\begin{aligned}
H = \begin{Bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \\ H_4 \\ H_5 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \sqrt{3/2}s_{11} \\ \sqrt{2}(s_{22} + s_{11}/2) \\ \sqrt{2}s_{12} \\ \sqrt{2}s_{13} \\ \sqrt{2}s_{23} \end{Bmatrix}; & s_{ij} &= \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma; \\
& & \sigma &= \sigma_{ii}/3; \\
& & H &= (s_{ij}s_{ij})^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{3}}\sigma_I; \\
E = \begin{Bmatrix} \mathcal{E}_1 \\ \mathcal{E}_2 \\ \mathcal{E}_3 \\ \mathcal{E}_4 \\ \mathcal{E}_5 \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \sqrt{3/2}e_{11} \\ \sqrt{2}(e_{22} + e_{11}/2) \\ \sqrt{2}e_{12} \\ \sqrt{2}e_{13} \\ \sqrt{2}e_{23} \end{Bmatrix}; & e_{ij} &= \varepsilon_{ij} - \delta_{ij}\varepsilon; \\
& & \varepsilon &= \varepsilon_{ii}/3; \\
& & \mathcal{E} &= (e_{ij}e_{ij})^{1/2} = \sqrt{\frac{2}{3}}\varepsilon_I.
\end{aligned} \tag{1.95}$$

Векторы скоростей напряжений и деформаций, а также длины дуг траекторий определяют по формулам

$$\begin{aligned}
H &= [H_1 \ H_2 \ H_3 \ H_4 \ H_5]^T; \quad \Sigma = \int_0^t |H| dt = \int_0^t (s_{ij}s_{ij})^{1/2} dt; \\
E &= [\mathcal{E}_1 \ \mathcal{E}_2 \ \mathcal{E}_3 \ \mathcal{E}_4 \ \mathcal{E}_5]^T; \quad \Sigma s = \int_0^t |E| dt = \int_0^t (e_{ij}e_{ij})^{1/2} dt.
\end{aligned} \tag{1.96}$$

Угол сближения, т. е. угол между вектором напряжений и вектором скоростей деформаций, направленным по касательной к траектории деформаций, вычисляют по формуле

$$\beta = \arccos \frac{H \cdot E}{H|E|}. \tag{1.97}$$

Результаты сопоставляют как по траекториям напряжений  $H = H(s)$  и деформаций  $E = E(t)$ , так и по параметрам  $H = H(s)$  и  $\beta = \beta(s)$ , характеризующим, соответственно, скалярное и векторное запаздывания.

Для траектории малого кручения и произвольной кривизны в общей математической теории пластичности Ильюшина справедливо уравнение

$$H = N \cdot E + (P - N) \frac{(H \cdot E)}{H^2} H, \quad (1.98)$$

где  $P$  и  $N$  – функционалы пластичности.

Для траекторий средней кривизны ( $\beta < \pi/8$ ) В. И. Малым предложены зависимости

$$N = \frac{G}{\varphi^*}; \quad P = \frac{d\Phi}{ds}, \quad (1.99)$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $\varphi^* = 0,735$ ;  $\Phi(s)$  – единая кривая деформирования.

В теориях пластического течения при комбинированном упрочнении деформации разделяют на упругую и пластическую:

$$E = E^e + E^p. \quad (1.100)$$

Упругая деформация подчиняется закону Гука, для пластической – принимают ассоциированный закон течения

$$E^e = \frac{H}{2G}; \quad (1.101)$$

$$\dot{E}^p = \begin{cases} \frac{H^*}{H^*} |\dot{E}^p|, & \text{если } H^* = C_p(s^p) \wedge H^* (H^* \cdot \dot{E}^p) > 0; \\ 0, & \text{если } H^* < C_p(s^p) \vee (H^* \cdot \dot{E}^p) \leq 0, \end{cases} \quad (1.102)$$

где  $H^*$  – вектор активных напряжений;  $H^* = H - A$ ;  $A$  – вектор смещения центра поверхности нагружения (вектор добавочных напряжений);  $H^* = C_p(s^p)$  – уравнение поверхности нагружения;  $C_p(s^p)$  – радиус поверхности нагружения;  $s^p$  – длина дуги пластической деформации.

Варианты теорий пластичности при комбинированном упрочнении в основном отличаются уравнением для вектора смещения.

Для дифференциальных зависимостей одночленной структуры

$$\dot{A} = g \dot{E}^p \quad (1.103)$$

предложены различные виды функции  $g$ :  $g = g(A)$  – Ю. И. Кадашевичем и В.В. Новожиловым;  $g = g(H)$  – Р. А. Арутюняном;  $g = g\left(\frac{(A \cdot H^*)}{H^*}, \frac{(E^p \cdot H^*)}{H^*}\right)$  – И.А. Биргером и Б.Ф. Шорром;  $g = g\left(A, \frac{(A \cdot H^*)}{(A \cdot H^*)}\right)$  – Ю. Г. Коротких [14, 16].

Дифференциальная зависимость для вектора смещения трехчленной структуры согласно обобщенной модели неупругости имеет вид

$$\dot{A} = g \dot{E}^p + (g_E E^p + g_A A) \cdot |\dot{E}^p|, \quad (1.104)$$

где  $g$ ,  $g_E$ ,  $g_A$  – экспериментально определяемые константы породы.

Используя уравнения (1.102), (1.104) и уравнение поверхности нагружения [16-18], можно получить зависимость между модулем вектора скорости пластической деформации и векторами скоростей напряжений или деформаций:

$$|\dot{E}^p| = \frac{1}{E_*} \frac{(H^* \cdot \dot{H})}{H^*}; \quad |\dot{E}^p| = \frac{2G}{2G + E_*} \frac{(H^* \cdot \dot{E})}{H^*}, \quad (1.105)$$

где

$$E_* = \frac{dC_p}{Ds^p} + g + g_E \frac{(H^* \cdot E^p)}{H^*} + g_A \frac{(H^* \cdot A)}{H^*}.$$

Варианты теорий пластического течения при изотропном или только кинематическом упрочнениях являются частными случаями теории при комбинированном упрочнении; для них справедливы уравнения (1.100)-(1.102), (1.104)-(1.105) соответственно при  $g = 0$ ,  $g_E = 0$ ,  $g_A = 0$  или при  $dC_p/ds^p = 0$ .

В теориях ползучести деформации разделяют на упругую и деформацию ползучести [18]:

$$E = E^e + E^c. \quad (1.106)$$

Для определения вектора скорости деформации ползучести принимают ассоциированный закон течения:

$$\dot{E}^c = \frac{H^*}{H^*} |\dot{E}^c|, \quad (1.107)$$

где  $H^* = H - A$  – вектор активных напряжений;  $A$  – вектор добавочных напряжений.

Практически все уравнения, предложенные для вектора скорости добавочных напряжений, имеют двучленную структуру:  $\dot{A} = g\dot{E}^c - g_A^R A$ .

Вид функций  $g_A^R = g_A^R(A)$ ;  $g = g(H)$  – предложен Н.Н. Малининым и Г.М. Хажинским;  $g_A^R = g_A^R(A)$ ;  $g = g(A, (A \cdot H^*) / (A \cdot H^*))$  – Ю. Г. Коротких [12, 14]. Для модуля вектора скорости деформации ползучести этими авторами приняты соответственно следующие зависимости:

$$|\dot{E}^c| = \Phi(H^*); \quad |\dot{E}^c| = \Phi\left(\frac{H^* - C_n(s^c)}{C_n(s^c)}\right). \quad (1.108)$$

Первая зависимость описывает только кинематическое упрочнение; параметр  $C_n(s^c)$ , характеризующий изменение размера поверхности нулевой скорости ползучести, во второй зависимости учитывает и изотропное упрочнение.

В теориях неупругости нет условного разделения деформаций пластичности и ползучести; здесь введено понятие суммарной деформации неупругости, т. е. принято, что полная деформация состоит из упругой и неупругой:

$$E = E^e + E^N. \quad (1.109)$$

Для определения вектора скорости неупругой деформации при-

нимают ассоциированный закон течения

$$\dot{E}^N = \frac{H^*}{H^*} |\dot{E}^N|. \quad (1.110)$$

Уравнения для модуля вектора скорости неупругой деформации, вектора скорости добавочных напряжений и параметра, учитывающего изотропное упрочнение, предложены Миллером в виде

$$|\dot{E}^N| = \Phi(H^*/D); \quad (1.111)$$

$$\dot{A} = g\dot{E}^N - g_A^R(A) \cdot A; \quad (1.112)$$

$$\dot{D} = q(A, D) \cdot |\dot{E}^N| - q_R(D). \quad (1.113)$$

Здесь уравнение для вектора скорости добавочных напряжений имеет двучленную структуру.

Уравнения неупругого состояния (1.111)-(1.113) при скоростях деформации, при которых можно пренебречь временными эффектами, не переходят в уравнения пластичности, которые должны быть для них частным случаем.

Для вектора скорости неупругой деформации в обобщенной модели неупругости принят ассоциированный закон течения с учетом условий упругого и неупругого состояний:

$$\dot{E}^N = \begin{cases} \frac{H}{H^*} |\dot{E}^N|, & \text{если } H^* = C \wedge H^*(H^* \cdot \dot{E}^N) > 0; \\ 0, & \text{если } H^* < C \vee (H^* \cdot \dot{E}^N) \leq 0, \end{cases} \quad (1.114)$$

где  $C$  соответствует радиусу поверхности нагружения и учитывает изотропное упрочнение.

Для вектора скорости добавочных напряжений и параметра  $C$  предложены уравнения

$$\dot{A} = g\dot{E}^N + (g_E E^N + g_A A) \cdot |\dot{E}^N| - [g_E^R(A) \cdot E^N + g_A^R(A) \cdot A]; \quad (1.115)$$

$$\dot{C} = q_E(s^N) \cdot |\dot{E}^N| - q_R(s^N, C). \quad (1.116)$$

Используя уравнения (1.101), (1.109), (1.114)-(1.116) и уравнение поверхности нагружения, можно получить выражения для модуля вектора скорости неупругой деформации для мягкого и жесткого нагружений:

$$\begin{aligned} |\dot{E}^N| &= \frac{1}{E_*} \left[ \frac{(H^* \cdot \dot{H})}{H^*} + B_R \right]; \\ |\dot{E}^N| &= \frac{2G}{2G + E_*} \left[ \frac{(H^* \cdot \dot{E})}{H^*} + \frac{B_R}{2G} \right], \end{aligned} \quad (1.117)$$

где

$$\begin{aligned} E_* &= q_E + g + g_E \frac{(H^* \cdot E^N)}{H^*} + g_A \frac{(H^* \cdot A)}{H^*}; \\ B_R &= q_R + g_E^R \frac{(H^* \cdot E^N)}{H^*} + g_A^R \frac{(H^* \cdot A)}{H^*}. \end{aligned}$$

В реальных условиях нагружения (особенно при длительных нагрузках) в породе возможно одновременное протекание процессов пластичности и ползучести, причем не всегда можно заранее определить какой из этих процессов будет превалировать. Таким образом, для практических расчетов в задачах геомеханики теории неупругости представляются наиболее практичными.

Полученные аналитические соотношения, положенные в основу расчета методом конечных элементов задач геомеханики, позволяют получить результат вычислительного эксперимента, учитывающий реальные геометрические составляющие расчетной области, нелинейности поведения пород, сложные условия нагружения и взаимного контакта породных слоев, образующих горный массив. Выведенные закономерности легли в основу разработанной математической модели поведения тонкослоистого горного массива в условиях сложного нагружения при нелинейной постановке расчетной задачи и с учетом реальных параметров элементов крепи выработки.

## **2 ЭВОЛЮЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ**

### **2.1 Развитие математических моделей**

Математическое моделирование и вычислительный эксперимент – ведущие методологии изучения глобальных моделей процессов и явлений на Земле. В задачах геомеханики применение математического эксперимента позволяет избежать лишних трудоемких натуральных экспериментов, постановка которых не только требует значительных финансовых затрат, но и приводит к существенным потерям времени на производстве.

Вычислительный эксперимент в отличие от натуральных экспериментальных установок позволяет накапливать результаты, полученные при исследовании какого-либо круга задач, а затем быстро и гибко применять их к решению аналогичных проблем.

Особенности решения задач геомеханики можно выделить в три основные группы [19, 20]:

– учет строения горных массивов, связанный с наличием в них породных слоев, существенно различающихся по механическим свойствам, разделенных различными поверхностями природной трещиноватости с разными сцеплением и трением по этим поверхностям;

– в ходе решения задачи приходится учитывать не только упруго-пластическое деформирование, но и так называемые стадии разупрочнения и разрыхления в определенных областях горного массива;

– геомеханические процессы в горном массиве зависят от реологических характеристик породных слоев, размеров и взаимного расположения горных выработок, их изменения во времени и пространстве при ведении горных работ.



Поскольку формирование расчетных схем для задач геомеханики связано с необходимостью описания большого числа нерегулярных параметров и сложных граничных условий, исследователи прибегают к вынужденному упрощению в постановке задачи с целью снижения размерности уравнений, описывающих систему, и функций, учитывающих особенности начальной нагрузки и геометрии.

Если на ранних стадиях развития численных методов считалось возможным получение с их помощью для задач геомеханики только качественных результатов [20], то с развитием самих численных методов и представлений о напряженно-деформированном состоянии (НДС) горного массива становится возможным получение не только адекватных качественных, но и в достаточной мере точных количественных результатов [19].

Все многообразие расчетных схем можно представить как комбинацию трех основных классов:

- геометрические признаки: понятия плоского или пространственного решения; наличие или отсутствие симметрии; использование одно-, двух- и многосвязных областей и т.п.;

- внешние воздействия и механические свойства породного массива и инженерных конструкций: учет фильтрации жидкости и газа; изотропная, орто- или анизотропная среда; упругая, упругопластическая или вязкопластическая деформация массива; без или с учетом разупрочнения и разрыхления пород и т.д.;

- конструктивно-технологические особенности сооружения, охраны и функционирования выработок: конструктивно-технологическая схема проведения выработок; последовательность ведения подготовительных и очистных работ; виды выработок и способы их охраны, а также конструкции и режимы работы крепи.

Каждый класс расчетных схем порождает отдельный подход в

формировании математической модели, а комбинация учитываемых факторов позволяет усложнять или упрощать предлагаемое решение. Поэтому исторически можно наблюдать картину поэтапного усложнения математических моделей, используемых в задачах геомеханики.

Изначально широкое применение при решении задач геомеханики нашли аналитические методы, со временем более интенсивно начали использовать численные методы, основанные на разностных схемах. В настоящее время самым востребованным является метод конечных элементов. Теперь перейдем к анализу математических моделей, разрабатываемых и используемых в рамках задач геомеханики.

Аналитический метод расчета [21] основан на решении обратной задачи для определения НДС горного массива по полученным в результате натурного эксперимента деформациям контура выработки. Подобный подход позволяет получить адекватную картину полей напряжений в окрестности выработки только в упругой постановке и не всегда может иметь практическую ценность при решении прикладных задач устойчивости горных выработок. При выполнении расчетов крепь выработки описывается как одна из компонент напряжений, присутствующая на поверхности горного массива, образованной контуром выработки.

Решение [22] получено для упруго-пластической задачи в плоской постановке вокруг выработки круглого сечения. В основу математической модели положено представление о линиях скольжения, возникающих при переходе пород горного массива из упругого состояния в пластическое. Такая постановка задачи связана с необходимостью преодоления нелинейности масштабного эффекта в породах горного массива. Еще одним положительным фактором представленного метода расчета является возможность получения однозначного результата при учете ниспадающей ветви диаграммы «на-

пряжение-деформация».

В работе [23] рассматривается НДС системы «крепь-горный массив» исходя из уравнений равновесия сингулярных точек, располагающихся на контуре выработки и находящихся под воздействием начальных граничных условий, характерных для конкретного случая проведения выработки. Поле напряжений рассчитывается в результате анализа получаемых в ходе решения перемещений, величина которых не должна выходить за пределы упругого представления о поведении материала. Несмотря на утверждение автора об универсальности данного метода, отсутствие возможности учета неоднородности горного массива, вблизи контура выработки, и независимость получаемых результатов от типа крепи указывает на локальный характер области применения методики.

Методика анализа поведения анкеров как элементов рамно-анкерной крепи, устанавливаемой в выработках произвольного сечения, предложена в [24]. Задача решена в плоской постановке и не учитывает запредельное поведение материала элементов расчетной схемы. Напряженно-деформированное состояние анкеров и контактной зоны горного массива определяется из условия расслоения пород в и над кровлей выработки. Авторское решение позволяет определять оптимальные показатели установки анкеров для минимизации зоны расслоения пород над сводом выработки. Для различных условий проведения выработок, подкрепляемых комбинированной рамно-анкерной крепью, получены эмпирические зависимости, основанные на результатах математического эксперимента.

Реализована модель оценки конструктивных особенностей крепи в условиях изотропного однородного горного массива вблизи выработки сводчатого вида [25]. Основополагающим фактором при проведении расчетов выбрана форма контура крепи и усредненные физи-

ко-механические характеристики горного массива, примыкающего к нему. На основе получаемых результатов осуществлялся выбор типа крепи (рамная, рамно-анкерная и анкерная), а также плотность ее установки вдоль конкретной горной выработки.

Для оценки НДС горного массива вблизи выработки сводчатой формы [26] использован подход, основанный на применении комплексных потенциалов многосвязных областей и метода конформных отображений. Задача решена в упругой постановке на основе плоской модели для бесконечного многосвязного анизотропного тела с конечным числом эллиптических полостей. Разгрузочные полости и сама выработка моделировались эллипсами различной кривизны. Расчеты выполнялись для различных комбинаций размеров и местоположения разгрузочных полостей. А получаемыми результатами стали оптимизационные показатели минимизации градиентов напряжений на контуре выработки. Данный метод решения задачи не учитывает наличия структурных неоднородностей горного массива, пересекающих разгрузочные полости, что значительно сужает сферу его применения.

Методика расчетов различных типов крепи [27] основана на методе коэффициентов передачи нагрузок. Контактная задача взаимодействия крепи и горного массива рассматривается в плоской упругой постановке при наличии хотя бы одной оси симметрии. В общей постановке решение задачи выполняется для однородного изотропного массива, однако для определенного класса задач приводится методика учета неоднородности массива и угла падения породных слоев. Горный массив представляется в виде внешнего кольца бесконечного радиуса. Каждое внутреннее кольцо находится под воздействием напряжений, действующих на внешнем и внутреннем контурах. В результате возникают тангенциальные напряжения, на основе значений которых выполняется проверка каждого слоя на прочность.

Для определения НДС массива горных пород авторы [28] предложили несколько расчетных схем. При этом особое внимание уделялось динамическим характеристикам изменения НДС в объемной системе с определенными механическими нарушениями (трещиноватость, поверхности ослабления и т. п.). Решение разбито на две части определения НДС: в окрестности уже пройденной выработки и впереди забоя выработки. Такая схема содержит в себе ряд допущений, которые при наличии существенных вариаций параметров горного массива и крепи выработки приводят ее к неадекватности получаемых результатов.

Интересным подходом в решении задач геомеханики является использование теории предельного равновесия [29]. При наличии в массиве протяженных поверхностей ослаблений расчет производят с учетом определения возможности его разрушения по этим поверхностям. Тогда горный массив рассматривается как система породных блоков, взаимодействующих по поверхностям ослаблений. К сожалению, данная схема практически не учитывает влияние конструктивных и режимных параметров элементов крепи и, основываясь на ней, возможно только эмпирическое определение параметров взаимодействия «горный массив-крепь».

Представляет интерес анализ математических методов решения упругопластических задач для разупрочняющихся горных массивов [30]. Предлагаемые решения анализировались с точки зрения адекватности учета разрыхления горных пород в окрестности выработок. Большинство решений выполнено в плоской постановке. Их основные различия состоят в способах определения поведения горного массива за пределами упругих деформаций. Как отмечает автор, практически во всех случаях имеют место существенные отклонения поведения горных пород от их описаний, используемых в расчетных схемах.

Кроме того, автор делает вывод о том, что для учета в решениях сложных граничных условий, неоднородности среды и неопределенности положения упругопластической границы в решении задач геомеханики необходимо использовать численные методы.

Оценка устойчивости основных подготовительных выработок на шахтах Западного Донбасса выполнена на основе вероятностного подхода [31]. За критерий устойчивости выработки автором принято отношение критического радиуса зоны предельного состояния к текущему радиусу этой зоны, который изменяется по длине выработки. Но в работе [30], показано, что величина радиуса зоны предельного состояния в высокой степени зависит от параметров запредельной стадии деформирования породы: в основном от модуля спада и остаточной прочности породы на сжатие. Один и тот же радиус зоны может иметь место при разных комбинациях прочностных и деформационных характеристик полной диаграммы деформирования породы. Кроме того, относительное объемное разрыхление породы не есть величина постоянная, и зависит от соотношения компонент главных напряжений и, в общем случае, от величины деформации элементарного объема на стадии разрыхления [30]. Здесь использованы результаты аналитического решения плоской задачи НДС однородного горного массива в окрестности круглого отверстия. Данный подход в значительной степени идеализирует объект математического эксперимента. Однако при совершенствовании математической модели за счет учета реальных горно-геологических и горнотехнических условий получаемые результаты могут иметь высокий уровень адекватности.

Другая сторона исследуемого вопроса заключается в том, что по мере деформирования системы «массив-крепь» эпюра нагрузки на крепь изменяется в соответствии с меняющимися условиями взаимодействия контакта элементов системы. Как известно, учет этого про-

цесса наиболее адекватно отражает метод расчета крепи в режиме совместного деформирования [32], предполагающий исследование силового взаимодействия крепи с вмещающим выработку массивом как единой взаимосвязанной и взаимовлияющей системы.

В этой связи интересен вероятностный подход к определению пространственной эпюры нагрузки на крепь протяженной выработки [33]. Но использование подобной методики в практических целях на данном этапе развития исследовательских технологий является преждевременным, поскольку существует ряд технологических ограничений, связанных с реализацией натурного мониторинга состояния продольного и поперечного сечений реальной горной выработки. Вносимые таким образом в расчет начальные погрешности могут серьезно влиять на точность получаемых результатов.

Фадеев А.Б. [34] большое внимание уделил учету неоднородности физико-механических показателей пород, слагающих горный массив. Проведена классификация математических моделей пород по их прочностным характеристикам. Породы разделены на три основные группы: слабые, средней прочности и крепкие. Показана методика интегрирования математических моделей пород в расчетную схему метода конечных элементов. Особо следует выделить решение задачи определения НДС горного массива с учетом полной диаграммы «напряжение-деформация» слагающих пород.

В [35] рассмотрены аспекты применения МКЭ для расчета геомеханических явлений с низким внутренним трением, в частности приведено решение задачи для модели обрушенных пород. Расчетная модель задачи, как показано авторами, может быть только пространственной, поскольку необходимо учитывать специфику поведения материала, состоящую в том, что приходится вводить зависимость угла внутреннего трения от геометрических размеров явления. В результате

поведение разрушенных пород описывается неньютоновской несжимаемой жидкостью со степенной зависимостью вязкости от величины сдвиговых деформаций. Задача, решенная на основе предложенной методики, позволила получить картину роста перемещений контура породного массива в зависимости от роста зоны разрушенных пород.

Интересен расчет параметров пучения почвы выработки в тонкослоистом горном массиве в плоской постановке и без учета влияния крепи [36]. Картина начальных условий, по утверждению самих авторов, сильно идеализирована. Не ясно, выполнялся ли расчет в упругой или упруго-пластической постановке. Полученные в ходе решения задачи результаты соизмеримы с реальными показателями пучения в конкретной выработке и составили несколько десятков сантиметров.

Решение задачи геомеханики методом конечных элементов используется для проведения анализа влияния главных напряжений на состояние горного массива вблизи выработок большой протяженности [37]. Задача рассматривается для однородного упругого массива в объемной постановке. Поскольку математически доказано влияние на НДС системы главных напряжений, не совпадающих с осью выработки, для упрощения компьютерной модели обобщенную объемную задачу представляют в виде суперпозиции плоской и так называемой антиплоской задачи. Показано, что антиплоскую деформацию необходимо учитывать для определения полей напряжений при выемке запасов крутопадающих рудных тел, а в условиях отработки протяженных пологопадающих залежей допустимо применение решений, отвечающих предположению о плоской деформации.

Методика, позволяющая избежать итерационного процесса при решении нелинейной задачи геомеханики, приведена в [38]. Автором разработана процедура, объединяющая методы переменных параметров упругости и начальных деформаций. В основу данной процедуры



положен принцип Родина в конечно-элементной интерпретации, позволяющий определять дополнительные техногенные перемещения на основе изменений исследуемой области исходного поля перемещений. Для описания процесса деформирования во времени используется принцип Вольтера. Решение выполняется для кусочно-линейной диаграммы «напряжения-деформации», характеризующейся модулем упругости, пределом прочности на сжатие, модулем спада и остаточной прочностью породы. Достоинством данного подхода является сочетание простоты вычислений и возможности учета сложного реологического поведения горного массива.

Анализ влияния анкерной крепи на НДС горного массива на основании решения плоской упругой задачи методом конечных элементов выполнен в [39]. При проведении расчетов анкерное крепление представлялось как полный конструктивный набор реальных элементов крепи. Были рассмотрены несколько вариантов анкерного крепления в выработках различной геометрии. Для определения зон разрушения горных пород в этом случае использовались два параметра, характеризующие вероятность возникновения разрушения и предположительный режим разрушения.

Работа [40] полностью посвящена реализации расчетных схем задач геомеханики, основанных на применении метода конечных элементов. Рассмотрены варианты решений как в упругой (в т. ч. при больших перемещениях), так и в неупругой постановке. Предложены базовые уравнения для решения задач на основе теории малых упругопластических деформаций, ассоциированной теории течения и теории наследственной ползучести. Данная работа может рассматриваться как одна из фундаментальных по применению МКЭ для решения трехмерных задач сложной конфигурации с использованием линейных и нелинейных законов деформирования горных пород. На приме-

ре задач, основанных на упругой постановке, показаны расчетные схемы, используемые для определения различных параметров элементов крепи выработок.

При решении задач геомеханики часто используют и так называемые комбинированные численные методы. Одним из таких методов является МКЭ – МНП (метод конечных элементов – метод начальных параметров) [3]. МНП позволяет легко учесть технологические и конструктивные особенности крепи, представляя ее в виде стержневой системы определенной конфигурации. Такие элементы сочленяются с сеткой МКЭ горного массива в узлах, расположенных на поверхности выработки. Этот подход позволяет в определенной мере упростить решение контактной задачи на границе горного массива и крепи выработки.

Основная масса методик расчета, основанных на аналитическом подходе [20-33], реализует плоскую модель расчета, учитывает незначительное число показателей, связанных «простым» образом, и использует при решении, как правило, системы дифференциальных уравнений малого порядка. Таким образом, получаемое численное решение, являясь однозначным, не позволяет получать высокоточные результаты, особенно при проведении прогнозирования поведения выработок во времени. Создание подобных моделей для учета конкретной специфики той или иной выработки требует больших затрат и поэтому подобный подход в математическом эксперименте используется обычно как один из базовых элементов для построения сложных конечноразностных расчетных моделей.

В работах [19, 34-40] показано насколько эффективно применение численных методов при решении задач геомеханики, основанных на различных базовых представлениях о поведении среды горного массива. Однако поведение самой среды и системы «крепь выработки»

горный массив», как правило, значительно идеализируется. Авторы, прибегая к подобным идеализациям, стремятся показать универсальность предлагаемой методики для различных условий математического эксперимента. При этом жертвуют точностью описания рассчитываемой системы как физического объекта, а конечноразностный подход приобретает функцию интегрированной вычислительной системы (отсутствует четкое разделение между математической реализацией и физическим описанием среды).

В стремлении снизить вычислительные затраты большинство исследователей сознательно идут на упрощение модели математического эксперимента – не всегда оправданное. Во многих работах вообще отсутствует критическая оценка избираемых параметров расчета, комбинация которых и в конкретных условиях может дать значительные отклонения в получаемых результатах. Отсюда следует, что развивать расчетные модели необходимо по пути максимального приближения их к реальным условиям эксплуатации, то есть к созданию модели среды горного массива и элементов крепи выработок, находящихся в сложных условиях взаимодействия, с учетом локальных нарушений, связанных с натурными геотехногенными условиями.

Из всего вышеизложенного следует сделать вывод о необходимости разработки математической модели, способной отображать реальное состояние приконтурного породного массива, форму выработки, ее крепь и способ охраны с учетом максимально возможного числа геологических и техногенных факторов. Создание такой модели невозможно без всестороннего анализа большого числа расчетов, проводимых с выбором разнообразных начальных и граничных условий для конкретной расчетной схемы. Такой подход позволит разработать и вычислительно доказать адекватность создаваемой модели, которую целесообразно использовать для проведения математического экспе-

римента в научно-прикладных целях.

Для разработки новой вычислительной модели целесообразным является:

- выполнение ее в объемной постановке, описывающей весь спектр взаимодействия отдельных элементов крепи (в т. ч. и с учетом изменения площади контактной поверхности) как между собой, так с породами примыкающего к поверхности выработки горного массива;

- определение полной диаграммы «напряжение-деформация» пород и материалов крепи;

- учет динамического изменения НДС с течением времени;

- рассмотрение величины и характера внешних нагрузок (взаимное влияние выработок, изменение их геометрии);

- выявление влияния структуры горного массива, в том числе геологических нарушений, угла внутреннего трения и условий контакта породных слоев;

- учет трещиноватости как макрофактора, влияющего на формирование НДС горного массива.

## **2.2 Технология вычислительного эксперимента**

Вычислительный эксперимент широко применяется для решения научно-прикладных задач в разнообразных отраслях знаний. Основой современного вычислительного эксперимента являются численные методы. Каждый численный метод использует для проведения расчетов математическую модель, описывающую реальный объект или процесс. Проблема адекватности математических моделей имеет непосредственное отношение к эффективности функционирования, в процессе эксплуатации, программного обеспечения реализующего вычислительный эксперимент. Выдаваемые программным продуктом практические результаты в значительной степени зависят от надежно-

сти информации используемой при математическом моделировании в качестве начальных и граничных условий.

В работах, посвященных исследованию состояния горного массива ослабляемого системой выработок, используются приближенные методы анализа математических моделей, описывающих сложное взаимодействие крепи с породной средой. Существенная нелинейность и вероятностная основа таких моделей, невозможность строгого учета компонент вектора состояния ставят перед исследователями сложные проблемы анализа ситуации, преодоление которых связано со специфическими трудностями и требует большого труда и фантазии. Современные работы такого направления выполняются на базе обобщения идей и методов на все более абстрактные ситуации, требующие новых разработок и конструкций. Используемые подходы иногда создают видимость исчерпывающего решения задачи, тогда как проблема состоит не в возможности получения приближенного решения, а в фактической эффективности предлагаемого алгоритма вычислительного эксперимента.

Видимая тривиальность вычислительных задач способствует появлению работ не связанных с экспериментальной проверкой полученных данных. В отдельных случаях даже не содержится подробного алгоритма и численного материала, позволяющего судить об эффективности метода и качестве оценки полученного результата с позиций вычислительной математики. Искусство анализа и квалификация результата как близкого к экспериментальным данным – необходимый элемент исследовательской работы. Трудности решения задач геомеханики состоят в том, что сравнительно малая погрешность в исходных данных при вычислении компонент математических моделей связана с большой неопределенностью в конечном решении. Такая ситуация особенно недопустима в задачах оценки потери устойчивости

приконтурных пород выработки. Так как решение представляет собой информацию о важнейшем параметре, влияющем на устойчивость выработки, погрешность при оценке которого на практике может привести к тяжелым последствиям.

Теперь рассмотрим четыре ключевых момента, определяющих адекватность результатов вычислительного эксперимента в задачах геомеханики, решаемых на основе абстрактной математической модели.

Первый – планирование эксперимента. Возникающие при практическом решении задач геомеханики особенности планирования эксперимента часто выходят за рамки классического подхода и требуют специального обобщения с учетом специфики рассматриваемых проблем. При решении задачи максимально приближенной к реальным условиям вычислительные ресурсы могут быть существенно ограничены, а априорная информация недостаточна для несмещенной оценки функции регрессии. В этих условиях приходится считаться не только со случайной ошибкой приближения, но и с систематической ошибкой, вызванной неадекватностью принятой модели. Выбор пространства, в котором ищется оценка, приходится осуществлять совместно с планом эксперимента и методом оценивания.

Понимая под планом эксперимента  $\xi$  вероятностную меру на области планирования  $U$  с конечным носителем  $\text{supp } \xi = \{h \in U, \xi(h) \neq 0\}$  и обозначая через  $H_1$  конечномерное подпространство некоторого пространства  $H$  ( $H_1 \subseteq H$ ), которому принадлежит функция регрессии, будем считать, что по условиям реального эксперимента могут быть использованы только планы из допустимого множества

$$J_N = \{\xi \in J_N : \text{card}(\text{supp } \xi) \leq n\},$$

где  $n$  – число, характеризующее ограниченность ресурсов.

Выбор пространства оценивания  $H_1 = H_\xi$  и оператора оценива-

ния  $S = S_\xi$  обеспечивает при фиксированном плане  $\xi \in J_N$  нахождение наилучшего в метрике пространства  $H$  приближения к произвольному элементу  $\eta$  из  $H$ . При этом пространство оценивания  $H_\xi$  должно обеспечивать построение оценки неизвестного элемента  $\eta \in H$ . Выполнение всех этих условий приводит к качественному планированию вычислительного эксперимента.

Второй – выбор оптимальных условий эксперимента. Задача выбора оптимальных условий вычислительного эксперимента в геомеханике сводится к определению надежной оценки характеристик объекта и параметров среды, и связана с построением нормированного дискретного плана для динамического объекта, развивающегося во времени и пространстве. Пассивная стратегия планирования такого эксперимента характеризуется тем, что объект функционирует в режиме нормальной эксплуатации. В ходе эксперимента на основе анализа ситуации выбираются моменты времени и координаты точек, в которых следует производить вычисления. Выполнив серию расчетов при некоторых фиксированных значениях исследуемого фактора в различные моменты времени и имея модель системы, можно подсчитать нормированную информационную матрицу, описывающую ситуацию для оптимальных условий проведения вычислительного эксперимента.

Третий – оптимальная структура модели. Для условий проведения расчетов в задачах геомеханики значительное усложнение используемых математических моделей приводит к экспоненциальному росту объемов вычислений и получаемых результатов, затрудняющему процедуру представления, анализа и адаптации окончательных данных вычислительного эксперимента.

На практике приходится избегать чрезмерного усложнения мо-

дели за счет включения дополнительных регрессоров. Системный анализ задачи выбора наилучшей полиномиальной регрессии позволяет сформулировать подход к определению степени алгебраического многочлена, наиболее точно аппроксимирующего заданную экспериментальную зависимость  $\{y_n, x_n\}$ . Суть его состоит в дополнении классического метода (выбор в качестве  $k_{opt}$  величины  $k$ , доставляющей минимальное значение сумме квадратов отклонений) описанием способа определения экспериментального массива  $\{y_n\}$

$$y_n = g(G(x_n) + \xi_n),$$

где  $G(x_n)$  – некоторая функция;  $\xi_n$  – случайные ошибки ( $n = 1, N$ ).

В результате анализа полученного вектора значений определяется подмножество величин, характеризующее набор параметров критичных в данной постановке задачи.

Четвертый – особенности вычислительной технологии. Вычислительные трудности при реализации алгоритмов расчета систем с большим числом степеней свободы часто связаны с процедурой обращения матрицы  $X^T X$  системы нормальных уравнений

$$(X^T X)^{-1} \beta = X^T y.$$

Поэтому, при решении многокритериальных задач численными методами используют подход псевдообращения, обеспечивающий работу вычислительных процедур в условиях вырожденности матриц.

Сравнительный анализ получаемых результатов с помощью различных подходов обращения матриц дает возможность выделить прямой метод Гревилла, позволяющий работать непосредственно с матрицей  $X$ . Эта матрица лучше обусловлена, чем матрица  $X^T X$ . В ре-



зультате существенно повышается устойчивость к погрешностям округления.

В случае использования нелинейных по параметрам моделей возникает проблема оценок коэффициентов регрессии. При разреженности априорного множества параметров такая оценка может вообще не существовать (не достигается минимум суммы квадратов отклонений).

Планирование вычислительного эксперимента в геомеханике связано с выбором оптимальных методик вычисления, обеспечивающих допустимое качество результата расчета характеристик выработки и параметров горного массива. Для эффективной реализации процесса вычислений необходима разработка информационной технологии, обеспечивающей определение состояния динамического объекта и прогноз его поведения в различных условиях эксплуатации, в том числе и в экстремальных ситуациях. Здесь четко определяется граница между результатами вычислительного эксперимента и системой последующего анализа полученных данных. В частности для интеллектуальных систем принятия решения дополнительный анализ полученных данных не нужен.

Исходя из выше изложенного, можно выделить основные особенности проведения вычислительного эксперимента в задачах геомеханики с применением метода конечных элементов, требующие уточнения для обеспечения адекватности расчетных моделей:

- размер и форма области, описываемой в модели;
- характер начальных условий;
- характер и величина граничных условий;
- метод описания элементов крепи;
- определение диапазона физико-механических характеристик пород, используемых при моделировании горного массива.

Размер и форма области твердотельного моделирования горного массива, примыкающего к выработке, влияет на размерность решаемой задачи и априори на форму целевой функции, задающей распределение перемещений по всей расчетной области. Для выработок, пройденных под малым углом к горизонту, на основе тестовых расчетов, в качестве базовой формы области расчета выбран параллелепипед, имеющий следующие параметры:

- верхняя и нижняя грани ориентированны параллельно почве выработки и отстоят от ее оси на длину в семь радиусов окружности, описанной вокруг профиля выработки;
- боковые грани, ориентированные вдоль оси выработки, отстоят от ее оси на длину в пять радиусов окружности, описанной вокруг профиля выработки;
- боковые грани, пересекающие ось выработки, располагаются друг от друга на расстоянии, определяемом из характеристик крепи выработки, моделируемой в вычислительном эксперименте.

Параллелепипед в качестве базовой формы области расчета позволяет наиболее просто приложить начальные и граничные условия, хорошо согласующиеся с реальными условиями нагружения физического объекта (горного массива). Формы шара или круга, определенной толщины, вообще не применимы в задачах геомеханики в связи с большими сложностями наложения граничных условий. Для расчета стволов, ориентированных под малым углом к вертикали, хорошо подходит в качестве формы расчетной области цилиндр, ось которого совпадает с осью рассчитываемой выработки. Эта форма наиболее оптимальна для минимизации размерности решаемой задачи, но не позволяет реализовать в полном объеме классическую расчетную схему задач геомеханики.

Выбор размеров параллелепипеда обусловлен оптимизацией размерности основных матриц метода конечных элементов, что особенно важно при решении задач геомеханики в упруго-пластической постановке. Увеличение линейных размеров позволило бы свести к нулю воздействие на получаемый результат расчета граничных условий, однако при этом катастрофически сокращается величина доступных вычислительных ресурсов, что в конечном случае, как правило, приводит к отказу вычислительного алгоритма.

Другим важным фактором, подлежащим дополнительному анализу, является определение параметров начальных условий. Начальные условия могут значительно влиять на результаты вычислительного эксперимента при решении задач в упруго-пластической постановке и с учетом реологических свойств пород рассматриваемого горного массива. Одним из наиболее значимых начальных условий является задание формы функции приложения нагрузок во времени. Данная функция может быть определена только на основе натуральных наблюдений или лабораторных исследований для конкретных горно-геологических условий. Тестовые расчеты, выполненные для различных форм данной функции, показали ее ощутимое влияние на формирование в горном массиве зон разупрочнения. Это влияние выражается как в изменении формы зоны разупрочнения, так и в вариациях значений максимальных напряжений, возникающих в горном массиве.

Другим фактором, ощутимо влияющим на картину распределения напряжений при упруго-пластической постановке задачи, является выбор теории пластичности, используемой для описания предельного и запредельного поведения материала. Анализ тестовых расчетов показал, что при выборе критериев Мизеса и Треска, при сложном напряженно-деформированном состоянии области расчета, порог перехода материала породы в запредельное состояние на 10-12% выше,

чем при выборе критерия Друкера-Прагера, но при этом рост перемещений контура выработки во втором случае имеет более пологий вид и при этом на отдельных участках контура величины смещений имеют большее абсолютное значение. Однако, вычислительная устойчивость расчетной модели, использующей критерий Мизеса, намного выше аналогичной характеристики для критериев Треска и Друкера-Прагера. Поэтому данный показатель должен проходить этап оптимизации при каждом, даже незначительном, изменении расчетной модели, поскольку возможные погрешности вычислений могут приводить к срыву итерационного процесса, вызываемого невозможностью определения целевой функции на всем пространстве значений.

При выборе граничных условий их разделяют на две основные группы – пассивные и активные. В задачах геомеханики в качестве пассивных используют симметрию, мягкое основание, шарниры и жесткое основание. В качестве активных граничных условий используют давление (распределенную нагрузку), силу тяжести (если модель обладает собственным весом) и очень редко сосредоточенное усилие. Пассивные граничные условия обладают свойством постоянства и не изменяются в ходе выполнения расчетов. Активные напротив могут изменять как величину, так и характер. В частности, при решении задачи в упруго-пластической постановке нагружение расчетной области происходит по линейному закону от нуля до приведенной единицы.

В случае, когда рассматривается выработка, пройденная с малым углом к горизонту, наиболее оптимальной комбинацией граничных условий можно считать следующую – на вертикальные грани параллелепипеда накладывается симметрия; основание жестко фиксируется, что позволяет добиться высокой устойчивости вычислительного процесса; к верхней грани прикладывается равномерно распределенная нагрузка, при расчете вне зоны влияния очистных работ, или на-

грузка, распределение которой задается сложным образом, если необходимо учитывать влияние очистных работ.

Использование граничного условия «мягкое основание» можно считать не эффективным, особенно при проведение расчетов в упруго-пластической постановке, поскольку сложность проводимых расчетов и время их проведения возрастает многократно, что в свою очередь снижает надежность получаемых результатов. С другой стороны, эффект демпфера может быть достигнут простой комбинацией жесткого основания и примыкающих к нему двух-трех слоев конечных элементов с высоким уровнем пластичности, что несколько увеличит размерность задачи, но не усложнит сам вычислительный процесс.

Широкое применение в расчетной схеме граничного условия «симметрия» обусловлено как самим типом решаемой задачи геомеханики, так и высоким уровнем универсальности этого граничного условия. Очень важной особенностью данного граничного условия является слабое влияние его на формы целевой функции и высокая скорость нивелирования возмущений, привносимых им в расчетную схему.

Именно влиянием граничных условий на форму целевой функции обусловлено увеличение расстояния между вертикальными границами расчетной области, проходящими перпендикулярно оси выработки. Для получения наиболее адекватного результата в среднем сечении расчетной области необходимо смоделировать выработку, содержащую в длину от трех до пяти шагов крепи. При этом грани расчетной схемы необходимо располагать таким образом, чтобы пересекали на двое основные силовые элементы крепи (например, для рамной крепи грань должна проходить через ось симметрии рамы, а для анкерной через ось симметрии анкера).

В ходе проведения тестовых расчетов, было показано, что для

пространственной модели с относительно малой расчетной сетью, критически важно обеспечить высокую детализацию элементов крепи выработки. Данный вывод сделан на основе анализа ряда расчетных моделей, где крепь выработки моделировалась с различной степенью адекватности – от моделирования в виде распределенного давления на контуре выработки до точного воспроизведения всех конструктивных элементов. Оптимальным следует считать подход точного моделирования элементов крепи, имеющих максимальный геометрический размер больший, чем 15 минимальных размеров конечных элементов используемых в расчете.

Важным моментом при моделировании крепи является определение условий контакта крепи и поверхности породного массива. Поскольку в большинстве расчетных схем материал крепи обладает более высокими прочностными характеристиками, нежели породы горного массива, на площадках контакта крепи и породы возникает высокий градиент перемещений. Для повышения адекватности расчетной схемы, в этом случае, приходится использовать методику вычисления изменения поверхности контакта. Это не только повышает размерность задачи, так как число узлов на поверхности контакта удваивается, но и приводит к значительным вычислительным затратам. Поэтому, с одной стороны, необходимо крайне осторожно использовать этот подход, а с другой – применять его повсеместно в задачах геомеханики, при решении которых ожидаются большие перемещения узлов по контуру выработки.

Определение диапазона физико-механических характеристик материала пород, используемых при моделировании горного массива, зависит от типа решаемой задачи и наличия соответствующих показателей, полученных в ходе натурных и лабораторных исследований. Анализ расчетов, проведенных для различных вариантов учета прочност-

ных характеристик пород, показал следующее: ортотропность значительно влияет на распределение горизонтальных напряжений, ее учет приводит к росту перемещений по контуру выработки; учет полной диаграммы «напряжение-деформация» позволяет наиболее полно отобразить процесс деформирования приконтурных горных пород; учет температурных характеристик не оказывает зримого эффекта; учет реологических свойств пород позволяет получить полные перемещения на контуре выработки в любой момент времени ее эксплуатации.

Таким образом, получение надежных, качественно и количественно адекватных результатов вычислительного эксперимента для задач геомеханики возможно только с комплексным учетом широкого спектра характеристик математической модели, ряд которых должен проходить оптимизацию для каждой серии выполняемых расчетов и обеспечивать при этом сходимость вычислений с низкими значениями привносимых погрешностей.

### **2.3. Алгоритм постановки вычислительного эксперимента**

Получение надежных, качественно и количественно адекватных результатов вычислительного эксперимента для задач геомеханики возможно только с комплексным учетом широкого спектра характеристик математической модели, ряд которых должен проходить оптимизацию для каждой серии выполняемых расчетов и обеспечивать при этом сходимость вычислений с низкими значениями привносимых погрешностей.

Процесс актуализации расчетной схемы вычислительного эксперимента представлен в виде блок-схемы (рис. 2.1) и состоит из трех основных этапов, непосредственно предшествующих выполнению вычислительного эксперимента:

- создание геометрических объектов;

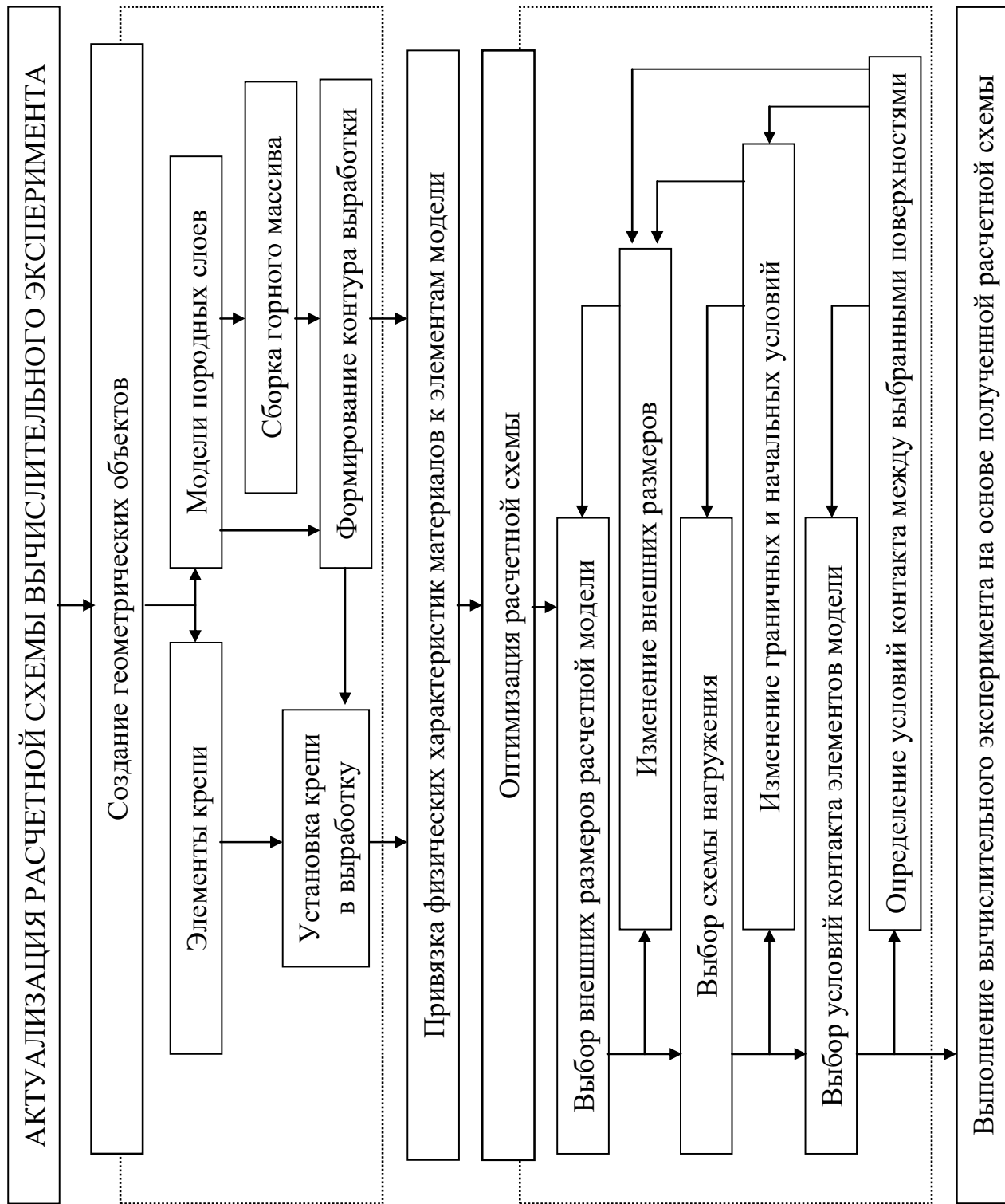


Рис. 2.1 – Блок-схема вычислительного эксперимента



– привязка физических характеристик материалов к элементам модели;

– оптимизация расчетной схемы.

Рассмотрим подробнее процедуру создания геометрических объектов. Вначале параллельно создаются модели элементов крепи и породных слоев, используемых при сборке модели горного массива. Вид элементов крепи и их качественная составляющая в расчетной схеме прямо зависит от выбора метода решения задачи (в линейной или нелинейной постановке), оценки продольной составляющей НДС горной выработки и степени необходимой точности получаемых результатов в зоне горного массива, непосредственно примыкающей к контуру выработки.

Процесс создания моделей породных слоев основывается на выборе глобальных условий контакта между поверхностями различных геометрических элементов выбираемой расчетной схемы. Если модель горного массива состоит из нескольких модельных слоев (их число может превышать число породных слоев) приходится производить так называемую сборку горного массива. Сборка заключается в создании пространственной модели, описывающей горно-геологические условия в зоне влияния выработок и устанавливающая границы расчетной зоны конкретной задачи. В случае, когда модель горного массива рассматривается как однородная, этап сборки горного массива не требуется и происходит переход непосредственно к формированию контура горной выработки.

Формирование контура выработки определяет условия установки элементов крепи. Кроме того, происходит привязка выработок и их сопряжений к горно-геологической структуре горного массива. Структурно-логические ошибки, возникающие при формировании

контура выработки, приводят к невозможности правильного сопряжения поверхностей элементов крепи и горного массива.

В конце первого этапа происходит совмещение элементов крепи с контуром выработки. Этот этап достаточно трудоемок и в значительной мере является определяющим при решении задач с изменяющейся поверхностью контакта. Если в расчетах не планируется использование элементов крепи, как частей расчетной схемы, блоки «Элементы крепи» и «Установка крепи в выработку» игнорируются.

Второй этап актуализации расчетной схемы не обладает ярко выраженной структуризацией и, по сути, заключается в двух неоднократно выполняемых операциях – формирование библиотечных модулей описания свойств материалов и привязывание свойств материалов к конкретным элементам расчетной схемы. На этом этапе определяется тип задачи (линейная, нелинейная и т.п.), на основе которого будет проводиться последующий вычислительный эксперимент. Если при оптимизации расчетной схемы возникнет необходимость изменить тип задачи, придется повторно разработать библиотеки материалов и выполнить привязку свойств материалов к элементам расчетной схемы.

Наиболее трудоемкий и требующий высокого уровня профессиональной подготовки этап – оптимизация расчетной схемы. Он состоит из трех взаимосвязанных шагов, каждый из которых реализует один и тот же алгоритм действий, применяемых к различным показателям расчетной схемы. Суть данного алгоритма состоит в следующем: задаем конкретные значения выбранных показателей (для первой итерации выбираем значения исходя из предыдущего опыта); выполняем тестовый расчет; если результат расчета удовлетворителен, переходим к оптимизации следующей группы параметров; при неудовлетворительном результате проводим дополнительный анализ

полученных данных и на его основании выбираем новые значения анализируемых показателей; возвращаемся к началу цикла.

Оптимизация параметров внешних размеров модели заключается в выборе таких значений высоты, ширины и глубины, при которых влияние граничных условий на результат вычислительного эксперимента минимизируется, с одной стороны, а с другой, – минимизируется шаг приращения при определении расчетных точек. И схема нагружения, и условия контакта элементов модели оптимизируются на основании снижения локальных возмущений, проявляющихся в зонах сопряжения элементов модели и поверхностей, воспринимающих внешние нагрузки.

В заключении, созданная расчетная схема, полностью или в своей основе удовлетворяющая условиям постановки задачи, используется как основа выполнения вычислительного эксперимента. Любые изменения расчетной модели в ходе вычислительного эксперимента находятся в пределах работ по ее актуализации и носят частный характер, обуславливаемый особенностями конкретного вычислительного эксперимента. В случае, когда вычислительный эксперимент нельзя выполнить в полном объеме при существующей расчетной схеме, такая схема рассматривается как неадекватная и требует повторной актуализации.

### **3 МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА И ХАРАКТЕРИСТИКА ЭТАПОВ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТКАХ**

Стабильность функционирования угольной шахты во многом определяется состоянием подземных горных выработок, среди которых в наиболее сложных (с точки зрения интенсивности проявлений горного давления) условиях эксплуатируются пластовые (участковые и основные подготовительные) выработки, находящиеся в непосредственной технологической связи с очистными работами. Эта группа выработок уже по своему назначению размещается в весьма разнообразной по свойствам слоистой геологической структуре, которая для условий шахт Западного Донбасса еще отличается слабыми прочностными характеристиками пород. Поэтому обеспечение надлежащего эксплуатационного состояния подготовительных выработок, например, шахт Западного Донбасса, является важной технической задачей.

С другой стороны, в понятие «эксплуатационное состояние выработки» специалисты вкладывают комплекс вопросов, связанных в первую очередь с устойчивостью крепи, безопасностью передвижения людей и транспортных средств, надежностью схем проветривания участков шахтного поля. На основании учета этих факторов проектировщиками принимается решение о выборе наиболее рационального типового сечения выработки, в процессе которого необходимо достаточно надежно спрогнозировать эпюру перемещений ее контура под воздействием горного давления и оценить соблюдение комплекса конструктивно-технологических норм и требований правил безопасности.

В настоящее время в нормативных документах прогноз перемещений контура выработки осуществляется в интегральной форме (перемещения постоянные и усреднены по участкам контура выработки:

кровля, бока и почва), на основании которого выбирается типоразмер крепи и выработки в целом, а оценка выполнения всего комплекса требований по обеспечению дальнейшего надлежащего эксплуатационного состояния выработки вплоть до ее погашения не проводится по всему ее периметру (с учетом реально существующей неравномерной эпюрой перемещений): допустимые перемещения контура крепи, допустимые зазоры при движении транспорта, допустимые расстояния для прохода людей, допустимая потеря сечения при движении вентиляционной струи и т.п. (рис. 3.1).

Поэтому, разработка методики прогноза эпюры перемещений контура пластовой выработки, расположенной в слоистом массиве слабых пород, для комплексной оценки ее эксплуатационного состояния является, безусловно, актуальной задачей повышения эффективности работы угольных шахт.

Задача прогноза проявлений горного давления в окрестности подземной выработки имеет практически более чем вековую историю и активно совершенствуется до настоящего времени в направлении более адекватного отражения реальных геомеханических процессов. В ее решение внесли значительный вклад ученые и специалисты ведущих научно-исследовательских, учебных, проектно-конструкторских и производственных организаций: НГУ, ИГТМ НАН Украины, ДонУГИ, ДонНТУ, ГОАО «Днепрогипрошахт», ОАО «Павлоград-уголь», ДонГТУ, КТУ, МГГУ, ВНИМИ, СПбГУ, ИГД СО РАН, ФГУП «НЦЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского» и др.

Высокая интенсивность проявлений горного давления на шахтах Западного Донбасса связывается специалистами со слабыми прочностными свойствами пород слоистой углевмещающей толщи, а перспективы развития этого региона с расширением освоения месторождения угля в Западном направлении и переходом на более глубокие

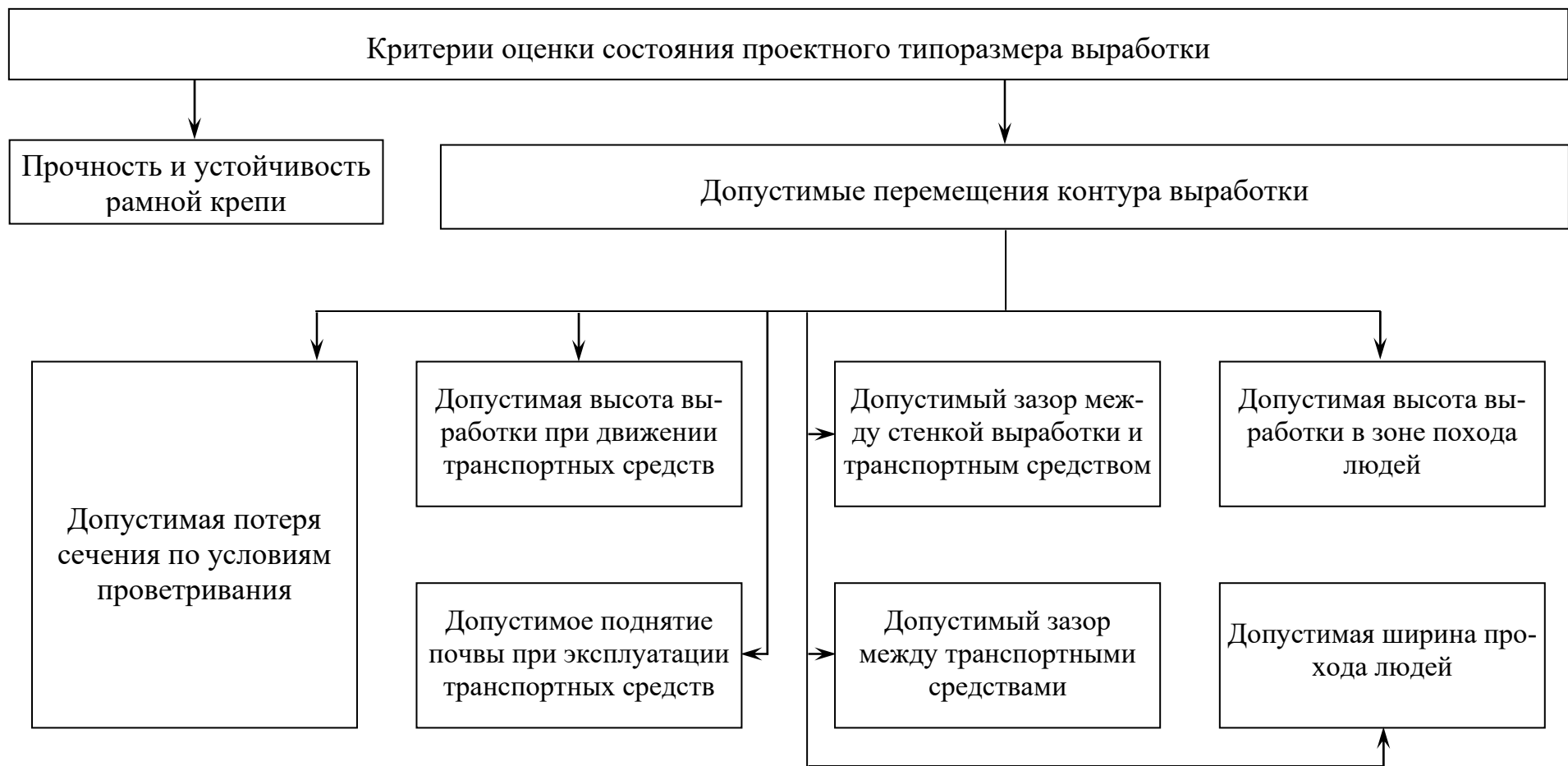


Рис. 3.1 – Структурная схема комплекса критериев оценки состояния выработки

горизонты в действующих шахтах с усложнением горно-геологических условий однозначно указывают на возрастающую актуальность прогнозирования состояния в окрестности выработки породного массива для обоснованного принятия технических решений по обеспечению надежного ее функционирования.

С другой стороны, существующие нормативные методики расчета проявления горного давления (в которых накоплены и систематизированы результаты обширных экспериментальных исследований) нацелены, в конечном итоге, на выбор крепи горной выработки, обеспечивающей ее устойчивость, а прогнозирование равномерного по участкам породного контура выработки (кровля, бока, почва) перемещения не соответствует наблюдаемой в шахтных условиях существенно неравномерной эпюре смещений пород на этих участках. Задача ставится более комплексно – прогнозировать в целом эксплуатационное состояние пластовой выработки, где оценка ее устойчивости является лишь одним из факторов. Не менее важной является оценка надежности и безопасности передвижения людей и транспортных средств, схем проветривания соответствующих участков шахтного поля. Указанные факторы требуют прогнозирования перемещений не отдельных участков породного контура выработки, а эпюры перемещений ее внутреннего контура в любой точке периметра. Тогда выполнение любого требования эксплуатационных норм и правил безопасности легко оценить при сравнении прогнозируемых эпюр перемещений внутреннего контура выработки и размеров принятого проектом конкретного типового сечения с соответствующими нормируемыми зазорами, расстояниями и площадями поперечного сечения.

Такая комплексная постановка задачи требует максимально адекватного отражения процессов сдвижения слоистого массива слабых пород в окрестности пластовой выработки, а именно: учет совместно-

сти деформирования массива и крепи реальной пространственной геометрии с межрамным ограждением и забутованным закрепным пространством; моделирование максимально приближенной к существующей структуре слоистой углевмещающей толщи с неоднородными механическими характеристиками и нарушенными контактами между слоями в окрестности выработки; учет параметров полной диаграммы деформирования каждого из элементов системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки».

Исследованиями [1] обоснована геомеханическая модель деформирования системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» и получены следующие результаты.

Во-первых, для условий шахт Западного Донбасса обоснован весь комплекс исходных горно-геологических и горнотехнических параметров для максимально достоверного (в свете приведенных выше требований) моделирования процессов сдвижения слоистой углевмещающей толщи в окрестности пластовой выработки. Размеры модели выбраны с учетом незначительного влияния выработки на ее границах, где выполняются исходные негидростатические условия распределения вертикальных  $\sigma_y$  и горизонтальных  $\sigma_x$  компонент напряжений. Установлено, что при слабых связях между соседними слоями действующие касательные напряжения  $\tau_{xy}$  их разрушают в окрестности выработки и смежные породные слои деформируются с проскальзыванием друг относительно друга. Этот фактор существенно изменяет поле напряжений и учтен в разработанной модели, тестирование которой на предмет соответствия результатов расчета современным представлениям геомеханики сдвижения массива вокруг выработки подтвердило целесообразность использования модели.

Во-вторых, для условий Западного Донбасса по стратиграфиче-



ским колонкам рабочих угольных пластов построено три наиболее характерных (87...92% случаев) структуры угле вмещающей толщи (исключая тонкие прослойки мощностью 0,05...0,3 м), анализ поля напряжений в которых позволил с достаточной для горнотехнических расчетов точностью обосновать единую усредненную структуру (рис. 3.2), погрешность которой не превышает 10% во всем диапазоне изменения геомеханических параметров вмещающего массива. Произведен расчет группы тестовых моделей по вариантам размещения выработки относительно угольного пласта и другим фиксируемым параметрам для выбора их значений, формирующих НДС системы в пределах допустимой погрешности.

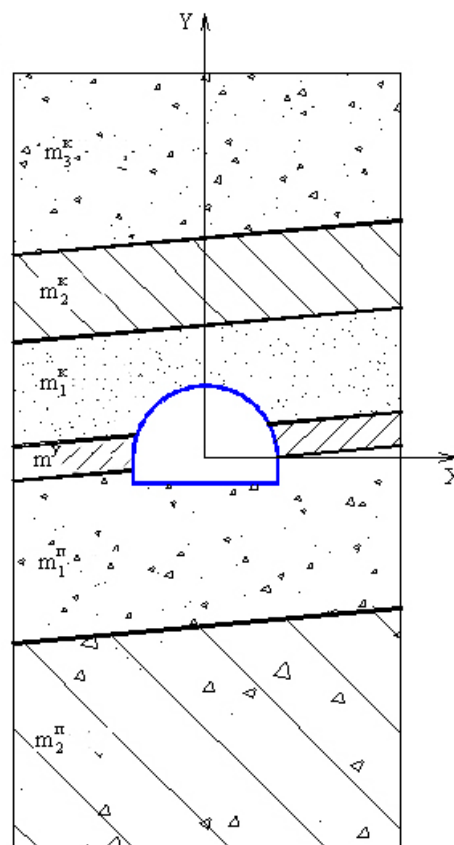


Рис. 3.2 – Модель усредненной структуры угле вмещающей толщи пород Западного Донбасса

В-третьих, оценено влияние деформационных характеристик близлежащих породных слоев на НДС системы и установлено, что несмотря на их различные сочетания (27 вариантов) в кровле и почве пластовой выработки размеры зон предельного состояния (в основном от действия растягивающих  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$ ) достаточно стабильны и охватывают два породных слоя в кровле и один – в почве. В боках выработки наблюдается ярко выраженная область опорного давления от действия сжимающих напряжений, размеры которой определяются глубиной разработки и прочностными характеристиками близлежащих породных слоев. В рамной крепи снижение приведенных напряжений  $\sigma$  (по которым производится ее прочностной расчет) происходит в случае залегания в непосредствен-

ной кровле хотя бы одного породного слоя повышенной жесткости.

Вторая задача исследований – расчет НДС системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» – выполнена [2] при условии нарушенных контактов между слоями и моделирования полных диаграмм деформирования всех составляющих элементов: для каждого из породных слоев и угольного пласта модели использована общепринятая в геомеханических задачах полная диаграмма, состоящая из трех линейных участков (упруго-пластическая стадия с модулем деформации  $E$ , разупрочнение с модулем спада  $M$ , разрыхление на стадии «руинного» разрушения с остаточной прочностью  $\sigma_{сж}^0$ ); для рамной крепи использована реальная диаграмма нагружения стали Ст5, учитывающая площадку текучести и стадию упрочнения; полная диаграмма породной забутовки в закрепном пространстве определена на основе существующих шахтных экспериментов. Выполнен обширный комплекс расчетов по 27 вариантам сочетаний модуля деформации  $E_i^{K,П}$  близлежащих породных слоев, 27 вариантам сочетаний расчетного сопротивления сжатию  $\sigma_{сж_i}^{K,П}$  (с учетом понижающих коэффициентов на различного рода ослабляющие факторы в массиве в соответствии с нормативными методиками), 64 вариантам сочетаний параметров  $M_i^{K,П} / E_i^{K,П}$  и  $(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0 / \sigma_{сж_i}^{K,П}$  (индексы  $i = 1, 2$  нумеруют породные слои начиная от угольного пласта, а индексы « $K, П$ » обозначают принадлежность слоев к кровле или почве). В итоге исследований получены следующие результаты [1, 2]:

– различные сочетания прочностных и деформационных характеристик по каждому из близлежащих породных слоев обуславливают разную степень их влияния на изменение поля напряжений и перемещений с ростом глубины  $H$  расположения выработки. Определяющим фактором является вид состояния близлежащих породных слоев и

угольного пласта при конкретной величине  $H$  (допредельное, предельное, запредельное): при повышенных прочностных характеристиках близлежащих породных слоев их частично допредельное состояние предопределяет связь напряжений и перемещений с параметром  $H$ , близкую к линейной; вариация  $E_i^{K,II}$  в интервале  $(0,3...1) \cdot 10^4$  МПа изменяет напряжения до 55%, а перемещения до 131%; при пониженных прочностных характеристиках зависимость НДС массива от параметра  $H$  становится существенно нелинейной с наступлением предельного состояния хотябы одного из близлежащих породных слоев, в запредельном состоянии рост перемещений усиливается, а напряжений уменьшается; при этом деформационные характеристики слоев несущественно влияют на поле напряжений, а смещения контура выработки, особенно в ее почве, могут изменяться до 2,5 раз и в некоторых вариантах на глубинах  $H = 500...600$  м происходит существенное заполнение разупрочненной породой полости выработки;

– НДС рамной крепи и закономерности его изменения с ростом  $H$  являются нелинейными, особенно при переходе близлежащих породных слоев в запредельное состояние; затухание роста функции обусловлено появлением и увеличением зон пластических деформаций в раме; этот процесс стабильно начинается в нижней части стоек рамы (они изгибаются в полость выработки) и распространяется с ростом  $H$  почти на весь ее контур (за исключением локальных областей допредельного состояния в своде); образование системы пластических шарниров по контуру рамной крепи способствует (в ряде вариантов) развитию таких ее перемещений, которые исключают возможность дальнейшей эксплуатации выработки. Поэтому для обоснованного выбора рамной крепи пластовой выработки необходимо установить связи ее НДС с основными влияющими геомеханическими параметрами.

Эта задача исследований реализована в настоящей книге на базе

установленных закономерностей посредством корреляционно-дисперсионного анализа результатов расчета НДС системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» по сформированной многофакторной базе обширного массива различных вариантов сочетаний геомеханических параметров. Для полноценного анализа учтены еще два фактора – переменная площадь сечения выработки и ее форма, зависящая от типа применяемой рамной крепи в пластовых выработках шахт Западного Донбасса: КМП-А3 или КШПУ. С целью всестороннего охвата диапазона изменения типовых сечений участковых и основных подготовительных выработок был проведен весь комплекс предыдущих расчетов НДС системы для шести типоразмеров: КМП-А3-9,2; 13,8; 18,3 и КШПУ-9,5; 14,4; 17,7. При этом выявлен ряд особенностей связи эпюры перемещений с площадью поперечного сечения выработки в свету до осадки  $S_{ce}$  и видом применяемой крепи:

– установлена устойчивая степенная закономерность связи  $S_{ce}$  с перемещениями всех участков внутреннего контура выработки с переменным показателем степени на разных участках этого контура, что принципиально отличается от методологии нормативных документов, где  $S_{ce}$  учитывается линейно возрастающим поправочным коэффициентом, а вид крепи (КМП-А3 или КШПУ) единым коэффициентом ее работоспособности на все горно-геологические условия поддержания выработки;

– выявлены отличия в величине и интенсивности роста перемещений (с увеличением  $S_{ce}$ ) для видов крепей серии КШПУ в сравнении с КМП-А3: пониженная в кровле за счет уменьшенного радиуса свода верхняка и криволинейной части стойки; повышенная в боках и, особенно, в опорах стоек рамы за счет увеличенной длины стоек и высоты выработки в целом; повышенное вдавливание стоек рамы в поч-

ву; примерно одинаковая величина максимума пучения почвы;

– указанные особенности развития перемещений для крепей серии КМП-А3 и КШПУ преимущественно компенсируют друг друга (максимум отклонений 10,6%) при расчете относительной потери сечения  $\Delta S_{ce} / S_{ce}$  и наблюдается стабильная закономерность  $\Delta S_{ce} / S_{ce}(H)$  с практически постоянным показателем степени для разных типоразмеров сечения и видов применяемых крепей. Поэтому относительная величина потери сечения фактически определяется только глубиной расположения выработки и механическими характеристиками близлежащих породных слоев.

В итоге получены уравнения регрессии для расчета перемещений всех участков внутреннего контура выработки, по которым оценивается ее эксплуатационная пригодность.

Оценка достоверности методики прогноза перемещений контура крепи выработки выполнена по параметрам  $U_{ce}^y$ ,  $U_{np}^x$  и  $U_{поч}^y$ , сравниваемых с соответствующими равномерно распределенными перемещениями в кровле, боках и почве по действующим нормативным методикам и наиболее известным аналитическим методам расчета по полной диаграмме деформирования породы. Сравнительный анализ показал, что, благодаря учету основных механических характеристик полной диаграммы деформирования всех элементов системы, предлагаемая методика обладает достаточно высокой общностью прогноза перемещений контура пластовой выработки.

При реализации четвертой задачи исследований выделены четыре основных позиции надежной и безопасной эксплуатации пластовой выработки в соответствии с требованиями нормативных документов: устойчивость рамной крепи; условия безопасного движения транспортных средств; условия безопасного прохода людей; надежная

вентиляция участков шахтного поля. Для каждой из позиций сформулирован комплекс критериев в виде системы из 13 неравенств, в которые расчетными параметрами входят величины прогнозируемых перемещений и относительной потери сечения выработки по установленным зависимостям. Итоговый результат исследований представлен в виде алгоритма многофакторной оценки выбранного проектом типового сечения пластовой выработки в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях ее эксплуатации.

#### **4 ЗАКОНОМЕРНОСТИ СВЯЗИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ВЫРАБОТКИ С ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ»**

В первую очередь следует подчеркнуть, что задача оценки устойчивости пластовой выработки ставится в более широком понимании в сравнении с традиционно принятыми представлениями: необходимо прогнозировать ее состояние в плане сохранения (или потери) эксплуатационных характеристик по комплексу конструктивно-технологических норм надежного функционирования выработки с учетом соответствующих требований правил безопасности, оценка выполнения которых производится по эпюрам прогнозируемых перемещений контура выработки и сравнения с допустимыми перемещениями на определенных участках ее периметра. Если не выполняются требования надежного и безопасного функционирования выработки, то вопрос ее устойчивости, как искусственного горнотехнического сооружения, приобретает первостепенное значение, так как дальнейшая эксплуатация выработки недопустима без проведения определенных ремонтно-восстановительных работ.

Для реализации данного подхода необходимо разработать методику прогноза перемещений любой точки контура пластовой выработки, то есть определение эпюры перемещений ее поперечного сечения. Необходимость расчета эпюры перемещений по всему контуру поперечного сечения связана с тем, что различные требования надежного и безопасного функционирования выработки касаются различных участков ее периметра. С другой стороны, существующие нормативные методики [41-43] дают только усредненный прогноз перемещений в целом по кровле, бокам и почве выработки, хотя шахтные наблюдения

указывают на крайнюю неравномерность сдвижения углевмещающей толщи на каждом из отмеченных участков контура выработки.

В предыдущих публикациях [1, 2] изложены тенденции влияния на поле напряжений и перемещений в системе «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» основных геомеханических факторов: прочностных и деформационных характеристик углевмещающей толщи, а также глубины расположения выработки. Выявлено, что определенное сочетание этих факторов предопределяет вид состояния (допредельное, предельное, запредельное) близлежащих породных слоев и угольного пласта, который, в свою очередь, оказывает решающее воздействие на развитие эпюры смещений контура выработки. Поэтому главная задача настоящего раздела заключается в установлении закономерностей связи эпюры смещений контура выработки с основными геомеханическими факторами с целью последующей разработки методики прогноза проявлений горного давления и оценки выполнения эксплуатационных требований правил безопасности и устойчивости пластовой выработки, сооружаемой в слоистом массиве слабых пород.

#### **4.1 Методика проведения вычислительного эксперимента**

Для построения эпюры смещений по контуру выработки выделен ряд точек, совпадающих с узлами конечно-элементной сетки (рис. 4.1). Эти точки пронумерованы от 1 до 22 по движению часовой стрелки и принципы их расположения продиктованы стремлением, с одной стороны, получить наиболее точную эпюру перемещений контура выработки  $U(x, y)$ , а с другой, – ограничить объем измерений:

– принята симметричная относительно вертикальной оси выработки схема расположения замерных точек для выявления возможной



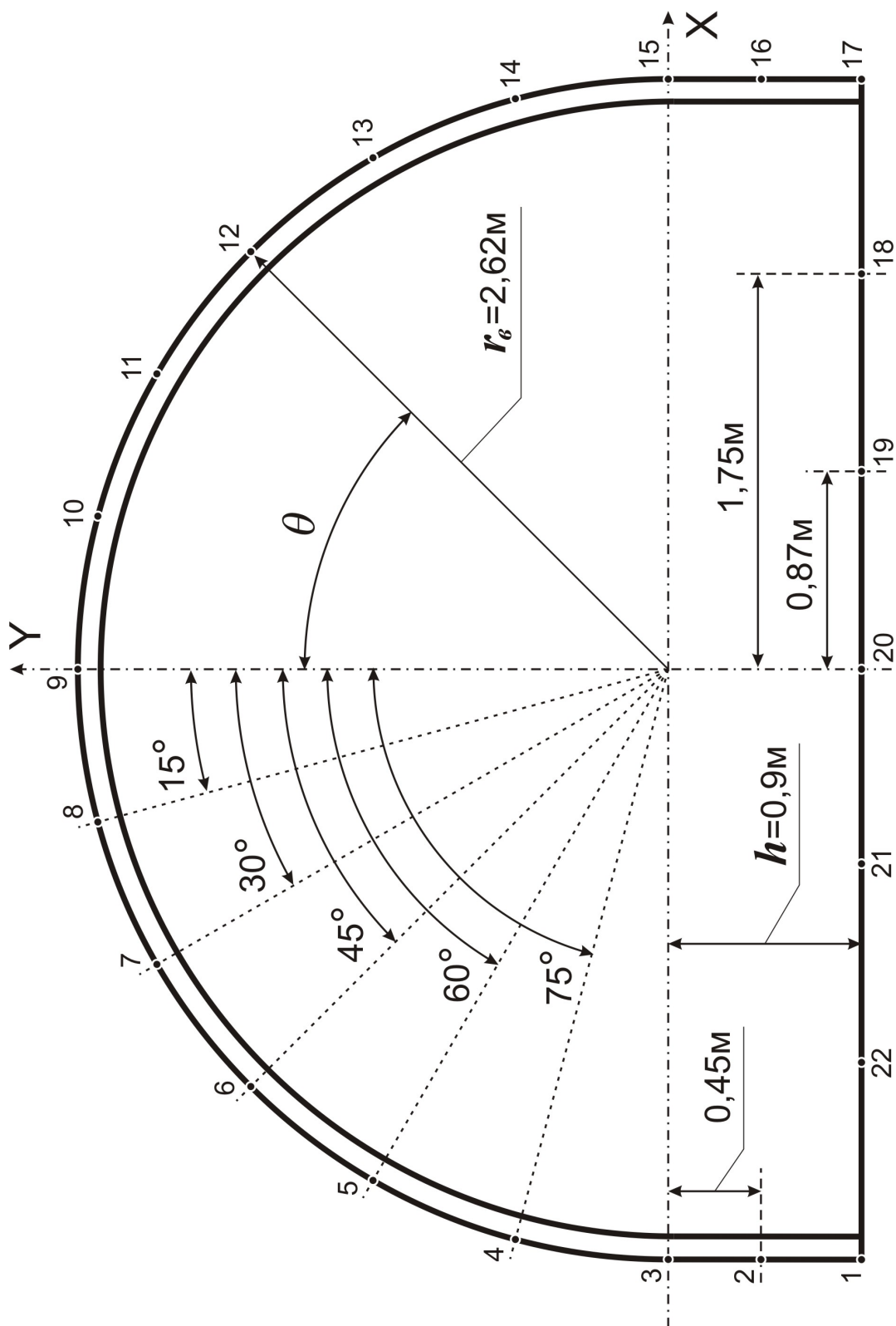


Рис. 4.1 – Схема расположения измерных точек по контуру выработки

асимметрии эпюры  $U(x, y)$ , обусловленной пологом  $\alpha \leq 6^\circ$  падением угольного пласта;

– в своде рамы замерные точки расположены равномерно через каждые  $15^\circ$  в интервале  $\theta = 0 \dots 90^\circ$ ;

– в прямолинейной части стойки рамы размещены три замерные точки (в опоре стойки, конце ее прямолинейного участка и по его середине) для более точного выявления ее изгиба;

– по ширине почвы выработки замерные точки размещены равномерно для более наглядного отображения неравномерного характера пучения пород почвы.

Результаты замеров эпюры смещений контура выработки представляются для анализа следующим образом (рис. 4.2).

Во-первых, для каждого из вариантов расчета строится новый контур выработки (соответствующий какому-либо фиксированному значению глубины ее расположения) и определяется площадь сечения  $S$  выработки внутри ее изменившегося контура. Зная первоначальную площадь поперечного сечения выработки  $S_o$ , определяется безразмер-

ный параметр  $\frac{S}{S_o}$  – относительное изменение площади поперечного

сечения пластовой выработки, который нередко используется в современных исследованиях [44, 45] для оценки устойчивости выработки и степени ее пригодности для дальнейшей эксплуатации, в том числе, по факторам транспорта и эффективности проветривания участка шахтного поля.

Во-вторых, существует ряд ограничений на допустимую величину смещения контура выработки (на разных участках ее периметра) исходя из комплекса требований ее надежной и безопасной эксплуатации [46, 47], например, допустимая величина вертикальной и

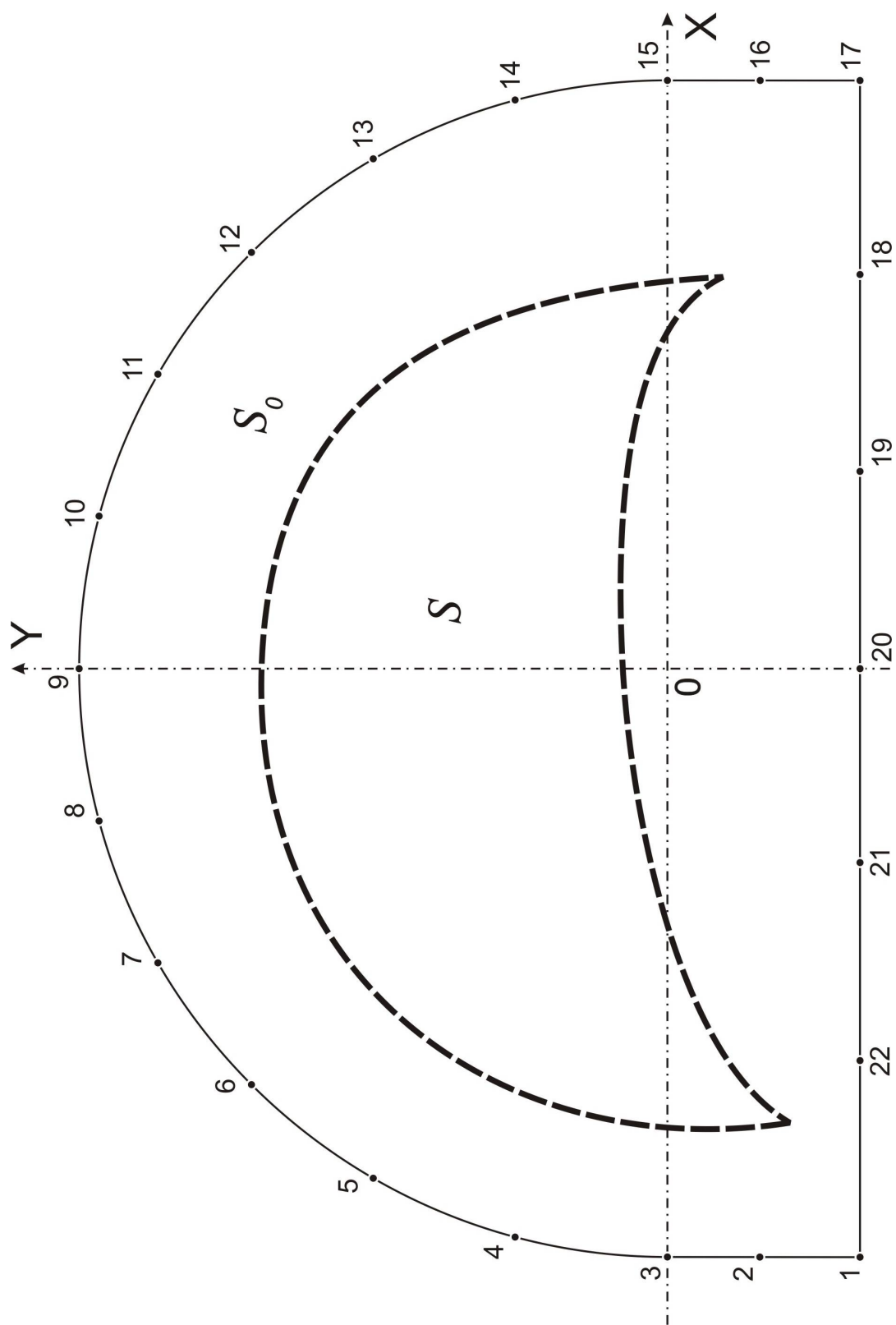


Рис. 4.2 – Схема к выполнению анализа результатов замера смещений контура выработки

боковой податливости крепи; минимально допустимые зазоры для безопасного прохода людей и движения подвижного состава, других транспортных средств; максимально допустимая (с точки зрения сохранности рельсового пути) величина пучения пород почвы и др. Эти требования отчасти индивидуальны в зависимости от типа и назначения выработки. Поэтому, отдельно от параметра  $\frac{S}{S_0}$ , необходимо установить закономерности изменения смещений контура выработки в следующих точках (см. рис. 4.1):

- точка 9 – максимальное опускание свода кровли;
- точка 20 – максимальное поднятие почвы;
- точки 4, 14 и 5, 13 – сближение боков выработки в зоне прохода людей;
- точки 1, 17 – сближение боков выработки по ее почве, а также вдавливание опор стоек рамы в почву;
- точки 18, 22 – поднятие почвы в зоне прохода людей.

Такая методика исследований потребовала проведения комплекса дополнительных расчетов для обеспечения достоверных результатов на всем диапазоне изменения геомеханических параметров (в том числе характеристик запредельного состояния) пластовых выработок шахт Западного Донбасса. Поэтому, в дополнение к уже выполненным расчетам [1, 2] произведена оценка степени влияния параметров

$$\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,II})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,II}} \text{ и } \frac{M_i^{K,II}}{E_i^{K,II}}$$

запредельного состояния каждого из слоев.

Первая особенность связи эпюры перемещений контура выработки с механическими характеристиками углевмещающей толщи состоит в том, что наблюдаются стабильные закономерности изменения функции  $U(x, y) = \Phi(E_i^{K,II})$  вне зависимости от параметров  $\sigma_{сж_i}^{K,II}$ ,

$\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$  и  $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$  предельного и запредельного состояния породных

слоев. Это позволяет представить эпюру перемещений контура выработки как функцию двух сомножителей

$$U(x, y) = \Phi_1(E_i^{K,П}) \cdot \Phi_2 \left[ \sigma_{сж_i}^{K,П}, \frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}, \frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}} \right]. \quad (4.1)$$

В свою очередь, вид функции  $U(x, y)$  по уравнению (4.1) создает возможность раздельного исследования функций  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ : расчеты НДС системы по установлению функции  $\Phi_1$  были проведены в работах [1, 2]; результаты расчетов НДС системы по установлению функции  $\Phi_2$  изложены в настоящем разделе и позволяют осуществить моделирование только одного ( $E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4$  МПа) из 27 вариантов табл. 4.1 соотношения модулей деформации слоев угле вмещающей толщи; остальные варианты учитываются функцией  $\Phi_1$ .

Варианты соотношения модулей деформации близлежащих породных слоев угле вмещающей толщи

Таблица 4.1

Вариант	$E_1^П \cdot 10^4$ МПа	$E_1^K \cdot 10^4$ МПа	$E_2^K \cdot 10^4$ МПа	Вариант	$E_1^П \cdot 10^4$ МПа	$E_1^K \cdot 10^4$ МПа	$E_2^K \cdot 10^4$ МПа	Вариант	$E_1^П \cdot 10^4$ МПа	$E_1^K \cdot 10^4$ МПа	$E_2^K \cdot 10^4$ МПа
1	0,3	0,3	0,3	10	0,3	0,3	1	19	0,3	1	0,6
2	0,3	0,6	0,3	11	0,6	0,3	1	20	0,6	1	0,6
3	0,3	1	0,3	12	0,6	0,6	1	21	1	1	0,6
4	0,6	0,6	0,3	13	0,3	0,6	1	22	0,3	0,3	0,6
5	1	0,6	0,3	14	0,3	1	1	23	0,6	0,3	0,6
6	0,6	1	0,3	15	0,6	1	1	24	1	0,3	0,6
7	1	1	0,3	16	1	0,3	1	25	0,3	0,6	0,6
8	1	0,3	0,3	17	1	0,6	1	26	0,6	0,6	0,6
9	0,6	0,3	0,3	18	1	1	1	27	1	0,6	0,6

Вторая особенность (по результатам расчетов в [2] и дополнительной оценке влияния характеристик предельного состояния) однозначно указывает на взаимовлияние параметров  $\sigma_{сж_i}^{K,П}$ ,  $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$  и  $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$  на функцию  $U(x, y)$ , которое невозможно разделить по аналогии с уравнением (4.1). Тогда в базу вариантов расчета настоящего раздела следует включать все 27 вариантов соотношений  $\sigma_{сж_i}^{K,П}$  угле-вмещающей толщи по табл. 4.2. Однако, установлено, что вся гамма закономерностей развития смещений  $U(x, y)$  в предельном и предельном состояниях с точностью до 10 % описывается восемью наиболее «разнополюсными» вариантами по параметру  $\sigma_{сж_i}^{K,П}$  из табл. 4.2: №№1, 3, 7, 8, 10, 14, 16, 18. Это позволяет более чем в три раза сократить объем вычислений.

Варианты расчетного предела прочности на одноосное сжатие  
 близлежащих породных слоев угле-вмещающей толщи

Таблица 4.2

Вариант	$(\sigma_{сж}^П)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^К)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^К)_2$ МПа	Вариант	$(\sigma_{сж}^П)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^К)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^К)_2$ МПа	Вариант	$(\sigma_{сж}^П)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^К)_1$ МПа	$(\sigma_{сж}^К)_2$ МПа
1	5	5	5	10	5	5	20	19	5	20	10
2	5	10	5	11	10	5	20	20	10	20	10
3	5	20	5	12	10	10	20	21	20	20	10
4	10	10	5	13	5	10	20	22	5	5	10
5	20	10	5	14	5	20	20	23	10	5	10
6	10	20	5	15	10	20	20	24	20	5	10
7	20	20	5	16	20	5	20	25	5	10	10
8	20	5	5	17	20	10	20	26	10	10	10
9	10	5	5	18	20	20	20	27	20	10	10

Далее выполнено обоснование диапазона изменения и выбранных фиксированных значений параметров запредельного состояния

$$\frac{(\sigma_{сжi}^{K,П})^0}{\sigma_{сжi}^{K,П}} \text{ и } \frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$$
 породных слоев углевмещающей толщи.

Исследованиями [48-51] установлено, что в слабых углевмещающих породах (в основном Западного района Донбасса) остаточная прочность на сжатие  $(\sigma_{сжi}^{K,П})^0$  составляет 10...20% от прочности на сжатие целостного образца  $\sigma_{сжi}^{K,П}$ . Для охвата данного диапазона проведены расчеты НДС системы при различных сочетаниях остаточной прочности каждого из близлежащих породных слоев для двух фиксированных значений  $\frac{(\sigma_{сжi}^{K,П})^0}{\sigma_{сжi}^{K,П}} = 0,1$  и  $0,2$ , которые сведены в табл. 4.3.

$$\frac{(\sigma_{сжi}^{K,П})^0}{\sigma_{сжi}^{K,П}} = 0,1 \text{ и } 0,2, \text{ которые сведены в табл. 4.3.}$$

Варианты соотношений параметра  $\frac{(\sigma_{сжi}^{K,П})^0}{\sigma_{сжi}^{K,П}}$  близлежащих породных слоев углевмещающей толщи

Таблица 4.3

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
$\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
$\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2

Что касается параметра  $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$  ниспадающей ветви полной диаграммы деформирования породы, то вышеуказанные исследования механических свойств слабых глинистых, песчано-глинистых и песчаных сланцев Западного Донбасса дают достаточно ограниченный

интервал изменения  $\frac{M_i^{K,\Pi}}{E_i^{K,\Pi}} = 0,5...3$ . Более пластичные глинистые сланцы имеют пониженный (усредненный по ниспадающей ветви) модуль спада ( $\frac{M}{E} = 0,5...1,5$ ), песчанистые сланцы склонны к более хрупкому разрушению ( $\frac{M}{E} = 2...3$ ), а песчано-глинистые сланцы занимают промежуточное значение. В этой связи принято ранее рассчитывать НДС системы для группы вариантов, где параметр  $\frac{M_i^{K,\Pi}}{E_i^{K,\Pi}}$  зафиксирован двумя значениями 0,5 и 3 для каждого из близлежащих слоев углевмещающей толщи (табл. 4.4).

Варианты соотношений параметра  $\frac{M_i^{K,\Pi}}{E_i^{K,\Pi}}$  близлежащих породных слоев углевмещающей толщи

Таблица 4.4

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{M_2^K}{E_2^K}$	0,5	0,5	0,5	0,5	3	3	3	3
$\frac{M_1^K}{E_1^K}$	0,5	0,5	3	3	0,5	0,5	3	3
$\frac{M_1^\Pi}{E_1^\Pi}$	0,5	3	0,5	3	0,5	3	0,5	3

Кроме того, в работе [2] просчитана группа вариантов при  $\frac{M_i^{K,\Pi}}{E_i^{K,\Pi}} = 1,3$ , которые занимают промежуточное значение по исследуемому параметру. Эти расчеты совместно с дополнительными (при необходимости более точного установления закономерностей связи  $U(x, y)$  и механических характеристик углевмещающей толщи) ис-



пользованы в разрабатываемой методике прогноза эпюры перемещений контура пластовой выработки.

#### 4.2 Влияние геомеханических параметров углевмещающего массива на смещения кровли выработки

В соответствии с методикой проведения исследований выполнен комплекс расчетов НДС системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки», результаты которых наиболее наглядно проиллюстрированы семейством графиков опускания кровли штрека (по вертикальной координате  $Y$ ) в зависимости от геомеханических

параметров:  $H$ ,  $E_i^{K,П}$ ,  $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$ ,  $\sigma_{сжi}^{K,П}$  и  $\frac{(\sigma_{сжi}^{K,П})^0}{\sigma_{сжi}^{K,П}}$ . Наибольший интерес

представляет максимум вертикальных перемещений в замке свода  $U_9^y$  и в зоне прохода людей ( $U_4^y, U_5^y, U_{13}^y$  и  $U_{14}^y$ ).

На рис. 4.3 приведены зависимости роста перемещений замка свода  $U_9^y$  с увеличением глубины разработки. Функции  $U_9^y(H)$  имеют нелинейный характер: по мере роста  $H$  смещения  $U_9^y$  увеличиваются более интенсивно, что обусловлено ростом зон запредельного состояния в близлежащих породных слоях. На величину опускания замка свода наибольшее влияние оказывает модуль деформации  $E_1^K$  первого породного слоя кровли: увеличение его жесткости ограничивает смещения  $U_9^y$  до 1,69 раза. Меньшее влияние оказывает модуль деформации  $E_2^K$  второго породного слоя кровли: при его увеличении от  $0,3 \cdot 10^4$  МПа до  $1 \cdot 10^4$  МПа смещение  $U_9^y$  уменьшается до 11%. Влияние модуля деформации  $E_1^П$  первого породного слоя почвы не превышает 7,2%.

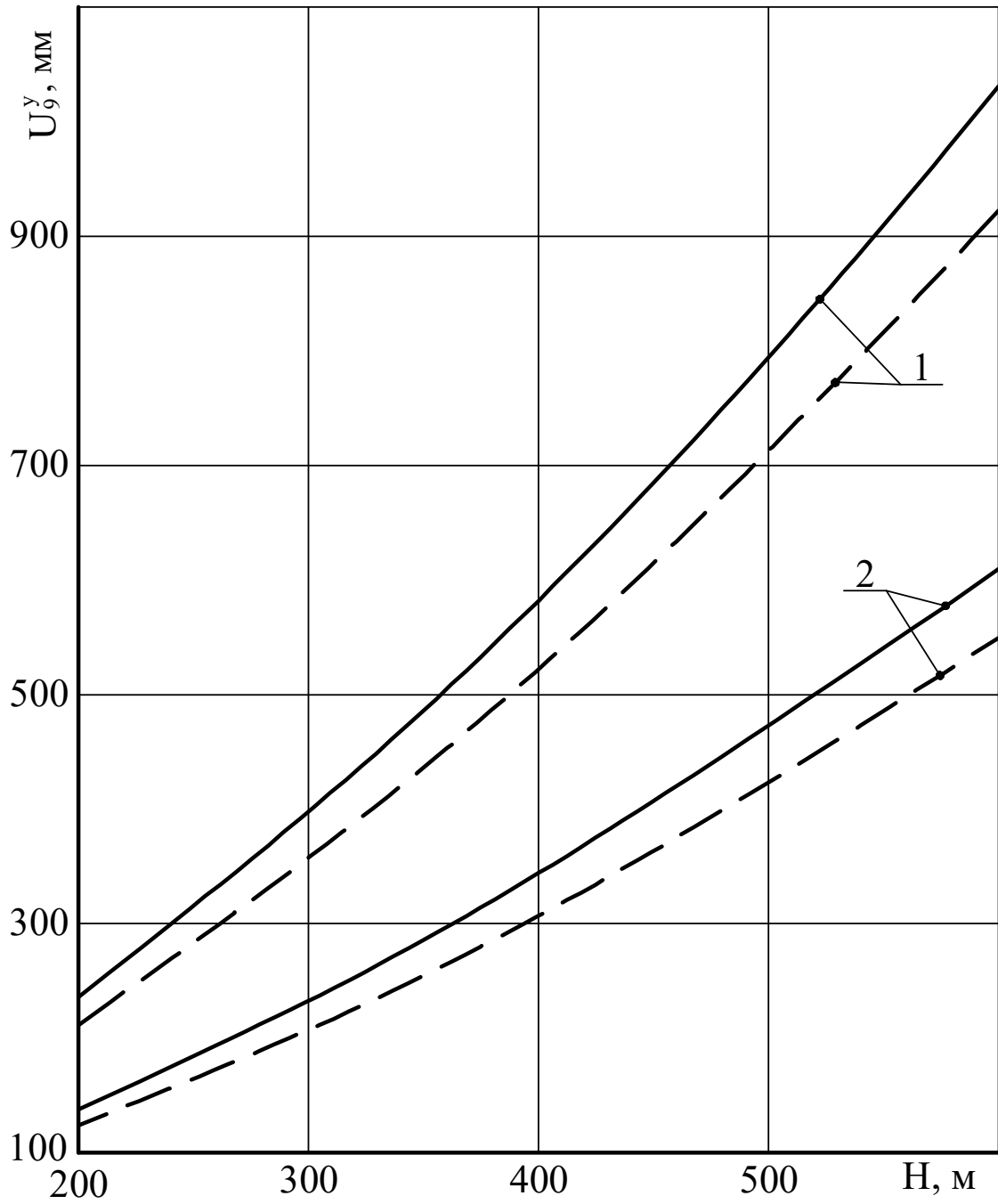


Рис. 4.3 – Опускание  $U_9^y$  замка свода выработки с ростом глубины разработки  $H$  при:  
 1 –  $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; 2 –  $E_1^K = 1 \cdot 10^4$  МПа;  
 —————  $E_2^K = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; —————  $E_2^K = 1 \cdot 10^4$  МПа

Ограничение опускания замка свода с ростом жесткости близлежащих породных слоев логично и не противоречит соответствующим положениям механики подземных сооружений.

Пример закономерности связи опускания  $U_9^y$  замка свода с прочностными характеристиками близлежащих породных слоев приведен на рис. 4.4. Обращает внимание весьма тесная связь перемещений  $U_9^y$  с пределом прочности на сжатие первого  $\sigma_{сж1}^K$  и второго  $\sigma_{сж2}^K$  породных слоев кровли. Увеличение  $\sigma_{сж1}^K$  от 5 МПа до 20 МПа приводит к снижению опускания замка свода в 3,46...4,74 раза при  $H = 200$  м и в 3,83...5,52 раза при  $H = 600$  м, что объясняется резким ограничением областей запредельного состояния в первом породном слое кровли. Аналогичный эффект наблюдается и во втором породном слое кровли, но уже с менее тесной связью  $U_9^y$  и  $\sigma_{сж2}^K$  по причине его некоторой удаленности от свода выработки: увеличение  $\sigma_{сж2}^K$  от 5 МПа до 20 МПа способствует снижению  $U_9^y$  в 1,49...1,79 раза при  $H = 200$  м и в 1,55...2,07 раза при  $H = 600$  м. Как видим, с увеличением глубины расположения пластовой выработки усиливается влияние прочностных характеристик породных слоев кровли.

Что касается первого породного слоя почвы, то влияние  $\sigma_{сж1}^П$  на величину  $U_9^y$  менее заметно: при увеличении  $\sigma_{сж1}^П$  с 5 МПа до 20 МПа смещения снижаются на 3,9...17,5% при  $H = 200$  м и на 2,1...11,6% при  $H = 600$  м. При этом наибольшее влияние  $\sigma_{сж1}^П$  оказывает при умеренных перемещениях замка свода  $U_9^y = 100...300$  мм.

Таким образом, по результатам анализа влияния на смещения замка свода прочностных и деформационных характеристик допредельного и предельного состояния близлежащих породных слоев

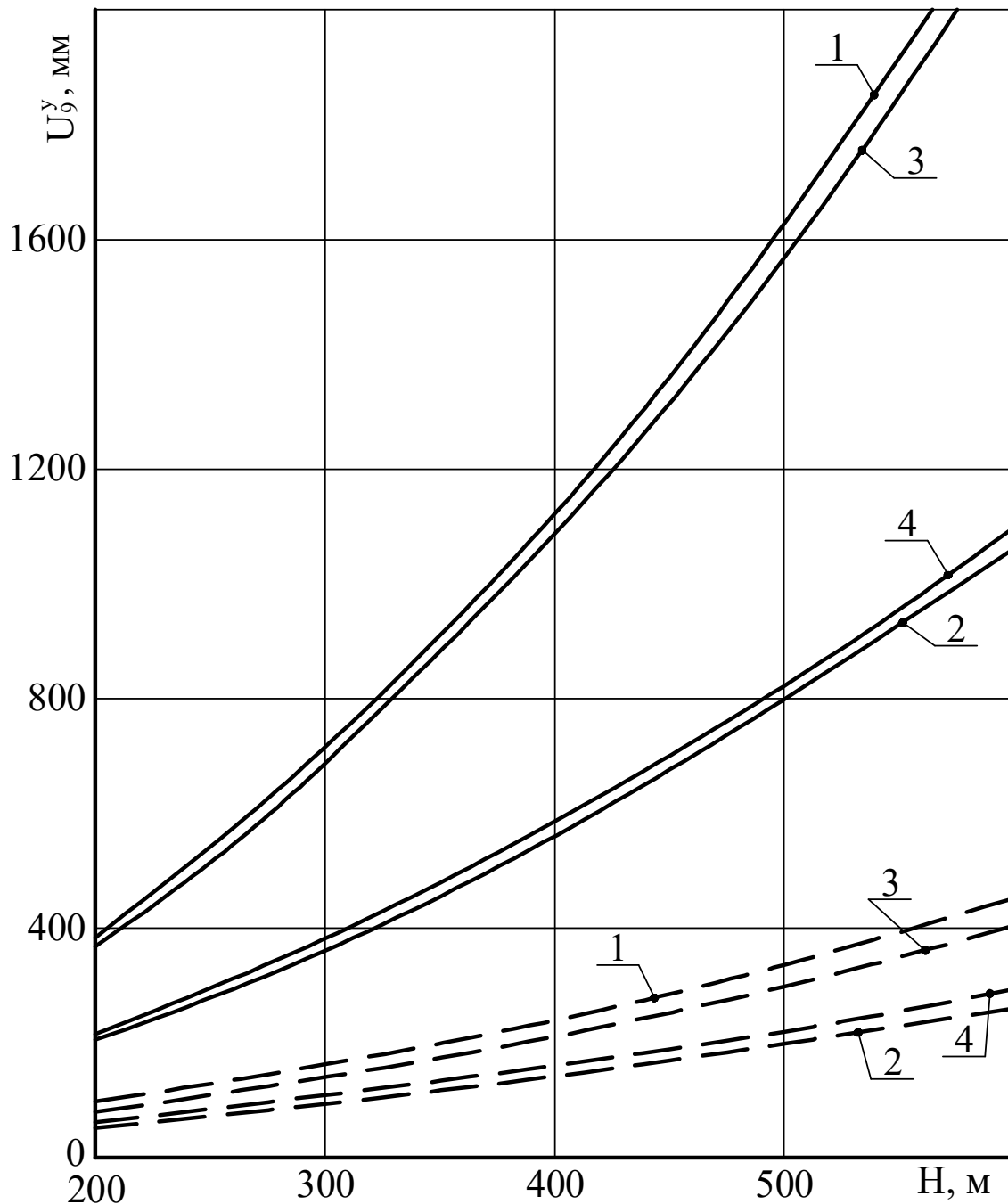


Рис. 4.4 – Опускание  $U_9^y$  замка свода выработки с ростом глубины разработки  $H$  при:

————  $\sigma_{сж1}^K = 5 \text{ МПа}$ ; — — — —  $\sigma_{сж1}^K = 20 \text{ МПа}$ ;

1 –  $\sigma_{сж2}^K = \sigma_{сж1}^П = 5 \text{ МПа}$ ; 2 –  $\sigma_{сж2}^K = \sigma_{сж1}^П = 20 \text{ МПа}$ ;

3 –  $\sigma_{сж2}^K = 5 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{сж1}^П = 20 \text{ МПа}$ ;

4 –  $\sigma_{сж2}^K = 20 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{сж1}^П = 5 \text{ МПа}$

можно сделать два вывода:

- параметры  $\sigma_{сж1}^K$ ,  $\sigma_{сж2}^K$ ,  $E_1^K$  и  $E_2^K$  необходимо учитывать при прогнозе перемещений свода  $U_9^y$  выработки;
- влияние механических характеристик  $\sigma_{сж1}^П$  и  $E_1^П$  первого породного слоя почвы находятся в пределах погрешности, допускаемой при горнотехнических расчетах, что позволяет их исключить при прогнозировании величины  $U_9^y$ .

Анализ влияния на перемещение замка свода  $U_9^y$  механических характеристик запредельного состояния  $\frac{(\sigma_{сжi}^{K,П})^0}{\sigma_{сжi}^{K,П}}$  и  $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$  близлежащих породных слоев дал следующие результаты.

Подтверждена общеизвестная закономерность снижения перемещения контура выработки при росте остаточной прочности вмещающего породного массива (рис. 4.5). Вполне логично, что наибольшее влияние на величину  $U_9^y$  оказывает остаточная прочность

первого породного слоя: связь  $U_9^y$  с параметром  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  обратно пропорциональная и близка к степенной функции с показателем степени

– 1, то есть при увеличении  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  в два раза происходит ограничение опускания замка свода также около двух раз. Как видим, остаточная прочность породы существенно влияет на геомеханические процессы в окрестности пластовой выработки. Те же тенденции ха-

рактерны и для параметров  $\frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K}$  второго слоя кровли и  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$  первого слоя почвы углевмещающего массива, однако степень их

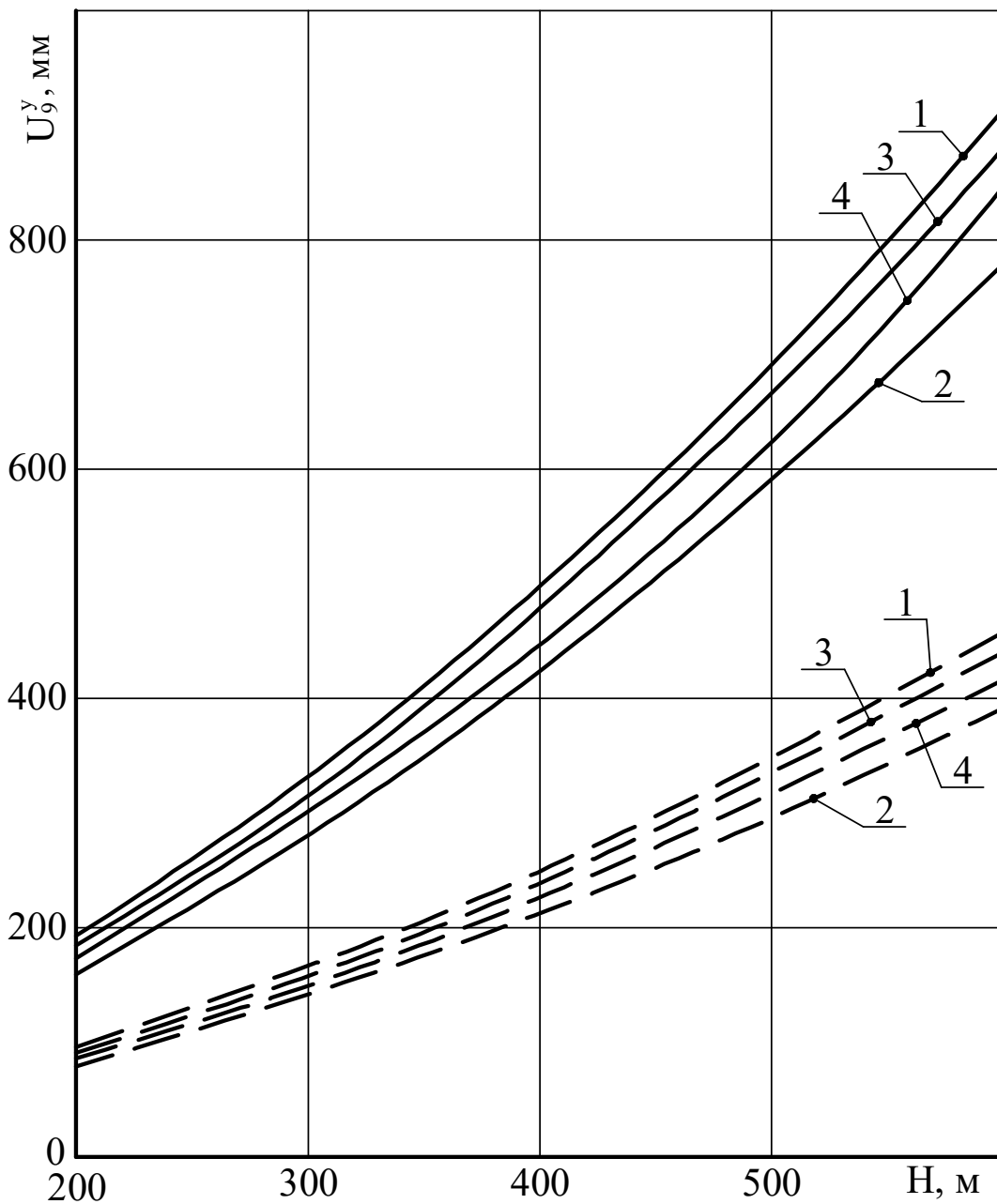


Рис. 4.5 – Опускание  $U_9^y$  замка свода выработки с ростом глубины разработки  $H$  при:

$$\begin{aligned}
 & \text{—} \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1; \quad \text{---} \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2; \\
 & 1 - \frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K} = \frac{(\sigma_{сж1}^\Pi)^0}{\sigma_{сж1}^\Pi} = 0,1; \quad 2 - \frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K} = \frac{(\sigma_{сж1}^\Pi)^0}{\sigma_{сж1}^\Pi} = 0,2; \\
 & 3 - \frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K} = 0,1, \quad \frac{(\sigma_{сж1}^\Pi)^0}{\sigma_{сж1}^\Pi} = 0,2; \quad 4 - \frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K} = 0,2, \quad \frac{(\sigma_{сж1}^\Pi)^0}{\sigma_{сж1}^\Pi} = 0,1
 \end{aligned}$$

влияния на величину  $U_9^y$  существенно ниже: при увеличении указанных параметров от 0,1 до 0,2 снижение  $U_9^y$  происходит всего до 10,8% и 6,4% соответственно. Принимая во внимание, что совместное влияние  $\frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K}$  и  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$  оценивается до 18% целесообразно в разрабатываемой методике прогноза учитывать колебания остаточной прочности второго породного слоя кровли при усредненном значении  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П} = 0,15$  для первого породного слоя почвы. Тогда погрешность определения  $U_9^y$  не будет превышать 3,5%.

Закономерности влияния модуля спада  $M_i^{K,П}$  на величину смещения  $U_9^y$  замка свода также не противоречат известным аналитическим решениям [50, 51] и для пластовой выработки характеризуются следующими особенностями (рис. 4.6). Как и следовало ожидать, наибольшее влияние оказывает параметр  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  первого породного слоя кровли (до 59% в диапазоне  $0,5 \leq \frac{M_1^K}{E_1^K} \leq 3$ ). Аналогичные параметры второго породного слоя кровли и первого слоя почвы оказывают гораздо меньшее воздействие на смещение  $U_9^y$  замка свода. Параметр  $\frac{M_2^K}{E_2^K}$  изменяет  $U_9^y$  до 7% на глубине  $H = 200$  м и до 12,9% на глубине  $H = 600$  м, но, если усреднить значение  $\frac{M_2^K}{E_2^K} = 1,3$  (наиболее характерное для углевмещающих пород Западного Донбасса), то относительно него колебания  $U_9^y$  не превышают 6,6%, то есть вполне допустимы при горнотехнических расчетах.

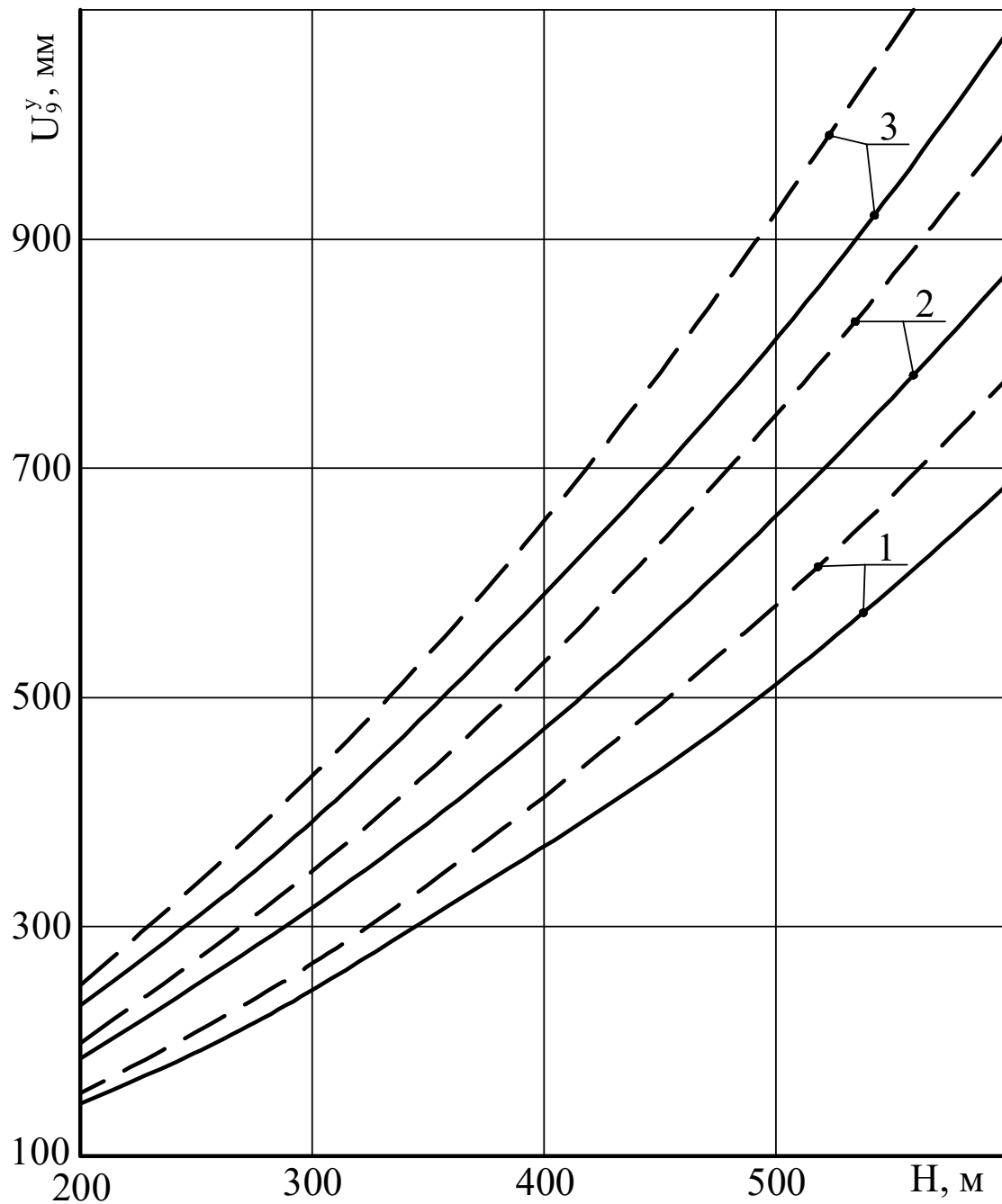


Рис. 4.6 – Опускание  $U_9^y$  замка свода выработки с ростом глубины разработки  $H$  при:

$$\text{—} \frac{M_2^K}{E_2^K} = 0,5; \quad \text{---} \frac{M_2^K}{E_2^K} = 3;$$

$$1 - \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5; \quad 2 - \frac{M_1^K}{E_1^K} = 1,3; \quad 3 - \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3$$



Таким образом, установлено, что при прогнозе опускания замка свода необходимо учитывать следующие характеристики запредельного состояния близлежащих породных слоев углевмещающей толщи:

$$\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}, \frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K} \text{ и } \frac{M_1^K}{E_1^K}.$$

Не менее важным является определение вертикальных перемещений ( $U_4^y, U_5^y, U_{13}^y$  и  $U_{14}^y$ ) в зоне прохода людей, повышенная величина которых обусловит невыполнение правил безопасности.

Прежде всего, следует отметить, что вертикальные перемещения  $U_5^y$  и  $U_{13}^y$  практически одинаковы во всем диапазоне исследований; перемещение  $U_4^y$  больше  $U_{14}^y$  всего на 5,6...6,0%, что объясняется малым углом падения угольного пласта; величины  $U_4^y$  и  $U_{14}^y$  меньше соответствующих значений  $U_5^y$  и  $U_{13}^y$  на 8,7...16,1%, что указывает на тенденцию снижения вертикальных перемещений при движении от замка к пяте свода. Аналогичный факт отмечается и для других участков свода (точки 5, 6, 7, 8, 10, 11 и 12 на рис. 4.1) и подтверждает наблюдаемое в шахтных условиях явление выполаживания свода, которое влечет за собой снижение несущей способности рамной крепи.

Нас больше интересуют смещения  $U_5^y$  и  $U_{13}^y$ , которые при опускании свода могут переместить точки 5 и 13 контура выработки в зону безопасного прохода людей (1,8 м от пешеходного настила), что недопустимо по действующим нормам правил безопасности. Развитие перемещений  $U_5^y$  и  $U_{13}^y$  с ростом глубины разработки аналогичны вышеописанным закономерностям  $U_9^y$  замка свода, но имеются некоторые особенности, которые пояснены на рис. 4.7 (графики приведены для глубины  $H = 400$  м). При прочих равных условиях величина  $U_{5,13}^y$  составляет 64...71% от  $U_9^y$ , что еще раз обращает внимание на процесс выполаживания свода выработки.

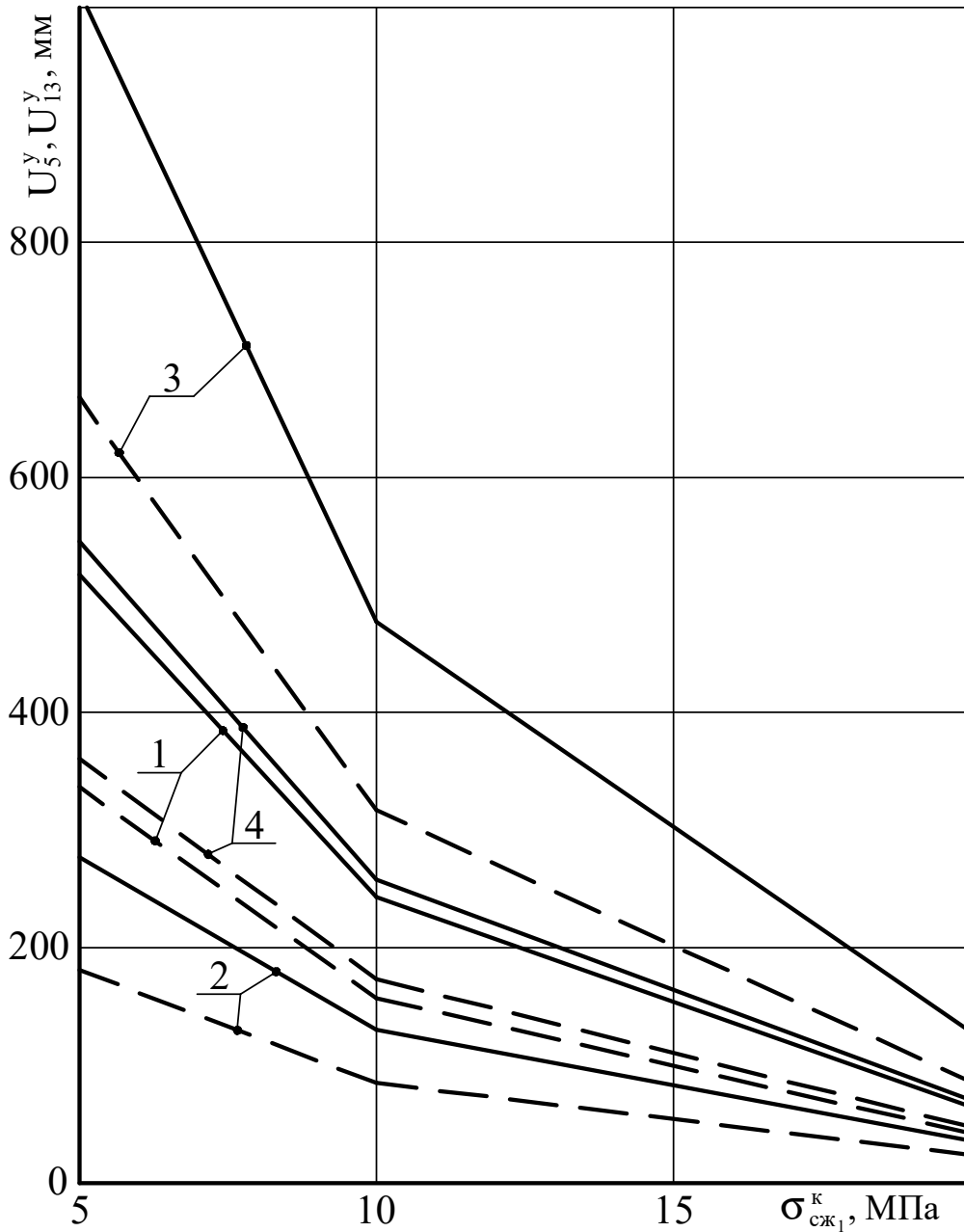


Рис. 4.7 – Вертикальные перемещения  $U_5^y$ ,  $U_{13}^y$  свода выработки в зоне прохода людей в зависимости от сопротивления сжатию  $\sigma_{сж1}^K$  первого породного слоя кровли при:

—————  $\sigma_{сж2}^K = 5$  МПа; - - - - -  $\sigma_{сж2}^K = 20$  МПа;

$$1 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5; 2 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5;$$

$$3 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3; 4 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3$$

Влияние сопротивления сжатию  $\sigma_{сж1}^K$  первого породного слоя усиливается (в сравнении с  $U_9^y$ ) и в диапазоне  $\sigma_{сж1}^K = 5...20$  МПа величина  $U_{5,13}^y$  изменяется до 8,14 раза, поскольку координаты точек 5 и 13 располагаются в самом эпицентре опорного давления и возникающая здесь область запредельного состояния пород оказывает более интенсивное воздействие.

В противовес отмеченному выше, влияние сопротивления сжатию  $\sigma_{сж2}^K$  второго породного слоя кровли уменьшается (по отношению к  $U_9^y$ ), что обусловлено большей удаленностью от него точек 5 и 13: в диапазоне  $\sigma_{сж2}^K = 5...20$  МПа перемещения  $U_{5,13}^y$  изменяются всего до 52%.

По той же причине, что и  $\sigma_{сж1}^K$  параметры запредельного состояния  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  и  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  первого породного слоя кровли оказывают весьма существенное влияние на развитие перемещений  $U_{5,13}^y$ : в диапазоне  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} 0,1...0,2$  и  $\frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5...3$  перемещения изменяются до 3,66 раз.

Остальные механические характеристики близлежащих породных слоев углевмещающей толщи (за исключением модуля деформации первого породного слоя) не оказывают сколь-нибудь существенного влияния на вертикальные перемещения свода выработки в зоне прохода людей.

Анализ тенденций опускания свода рамной крепи также позволяет наметить пути ее ресурсосберегающего усиления с помощью системы анкеров в определенных горно-геологических условиях

[52-55]. Предпосылкой этого пути являются две стороны единого геомеханического процесса:

– относительно умеренные перемещения свода (при  $H$  до 400 м и  $\sigma_{сж_i}^{K,II} = 10...15$ ;  $H$  до 600 м и  $\sigma_{сж_i}^{K,II} > 15$  МПа), которые можно ограничить системой анкеров и привести в соответствие с конструктивно-технологическими нормами и правилами безопасной эксплуатации выработки;

– относительно небольшие размеры зон предельного и заpredельного состояния приконтурных пород кровли [2], которые позволяют анкерам развивать требуемую реакцию сопротивления.

По причине невозможности полного исключения перемещений свода рамы необходимо применять податливые конструкции анкеров, например, трубчатые ТА2, которые также обладают высокой несущей способностью в режиме податливости.

Исходя из эпюр распределения  $\sigma$  в своде рамы [2] анкера целесообразно устанавливать в областях действия концентраций  $\sigma$ : в замке свода выработки и его нижней части в районе расположения замков податливости рамной крепи.

### **4.3 Закономерности сближения боков выработки**

Выявление тенденций развития сближения (по горизонтальной координате  $X$ ) боков выработки чрезвычайно важно по ряду причин:

– перемещения  $U_i^x$  боков выработки уменьшают ее проходное сечение для движения воздушной струи;

– чрезмерное сближение боков выработки нарушает безопасные расстояния при движении транспортных средств (зазоры между стойками рамной крепи и транспортными средствами, зазоры между ними в двухпутевых выработках);

– существует вероятность невыполнения правил безопасности по минимально допустимой ширине прохода людей;

– изгиб стоек рамной крепи (повсеместно наблюдаемый на шахтах Западного Донбасса) резко снижает ее несущую способность, что нередко приводит к потере устойчивости выработки в целом.

Наибольший интерес представляют горизонтальные перемещения  $U_4^x$ ,  $U_5^x$ ,  $U_{13}^x$  и  $U_{14}^x$  в зоне прохода людей и величин  $U_1^x$  и  $U_{17}^x$  сближения опор стоек рамы при их изгибе.

Независимо от механических характеристик близлежащих породных слоев углевмещающей толщи проявляются достаточно стабильные закономерности горизонтальных перемещений различных участков боков выработки:

– в зоне прохода людей перемещения со стороны падения пласта выше, чем со стороны восстания:  $\frac{U_4^x}{U_{14}^x} = 1,04...1,16$ ;

$$\frac{U_5^x}{U_{15}^x} = 1,38...1,47;$$

– разница между перемещениями  $U_5^x$  и  $U_4^x$  изменяется в весьма ограниченном интервале от  $-4,2$  до  $6,8\%$ , что с достаточным основанием позволяет исследовать закономерности связи с геомеханическими параметрами системы только перемещений  $U_5^x$ ;

– перемещения опоры стойки со стороны восстания пласта превышают таковые со стороны падения  $\frac{U_{17}^x}{U_1^x} = 1,20...1,60$ , что обосновывает рассмотрение закономерностей связи только величины  $U_{17}^x$ , как

более опасной с точки зрения несоответствия правилам безопасности;

– попарное сравнение  $U_1^x$ ,  $U_2^x$  и  $U_{16}^x$ ,  $U_{17}^x$  показывает, что разница между ними может достигать  $200...250$  мм всего на длине  $450$  мм

прямолинейной части стойки рамы, то есть, происходит ее интенсивный изгиб с резким снижением несущей способности рамы.

Таким образом, на первоначальном этапе целесообразно провести детальный анализ закономерностей влияния геомеханических параметров системы на сближение боков выработки для ограниченного числа точек:  $U_4^x$ ,  $U_5^x$  – зона прохода людей со стороны падения пласта;  $U_{17}^x$  – опора стойки рамной крепи со стороны восстания пласта.

На рис. 4.8 приведены зависимости развития горизонтальных перемещений  $U_{4,5}^x$  в зоне прохода людей с ростом глубины разработки. На графиках четко прослеживается разная степень влияния на величину  $U_{4,5}^x$  модулей деформации  $E_1^K$ ,  $E_2^K$  и  $E_1^H$  близлежащих породных слоев углевмещающей толщи: в исследуемом диапазоне ( $E_i^{K,H} = (0,3...1) \cdot 10^4$  МПа) перемещение изменяется до 2,01 раза – ( $E_1^K$ ), до 23,9% – ( $E_2^K$ ) и до 15,2% – ( $E_1^H$ ); совместное их воздействие достигает до 2,86 раз.

В отличие от вертикальных перемещений свода выработки зависимость  $U_{4,5}^x$  имеет ряд особенностей:

– горизонтальные перемещения  $U_{4,5}^x$  составляют 37,5...47,6% от смещений замка свода  $U_9^y$  и превышают нормативный [41-43] показатель на – 35%;

– рост модуля деформации  $E_2^K$  второго породного слоя кровли не ограничивает перемещения  $U_{4,5}^x$  (как это наблюдается для  $U_9^y$ ), а напротив, интенсифицирует их; это явление объясняется тем, что под воздействием горного давления более жесткий второй слой кровли действует как штамп в боках выработки (зона опорного давления), выдавливая породу в полость выработки;

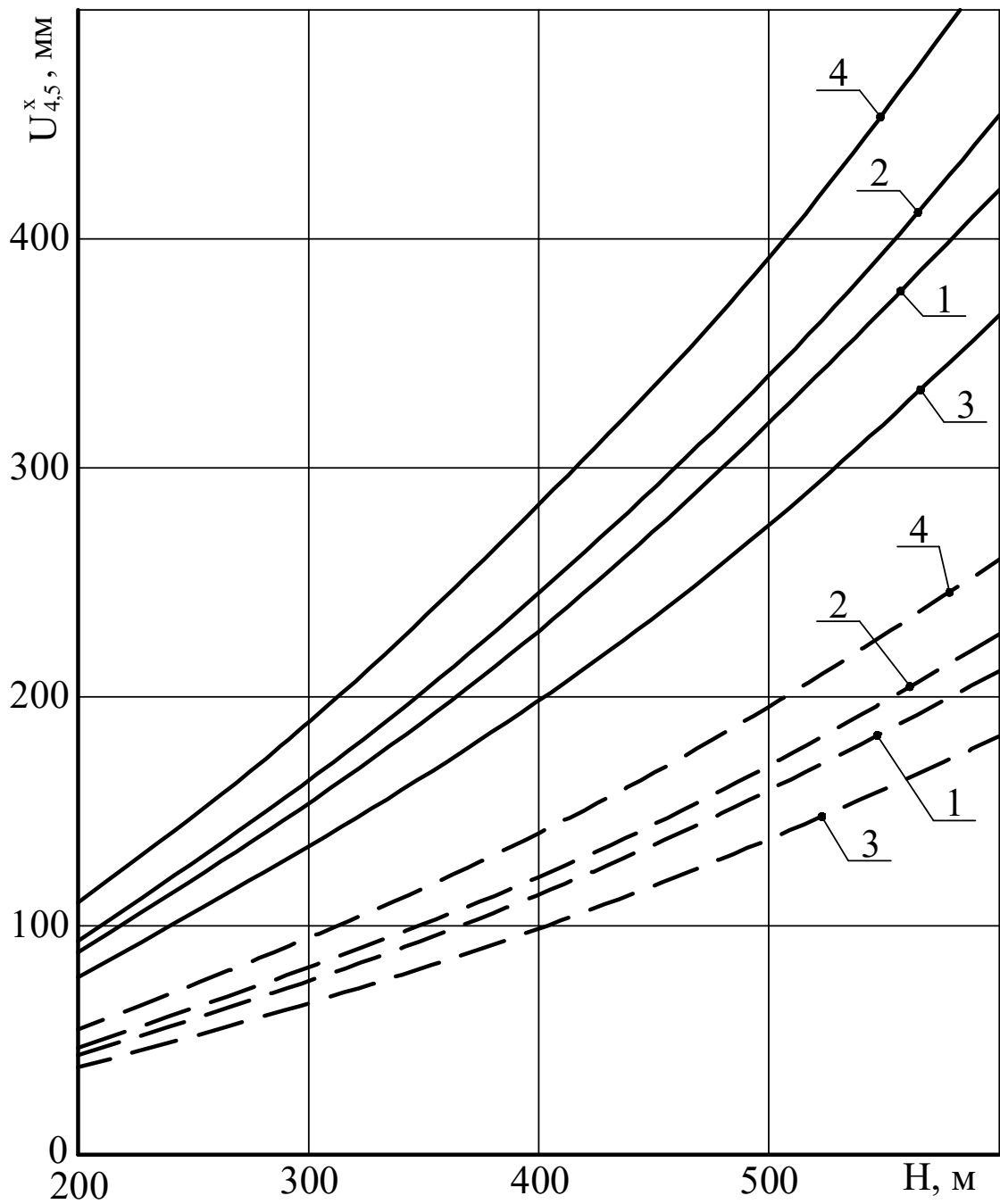


Рис. 4.8 – Горизонтальные перемещения  $U_4^x, U_5^x$  боков  
 выработки в зоне прохода людей в зависимости от  
 глубины разработки  $H$  при:  
 —————  $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; — — — —  $E_1^K = 1 \cdot 10^4$  МПа;  
 1 –  $E_2^K = E_1^{II} = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; 2 –  $E_2^K = E_1^{II} = 1 \cdot 10^4$  МПа;  
 3 –  $E_2^K = 0,3 \cdot 10^4$  МПа,  $E_1^{II} = 1 \cdot 10^4$  МПа;  
 4 –  $E_2^K = 1 \cdot 10^4$  МПа,  $E_1^{II} = 0,3 \cdot 10^4$  МПа

– заметное влияние начинает оказывать модуль деформации  $E_1^{\text{II}}$  первого породного слоя почвы, с ростом которого перемещения  $U_{4,5}^x$  снижаются; это обусловлено тем, что более жесткая почва создает некое подобие опоры для ограничения развития зон запредельного состояния в боках выработки, где увеличивающаяся в объеме разрыхленная порода стремится переместиться в полость выработки.

Прочностные характеристики близлежащих породных слоев ( $\sigma_{сж1}^K$ ,  $\sigma_{сж2}^K$  и  $\sigma_{сж1}^{\text{II}}$ ) оказывают еще большее воздействие на развитие горизонтальных перемещений  $U_{4,5}^x$  в зоне прохода людей (рис. 4.9).

Наиболее зависима (до 6,08 раз в диапазоне  $\sigma_{сж1}^K = 5...20$  МПа) величина перемещений  $U_{4,5}^x$  от сопротивления сжатию пород первого слоя кровли  $\sigma_{сж1}^K$ , в котором и размещены бока выработки. Это объясняется высокой подвижностью разупрочненных пород, которые, перемещаясь под воздействием опорного давления в боках выработки, создают высокую боковую нагрузку на стойки рамной крепи. Если первый породный слой почвы более устойчив, то он ограничивает развитие перемещений не только в почве, но и боках выработки за счет снижения размеров областей запредельного состояния в зоне опорного давления. В диапазоне  $\sigma_{сж}^{\text{II}} = 5...20$  МПа влияние первого породного слоя почвы сказывается до 41,3%. В то же время, второй породный слой кровли оказывает противоположное влияние (по аналогии с  $E_2^K$ ): с увеличением степени его целостности (рост  $\sigma_{сж2}^K$ ) возрастает эффект действия штампа на разупрочненный первый породный слой кровли и под воздействием опорного давления боковые перемещения  $U_{4,5}^x$  в зоне прохода людей возрастают до 32,3%.



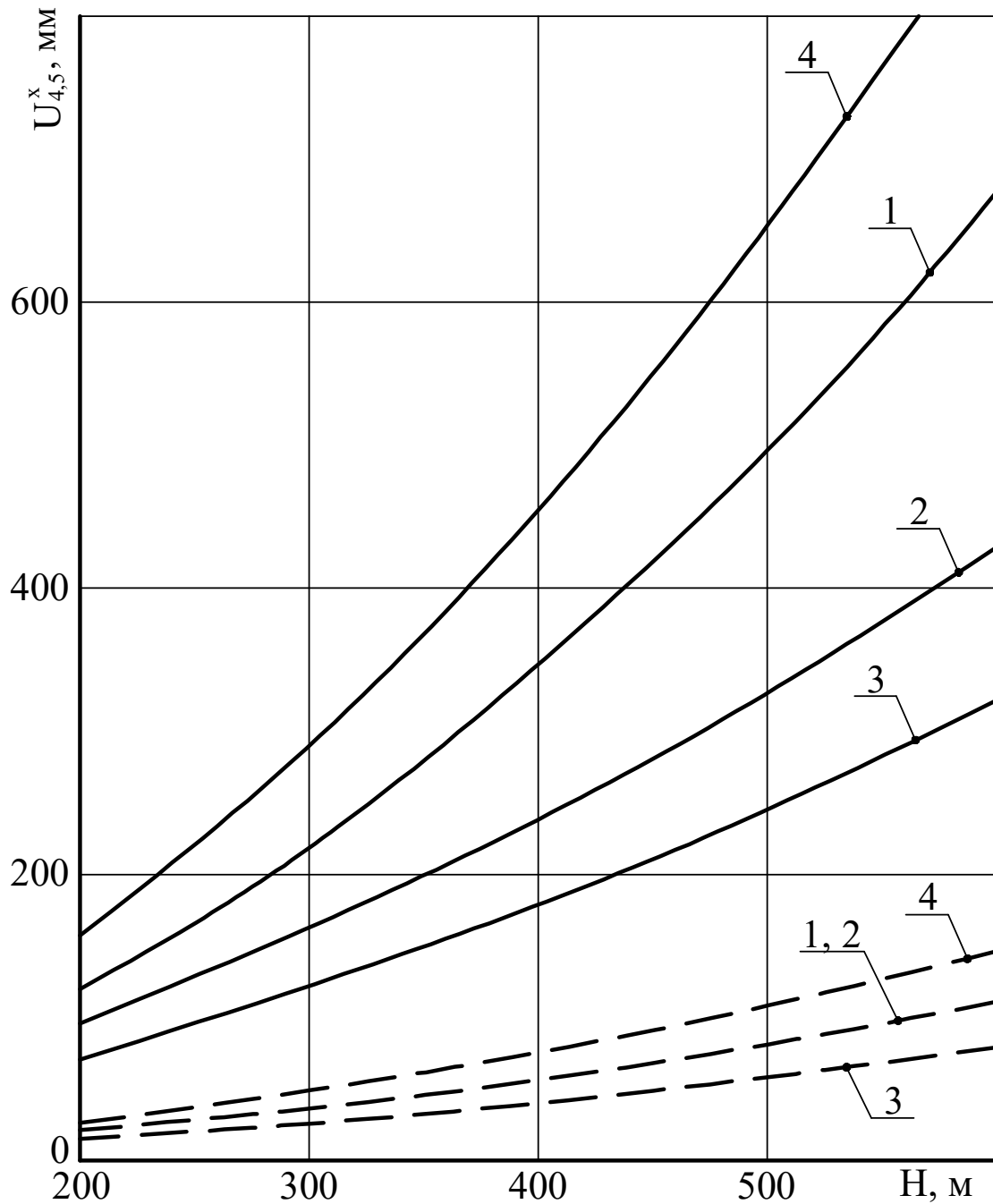


Рис. 4.9 – Горизонтальные перемещения  $U_{4,5}^x$  боков выработки в зоне прохода людей в зависимости от глубины разработки  $H$  при:

—  $\sigma_{сж2}^K = 5$  МПа; - - -  $\sigma_{сж1}^K = 20$  МПа;

1 –  $\sigma_{сж2}^K = \sigma_{сж1}^П = 5$  МПа; 2 –  $\sigma_{сж2}^K = \sigma_{сж1}^П = 20$  МПа;

3 –  $\sigma_{сж2}^K = 5$  МПа,  $\sigma_{сж1}^П = 20$  МПа;

4 –  $\sigma_{сж2}^K = 20$  МПа,  $\sigma_{сж1}^П = 5$  МПа

Механические характеристики запредельного состояния влияют на развитие горизонтальных перемещений  $U_{4,5}^x$  в зоне прохода людей с разной интенсивностью для каждого из близлежащих породных слоев углевмещающей толщи. В диапазоне  $\frac{(\sigma_{сжi}^{K,П})^0}{\sigma_{сжi}^{K,П}} = 0,1 \dots 0,2$  и  $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}} = 0,5 \dots 3$  эти характеристики второго слоя кровли и первого слоя почвы изменяют величину  $U_{4,5}^x$  всего до 8,5% и их колебания можно не учитывать при прогнозе перемещений  $U_{4,5}^x$ . В то же время, характеристики запредельного состояния первого породного слоя кровли оказывают существенное влияние на изменение  $U_{4,5}^x$ :  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  – до 53,6%,  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  – до 74,2% (рис. 4.10), что объясняется примыканием именно первого породного слоя кровли к зоне прохода людей.

Таким образом, установлено, что решающее воздействие на развитие боковых перемещений  $U_{4,5}^x$  в зоне прохода людей оказывают такие механические характеристики близлежащих породных слоев углевмещающей толщи:  $\sigma_{сж1}^K$ ,  $\sigma_{сж2}^K$ ,  $\sigma_{сж1}^П$ ,  $E_1^K$ ,  $E_2^K$ ,  $E_1^П$ ,  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  и  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ . Указанные характеристики необходимо учитывать при прогнозе боковых перемещений в зоне прохода людей.

Не менее важным участком (с точки зрения безопасного прохода людей, движения транспортных средств и, особенно, устойчивости рамной крепи) является район опоры стоек рамы, величина сближения которых может до 60% превышать горизонтальные перемещения на

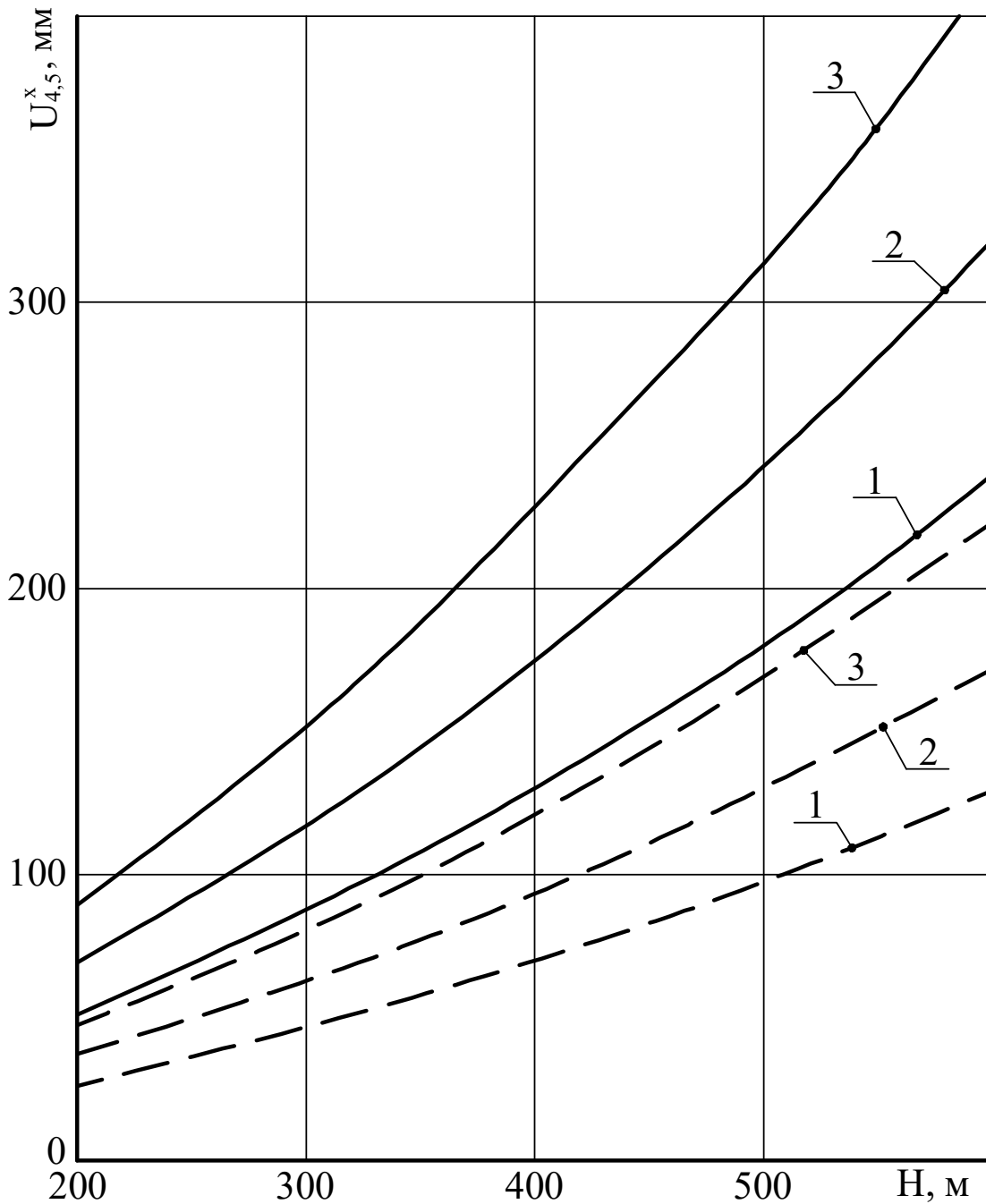


Рис. 4.10 – Горизонтальные перемещения  $U_{4,5}^x$  боков выработки в зоне прохода людей в зависимости от глубины разработки  $H$  при:

$$\text{—} \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1; \quad \text{- - -} \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2;$$

$$1 - \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5; \quad 2 - \frac{M_1^K}{E_1^K} = 1,3; \quad 3 - \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3$$

других более удаленных от почвы выработки участках. Здесь выявлено три общие закономерности:

– несмотря на небольшой угол падения пласта (до  $6^\circ$ ) более активный процесс сдвижения опор стоек наблюдается со стороны восстановления пласта, в связи с чем более подробному описанию подвергнуто перемещение  $U_{17}^x$ ;

– повсеместно наблюдается «эффект штампа», когда более жесткие и целостные (в тех вариантах расчета НДС системы, где это имеет место) первый породный слой кровли и угольный пласт под воздействием опорного давления интенсифицируют боковое перемещение почвы пласта, где и расположены опоры стоек рамы;

– из-за удаленности опор стоек рамы от второго породного слоя кровли, его механические характеристики не оказывают существенного влияния на горизонтальные перемещения опор стоек рамной крепи.

Закономерность связи перемещения  $U_{17}^x$  с модулями деформации первых породных слоев кровли  $E_1^K$  и почвы  $E_1^П$  (с увеличением глубины разработки) приведена на рис. 4.11. Поскольку опоры стоек рамы расположены в почве пласта, то более сильное влияние оказывает  $E_1^П$  – до 2,01 раз в исследуемом интервале  $(0,3...1) \cdot 10^4$  МПа изменения этого параметра. А вот параметр  $E_1^K$  наглядно иллюстрирует «эффект штампа», когда более жесткий первый породный слой кровли ( $E_1^K = 1 \cdot 10^4$  МПа) увеличивает горизонтальное перемещение  $E_1^K$  до 23,4%.

Влияние прочностных характеристик  $\sigma_{сж1}^K$  и  $\sigma_{сж1}^П$  первых породных слоев кровли и почвы на перемещение  $U_{17}^x$  в определенной степени аналогично воздействию модулей деформации этих слоев:

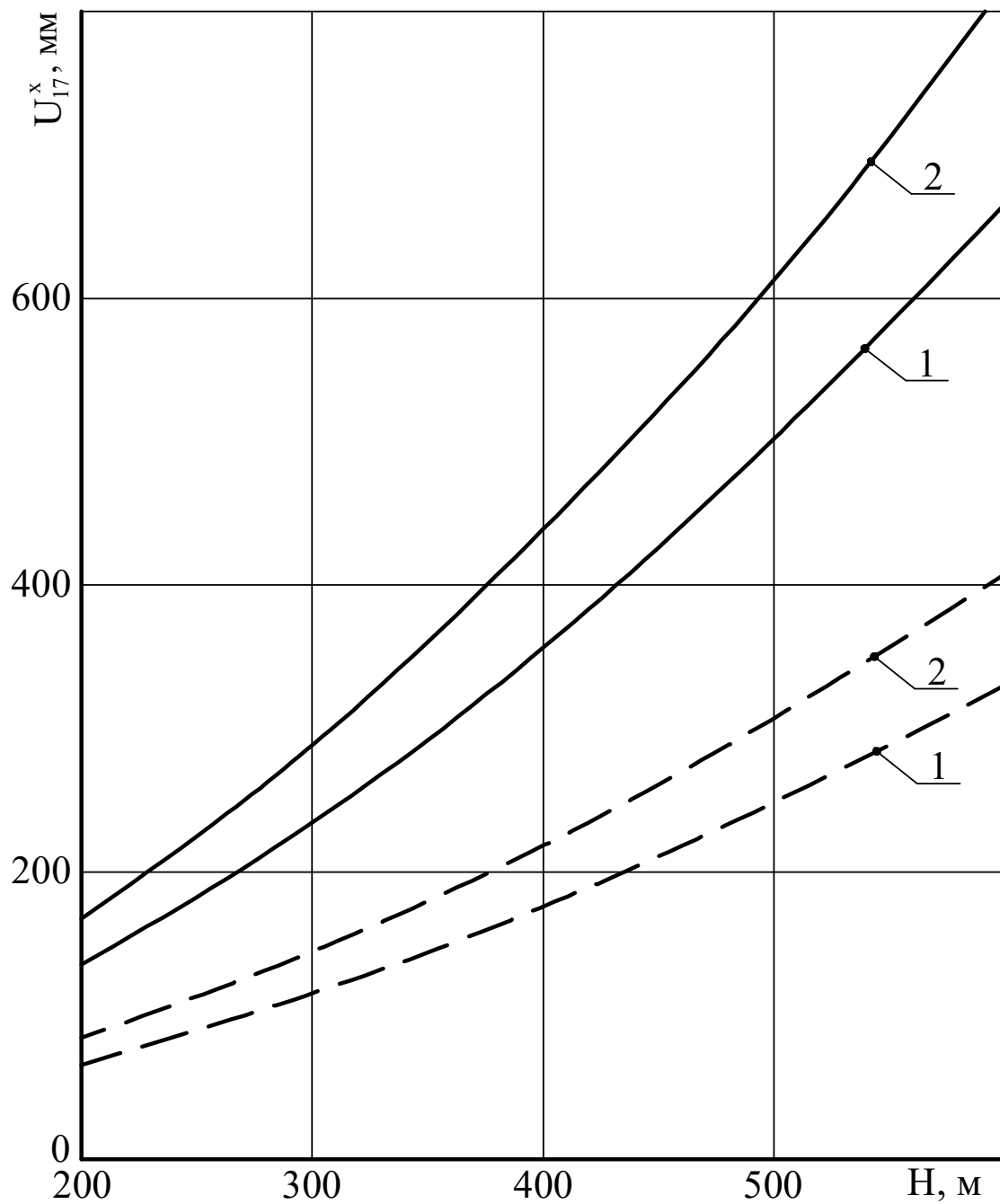


Рис. 4.11 – Горизонтальные перемещения  $U_{17}^x$  в опоре стойки рамы в зависимости от глубины разработки  $H$  при:  
 —————  $E_1^H = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; — — — —  $E_1^H = 1 \cdot 10^4$  МПа;  
 1 –  $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; 2 –  $E_1^K = 1 \cdot 10^4$  МПа

увеличение  $\sigma_{сж1}^{\Pi}$  сдерживает, а рост  $\sigma_{сж1}^K$  интенсифицирует развитие перемещений  $U_{17}^x$  (рис. 4.12). Безусловно, наиболее значимое влияние (до 6,73 раз в диапазоне  $\sigma_{сж1}^{K,\Pi} - 5...20$  МПа) оказывает сопротивление сжатию первого породного слоя почвы, поскольку опоры стоек рамы располагаются именно в этом слое. В указанном диапазоне  $\sigma_{сж1}^K$  увеличивает перемещение  $U_{17}^x$  до 84% в зависимости от соотношения  $\frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^{\Pi}}$ . Установленный факт объясняется тем, что чем прочнее выше-

лежащий первый породный слой кровли, тем меньше в нем области запредельного состояния, которые определенным образом увеличивают его деформируемость (снижается жесткость) и уменьшается «эффект штампа» по выдавливанию пород почвы в полость выработки в районе опоры стоек рамной крепи. Установленный «эффект штампа» подтверждается при анализе связи перемещений  $U_{17}^x$  с характери-

стическими  $\frac{(\sigma_{сж1}^{K,\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{K,\Pi}}$  и  $\frac{M_1^{K,\Pi}}{E_1^{K,\Pi}}$  запредельного состояния первых породных

слоев кровли и почвы (рис. 4.13). Из графиков видно, что с уменьшением  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  и увеличением  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  величина перемещения  $U_{17}^x$  снижа-

ется. В то же время известно [50, 51], что такое изменение характеристик способствует развитию размеров зон запредельного состояния (в данном случае в первом породном слое кровли). Также известна повышенная деформируемость породы в запредельном состоянии, которая демпфирует передачу нагрузки (в зоне опорного давления) на первый породный слой почвы и перемещение  $U_{17}^x$  уменьшается.

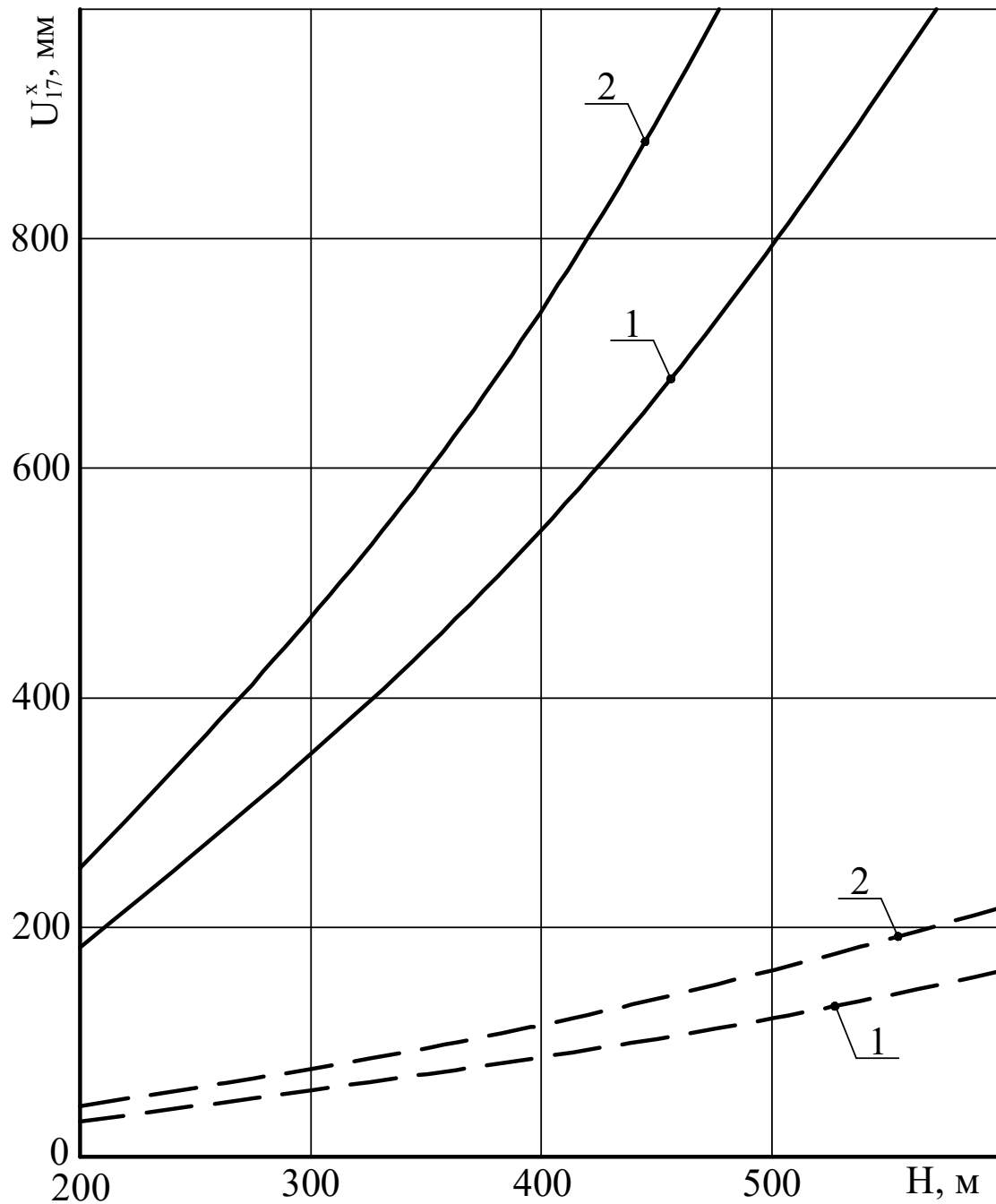


Рис. 4.12 – Горизонтальные перемещения  $U_{17}^x$  в опоре стойки рамы в зависимости от глубины разработки  $H$  при:

—  $\sigma_{сж1}^I = 5$  МПа; - - -  $\sigma_{сж1}^I = 20$  МПа;

1 –  $\sigma_{сж1}^I = 5$  МПа; 2 –  $\sigma_{сж1}^K = 20$  МПа

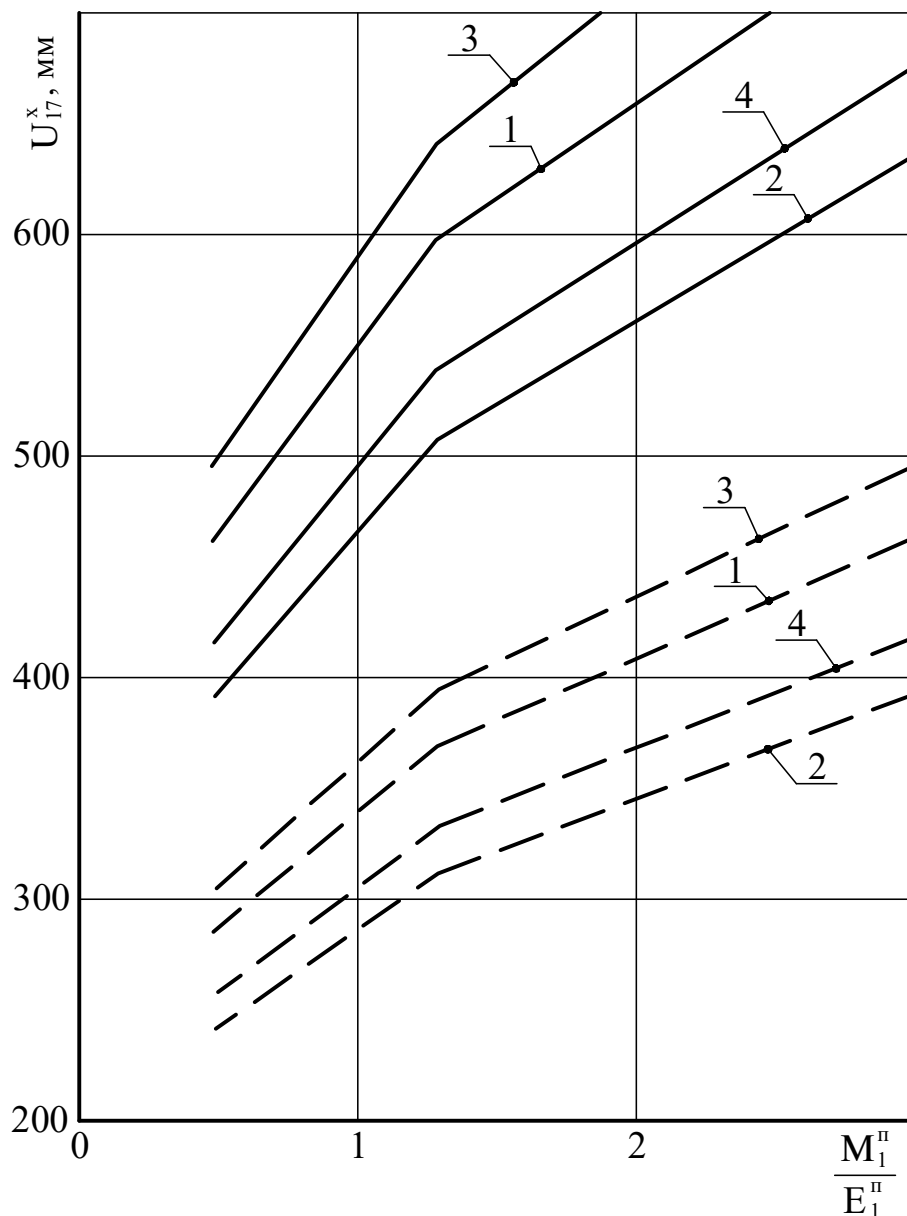


Рис. 4.13 – Горизонтальные перемещения  $U_{17}^x$  в опоре стойки рамы

в зависимости от параметра  $\frac{M_1^{\Pi}}{E_1^{\Pi}}$  первого породного

слоя почвы при:

$$\text{—} \frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}} = 0,1; \quad \text{---} \frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}} = 0,2;$$

$$1 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5; \quad 2 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3;$$

$$3 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5; \quad 4 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3$$



Параметры запредельного состояния  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  и  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  первого породного слоя кровли изменяют  $U_{17}^x$  до 7,4 и 18,0% соответственно, а их совместное действие оценивается до 26,7%. Ввиду небольшого влияния остаточной прочности первого породного слоя кровли ( $(\sigma_{сж1}^K)^0 < 10\%$ ) следует усреднить ее значение для углевмещающих пород Западного Донбасса и при выводе уравнения регрессии учитывать поправочным коэффициентом.

Характеристики запредельного состояния первого породного слоя почвы оказывают более значимое влияние на горизонтальные перемещения  $U_{17}^x$ :  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$  – до 62,5%, а  $\frac{M_1^П}{E_1^П}$  – до 62,2% в исследуемом диапазоне их изменения.

По итогам проведенного анализа установлено, что при прогнозировании сближения опор стоек рамной крепи следует учитывать следующие механические характеристики первых породных слоев кровли и почвы:  $\sigma_{сж1}^K$ ,  $\sigma_{сж1}^П$ ,  $E_1^K$ ,  $E_1^П$ ,  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$ ,  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  и  $\frac{M_1^П}{E_1^П}$ .

Рекомендации по повышению устойчивости боков рамной крепи путем ограничения их сближения при установке анкеров аналогичны таковым для свода рамы. Здесь также в оговоренном диапазоне изменения геомеханических параметров целесообразно применять податливые конструкции анкеров с высокой несущей способностью в разупрочненном породном массиве.

Наиболее эффективные координаты установки анкеров – опора стойки рамы и конец ее прямолинейной части в районе пяты свода.

Эти рекомендации отчасти схожи с работами [45, 52], но, в от-

личии от них, геомеханически обоснованы для слоистого неоднородного углевмещающего массива с нарушенными связями между породными слоями.

#### **4.4 Влияние геомеханических параметров**

##### **углевмещающего массива на пучение почвы выработки**

Исследование закономерностей развития перемещений пород почвы в полость выработки (пучение почвы) выявило ряд общих тенденций этого процесса для различных сочетаний геомеханических параметров системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки»:

– даже при малом угле падения угольного пласта (до  $6^\circ$ ) наблюдается некоторая асимметрия эпюры пучения почвы по ширине выработки: ее максимум смещен на  $0,2 \dots 0,3$  м в сторону восстания пласта, что указывает на повышенную интенсивность пучения в этой области.

Однако величина поднятия почвы по вертикальной оси выработки  $U_{20}^y$  (точка 20 на рис. 4.1) незначительно (до  $1,2\%$ ) отличается от максимального значения и позволяет использовать этот параметр как характеристику оценки максимальной интенсивности пучения;

– четко прослеживается вдавливание опор стоек рамы в породы почвы (несмотря на моделирование подпятников под каждой из опор размером  $200 \times 200 \times 20$  мм) под воздействием вертикальной нагрузки на крепь. Здесь следует отметить, что в существующих нормативных методиках [41-43] нет разделения величины перемещения пород почвы относительно опоры стойки рамы на две составляющие: собственно пучение и вдавливание стойки в почву. Такая интегральная оценка пучения не отражает физическую сущность двух довольно различающихся между собой геомеханических процессов и в ряде случаев мо-

жет привести к существенным погрешностям в прогнозировании пучения почвы пластовой выработки, пройденной в слоистом массиве слабых пород;

– величины вдавливания обеих опор стоек  $U_1^y$  и  $U_{17}^y$  до глубин разработки  $H = 400...450$  м примерно одинаковы. При дальнейшем увеличении  $H$  происходит более интенсивный изгиб стойки со стороны восстания пласта, за счет чего компенсируется дальнейшее перемещение  $U_{17}^y$ , а в некоторых вариантах даже несколько снижается. Со стороны падения пласта изгиб стойки рамы менее интенсивный и при увеличении  $H$  перемещение  $U_1^y$  растет, достигая величины до  $0,3...0,5$  м. Таким образом, суммарная величина перемещений почвы (по оси выработки) относительно опоры стойки составит  $U_1^y + U_{20}^y$ , по которой и необходимо оценивать выполнение требований правил безопасности и эксплуатационные параметры выработки;

– установлено, что поднятие почвы в зоне прохода людей  $U_{18}^y$  и  $U_{22}^y$  имеют аналогичные параметру  $U_{20}^y$  закономерности связи не только в качественном, но и в количественном плане. Вне зависимости от геомеханических параметров системы соотношения указанных перемещений практически стабильны и составляют:  $\frac{U_{22}^y}{U_{20}^y} = 0,54...0,57$ ;

$\frac{U_{18}^y}{U_{20}^y} = 0,66...0,67$ . Поэтому представляется целесообразным устано-

вить уравнение регрессии для перемещения  $U_{20}^y$ , а для величин  $U_{22}^y$  и  $U_{18}^y$  ввести поправочные коэффициенты  $0,57$  и  $0,67$  соответственно.

В первую очередь проанализированы закономерности развития максимума пучения почвы  $U_{20}^y$ , наблюдаемого в районе центральной

оси выработки.

С увеличением глубины разработки наблюдается нелинейный рост поднятия почвы  $U_{20}^y$  (как и для других участков контура выработки). Модуль деформации первого породного слоя почвы оказывает влияние до 88,1% в диапазоне  $E_1^{\Pi} = (0,3...1) \cdot 10^4$  МПа (рис. 4.14). Влияние  $E_1^K$  оценивается до 19,2% и проявляется таким образом, что с ростом  $E_1^K$  пучение почвы увеличивается, то есть присутствует «эффект штампа», когда жесткий первый породный слой кровли под воздействием опорного давления интенсифицирует перемещение пород почвы в полость выработки.

Аналогичным образом влияет на развитие пучения почвы сопротивление сжатию  $\sigma_{сж1}^K$  первого породного слоя кровли, от величины которого зависит степень его целостности и размеры зон запредельного состояния с повышенной деформируемостью породы (рис. 4.15). С увеличением  $\sigma_{сж1}^K$  происходит более интенсивное выдавливание пород почвы в полость выработки и его влияние оценивается до 72,9% на глубине  $H = 600$  м. Размеры зон запредельного состояния в первом породном слое кровли также зависят от параметров

$\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  и  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$ , которые, снижая (повышая) деформационные свойства

этого слоя в целом, изменяют действие «эффекта штампа». Однако влияние параметров запредельного состояния первого слоя кровли гораздо меньше и, как правило, не выходит за пределы 10%. Исключения

составляют варианты с  $\sigma_{сж1}^{K,\Pi} = 20$  МПа, когда влияние  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  доходит

до 17,5% и варианты с  $\sigma_{сж1}^{\Pi} = 5$  МПа,  $\sigma_{сж1}^K = 20$  МПа, когда

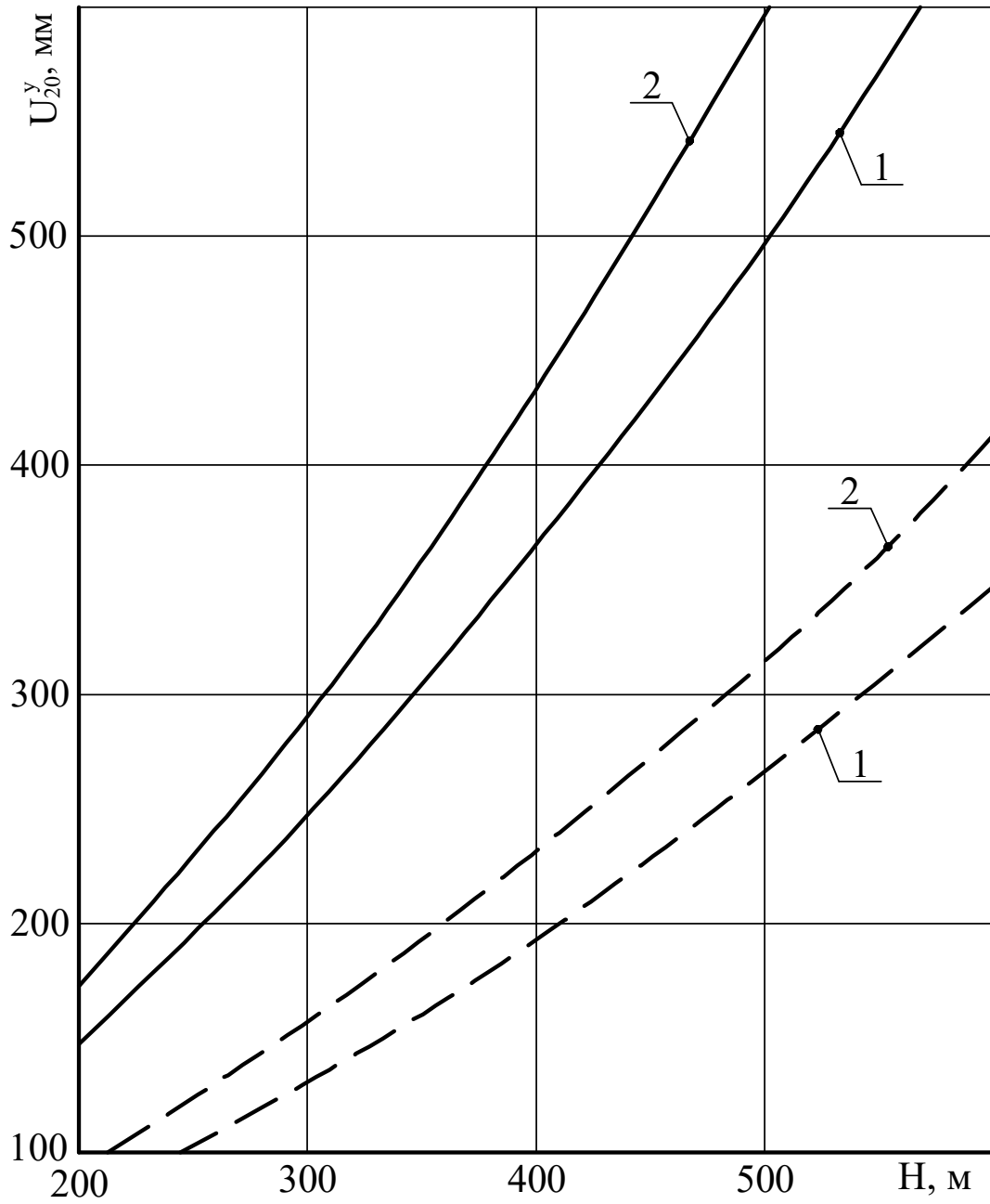


Рис. 4.14 – Поднятие почвы по оси выработки  $U_{20}^y$  в зависимости от глубины разработки  $H$  при:  
 —————  $E_1^H = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; — — — —  $E_1^H = 1 \cdot 10^4$  МПа;  
 1 –  $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; 2 –  $E_1^K = 1 \cdot 10^4$  МПа

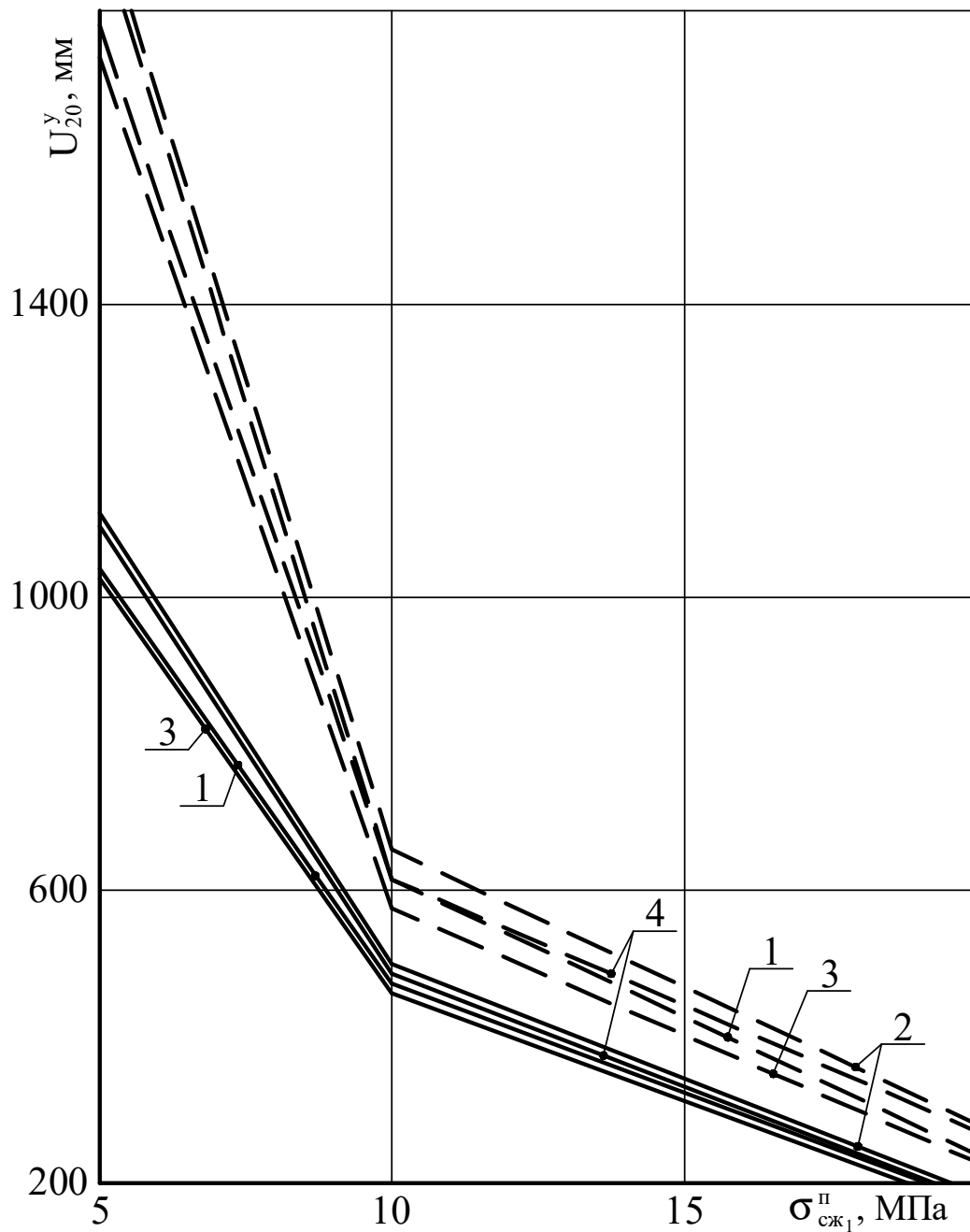


Рис. 4.15 – Поднятие почвы по оси выработки  $U_{20}^y$  в зависимости от глубины разработки  $H$  при:

—  $\sigma_{сж1}^K = 5$  МПа; - - -  $\sigma_{сж1}^K = 20$  МПа;

$$1 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5; 2 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3;$$

$$3 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5; 4 - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2, \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3$$

влияние  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  достигает 10,5%. С другой стороны, если усреднить

анализируемые параметры, то колебания  $U_{20}^y$  в исследуемом диапазоне

не  $(\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1...0,2; \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5...3)$  не выйдут за пределы допускаемой погрешности (10%), что существенно упростит дальнейший вывод уравнения регрессии для расчета поднятия почвы  $U_{20}^y$  выработки в районе ее центральной оси.

Наиболее сильное влияние на перемещение  $U_{20}^y$  оказывает сопротивление сжатию первого породного слоя почвы (до 8,1 раз), поскольку именно от этого параметра весьма зависят размеры областей запредельного состояния пород в почве, которые, обладая значительной подвижностью под воздействием опорного давления, выдавливаются в полость выработки. Помимо  $\sigma_{сж1}^П$ , размеры областей запредельного состояния определяются (рис. 4.16) параметрами  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$

(влияние до 2,14 раз) и  $\frac{M_1^П}{E_1^П}$  (влияние до 87,2%), изменение которых

обязательно к учету при прогнозе пучения почвы выработки.

Законности развития пучения почвы в зоне прохода людей

аналогичны таковым для  $U_{20}^y$  и определяются путем умножения на коэффициент 0,57 со стороны падения пласта и 0,67 – со стороны восстания.

Другой составляющей поднятия почвы выработки является глубина вдавливания  $U_{1,17}^y$  опор стоек в почву под воздействием вертикальной нагрузки на крепь. Глубина вдавливания  $U_{1,17}^y$  определяется

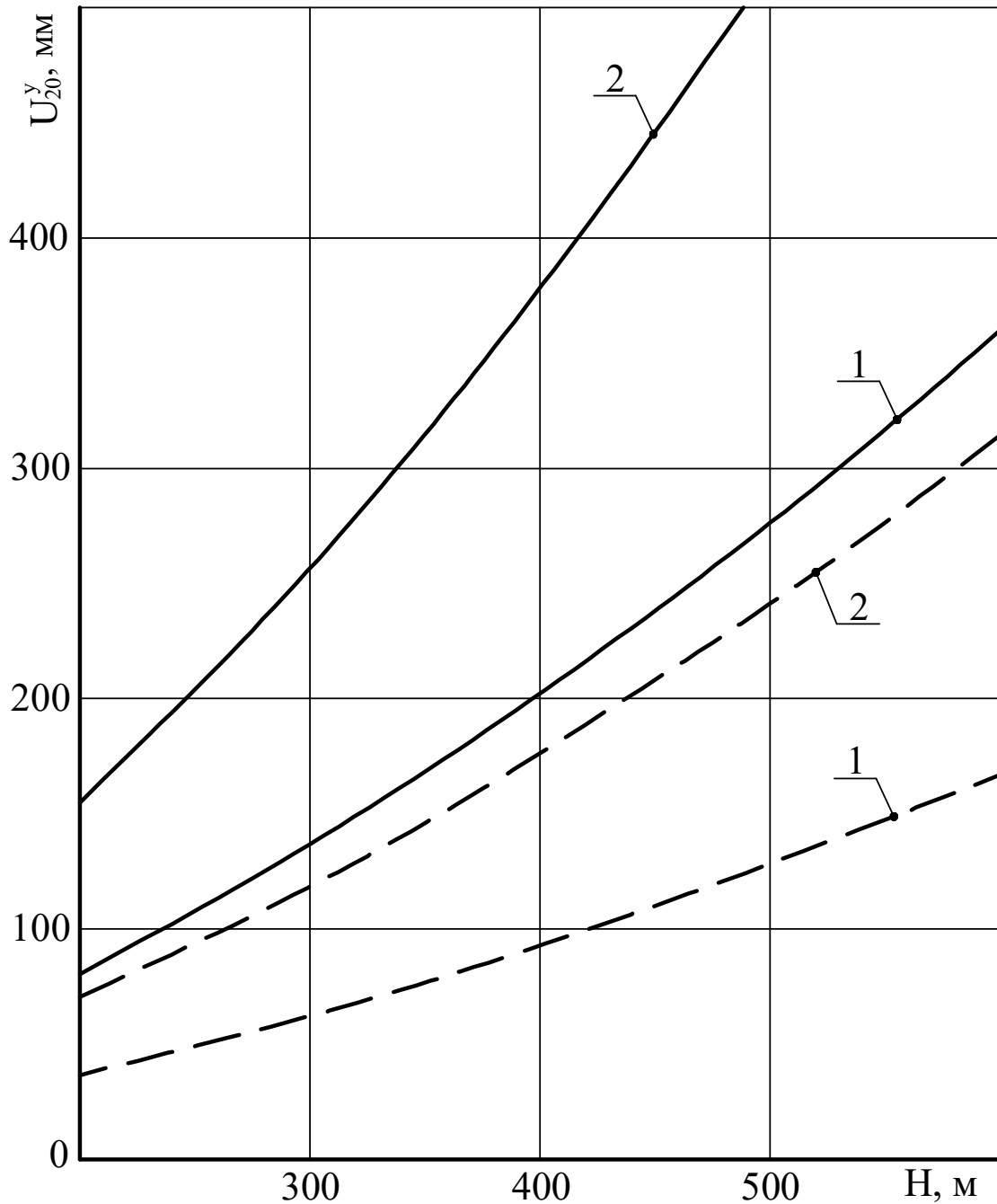


Рис. 4.16 – Поднятие почвы по оси выработки  $U_{20}^y$  в зависимости от глубины разработки  $H$  при:

$$\text{—————} \frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}} = 0,1; \quad \text{-----} \frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}} = 0,2;$$

$$1 - \frac{M_1^{\Pi}}{E_1^{\Pi}} = 0,5; \quad 2 - \frac{M_1^{\Pi}}{E_1^{\Pi}} = 3$$



(помимо глубины разработки) двумя факторами (рис. 4.17 и рис. 4.18): вертикальной нагрузкой на крепь и состоянием (степенью разупрочнения) пород почвы под опорами стоек рамы. Установлено, что существенно влияющими механическими характеристиками первого фактора являются  $\sigma_{сж2}^K$  (до 27,2%) и  $\sigma_{сж1}^K$  (до 66,5%). Второй фактор включает механические характеристики первого породного слоя поч-

вы:  $E_1^П$  – до 32,3%,  $\sigma_{сж1}^П$  – до 8,41 раз,  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$  – до 46,4%.

В части рекомендаций по борьбе с пучением почвы можно отметить следующее. В работе [2] проиллюстрирована достаточно обширная область разупрочненных пород в почве при определенных сочетаниях геомеханических параметров. Однако ограничить пучение можно податливыми анкерами, которые за счет разницы перемещений почвы на наружном и заглубленном конце анкера натягиваются (без разрыва несущего элемента) и формируют сжимающими усилиями некоторое подобие грузонесущей металлопородной конструкции в почве. Смещаясь вместе с породами почвы (на заглубленном конце) податливые анкера компенсируют разницу перемещений почвы по длине анкера.

Таким образом, на наш взгляд, при умеренной величине пучения почвы (в оговоренном ранее диапазоне изменения геомеханических параметров) целесообразно применение податливых анкеров с высокой реакцией сопротивления (повышенные сжимающие усилия, формирующие в породах почвы грузонесущую конструкцию). Этим требованиям в наибольшей степени отвечают конструкции трубчатых анкеров, особенно ТА-2, специально предназначенные для упрочнения слабых пород [56, 57].

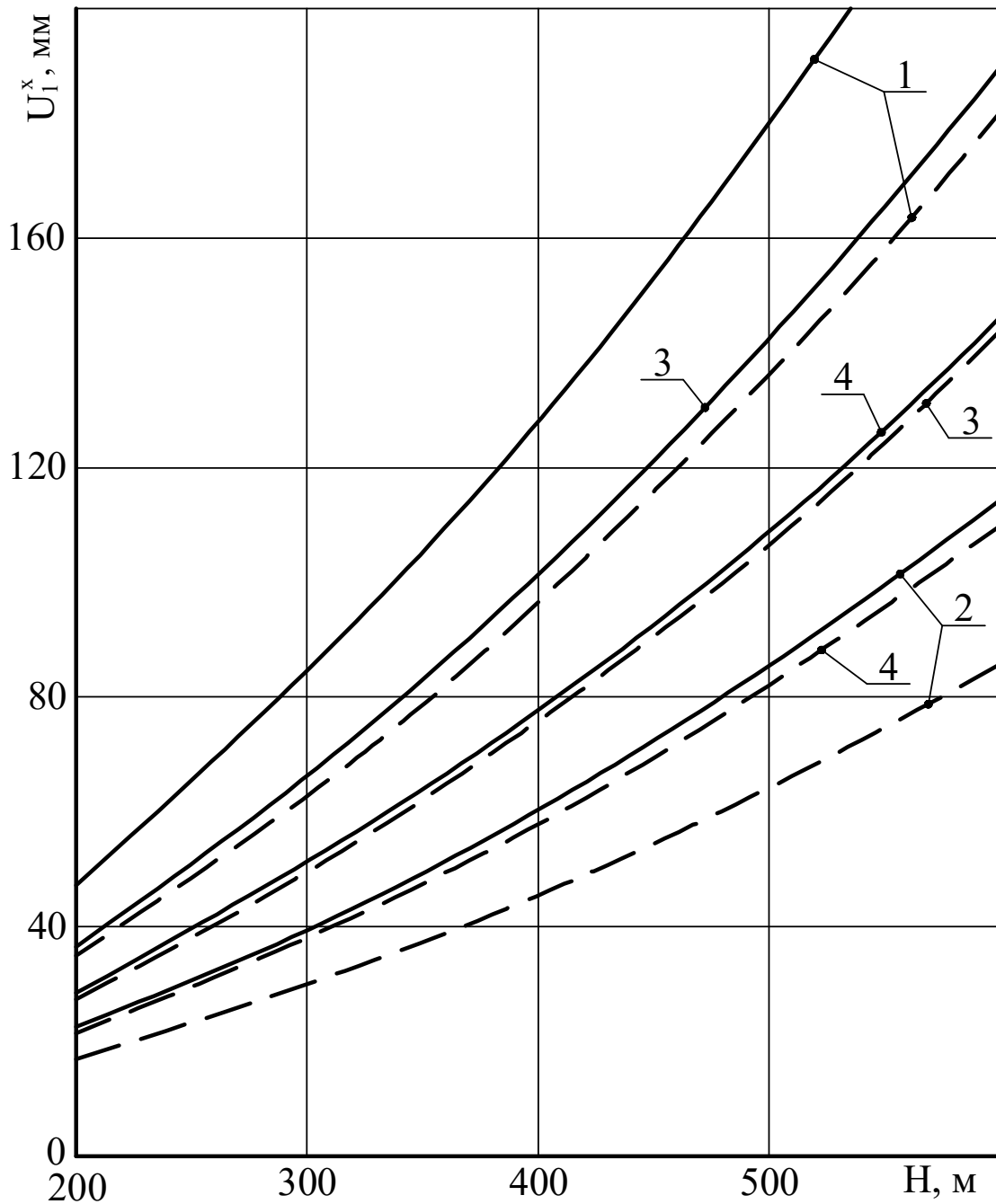


Рис. 4.17 – Вдавливание опоры стойки  $U_1^y$  рамной крепи в зависимости от глубины разработки  $H$  при:  
 —————  $E_1^H = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; — — — —  $E_1^H = 1 \cdot 10^4$  МПа;  
 1 —  $\sigma_{сж1,2}^K = 5$  МПа; 2 —  $\sigma_{сж1,2}^K = 20$  МПа;  
 3 —  $\sigma_{сж1}^K = 5$  МПа,  $\sigma_{сж2}^K = 20$  МПа; 4 —  $\sigma_{сж1}^K = 20$  МПа,  $\sigma_{сж2}^K = 5$  МПа

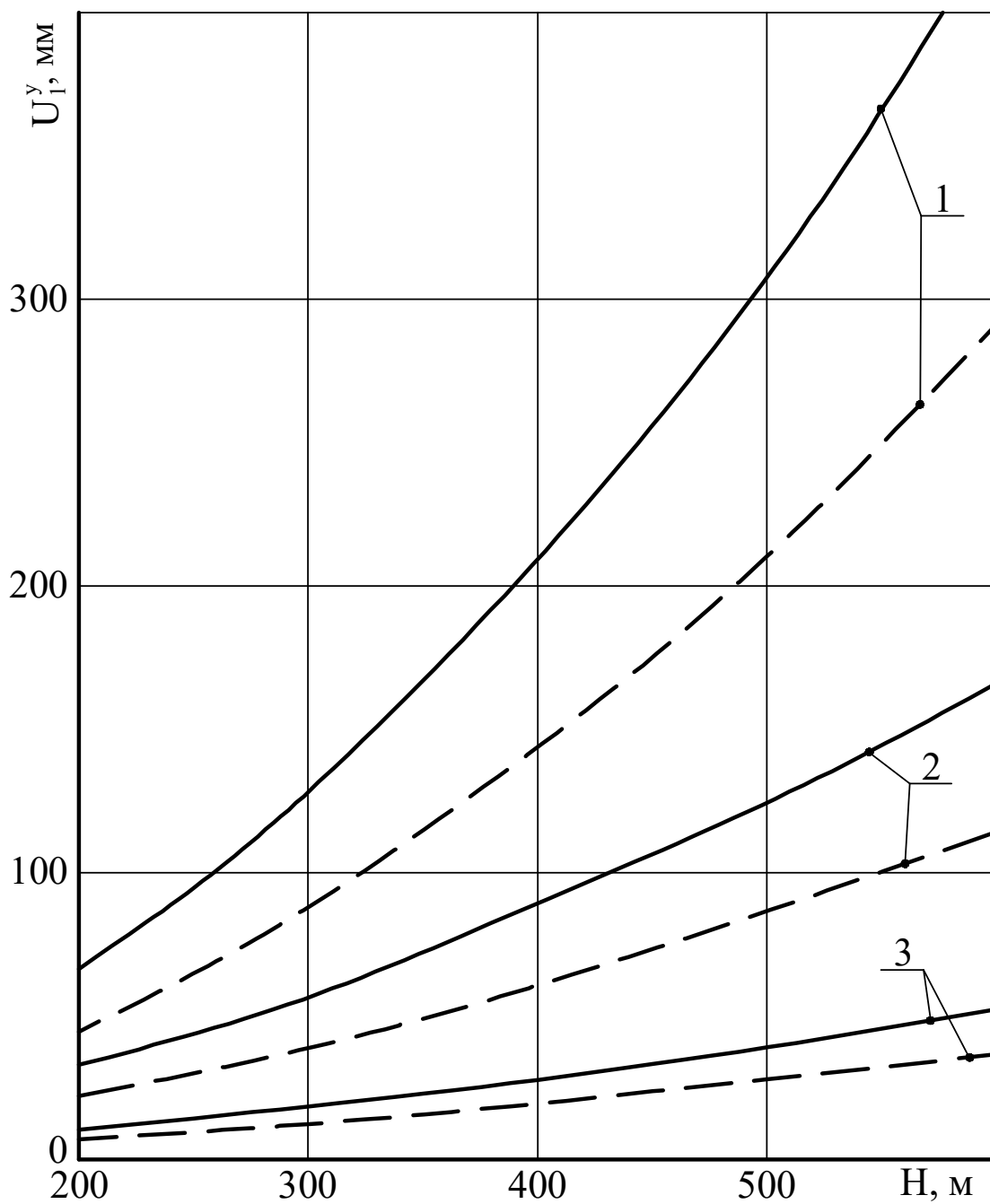


Рис. 4.18 – Вдавливание опоры стойки  $U_1^y$  рамной крепи в зависимости от глубины разработки  $H$  при:

$$\text{—————} \frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}} = 0,1; \quad \text{-----} \frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}} = 0,2;$$

$$1 - \sigma_{сж1}^{\Pi} = 5 \text{ МПа}; \quad 2 - \sigma_{сж1}^{\Pi} = 10 \text{ МПа}; \quad 3 - \sigma_{сж1}^{\Pi} = 20 \text{ МПа}$$

## 4.5 Закономерности изменения контура пластовой выработки

Наряду с установленными закономерностями развития смещений на наиболее ответственных (с точки зрения безопасности функционирования и устойчивости выработки) участках контура выработки не менее важным фактором является определение тенденции его изменения, и как следствие, уменьшения поперечного сечения в процессе сдвижения углевмещающего массива, что ухудшает эффективность проветривания соответствующего участка шахтного поля. Поэтому были проанализированы закономерности изменения контура пластовой выработки и ее относительного сечения  $\frac{S}{S_0}$  (см. рис. 4.2) в зависимости от геомеханических параметров системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки».

На рис. 4.19 приведены эпюры изменения контура выработки с ростом глубины разработки при  $\sigma_{сжг}^{К,П} = 10$  МПа. На эпюрах четко прослеживается ряд особенностей, характерных для различных вариантов сочетаний геомеханических параметров:

- выполаживание свода (уменьшение стрелы подъема) рамы, что снижает ее несущую способность;
- изгиб стоек рамной крепи, который также способствует уменьшению ее несущей способности;
- с ростом глубины разработки становится более заметна асимметрия эпюры контура в кровле и почве выработки, направленная в сторону восстания пласта;
- изгиб стоек рамы происходит более интенсивно со стороны восстания пласта и по этой причине глубина внедрения стойки в почву выше со стороны падения пласта.

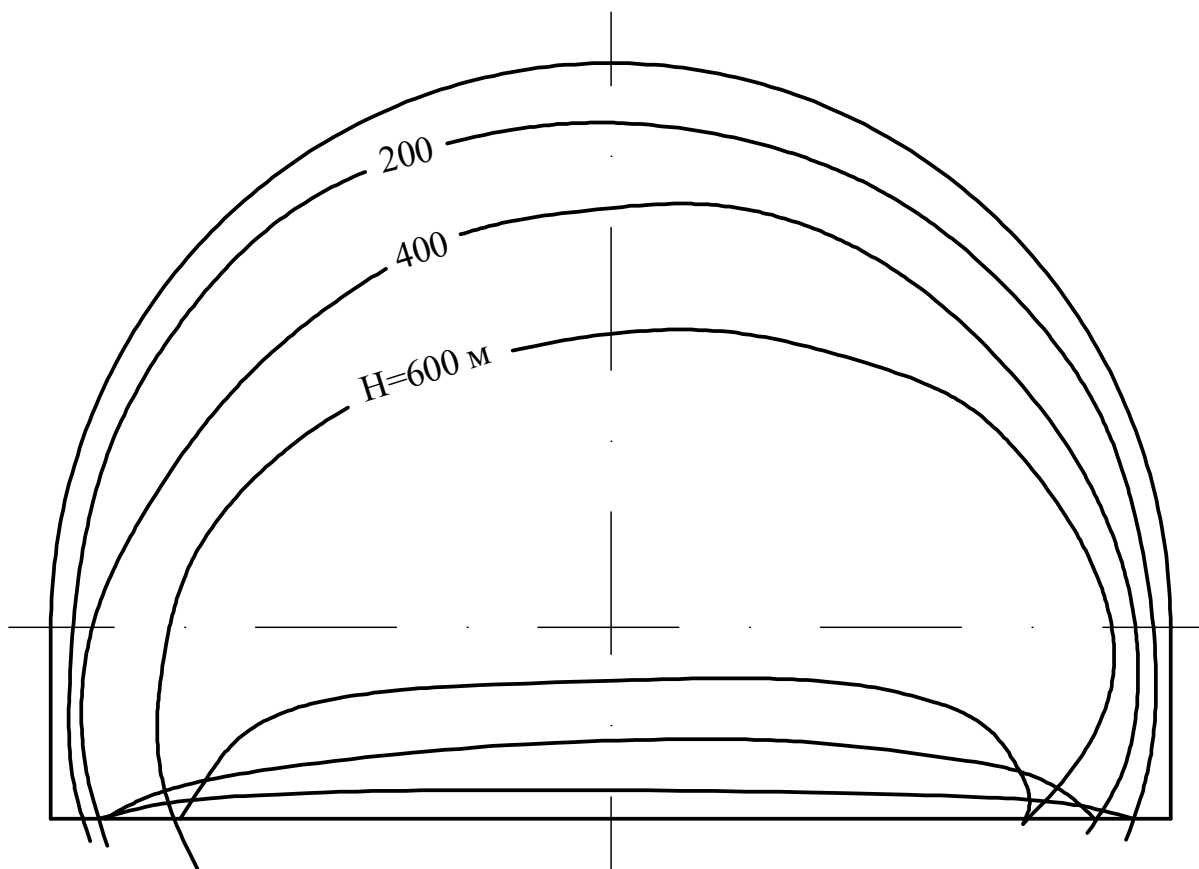


Рис. 4.19 – Изменение контура выработки в зависимости от глубины  $H$  ее расположения

С увеличением глубины расположения выработки уменьшается площадь ее поперечного сечения; потеря сечения  $\frac{S_0 - S}{S_0}$  составляет 13,7% при  $H = 200$  м, 33,4% при  $H = 400$  м и 61,4% при  $H = 600$  м. Как видно из приведенных данных, уже на глубине 400 м сечение выработки уменьшилась на треть и для ее дальнейшей эксплуатации необходимо проводить ремонтно-восстановительные работы: подрывка почвы, выпуск породы в кровле и тому подобное.

Не менее существенно на увеличение потери сечения влияют прочностные характеристики близлежащих породных слоев углевмещающей толщи. На примере глубины  $H = 500$  м (рис. 4.20) показано, что при расчетном сопротивлении сжатию  $\sigma_{сжг}^{K,II} = 20$  МПа близлежащих породных слоев потеря сечения составляет всего 16,1% и выработка находится в удовлетворительном состоянии с точки зрения ее устойчивости и безопасной эксплуатации. При  $\sigma_{сжг}^{K,II} = 10$  МПа потеря сечения составляет 32,1%, что требует проведения комплекса ремонтно-восстановительных работ. При  $\sigma_{сжг}^{K,II} = 5$  МПа потеря сечения возрастает до 81,8% и здесь, скорее всего, решается вопрос о полном перекреплении или проведении новой выработки. В этом плане следует отметить, что на глубине  $H = 600$  м порода заполняет весь объем выработки.

Приведенные данные указывают о чрезвычайной важности определения изменения площади поперечного сечения штрека для оценки его эксплуатационной пригодности. На величину уменьшения сечения штрека  $\frac{S_0 - S}{S_0}$  оказывают влияние перемещения всех участков контура выработки, что ставит параметр  $\frac{S_0 - S}{S_0}$  в зависимость от

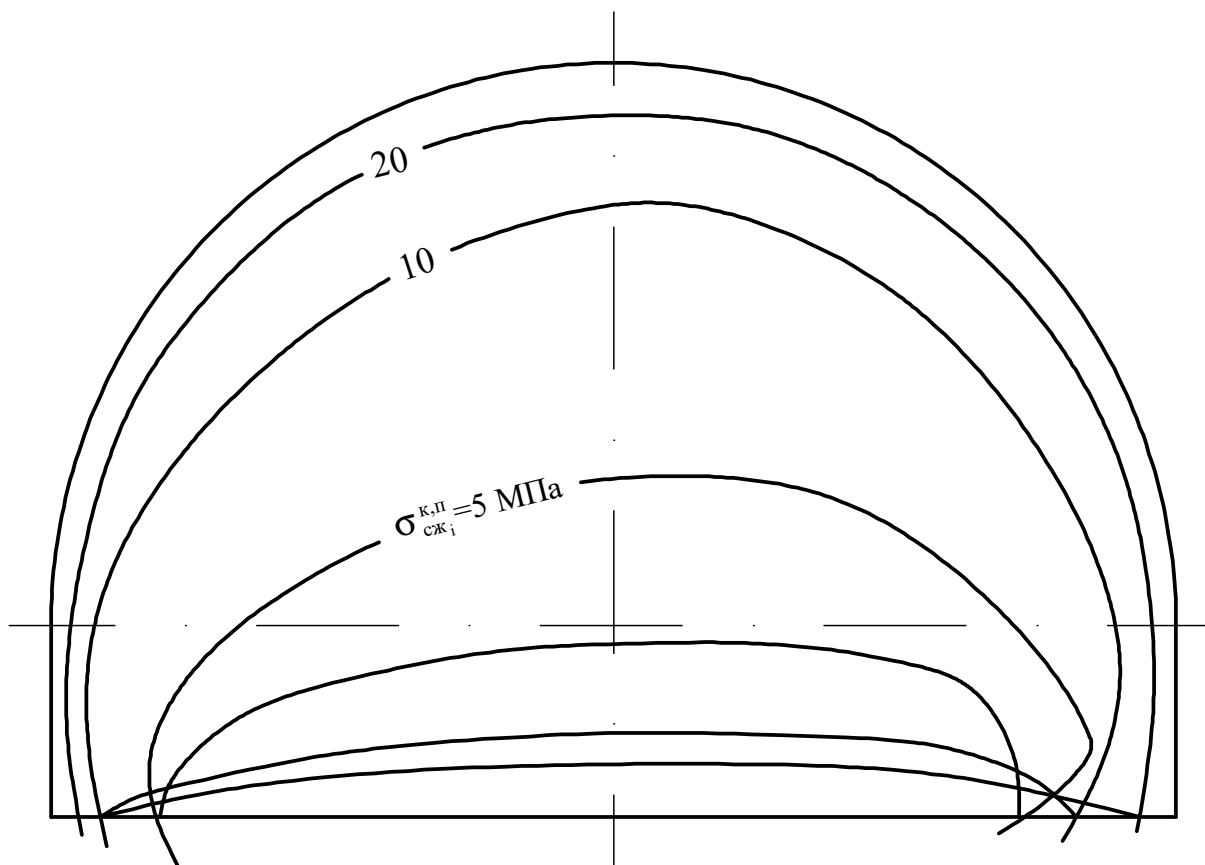


Рис. 4.20 – Изменение контура выработки в зависимости от расчетного сопротивления сжатию  $\sigma_{сж_i}^{к,п}$  близлежащих породных слоев

большого числа механических характеристик близлежащих породных слоев углевмещающей толщи. Поэтому была проведена оценка значимости этого влияния и установлено, что при прогнозе величины потери сечения следует учитывать такие механические характеристики:  $E_1^K$  оказывает влияние до 59,4%,  $E_2^K$  – до 10,5%,  $E_1^П$  – до 24,0%,  $\sigma_{сж1}^K$  – до 4,52 раз,  $\sigma_{сж2}^K$  – до 61,8%,  $\sigma_{сж1}^П$  – до 3,21 раз,  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  – до 44,8%,  $\frac{M_1^П}{E_1^П}$  – до 17,5%,  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  – до 60,4%,  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$  – до 27,3%.

Таким образом, проанализированы закономерности развития перемещений на участках контура пластовой выработки, которые определяют степень ее эксплуатационной пригодности и выполнение (нарушение) требований правил безопасности. Выявленные закономерности формируют базу для разработки новой, более адекватной реальным условиям, методики прогноза проявлений горного давления в пластовой выработке, сооружаемой в слоистом массиве слабых пород.

## Выводы

1. На величину опускания замка свода выработки наиболее существенное влияние оказывают механические характеристики первого и второго породных слоев кровли (в исследованном интервале их изменения):  $E_1^K$  – до 69%,  $E_2^K$  – до 11%,  $\sigma_{сж1}^K$  – до 5,52 раз,  $\sigma_{сж2}^K$  – до 2,07 раз,  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  – до 2,0 раз,  $\frac{(\sigma_{сж2}^K)^0}{\sigma_{сж2}^K}$  – до 10,8%,  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  – до 59%. Перечисленные параметры необходимо учитывать при расчете перемещения замка свода в полость выработки.

2. Вертикальные перемещения свода выработки в зоне прохода людей составляют 64...71% от величины опускания замка свода, что



указывает на его выполаживание и, соответственно, снижение несущей способности рамной крепи. Величина вертикальных перемещений свода в зоне прохода людей может достигать 400...500 мм (иногда более), что в ряде случаев приводит к нарушению требований правил безопасности. Существенное влияние на величину перемещений оказывают следующие механические характеристики близлежащих породных слоев углевмещающей толщи:  $E_1^K$  – до 2 раз,  $\sigma_{сж1}^K$  – до 8,14

раз,  $\sigma_{сж2}^K$  – до 52%, совместное влияние параметров  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  и  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$

запредельного состояния первого породного слоя кровли – до 3,66 раз.

3. Решающее воздействие на развитие боковых перемещений в зоне прохода людей (помимо глубины разработки) оказывают следующие механические характеристики близлежащих породных слоев углевмещающей толщи:  $E_1^K$  – до 2,01 раз,  $E_2^K$  – до 23,9%,  $E_1^П$  – до 15,2%,

$\sigma_{сж1}^K$  – до 6,08 раз,  $\sigma_{сж2}^K$  – до 32,3%,  $\sigma_{сж1}^П$  – до 41,3%,  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  – до

53,6%,  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  – до 74,2% в исследуемом диапазоне их изменения, харак-

терном для углевмещающей толщи угольных пластов Западного Донбасса. Указанные характеристики обязательны к учету при прогнозе боковых перемещений пластовой выработки в зоне прохода людей.

4. Установлено, что величина сближения опор стоек рамной крепи определяется механическими характеристиками только первых породных слоев кровли и почвы угольного пласта:  $E_1^K$  – до 23,4%,

$E_1^П$  – до 2,01 раз,  $\sigma_{сж1}^K$  – до 84%,  $\sigma_{сж1}^П$  – до 6,73 раз,  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$  – до

62,5%,  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  – до 18%,  $\frac{M_1^П}{E_1^П}$  – до 62,2%. Выявлен «эффект штампа»,

когда в вариантах более целостного и жесткого первого породного слоя кровли, он под воздействием опорного давления интенсифицирует перемещение пород почвы в районе опор стоек рамной крепи в полость выработки.

5. Эпюра пучения почвы штрека имеет асимметрию в сторону восстания пласта таким образом, что в зоне прохода людей в этой части выработки пучение составляет 0,67 от максимального (в центральной части выработки), а в зоне прохода людей со стороны падения – 0,57 от максимального вне зависимости от сочетания геомеханических факторов. На величину максимума пучения почвы существенное влияние (помимо глубины разработки) оказывают следующие механические характеристики только первых породных слоев кровли и почвы:  $E_1^K$  – до 19,2%,  $E_1^П$  – до 88,1%,  $\sigma_{сж1}^K$  – до 72,9%,  $\sigma_{сж1}^П$  – до 8,1 раз,  $\frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П}$  – до 2,14 раз,  $\frac{M_1^П}{E_1^П}$  – до 87,2%.

6. Общая величина поднятия почвы выработки включает две составляющие, отличающиеся между собой механизмом развития перемещений: собственно пучение – перемещение пород почвы в полость выработки под воздействием опорного давления в ее боках и разгруженной зоны непосредственно под выработкой; вдавливание опор стоек рамной крепи, обусловлено совместным действием вертикальной нагрузки на крепь и разупрочняющимися породами почвы под опорами стоек. Величина вдавливания опор стоек зависит от таких механических характеристик близлежащих породных слоев углевмещающей толщи:  $E_1^П$  – до 32,3%,  $\sigma_{сж2}^K$  – до 27,2%,  $\sigma_{сж1}^K$  – до 66,5%,

$$\sigma_{сж1}^{\Pi} - \text{до } 8,41 \text{ раз, } \frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}} - \text{до } 46,4\%.$$

7. В результате анализа закономерностей изменения контура пластовой выработки выявлена группа механических характеристик близлежащих породных слоев, оказывающая существенное влияние на величину потери сечения:  $E_1^K$  – до 59,4%,  $E_2^K$  – до 10,5%,  $E_1^{\Pi}$  – до 24,0%,  $\sigma_{сж1}^K$  – до 4,52 раз,  $\sigma_{сж2}^K$  – до 61,8%,  $\sigma_{сж1}^{\Pi}$  – до 3,21 раз,  $\frac{M_1^K}{E_1^K}$  – до 44,8%,  $\frac{M_1^{\Pi}}{E_1^{\Pi}}$  – до 17,5%,  $\frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K}$  – до 60,4%,  $\frac{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0}{\sigma_{сж1}^{\Pi}}$  – до 27,3%.

Перечисленные механические характеристики обязательны к учету при прогнозе остаточного сечения выработки для оценки, например, эффективности проветривания соответствующего участка шахтного поля.

8. Установленные закономерности развития перемещений по всему контуру выработки, по которым судят о возможности ее безопасной эксплуатации, формируют базу для разработки новой, более адекватной реальным условиям, методики прогноза проявлений горного давления в пластовых выработках.

## **5 ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ЕЕ ТИПОРАЗМЕРА**

### **5.1 Методика исследования влияния типоразмера выработки на перемещения ее контура**

На угольных шахтах, в том числе и Западного Донбасса, пластовые выработки (горизонтальные или с небольшим углом наклона до  $6^\circ$ ) широко распространены и их можно разделить на две группы: участковые подготовительные выработки (выемочные штреки и ходки) и основные подготовительные выработки – магистральные штреки рабочего горизонта. Указанные выработки имеют существенно различные размеры с колебанием площади поперечного сечения до двух раз, иногда более [58, 59]. В нормативных методиках [41-43] изменение размеров выработки учитывается соответствующим коэффициентом, который постоянен вне зависимости от того, на каком участке контура выработки определяются перемещения. С другой стороны, на шахтах Западного Донбасса широко применяется крепь КШПУ, геометрия которой предусматривает существенные отличия контура выработки от таковой при традиционной крепи КМП-А3: уменьшенный радиус свода; более удлиненные и наклонные (к вертикальной оси) стойки рамы; по указанным факторам высота и ширина выработок с традиционной крепью КМП-А3 и крепью КШПУ отличается друг от друга при, примерно, одинаковой площади поперечного сечения. Тем не менее, в нормативной методике [42] эти отличия учитываются только коэффициентом (равным 1,1) работоспособности крепи, а какие-либо указания по учету изменений перемещений породного контура выработки отсутствуют.

По совокупности указанных причин выполнен комплекс исследований по выявлению закономерностей влияния размеров и формы выработки на эпюру смещений ее контура.

Форма выработки определяется применяемой крепью, что потребовало рассмотрения двух групп типовых сечений – с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ. Внутри каждой группы выбрано по три типоразмера, которые охватывают наиболее применяемый интервал поперечных сечений выработок на шахтах Западного Донбасса:

- КМП-А3-9,2; КМП-А3-13,8; КМП-А3-18,3;
- КШПУ-9,5; КШПУ-14,4; КШПУ-17,7.

Выбранные типоразмеры двух групп минимально отличаются между собой по площади поперечного сечения, а вариант сечения выработки с крепью КМП-А3-13,8 уже был детально исследован в предыдущих работах [1, 2].

Следующий вопрос касается выбора наиболее объективного параметра, характеризующего конкретное сечение выработки. В нормативной методике [42] использована величина площади поперечного сечения в свету  $S_{св}$  для определения соответствующего поправочного коэффициента, однако не указывается какому периоду работы крепи соответствует значение  $S_{св}$  – до или после осадки. На наш взгляд, за базовый параметр следует использовать  $S_{св}$  до осадки, а изменение поперечного сечения в процессе эксплуатации выработки определяется разрабатываемой методикой прогноза. Параметр  $S_{св}$  также отражает и величину площади сечения выработки в проходке  $S_{пр}$ , поскольку моделируются все конструктивные особенности крепи и закрепного пространства и параметр  $S_{пр}$  отображается автоматически. Таким образом, смоделированы шесть типоразмеров выработки с крепями КМП-А3 и КШПУ.

На заключительном этапе обоснования методики исследований необходимо выбрать наиболее объективно отражающие варианты сочетаний геомеханических параметров системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки».

Глубина расположения выработки при пошаговом алгоритме расчета НДС (в запредельном состоянии) изменяется непрерывно и не участвует в формировании вариантов расчета.

Деформационные характеристики допредельного состояния породных слоев кровли и почвы  $E_i^{K,\Pi}$  и  $\mu_i^{K,\Pi}$  не влияют на вид функции связи перемещений контура выработки и площади ее поперечного сечения в свету. Поэтому, аналогично зависимости (4.1), можно влияние  $E_i^{K,\Pi}$  выразить в виде функции-сомножителя в общей зависимости перемещений, а варианты различных  $S_{св}$  просчитать только для одного значения  $E_i^{K,\Pi}$  (например,  $0,3 \cdot 10^4$  МПа). Остальные варианты по параметрам  $E_i^{K,\Pi}$  определяются из ранее установленных закономерностей [1].

Прочностные характеристики  $\sigma_{сж_i}^{K,\Pi}$  и параметры запредельного состояния близлежащих породных слоев  $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,\Pi})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,\Pi}}$  и  $\frac{M_i^{K,\Pi}}{E_i^{K,\Pi}}$  требуют более детального анализа в плане влияния на вид функции  $U_i^{x,y}(S_{св})$ . Поэтому для более объективного анализа были рассмотрены две группы вариантов сочетаний вышеуказанных параметров.

Первая группа вариантов касается сочетаний  $\sigma_{сж_i}^{K,\Pi}$  близлежащих породных слоев углевмещающей толщи, отображенных в табл. 4.1. Здесь для адекватного отражения закономерностей влияния достаточно восьми «разнополюсных» вариантов №№1, 3, 7, 8, 10, 14, 16 и 18 из табл. 4.1.

Вторая группа вариантов касается параметров запредельного состояния, которые, как показали исследования предыдущего раздела, оказывают заметно меньшее влияние на развитие перемещений контура выработки. Здесь предусмотрено четыре варианта крайних сочетаний параметров

$\frac{(\sigma_{сж1}^{K,П})^0}{\sigma_{сж1}^{K,П}}$  и  $\frac{M_1^{K,П}}{E_1^{K,П}}$ , так как аналогичные параметры

второго породного слоя кровли не оказывают существенного влияния на перемещения выработки, что было установлено в предыдущем раз-

деле. В данных вариантах соединены крайние значения  $\frac{(\sigma_{сж1}^{K,П})^0}{\sigma_{сж1}^{K,П}}$  и

$\frac{M_1^{K,П}}{E_1^{K,П}}$  на том основании [48, 50, 60], что более хрупкая порода (по-

вышенный модуль спада) отличается пониженной остаточной прочностью, а более пластичная (пониженный модуль спада) – повышенной величиной остаточной прочности. Тогда четыре варианта сочетаний параметров запредельного состояния первых слоев кровли и почвы имеют вид:

$$\text{№1} - \frac{(\sigma_{сж1}^{K,П})^0}{\sigma_{сж1}^{K,П}} = 0,1, \quad \frac{M_1^{K,П}}{E_1^{K,П}} = 3;$$

$$\text{№2} - \frac{(\sigma_{сж1}^{K,П})^0}{\sigma_{сж1}^{K,П}} = 0,2, \quad \frac{M_1^{K,П}}{E_1^{K,П}} = 0,5;$$

$$\text{№3} - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,1, \quad \frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П} = 0,2, \quad \frac{M_1^K}{E_1^K} = 3, \quad \frac{M_1^П}{E_1^П} = 0,5;$$

$$\text{№4} - \frac{(\sigma_{сж1}^K)^0}{\sigma_{сж1}^K} = 0,2, \quad \frac{(\sigma_{сж1}^П)^0}{\sigma_{сж1}^П} = 0,1, \quad \frac{M_1^K}{E_1^K} = 0,5, \quad \frac{M_1^П}{E_1^П} = 3.$$

Параметры запредельного состояния остальных породных слоев и угольного пласта остаются постоянными [2].

Таким образом, к расчету НДС сформировано 160 вариантов (с учетом того, что типоразмер выработки с крепью КМП-А3-13,8 уже просчитан), на базе которых установлены закономерности влияния типоразмера выработки на развитие перемещений ее контура.

## 5.2 Закономерности влияния типоразмера пластовой выработки на эпюру перемещений ее контура

Как отмечалось ранее, одна из особенностей разрабатываемой методики является дифференциация закономерностей развития перемещений по отдельным участкам контура выработки: кровля (замок свода, зона прохода людей), бока (зона прохода людей, опоры стойки рамы), почва (центральная часть выработки, зона прохода людей, вдавливание опор стоек рамы в почву). На интенсивность процесса перемещения контура выработки наиболее сильное воздействие оказывает глубина разработки и расчетное сопротивление сжатию  $\sigma_{сжi}^{К,П}$  близлежащих породных слоев углевмещающей толщи (см. раздел 4). Поэтому, в первую очередь, внимание уделено графической иллюстрации закономерностей влияния сечения выработки в свету  $S_{св}$  на функции  $U^{x,y}(H, \sigma_{сжi}^{К,П})$  в различных точках контура выработки. Влияние  $S_{св}$  на функции связи  $U^{x,y}$  с другими механическими характеристиками близлежащих породных слоев также было оценено и использовано в разрабатываемой методике прогноза перемещений контура пластовой выработки.

Исследование функций  $U^{x,y}(S_{св})$  выполнено, начиная с кровли выработки. На рис. 5.1 приведены зависимости роста опускания замка свода  $U_9^y$  с увеличением глубины разработки для трех типовых сечений с крепью КМП-А3 и трех типовых сечений с крепью КШПУ.



Анализ этих зависимостей выявил ряд закономерностей влияния  $S_{ce}$  на перемещения замка свода:

– четко прослеживается нелинейность функций  $U_9^y(S_{ce})$  в отличие от линейной зависимости по нормативной методике [42]. Выявленная нелинейность  $U_9^y(S_{ce})$  вытекает из самой физической сущности исследуемой геомеханической задачи, где перемещения прямо пропорциональны линейным размерам выработки, а от ее площади  $S_{ce}$  имеют степенную зависимость. Так, для крепи КМП-А3 увеличение  $S_{ce}$  на  $4,6 \text{ м}^2$  (от  $9,2 \text{ м}^2$  до  $13,8 \text{ м}^2$ ) способствует росту  $U_9^y$  на  $28,9\%$ , а почти такое же увеличение  $S_{ce}$  на  $4,5 \text{ м}^2$  (от  $13,8 \text{ м}^2$  до  $18,3 \text{ м}^2$ ) снижает интенсивность роста до  $20,2\%$ . Еще большая нелинейность  $U_9^y(S_{ce})$  наблюдается для крепи КШПУ;

– перемещения  $U_9^y$  при, примерно, одинаковой величине  $S_{ce}$  всегда меньше для типового сечения с крепью КШПУ и эта разница с ростом  $S_{ce}$  увеличивается:  $6,7\%$  – для  $S_{ce} = 9,2 \text{ м}^2$  и  $9,5 \text{ м}^2$ ;  $13,4\%$  – для  $S_{ce} = 13,8 \text{ м}^2$  и  $14,4 \text{ м}^2$ ;  $18,7\%$  – для  $S_{ce} = 18,3 \text{ м}^2$  и  $17,7 \text{ м}^2$ . Это объясняется тем, что форма крепи КШПУ такова, что более эффективно противодействует вертикальным нагрузкам [61], в том числе и за счет уменьшенного радиуса свода. С увеличением  $S_{ce}$  радиус свода в крепях КШПУ растет менее интенсивно, поэтому темпы роста перемещений  $U_9^y$  также замедлены в сравнении с выработками, где предусмотрены крепи серии КМП-А3;

– наблюдается стабильность отношения перемещений  $U_9^y$  для разных типоразмеров сечений выработки вне зависимости от глубины ее расположения, что указывает на независимость функции  $U_9^y(S_{ce})$

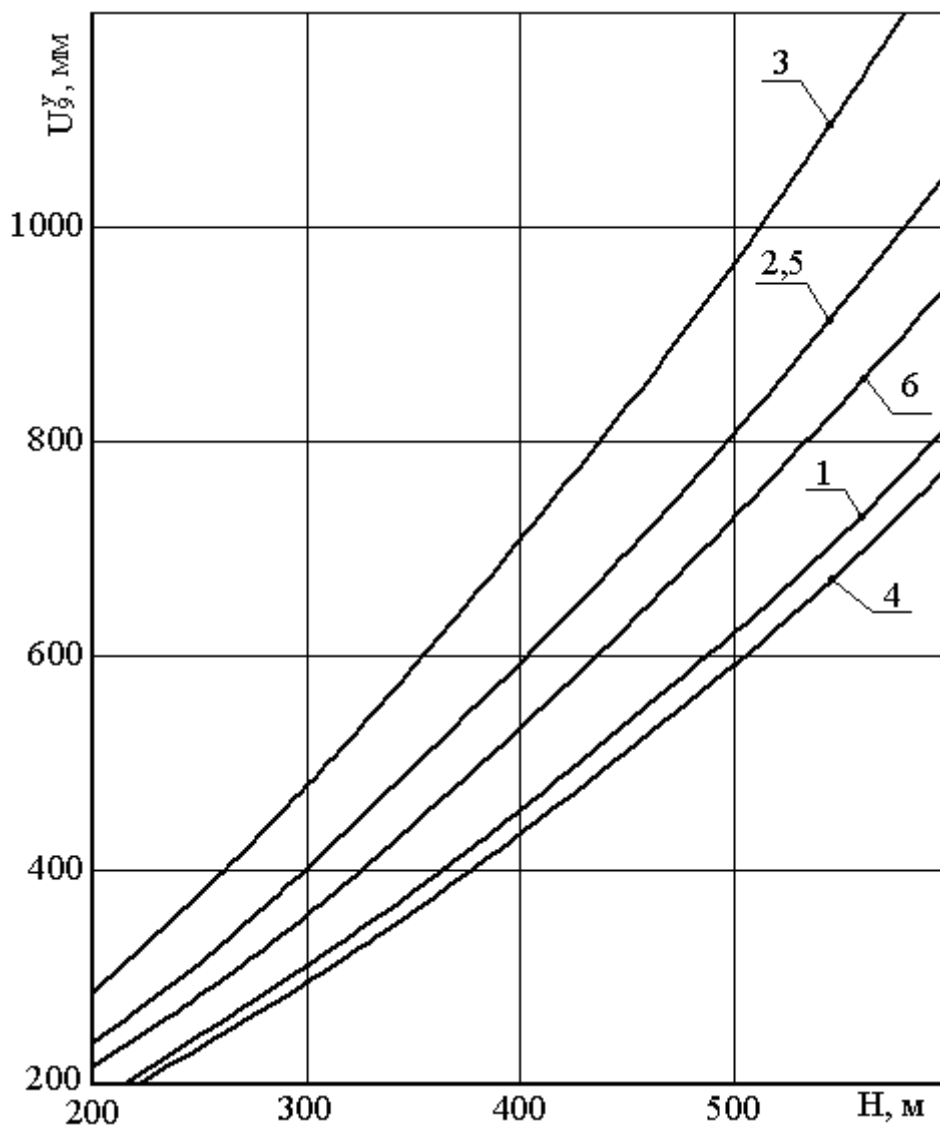


Рис. 5.1 – Закономерности развития опускания  $U_0^y$  замка свода с ростом глубины  $H$  разработки для типоразмеров выработки:

1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8; 3 – КМП-А3-18,3;  
 4 – КШПУ-9,5; 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

от  $H$  и ее можно использовать в качестве множителя к ранее установленным закономерностям связи развития перемещений  $U_9^y$  с геомеханическими параметрами системы по аналогии с поправочным коэффициентом сечения выработки в нормативной методике [42].

Отмеченные особенности функции  $U_9^y(S_{св}, H)$  стабильно проявляются и при варьировании прочностных характеристик  $\sigma_{сжi}^{K,II}$  близлежащих породных слоев (рис. 5.2), что подтверждает вывод о возможности корректировки перемещений  $U_9^y$  функцией  $U_9^y(S_{св})$ , постоянной при различных вариантах сочетаний параметров  $H$  и  $\sigma_{сжi}^{K,II}$ .

Изменение характеристик запредельного состояния  $\frac{(\sigma_{сж1}^{K,II})^0}{\sigma_{сж1}^{K,II}}$  и  $\frac{M_1^{K,II}}{E_1^{K,II}}$  также подтверждает независимость функции  $U_9^y(S_{св})$  от различных сочетаний указанных параметров.

Таким образом, очевиден вывод о том, что установленные закономерности влияния типоразмера выработки (отдельно для крепей КМП-А3 и КШПУ) можно использовать как множитель для общей закономерности развития опускания замка свода  $U_9^y$ .

Исследованиями вертикальных перемещений участка свода в зоне прохода людей  $U_{4,5}^y$  при разных типоразмерах выработки доказана стабильность отношения  $\frac{U_{4,5}^y}{U_9^y} = 0,62...0,71$  вне зависимости от вариантов сочетаний геомеханических параметров системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки». Это позволяет для определения  $U_{4,5}^y$  использовать закономерности  $U_9^y(S_{св})$  с учетом понижающего коэффициента, равного 0,62...0,71.

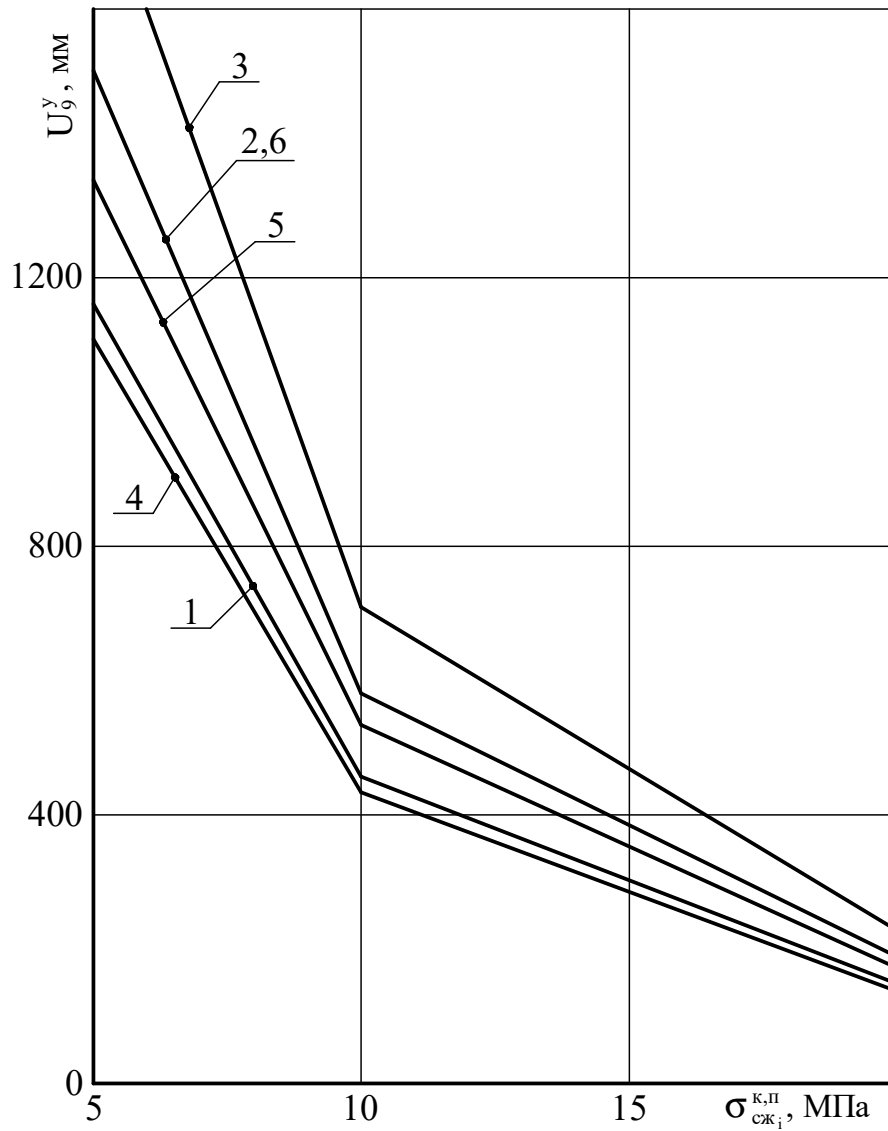


Рис. 5.2 – Закономерности связи опускания  $U_9^y$  замка свода с расчетным сопротивлением сжатию  $\sigma_{сж_i}^{K,П}$  близлежащих породных слоев для типоразмеров выработки:

- 1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8; 3 – КМП-А3-18,3;  
 4 – КШПУ-9,5; 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

Анализ влияния типоразмера выработки на развитие боковых перемещений в зоне прохода людей  $U_{4,5}^x$  и опор стоек рамной крепи  $U_{1,17}^x$  выявил следующие закономерности:

– с увеличением  $S_{св}$  стабильно возрастают боковые перемещения (в исследуемом интервале изменения  $S_{св}$ ): для выработок с крепью КМП-А3 в зоне прохода людей – до 49,5%, в опорах стоек – до 51%, то есть закономерности связи  $U_{4,5}^x$  и  $U_{1,17}^x$  с площадью поперечного сечения выработки в свету примерно одинаковы; для выработок с крепью КШПУ в зоне прохода людей – до 46,9%, в опорах стоек – до 55,7%, то есть рост  $U_{1,17}^x$  происходит более интенсивно;

– боковые перемещения для типовых сечений с крепью КШПУ стабильно больше, чем для типоразмеров с крепью КМП-А3: в зоне прохода людей – на 14,0...16,4%; в опорах стоек рам – на 32,7...44,3%. Это обусловлено действием двух факторов. Первый – высота выработки с крепью КШПУ как правило больше, чем таковая с крепью КМП-А3 для примерно одинаковой площади их сечения, что снижает сопротивление рамы боковым нагрузкам. Второй – наклон стоек рамной крепи КШПУ к вертикальной оси выработки создает дополнительный момент от вертикальных нагрузок, усиливающих процесс бокового перемещения стоек крепи КШПУ;

– разница в степени увеличения перемещений на уровне прохода людей и в опорах стоек объясняется тем, что поворот стоек внутрь выработки происходит в основном относительно пластического шарнира в районе замков рамы и плечо поворота для опоры стойки намного больше, чем для зоны прохода людей;

– интенсивный изгиб прямолинейной части стоек на больших глубинах, наблюдаемый у крепи КМП-А3 (особенно, со стороны вос-

стания пласта), для крепи КШПУ выражен менее явно и прямолинейная часть стоек в значительной степени сохраняет свою первоначальную (прямолинейную) геометрию. Это обусловлено совместным действием трех факторов. Первый – изгибающий момент от боковых нагрузок и второй – момент от горизонтальных перемещений почвы под опорами стойки рамы изгибают стойку моментом, действующим против часовой стрелки. Третий фактор – изгибающий момент по часовой стрелке отчасти компенсирует изгиб стойки и формируется за счет вертикальных нагрузок, действующих на наклонную прямолинейную часть стойки крепи КШПУ;

– геомеханические параметры системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» влияют на боковые перемещения выработки с закономерностями, не зависящими от ее типового сечения, что позволяет произвести учет размеров выработки в виде функции-сомножителя  $\Phi(S_{св})$  к стабильной функции связи горизонтальных перемещений с геомеханическими параметрами. Для наглядного примера приведены зависимости  $U_{4,5}^x(H)$  при  $\sigma_{сжi}^{K,II} = 10 \text{ МПа}$  (рис. 5.3) и  $U_{4,5}^x(\sigma_{сжi}^{K,II})$  при  $H = 400 \text{ м}$  (рис. 5.4) для шести типовых сечений выработки, доказывающие обоснованность такого решения. Так, разница  $U_{4,5}^x$  для КМП-А3-9,2 и КШПУ-17,7 на глубине  $H = 200 \text{ м}$  составляет 71,8%, а на глубине  $H = 600 \text{ м}$  – 70,9%, то есть практически постоянна вне зависимости от глубины расположения выработки (см. рис. 5.3). Разница в перемещениях  $U_{4,5}^x$  для КМП-А3-13,8 и КШПУ-14,4 составляет 18,4% при  $\sigma_{сжi}^{K,II} = 5 \text{ МПа}$  и 17,9% при  $\sigma_{сжi}^{K,II} = 20 \text{ МПа}$  (см. рис. 5.4). Такое же постоянство отношений  $U_{4,5}^x$  для различных типов-размеров выработки имеет место при вариации характеристик предельного состояния близлежащих породных слоев.

Анализ горизонтальных перемещений опор стоек рамы  $U_{1,17}^x$  подтверждает стабильность функций влияния типоразмера выработки вне зависимости от геомеханических параметров системы.

Связь пучения почвы с типоразмерами сечения пластовых выработок имеет следующие закономерности:

– максимум пучения  $U_{20}^y$  практически одинаков для типовых сечений выработок с крепями КМП-А3 и КШПУ, что обусловлено, на наш взгляд, незначительными колебаниями ширин выработок с примерно равной площадью сечения в свету. Такое объяснение вытекает из результатов исследований, установивших, что ширина выработки по почве является одним из главных факторов (помимо геомеханических параметров), который определяют интенсивность пучения почвы в слабых породах;

– интенсивность роста пучения пород почвы с увеличением  $S_{ce}$  оказалась несколько выше (для КМП-А3 на 4,0...4,9%; для КШПУ на 2,7...22,1%), чем опускание кровли, что может быть объяснено отсутствием в почве выработки крепежных элементов (обратного свода) и менее устойчивой плоской поверхностью почвы в отличие от сводообразной формы кровли. Так, для исследованных трех типоразмеров сечений с крепью КМП-А3 рост перемещений замка свода составил 54,9%, а пучения почвы – 68,9%; для трех типоразмеров с крепью КШПУ различия более существенны: в кровле 35%, в почве рост составил 60,5%;

– форма контура почвы выработки достаточно постоянна в виде неправильного полуэллипса, когда со стороны восстания пласта перемещения почвы выше на 8,3...17,5%. Отношения перемещений  $U_{18}^y$  и  $U_{22}^y$  к максимуму  $U_{20}^y$ , характеризующих центральную часть выработки ( $2/3$  от ее ширины по почве), весьма стабильны (вне зависимости от

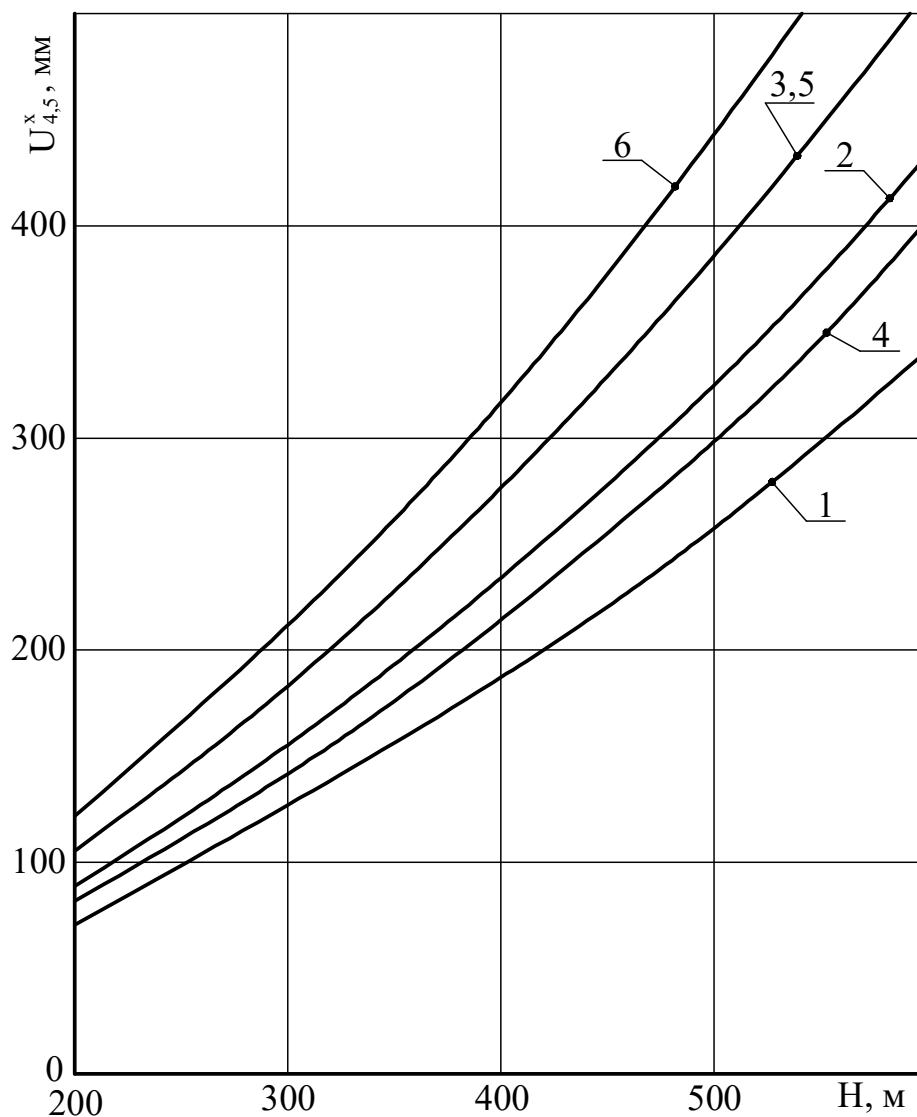


Рис. 5.3 – Горизонтальное перемещение  $U_{4,5}^x$  стойки рамы в зоне

прохода людей с ростом глубины разработки для  
типоразмеров выработки:

1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8; 3 – КМП-А3-18,3;

4 – КШПУ-9,5; 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7



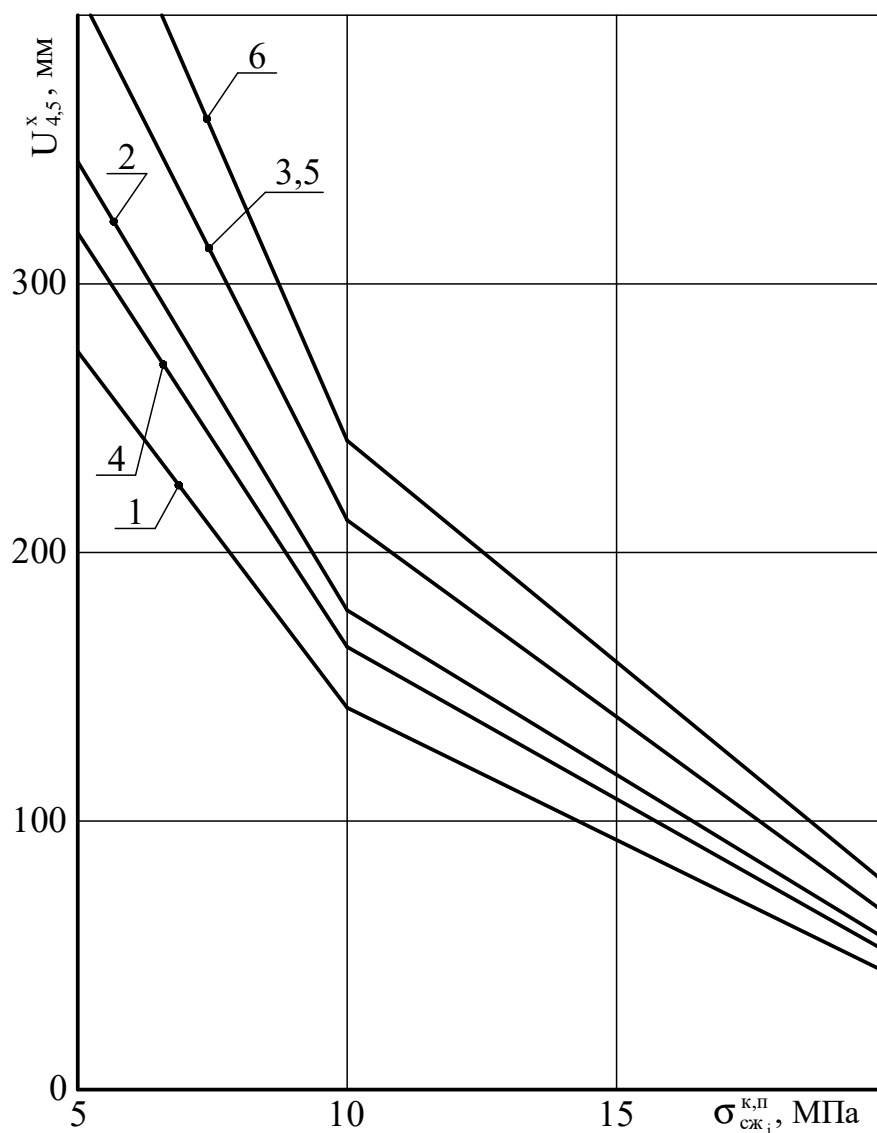


Рис. 5.4 – Горизонтальное перемещение  $U_{4,5}^x$  стойки рамы в зоне

прохода людей в зависимости от  $\sigma_{сж1}^{К,П}$  для

типоразмеров выработки:

1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8; 3 – КМП-А3-18,3;

4 – КШПУ-9,5; 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

типоразмера выработки) и усредненное их значение составляет: для крепи КМП-А3  $\frac{U_{18}^y}{U_{20}^y} = 0,67$  и  $\frac{U_{22}^y}{U_{20}^y} = 0,57$ ; для крепи КШПУ  $\frac{U_{18}^y}{U_{20}^y} = 0,65$  и

$\frac{U_{22}^y}{U_{20}^y} = 0,60$ . По этим отношениям можно судить, например, об угле на-

клона рельсового пути в двухпутевых выработках и проводить сравнение с допустимыми нормами эксплуатации подвижного состава;

– закономерности влияния типоразмера выработки на пучение ее почвы аналогичны таковым для перемещений кровли и боков в части независимости функции  $U_{18,20,22}^y(S_{ce})$  от геомеханических параметров системы. Для доказательства данного факта на рис. 5.5 и рис. 5.6 приведены закономерности связи максимума  $U_{20}^y$  пучения пород почвы с глубиной разработки и сопротивлением сжатию  $\sigma_{сж_i}^{K,П}$  близлежащих породных слоев для шести типовых сечений с крепями КМП-А3 и КШПУ.

В предыдущем разделе было отмечено, что вдавливание стоек рамы в почву приводит к уменьшению остаточного сечения выработки и данное явление обязательно к учету при прогнозе ее эксплуатационного состояния. В этой связи установлен ряд особенностей влияния типоразмера выработки на величину вдавливания  $U_{1,17}^y$  опор стоек в почву:

– с увеличением площади сечения выработки возрастает суммарная вертикальная нагрузка на нее, которая передается на опоры стойки и увеличивает глубину их внедрения в почву. В исследуемом диапазоне  $S_{ce}$  глубина вдавливания опор увеличивается до 36,9% для выработок с крепью КМП-А3 и до 42,1% для выработок с крепью КШПУ;

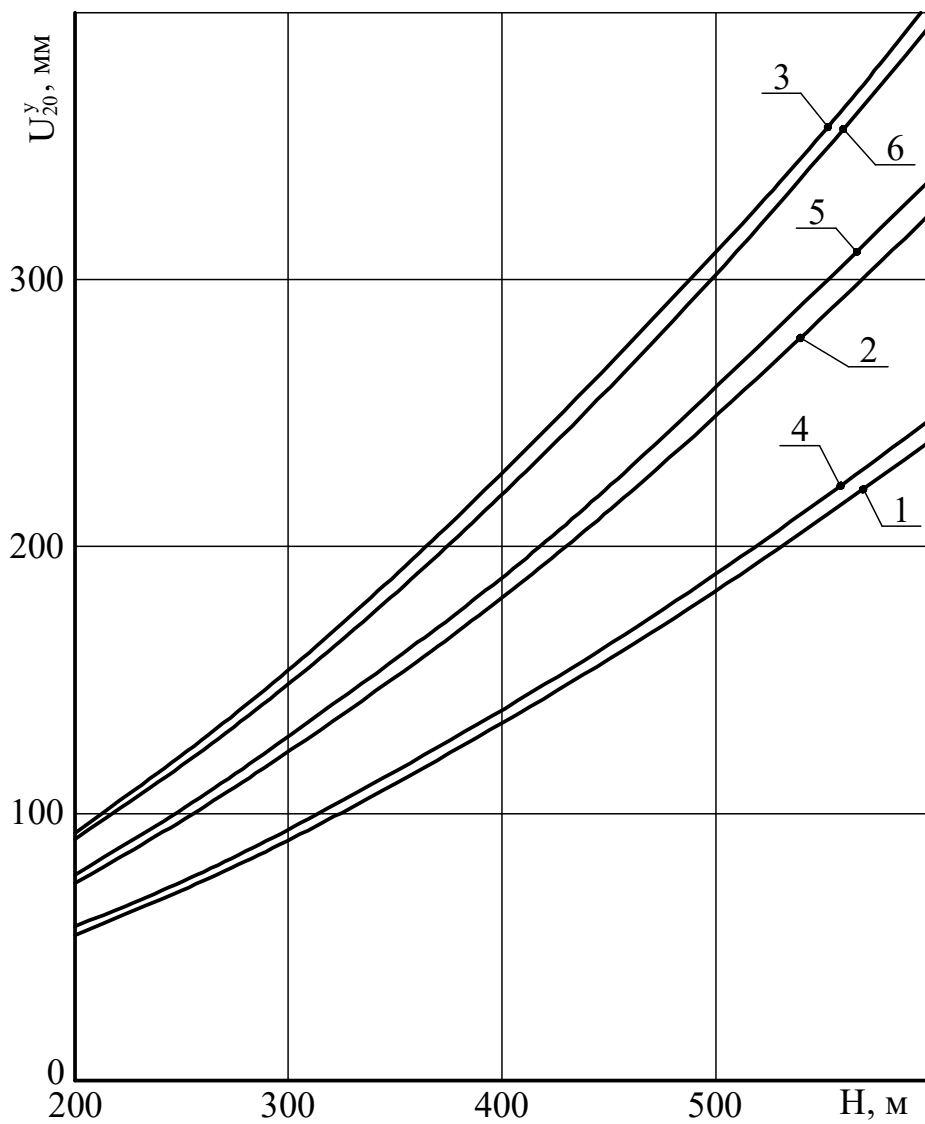


Рис. 5.5 – Максимум  $U_{20}^y$  поднятия почвы с ростом глубины

разработки для типоразмеров выработки:

1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8; 3 – КМП-А3-18,3;

4 – КШПУ-9,5; 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

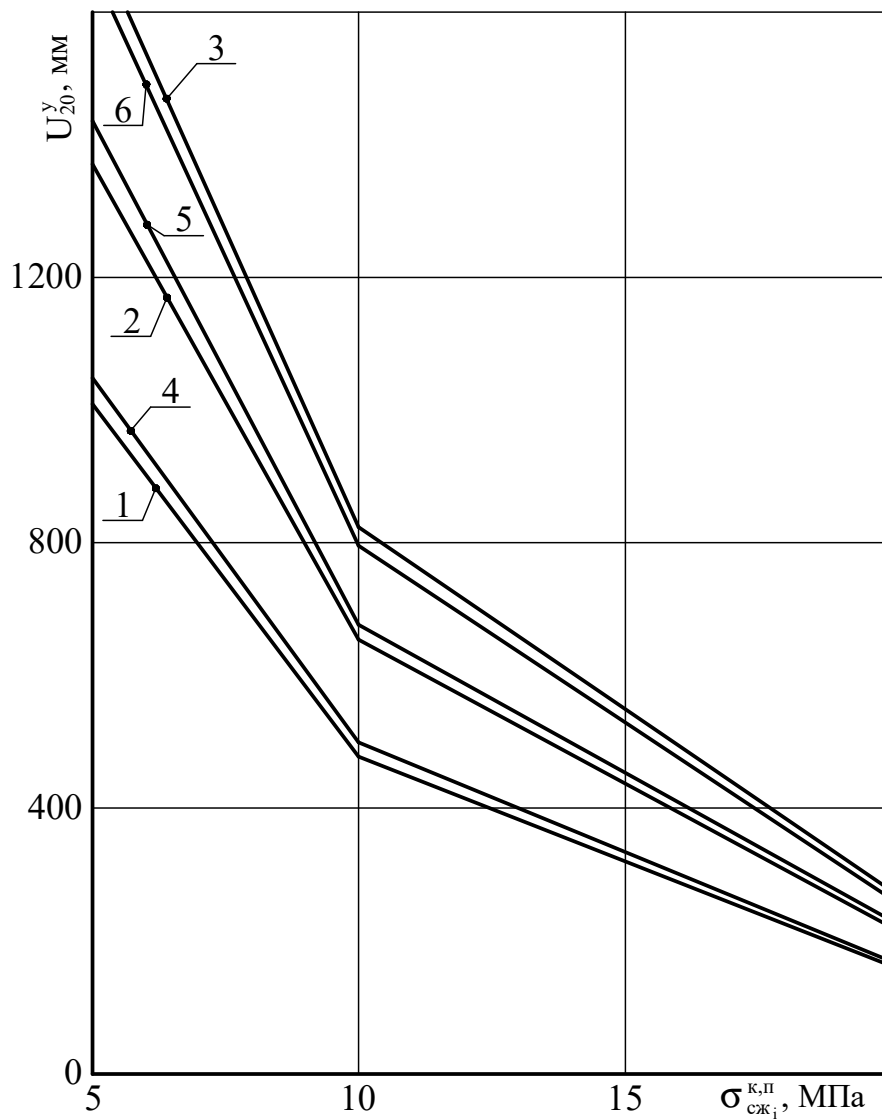


Рис. 5.6 – Максимум  $U_{20}^y$  поднятия почвы в зависимости от

$\sigma_{сж1}^{к,п}$  для типоразмеров выработки:

1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8; 3 – КМП-А3-18,3;

4 – КШПУ-9,5; 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

– глубина вдавливания стоек для крепи КШПУ на 12,0...20,6% выше, чем для крепи КМП-А3 при прочих равных условиях. Это обусловлено менее интенсивным изгибом прямолинейной части стоек у крепи КШПУ, что одновременно снижает сопротивление ее внедрению в почву.

Глубина вдавливания  $U_{1,17}^y$  опор стоек должна приплюсовываться к величине пучения почвы для оценки общей величины сближения «кровля-почва» и потери сечения выработки.

Выявленные закономерности влияния типоразмера выработки в интегральной форме проявляются на изменении площади ее поперечного сечения и, в частности, на такой относительной характеристике, как потеря площади сечения  $\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}}$  выработки в свету, для которой на рис. 5.7 приведены отдельные зависимости для  $E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4$  МПа и  $\sigma_{сж_i}^{K,П} = 10$  МПа. Обращает внимание рост потери сечения пластовой выработки по степенной зависимости с увеличением глубины ее расположения при относительно небольших отклонениях для разных типоразмеров выработки. Так, для типоразмеров выработок с крепью КМП-А3 увеличение площади поперечного сечения в свету  $S_{св}$  от 9,2 м<sup>2</sup> до 18,3 м<sup>2</sup> способствует росту потери сечения всего на 8,8% на глубине  $H = 200$  м и на 3,6% на глубине  $H = 600$  м; для типоразмеров выработок с крепью КШПУ рост потери сечения составляет 6,2% и 6,4% соответственно при сравнении типовых сечений КШПУ-9,5 и КШПУ-17,7. Потеря сечения для типоразмеров выработок (примерно равноценных) с крепью КШПУ несколько выше (до 8,2...10,6%), чем с крепью КМП-А3. Это обусловлено более интенсивным сближением боков у крепи КШПУ из-за удлиненных стоек рамы, которые поворачиваются относительно пластического шарнира, возникающего в районе пяты свода. Кроме

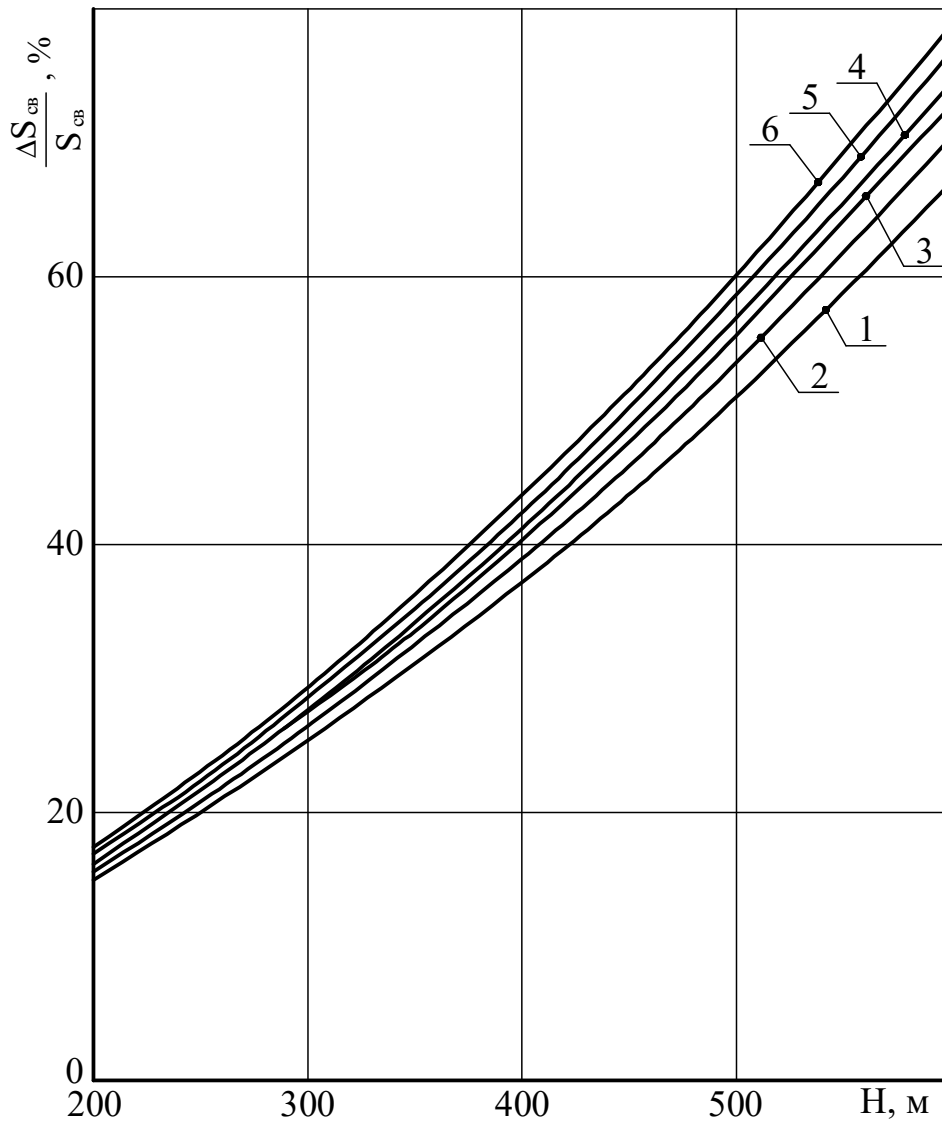


Рис. 5.7 – Потеря сечения штока  $\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}}$  в зависимости от

глубины разработки для типоразмеров выработки:  
 1 – КМП-А3-9,2; 2 – КМП-А3-13,8; 3 – КМП-А3-18,3;  
 4 – КШПУ-9,5; 5 – КШПУ-14,4; 6 – КШПУ-17,7

того, стойки крепи КШПУ вдавливаются в почву на несколько большую величину, чем у крепи КМП-А3.

В целом, достаточная независимость величины потери сечения от типоразмера выработки наблюдается при различных сочетаниях геомеханических параметров системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» и объясняется компенсацией прироста смещений контура при увеличении  $S_{cv}$  (см. рис. 5.1-рис. 5.6) ростом самой площади сечения выработки в свету, которая является знаменателем в формуле относительного параметра – потеря сечения штрека под воздействием проявлений горного давления.

### **5.3 Оценка достоверности прогноза перемещений контура выработки**

Основные результаты проведенных исследований всесторонне проанализированы на предмет сравнения с существующими общепринятыми методиками расчета проявлений горного давления для оценки сходных и отличительных черт установленных закономерностей и степени их достоверности при прогнозе эксплуатационного состояния пластовой выработки. В этой связи, наиболее объективно, на наш взгляд, будет комплексное сравнение с аналитико-эмпирическими методиками, построенными на базе обширных шахтных исследований проявлений горного давления, и аналитическими методами, учитывающими характеристики запредельного состояния вмещающего массива, которые в шахтном эксперименте выявить и разделить чрезвычайно затруднительно.

К настоящему времени разработан и повсеместно используется ряд руководящих нормативных документов [41-43], где в качестве базового прогнозируемого параметра проявлений горного давления использованы перемещения породного контура выработки, технология

замера которых в шахтных условиях отработана и не вызывает затруднений. С другой стороны, особенности влияния характеристик запредельного состояния массива на развитие перемещений контура выработки (которые в нормативных документах выражены в интегральной форме) оцениваются по известным и апробированным аналитическим методам [50, 60].

Предварительно отметим, что установленные закономерности позволяют определить эпюру полных перемещений в любой точке контура выработки, в то время как «базовые» (с точки зрения сравнительного анализа) методики способны прогнозировать лишь кусочно-линейную эпюру перемещений, равномерную в пределах кровли, боков и почвы выработки. Поэтому сравнительный анализ проведен для максимумов вертикальных перемещений в замке свода  $U_9^y$  и в районе центральной оси по почве  $U_{20}^y$ , а также для горизонтальных перемещений боков выработки  $U_{4,5}^x$  в зоне прохода людей. Сравнение перемещений замка свода выработки вне зоны влияния очистных работ, рассчитанных по методикам [41, 43], с установленными закономерностями дало такие результаты (рис. 5.8). Качественно закономерности развития смещений подобны друг другу. В количественном плане при  $\sigma_{сжi}^{K,II} = 5$  МПа и 10 МПа расчеты смещений в замке свода  $U_9^y$  по нормативным методикам ложатся в область  $U_9^y$  для интервала изменения  $E_i^{K,II} = (0,3...1) \cdot 10^4$  МПа по установленным закономерностям. При  $\sigma_{сжi}^{K,II} = 20$  МПа смещения  $U_9^y$  занижены по сравнению с [41, 43]. Здесь следует отметить, что в нормативных методиках не учитываются деформационные характеристики близлежащих породных слоев в отличие от установленных закономерностей. Поэтому при определенных сочетаниях деформационных характеристик породных слоев будет



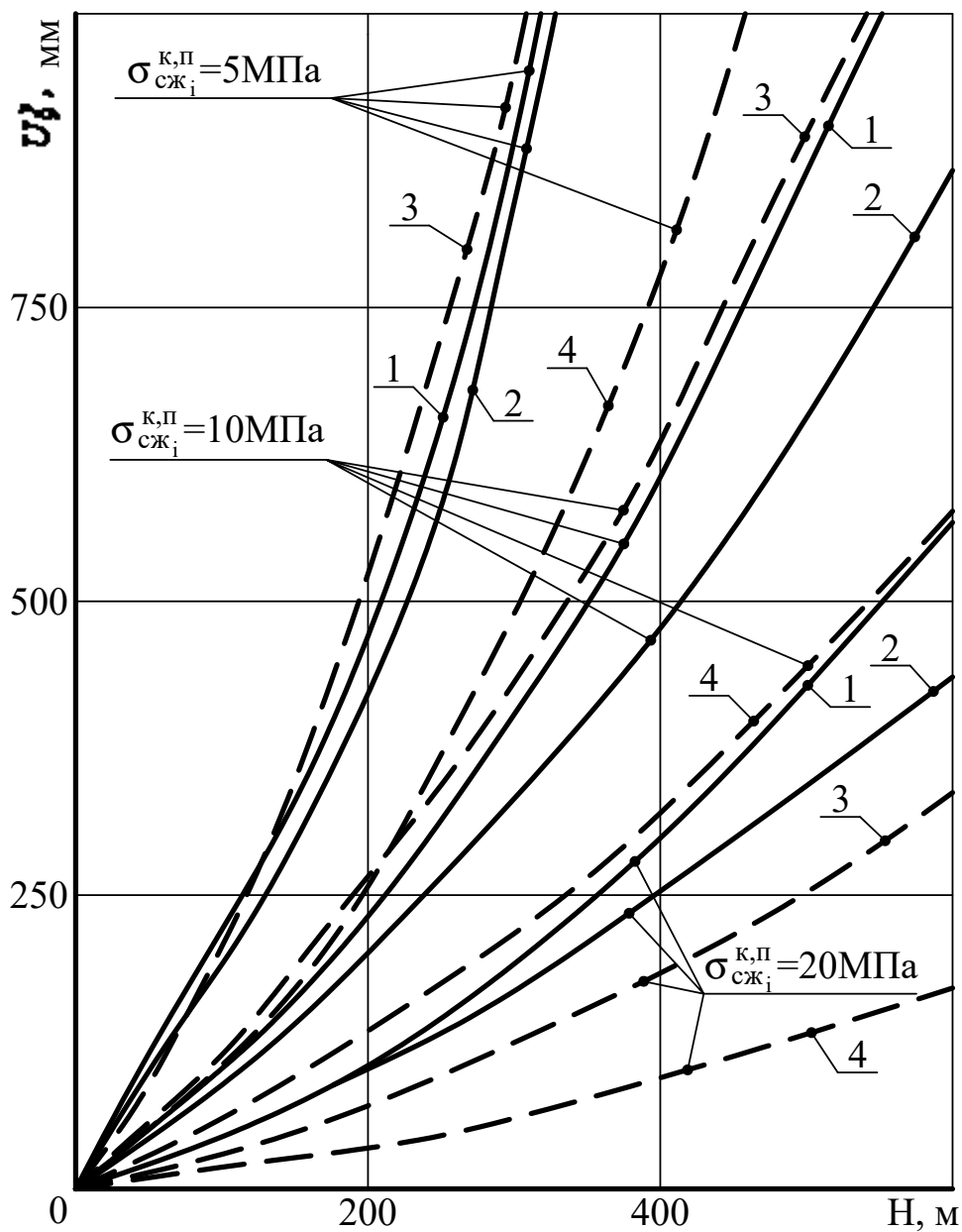


Рис. 5.8 – Перемещения в замке свода выработки (срок службы более 15 лет) по нормативным документам ( — ) и установленным закономерностям ( - - - ):

1 – [27]; 2 – [25]; 3 –  $E_i^{K,II} = 0,3 \cdot 10^4$  МПа; 4 –  $E_i^{K,II} = 1 \cdot 10^4$  МПа

иметь место вполне удовлетворительное соответствие результатов расчетов  $U_9^y$ , как это выявилось, например, при  $E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4$  МПа для  $\sigma_{сжi}^{K,П} = 5$  МПа и 10 МПа (отклонения с методикой [43] не превышают 11,3%). С другой стороны, вследствие действия увлажнения и реологических процессов деформационные характеристики породы снижаются, что вызывает увеличение перемещений  $U_9^y$ , и при  $\sigma_{сжi}^{K,П} = 20$  МПа вполне возможно снижение отклонений в расчетах по анализируемой методике. Также следует принимать во внимание

влияние параметров  $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$  и  $\frac{(\sigma_{сжi}^{K,П})^0}{\sigma_{сжi}^{K,П}}$ , которые в действующих нор-

мативных документах не учитываются: исследования [50, 60] доказывают тенденцию увеличения перемещений породного контура с ростом

томо  $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$  и снижением  $\frac{(\sigma_{сжi}^{K,П})^0}{\sigma_{сжi}^{K,П}}$ . Поэтому установленные законо-

мерности, учитывающие гораздо большее количество механических характеристик слоистого массива, обладает более общим (с точки зрения геомеханических процессов) подходом к оценке устойчивости пластовой выработки.

Инструкция [42] разработана специально для условий шахт Западного Донбасса и отличается от предыдущих нормативных документов тем, что даже вне зоны влияния очистных работ предполагает постоянный и равномерный во времени (за исключением начального периода в 20...40 суток после проведения выработки) рост перемещений породного контура. Действительно, в Западном Донбассе развитие перемещений протекает более длительный период, однако все же наблюдается эффект затухания скорости перемещения по мере эксплуатации подготовительных выработок, как это учтено в [41, 43].

Тем не менее, на рис. 5.9 построены графики роста перемещений породного контура с увеличением  $H$  для периода эксплуатации выработки  $t = 1$  год и 5 лет (сплошные линии) и проведено их сравнение с аналогичными зависимостями по установленным закономерностям, для

которого построены графики при  $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}} = 0,05$  и  $0,20$ . Это сделано с

учетом предположения, что во времени остаточная прочность пород (под действием ослабляющих факторов) снижается более интенсивно, чем прочность ненарушенных пород (специальных измерений на этот счет авторы не обнаружили в современных источниках). Таким обра-

зом, отношение  $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$  по мере эксплуатации выработки будет сни-

жаться и образуется некоторая область, в которую попадает семейство зависимостей  $U_9^y(H)$ ; для того, чтобы дать точное числовое различие в вычислениях  $U_9^y$ , необходим учет всей гаммы механических характеристик углевмещающего массива в нормативных методиках, что, к сожалению, пока не осуществлено. Из всего семейства  $U_9^y(H)$  выпа-

дает только вариант  $\sigma_{сж_i}^{K,П} = 20$  МПа,  $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}} = 0,2$ , хотя существует

тенденция [50] снижения  $\frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}}$  по мере увеличения прочностных

характеристик породы.

Теперь перейдем к сравнению величины перемещений  $U_{4,5}^x$  в боках выработки на высоте зоны прохода людей. В нормативных документах [41-43] отношение перемещений в боках и кровле (почве) регулируется постоянным коэффициентом, равным  $0,35$  для выработок,

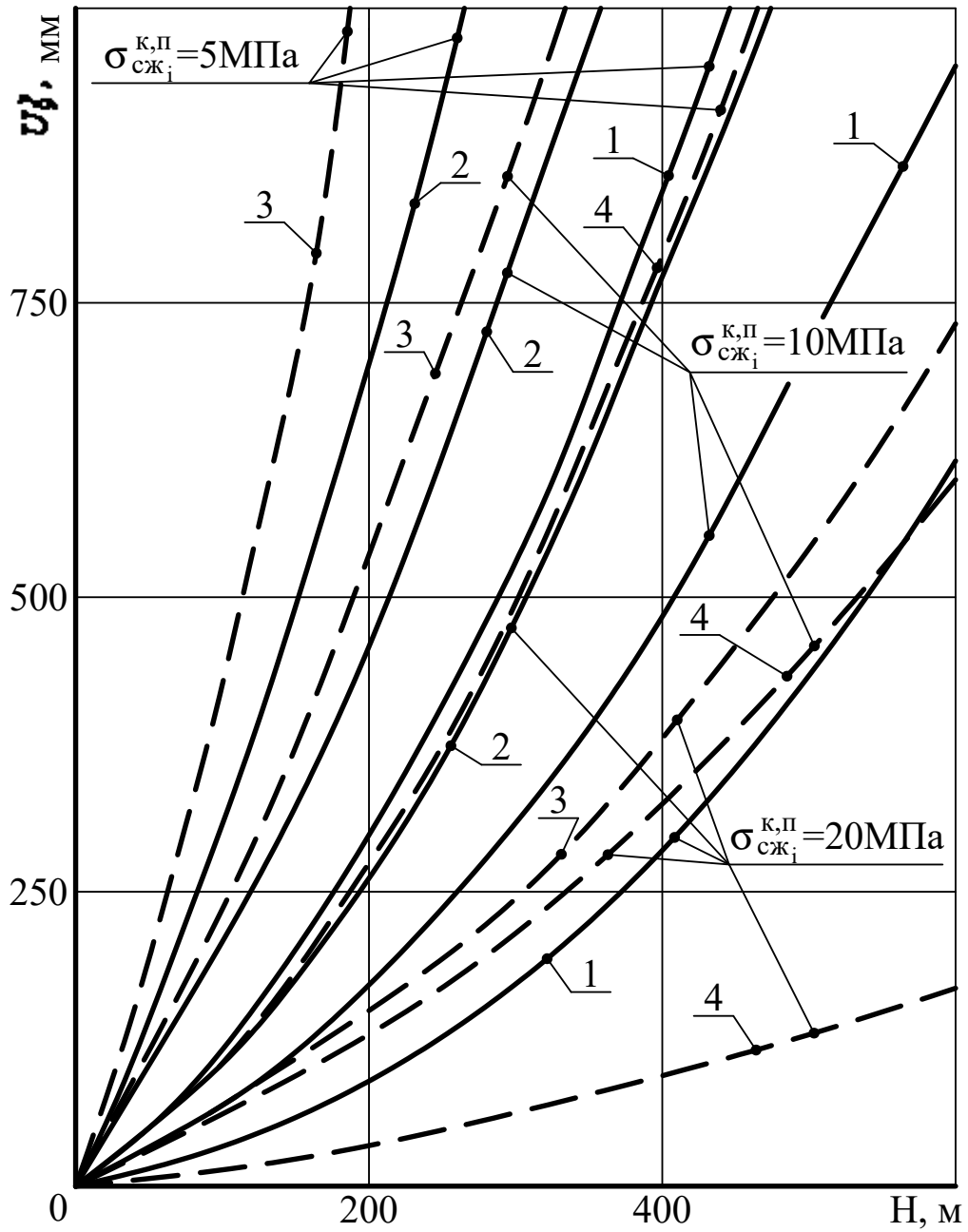


Рис. 5.9 – Перемещения в замке свода выработки по инструкции

[42] (—) и установленным закономерностям

(- - - -) при:

$$1 - t = 1 \text{ год}; 2 - t = 5 \text{ лет}; 3 - \frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}} = 0,05;$$

$$4 - \frac{(\sigma_{сж_i}^{K,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{K,П}} = 0,20$$

пройденных по простиранию на пологих угольных пластах. Причем, считается, что величина  $U^x(y)$  постоянна по высоте выработки, хотя расчеты показывают переменное перемещение боков выработки по ее высоте. Поэтому координаты боков выработки зафиксированы некоторым средним значением (район прохода людей) ее высоты и для них проведено сравнение с установленными закономерностями (рис. 5.10).

Закономерности  $U_{4,5}^x(H)$  имеют одинаковую качественную картину, а в количественном плане необходимо отметить следующее:

– для однородного по механическим характеристикам близлежащего породного массива рассчитанное усредненное отношение

$$\frac{U_{4,5}^x}{U_9^y} = 0,30 \dots 0,36 \text{ близко к рекомендуемому } (0,35) \text{ по нормативным}$$

методикам [41-43]; поэтому отклонения функций  $U_{4,5}^x(H)$  относительно невелики;

– когда в кровле выработки залегает более крепкий и жесткий второй породный слой ( $\sigma_{сж2}^K = 20 \text{ МПа}$ ,  $E_2^K = 1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ), то усред-

ненное отношение  $\frac{U_{4,5}^x}{U_9^y}$  увеличивается до 0,56...0,59. Это объясняется

механизмом развития боковых перемещений, когда более крепкий и жесткий второй породный слой кровли действует как штамп, выдавливая в полость выработки более слабые и менее жесткие первые породные слои кровли и почвы.

Что касается числовых значений отклонений, то при  $\sigma_{сжi}^{K,П} = 5 \text{ МПа}$  и  $10 \text{ МПа}$  они составляют с [43] не более 5,8%, при  $\sigma_{сжi}^{K,П} = 20 \text{ МПа}$  и  $E_2^K = 0,3 \cdot 10^4 \text{ МПа}$  отклонения  $U_{4,5}^x$  увеличиваются до 45...56%, при  $E_2^K = 1 \cdot 10^4 \text{ МПа}$  разница в боковых смещениях

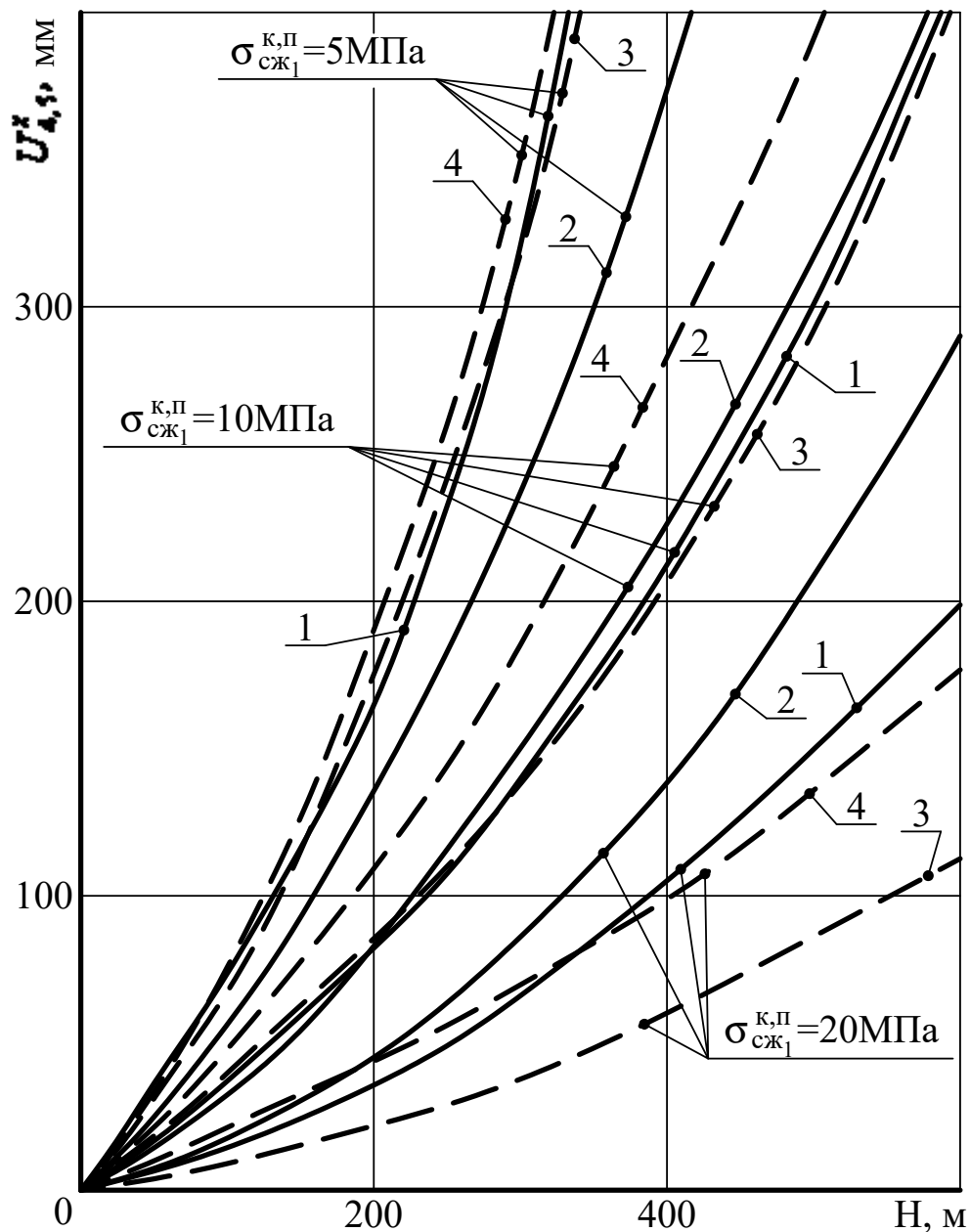


Рис. 5.10 – Боковые перемещения в зоне прохода людей по нормативным документам (—) и установленным закономерностям (---) при:

1 – [27],  $t \geq 15$  лет; 2 – [26],  $t = 2$  года;

3 –  $\sigma_{сж1}^{K,П} = 5$  МПа,  $E_i^{K,П} = 0,3 \cdot 10^4$  МПа;

4 –  $\sigma_{сж2}^K = 20$  МПа,  $E_2^K = 1 \cdot 10^4$  МПа

уменьшается до 6,3...8,8%. Методика [42] по сравнению с [43] дает заниженные боковые смещения при  $\sigma_{сж_i}^{K,II} = 5$  МПа, примерно, равную величину  $U_{4,5}^x$  при  $\sigma_{сж_i}^{K,II} = 10$  МПа и завышенное  $U_{4,5}^x$  при  $\sigma_{сж_i}^{K,II} = 20$  МПа.

Анализируя развитие перемещений в почве выработки по нормативным документам и установленным закономерностям необходимо отметить следующее:

– в методиках [41, 43] величина перемещений в кровле и почве принимается одинаковой;

– в методике [42] величина перемещения в почве оказывается несколько выше, чем в кровле. Однако с увеличением срока эксплуатации выработки  $t$  эта разница нивелируется; так, при  $t = 1$  год смещение в почве превышает смещение в кровле в 1,52...1,74 раза, при  $t = 10$  лет – в 1,10...1,27 раза;

– следует более внимательно подходить к результатам экспериментальных замеров смещений в кровле и почве: в большинстве публикаций либо не указывается методика измерения, либо она описывается таким образом, что разделить смещения в кровле и почве невозможно и, по сути, приводится величина сближения кровли и почвы – ведь известно, что для осуществления такого разделения необходимо вести маркшейдерскую съемку от более – менее неподвижной отметки в районе околоствольного двора. Кроме того, в слабых породах почвы наблюдается эффект вдавливания стоек рамной крепи, даже при наличии подпятников. Поэтому, следует также разделять величину вдавливания  $U_{1,17}^y$  стоек в почву (под действием преимущественно вертикальных сил горного давления в кровле) и величину непосредственно пучения самой почвы. По нашим расчетам и шахтным наблю-

дениям  $U_{1,17}^y = 0,1...0,5$  м; это значение (когда измеряется сближение кровли и почвы) следует приплюсовывать к перемещениям кровли  $U_9^y$  и отнимать от перемещений почвы  $U_{20}^y$  – тогда разница между  $U_9^y$  и  $U_{20}^y$  будет нивелироваться.

Указанные причины способствовали появлению различий в конечных результатах прогноза пучения почвы выработки при малом сроке ( $t = 1$  год) ее эксплуатации (рис. 5.11, семейство кривых 1 и 2). Представление методики [42] о незатухающем во времени развитии перемещений породного контура (в том числе и почвы при  $t > 1$  года еще более усиливают расхождения с результатами расчета  $U_{20}^y$  по методике [43]. В этой связи численные значения закономерностей развития пучения, рассчитанные по установленным закономерностям, занимают промежуточное положение между методиками [42] и [43]. Обращает внимание тот факт, что при более крепком и жестком первом породном слое кровли рост пучения почвы выработки происходит более интенсивно до 2,06 раз. Такое влияние  $\sigma_{сж1}^K$  и  $E_1^K$  объясняется самой природой пучения, когда относительно целостный первый слой кровли совместно с угольным пластом выдавливают (в зоне опорного давления) в полость выработки разупрочненный первый породный слой почвы.

Таким образом, на основе сравнительного анализа результатов прогноза перемещений породного контура выработки по нормативным документам и установленным в данной работе закономерностям можно сделать следующие выводы:

– результаты расчетов перемещений контура выработки, особенно ее почвы, имеют существенное различие между собой по нормативным методикам [42] и [43];



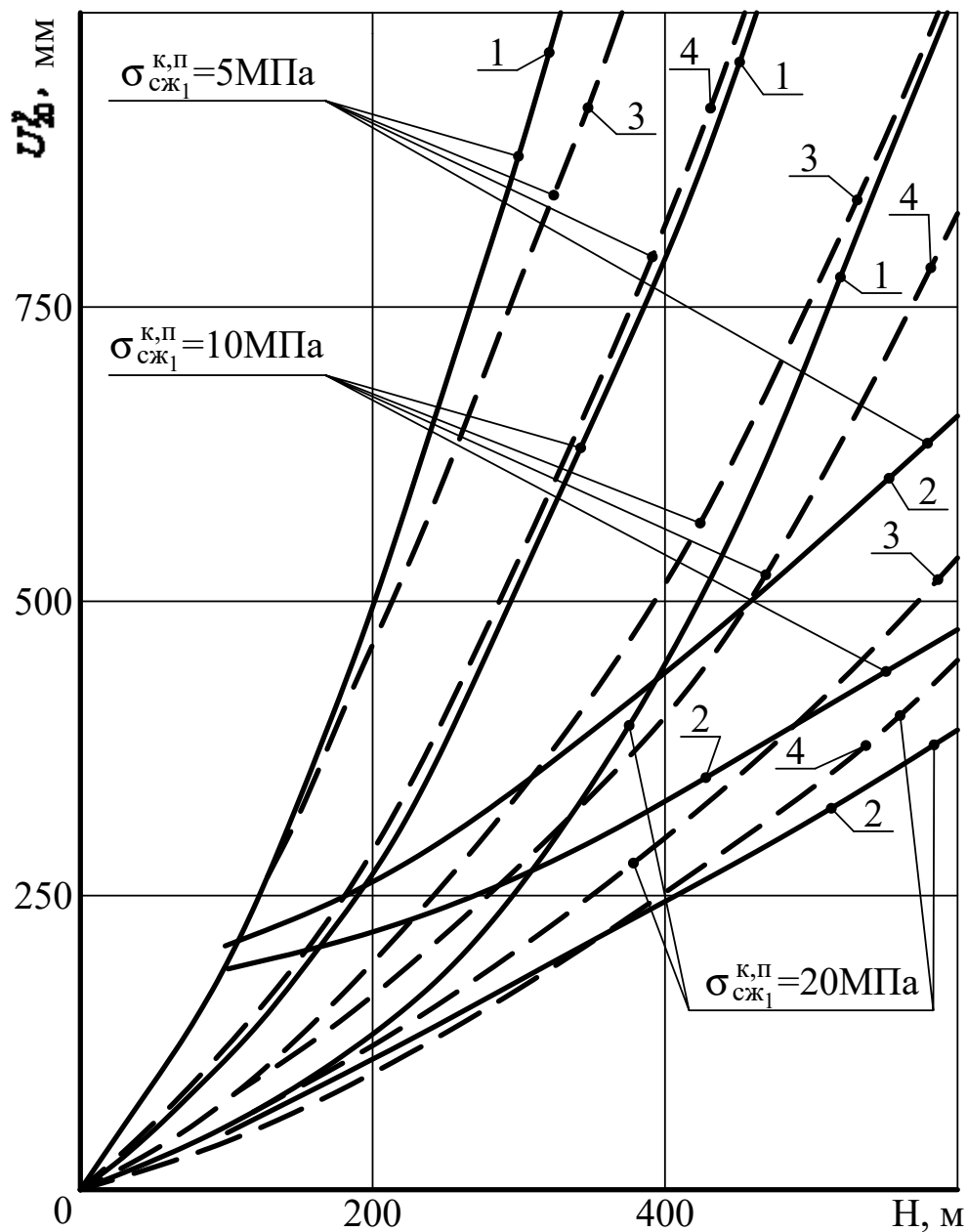


Рис. 5.11 – Перемещения почвы выработки (в районе ее центральной оси) по нормативным документам (—) и установленным закономерностям (---):  
 1 – [27],  $t = 1$  год; 2 – [26],  $t = 1$  год; 3 –  $\sigma_{сж1}^K = 20$  МПа,  $E_1^K = 1 \cdot 10^4$  МПа; 4 –  $\sigma_{сж1}^K = 5$  МПа,  $E_1^K = 0,3 \cdot 10^4$  МПа

– в разрабатываемом алгоритме и нормативных документах [41-43] имеют место схожие закономерности связи перемещения породного контура с глубиной разработки и сопротивлением сжатию вмещающего породного массива;

– как правило, расчеты по установленным закономерностям дают более широкий интервал перемещений, в который попадают величины  $U(x, y)$ , вычисленные по нормативным документам; это обусловлено учетом слоистости вмещающего выработку массива со всей гаммой влияния механических характеристик породных слоев в до-предельной, предельной и запредельной стадиях их деформирования;

– разрабатываемый алгоритм позволяет прогнозировать эпюру перемещений на всех участках контура выработки, что позволяет оценивать ее эксплуатационную пригодность в соответствии с требованиями правил безопасности и технологическими требованиями функционирования выработки.

В итоге, можно утверждать, что установленные закономерности прогноза перемещений контура пластовой выработки не противоречат нормативным документам [41-43], а дают более полную картину развития перемещений в зависимости от основных механических характеристик каждого из близлежащих породных слоев.

В плане более полного учета механических характеристик пород представляет интерес сравнения результатов расчета с методом проф. В.В. Виноградова [50]. Здесь можно провести в основном качественное сравнение закономерностей связи перемещений контура выработки с механическими характеристиками окружающего массива, поскольку исходные положения оцениваемых методологий имеют существенные отличия в части учета: слоистости с нарушенными контактами в окрестности выработки; реальной формы выработки взамен ее кругового очертания; реального паспорта крепления выработки с

соответствующими особенностями взаимодействия крепи и приконтурного породного массива взамен приложения равномерно распределенной реакции крепи. Тем не менее, закономерности влияния механических характеристик близлежащего породного массива и тенденции развития перемещений с увеличением параметра  $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}}$  во многом схожи. Так, величина остаточной прочности породы оказывает значительное влияние на величину перемещений (рис. 5.12). На этом рисунке приведены перемещения в замке свода выработки, поскольку метод [50] предполагает равномерное распределение перемещений по контуру выработки. По мере снижения отношения  $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}}$  происходит резкое увеличение перемещений породного контура. Причем, по методу [50] при  $\frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}} = 0,05$  возникает «катастрофическое» развитие перемещений в довольно узком диапазоне  $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}} = 0,40...0,55$ , что не наблюдается на практике. В установленных закономерностях такого скачка  $U_9^y$  не происходит, а имеет место плавный рост перемещений по некоторой степенной зависимости от  $\frac{\gamma H}{\sigma_{сж}}$ .

Другим существенно влияющим параметром согласно [50] является отношение  $\frac{M}{E}$  модуля спада к модулю деформации породы, по которому оценивают степень хрупкости породы при ее разрушении. Общеизвестно, что склонность породы к хрупкому разрушению  $\left(\frac{M}{E} \rightarrow \infty\right)$  провоцирует развитие обширных зон предельного состояния и, как следствие, значительных перемещений породного контура

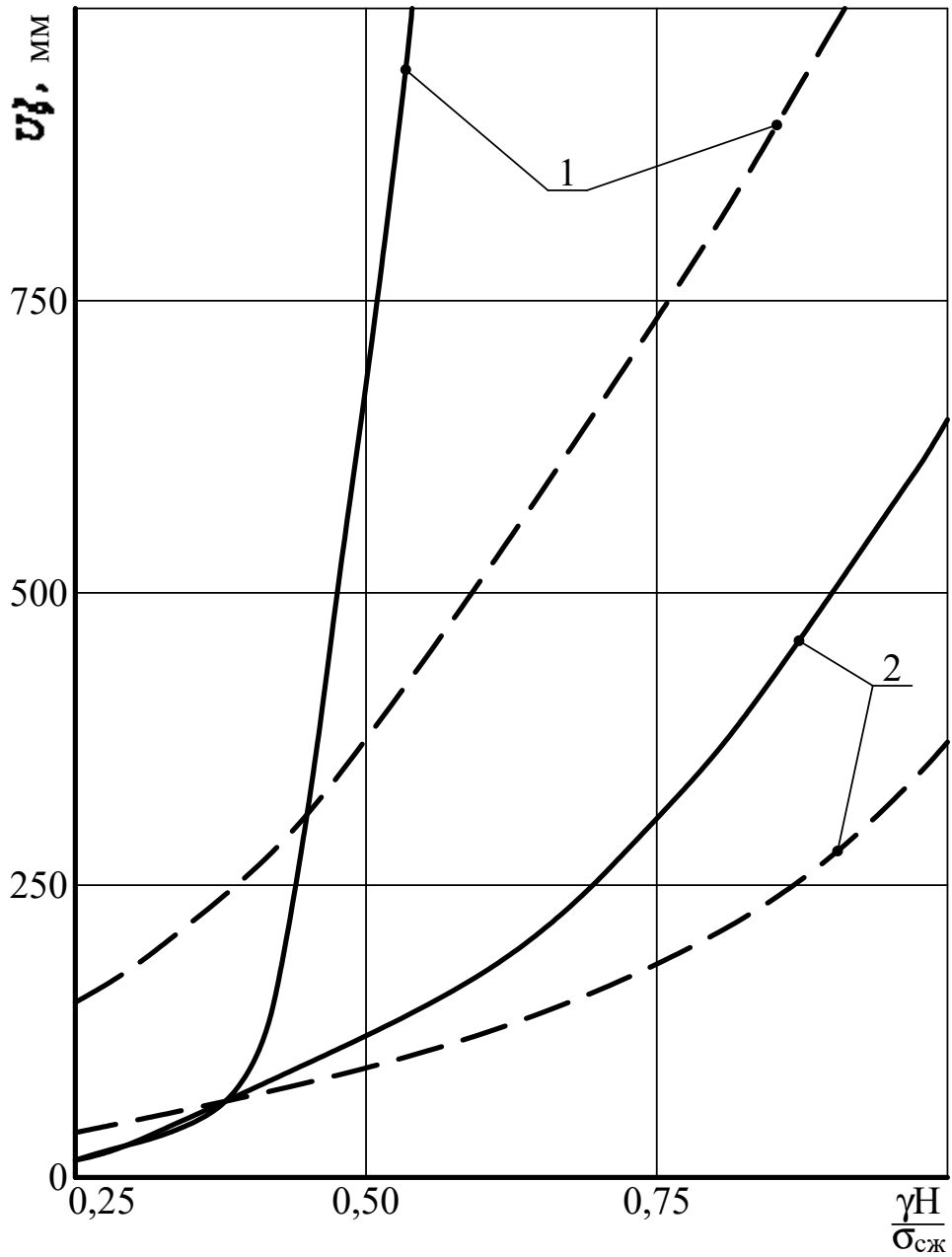


Рис. 5.12 – Перемещения в замке свода выработки по методу [50]

(—) и установленным закономерностям (---):

$$1 - \frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}} = 0,05; \quad 2 - \frac{\sigma_{сж}^0}{\sigma_{сж}} = 0,20$$

выработки. Только в установленных закономерностях функции  $U_9^y\left(\frac{\mathcal{M}}{\sigma_{сж}}\right)$  возрастают более плавно (рис. 5.13) без проявления скачка перемещений, как это наблюдается в методе [50].

В целом, результаты сравнительного анализа показывают, что разрабатываемый алгоритм прогноза перемещений контура выработки не противоречит известным геомеханическим закономерностям проявлений горного давления, установленным как экспериментальным [41-43], так и аналитическим [50] путем. Следовательно, исходные предпосылки разрабатываемого алгоритма выбраны достаточно обоснованно, а их преимущество в сравнении с известными методиками прогноза заключаются в учете:

- реальной структуры углевмещающей породной толщи угольных пластов;
- нарушения сплошности массива по плоскостям напластования;
- реального паспорта крепления пластовой выработки;
- полных диаграмм деформирования каждого из элементов системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки».

Таким образом, перспектива развития численных методов учета реальных структур объектов и полных диаграмм нагружения материалов не вызывает сомнений при условии постоянного накопления экспериментальных данных о поведении углевмещающей слоистой толщи пород не только в допредельной, но и запредельной стадиях состояния, что будет способствовать повышению точности прогноза проявлений горного давления.

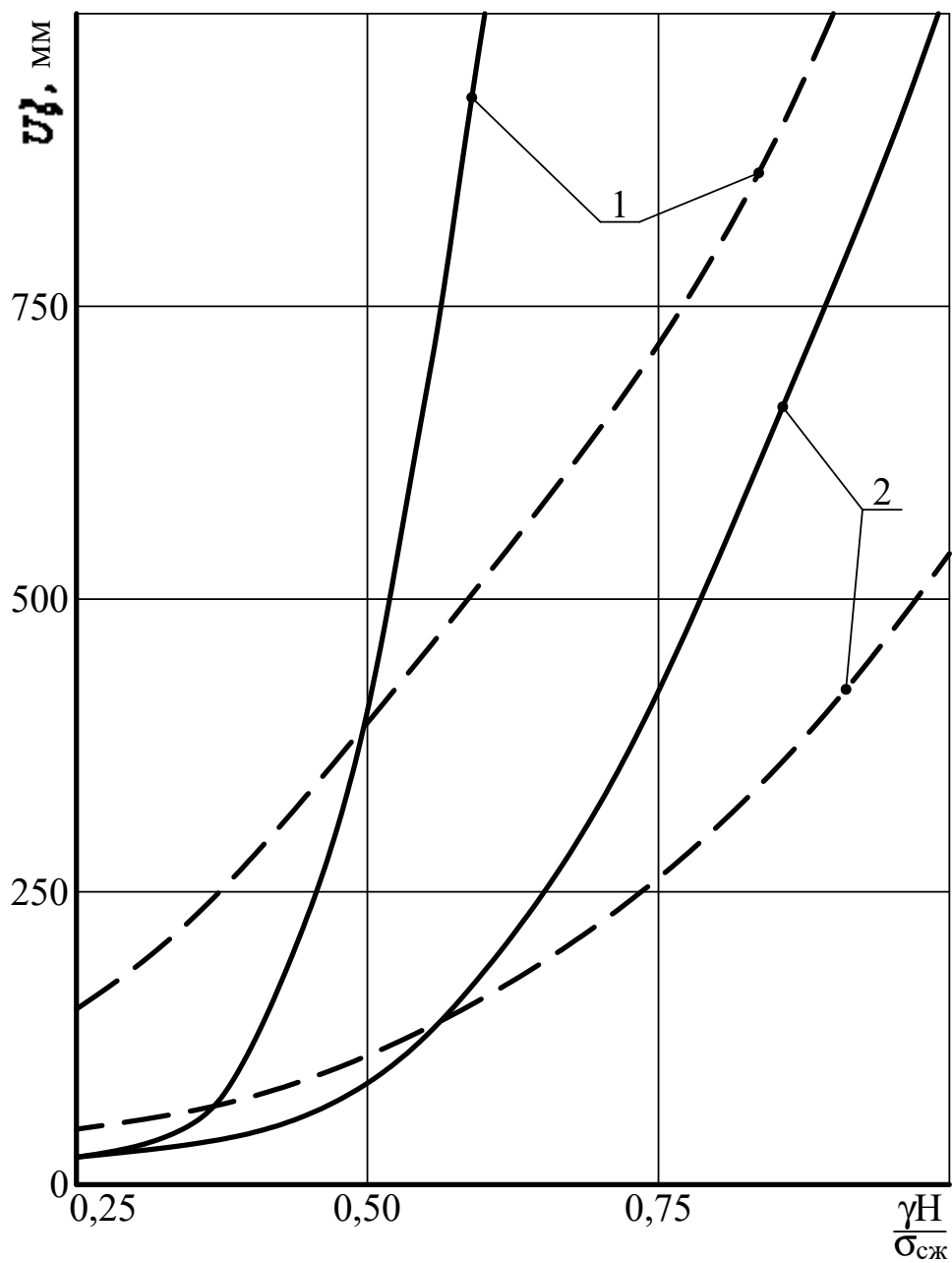


Рис. 5.13 – Перемещения в замке свода выработки по методу [50] (—) и установленным закономерностям (---): 1 –  $\frac{M}{E} = 5$ ; 2 –  $\frac{M}{E} = 0,5$

## 5.4 Обоснование критериев оценки эксплуатационной пригодности выработки

По совокупности результатов, полученных на предыдущих этапах исследований, можно утверждать, что выявлены закономерности развития перемещений на любом участке контура пластовой выработки. Эти закономерности необходимо оценить с практической стороны – безопасной и надежной эксплуатации выработки по соответствующему комплексу критериев на основе нормативных документов [46, 47] и современных исследований ее устойчивости.

В разделе 3 сформулирована система критериев оценки состояния выработки в общей постановке, теперь необходимо выразить эти критерии в виде системы математических неравенств, отражающих условия надежной и безопасной эксплуатации пластовой выработки, для чего выделено четыре основных позиции.

Первая – устойчивость рамной крепи – предполагает ее работу в податливом режиме на протяжении всего периода эксплуатации выработки. Если вертикальная или боковая податливость рамы исчерпана, ее дальнейший жесткий режим работы не предусматривает развитие сколь-нибудь существенных перемещений контура выработки. В противном случае перемещающийся в полость выработки породный массив вызывает появление в раме пластических шарниров, ее форма трансформируется в менее устойчивую с необратимыми пластическими деформациями спецпрофиля СВП, а иногда и его разрывом. Следовательно, вертикальные и боковые перемещения рамы не должны превышать ее допустимых норм податливости. За расчетную величину вертикальных и боковых перемещений следует принимать перемещения  $U_{4,5}^y$  и  $U_{4,5}^x$ , поскольку эти точки (№4 и №5) характеризуют участок расположения замков податливости (после осадки) у крепи

серии КМП-А3 и поворота удлиненных стоек у крепи серии КШПУ.

Таким образом, условие устойчивости рамной крепи можно записать двумя неравенствами:

$$\left. \begin{aligned} U_{4,5}^y &\leq U^e; \\ U_{4,5}^x &\leq U^b, \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

где  $U^e$  и  $U^b$  – допустимая величина вертикальной и боковой податливости рамы.

Вторая – обеспечение условий безопасного движения транспортных средств – предполагает сохранение допустимых зазоров при работе различных транспортных средств (подвижной состав, конвейер, монорельсовая или напочвенная дороги). Здесь необходимо выполнение целого ряда требований, которые разделены на допустимые зазоры по вертикальной  $\delta_i^y$  и горизонтальной  $\delta_i^x$  осям выработки после осадки крепи.

При монорельсовом транспорте вертикальный зазор «между днищем сосуда или нижней кромкой перевозимого груза и почвой выработки или расположенным на почве оборудованием» должен составлять не менее 0,4 м после осадки крепи. Поэтому при оценке выбора типового сечения выработки соответствующий зазор  $\delta_1^y$  до осадки должен удовлетворять условию

$$\delta_1^y - U_1^y - U_9^y - U_{20}^y \geq 0,4 \text{ м.} \quad (5.2)$$

При конвейерном транспорте «расстояние от верхней выступающей части конвейера до верхняка рамы должно быть не менее 0,5 м, а у натяжных и приводных головок – не менее 0,6 м». Тогда данный зазор  $\delta_2^y$  в типовом сечении выработки до осадки должен быть не менее



$$\delta_2^y - U_1^y - U_9^y - U_{20}^y \geq 0,5 \text{ м (0,6 м)}. \quad (5.3)$$

При рельсовом транспорте сохранность рельсового пути и безопасность перевозок обеспечивается при величине пучения почвы не более некоторого допустимого значения, величина которого по существующим исследованиям [62-66] оценивается в интервале 0,2...0,3 м. Следовательно, условие сохранности рельсового пути имеет вид

$$U_{20}^y \leq 0,3 \text{ м}. \quad (5.4)$$

Также существуют эксплуатационные требования по углу наклона рельсового пути когда превышение (в поперечном сечении выработки) головки одного рельса над другим не должно быть более допустимой нормы  $\delta_3^y$  во избежание схода с рельс подвижного состава. Такая опасность возникает обычно в двухпутевых выработках, где расположенные по бокам рельсовые пути (или рельсовый путь и конвейер) имеют разную величину поднятия головок рельс из-за переменной по ширине выработки величины пучения. Разница между уровнем головок рельс пути должна быть меньше допустимой  $\delta_3^y$  и определяется по формуле

$$U_{20}^y (1 - K_{II}) \frac{0,6 + 3l_{кол}}{l_в} \leq \delta_3^y, \quad (5.5)$$

где  $l_{кол}$  – ширина колеи рельсового пути;

$l_в$  – ширина выработки по почве в свету;

$K_{II}$  – коэффициент неравномерности пучения по ширине выработки: для типоразмеров выработки с крепью КМП-А3 –  $K_{II} = 0,67$  со стороны восстания пласта и  $K_{II} = 0,57$  со стороны падения; для типоразмеров с крепью КШПУ –  $K_{II} = 0,65$  со стороны восстания и  $K_{II} = 0,60$  со стороны падения.

Допустимые горизонтальные зазоры  $\delta_i^x$  формируют следующие критерии безопасного движения транспорта.

При рельсовом транспорте зазор «между крепью или размещенным в выработках оборудованием и трубопроводами и наиболее выступающей кромкой габарита подвижного состава» не должен быть менее 0,25 м для рамных конструкций крепей. Анализируя типовые сечения выработок с крепями КМП-А3 и КШПУ приходим к выводу, что наименьший зазор между крепью и подвижным составом будет на высоте прохода людей, где следует использовать параметр  $U_{4,5}^x$  горизонтального перемещения контура выработки. Тогда по горизонтальной составляющей критерий безопасного движения рельсового транспорта имеет вид

$$\delta_1^x - U_{4,5}^x \geq 0,25 \text{ м}, \quad (5.6)$$

где  $\delta_1^x$  – минимальный зазор до осадки крепи.

При конвейерном транспорте (независимо от наличия других транспортных средств) допустимый зазор между ним и рамной крепью должен быть не менее 0,4 м. Обычно верхняя кромка габарита ленточного конвейера располагается примерно посередине между точками №1 и №№4, 5 (№17 и №№13, 14) и здесь (независимо от типов рамных крепей) как правило располагается минимальный зазор. Поэтому, его величина  $\delta_2^x$  до осадки крепи проверяется по условию

$$\delta_2^x - 0,5(U_{4,5}^x + U_{17}^x) \leq 0,4 \text{ м} \quad (5.7)$$

при расположении конвейера, как со стороны падения, так и со стороны восстания угольного пласта.

При монорельсовом транспорте минимально допустимый зазор «между крепью и наиболее выступающей кромкой габарита подвиж-

ного состава или перевозимого груза при скорости его движения до 1 м/с» составляет 0,2 м; «при скоростях движения более 1 м/с зазор увеличивается до 0,3 м». В зависимости от высоты расположения наиболее выступающей кромки габарита допустимый зазор  $\delta_3^x$  до осадки крепи проверяется по одному из двух условий:

– верхняя часть габарита

$$\delta_3^x - U_{4,5}^x \geq 0,2 \text{ м (0,3 м);} \quad (5.8)$$

– нижняя часть габарита

$$\delta_3^x - 0,5(U_{4,5}^x + U_{17}^x) \geq 0,2 \text{ м (0,3 м).} \quad (5.9)$$

Третья позиция – безопасный проход людей – предполагает зазор «между крепью или размещенным в выработках оборудованием и трубопроводами и наиболее выступающей кромкой габарита подвижного состава» не менее 0,7 м (или 1,0 м в местах посадки людей в пассажирские вагонетки) на высоте от пешеходного настила не менее 1,8 м вне зависимости от вида транспорта. С учетом вертикальных перемещений рамы  $U_{4,5}^y$  в зоне прохода людей, вдавливания  $U_1^y$  стоек в почву, и пучения почвы в боках выработки  $U_{18,22}^y$  определяется вертикальная координата  $Y_p$  рамы, соответствующая отметке не менее 1,8 м

$$Y_p \geq 1,8 \text{ м} + U_{18,22}^y + U_{4,5}^y + U_1^y, \quad (5.10)$$

или, с учетом  $U_{18,22}^y = K_{II} U_{20}^y$  (значения коэффициента неравномерности пучения почвы по ширине выработки такие же, как и в выражении (5.5)), получаем

$$Y_p \geq 1,8 \text{ м} + K_{II} U_{20}^y + U_{4,5}^y + U_1^y. \quad (5.11)$$

Отталкиваясь от отметки  $U_p$  ширина зазора до осадки  $\delta_4^x$  для прохода людей в этом месте должна удовлетворять условию

$$\delta_4^x - U_{4,5}^x \geq 0,7 \text{ м (1,0 м)}. \quad (5.12)$$

Четвертая позиция – предполагает оценку выбора типового сечения выработки в свету до осадки  $S_{св}$  из расчета, чтобы ее сечение в свету после осадки  $S_{св}^{n.o}$  обеспечивало подачу необходимого объема свежей струи воздуха к местам горных работ. Для этого требуется, чтобы остаточное сечение выработки в свету  $S_{св}^{n.o}$  было не менее расчетной величины  $S_{св}^p$

$$S_{св}^{n.o} = S_{св} - \Delta S_{св} \geq S_{св}^p. \quad (5.13)$$

Сформулированные критерии надежной и безопасной эксплуатации выработки являются дополнением к оценке проектного решения по выбору типоразмера поперечного сечения пластовой выработки.

### **5.5 Построение уравнений регрессии для расчета эпюры перемещений контура пластовой выработки**

Практическое использование системы критериев надежной и безопасной эксплуатации выработки предполагает определение корреляционных зависимостей для расчета вертикальных и горизонтальных перемещений на тех участках ее контура, которые входят в качестве параметров в вышеупомянутые критерии (5.1)-(5.13).

На предыдущих этапах исследований на базе обширного массива расчетных данных выявлены закономерности связи перемещений контура выработки с ее горно-геологическими и горнотехническими параметрами. Эти закономерности исследованы методами корреляционно-дисперсионного анализа [67-69] и получена система уравнений

регрессии для прогноза перемещений контура пластовой выработки, размещенной в слоистом массиве слабых пород, например, шахт Западного Донбасса.

В критериях (5.1)-(5.13) используются значения вертикальных и горизонтальных перемещений  $U_1^y$ ,  $U_{4,5}^y$ ,  $U_{4,5}^x$ ,  $U_9^y$ ,  $U_{17}^x$ ,  $U_{20}^y$ , для которых и осуществлено построение уравнений регрессии.

Вдавливание стоек рамной крепи в породы почвы выработки

$$U_1^y = 0,41\Phi_{1,2} \frac{\exp(-0,034\sigma_{сж1}^K)}{\exp(0,4 \cdot 10^{-4} E_1^{\Pi})} \exp(-0,016\sigma_{сж2}^K) \times \\ \times \left[ \frac{\sigma_{сж1}^{\Pi}}{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^0} \right]^{0,55} \left[ (0,25 - 10^{-2} \sigma_{сж1}^{\Pi})H + \frac{2,3 \cdot 10^{-2} H^2}{(\sigma_{сж1}^{\Pi})^{1,75}} \right], \quad (5.14)$$

где  $\Phi_1 = 0,32S_{св}^{0,45}$  – для типовых сечений выработок с крепью КМП-А3;

$\Phi_2 = 0,29S_{св}^{0,55}$  – для типовых сечений выработок с крепью КШПУ.

Опускание свода выработки в зоне прохода людей

$$U_{4,5}^y = 0,127\Phi_{3,4} \frac{\exp(-0,028\sigma_{сж2}^K)}{\exp(10^{-4} E_1^K)} \left( \frac{M_1^K}{E_1^K} \right)^{0,38} \times \\ \times \left[ \frac{\sigma_{сж1}^K}{(\sigma_{сж1}^K)^0} \right]^{0,9} \left[ (1,6 - 0,07\sigma_{сж1}^K)H + \frac{7,3 \cdot 10^{-2} H^2}{(\sigma_{сж1}^K)^{1,5}} \right], \quad (5.15)$$

где  $\Phi_3 = 0,206S_{св}^{0,62}$  – для типовых сечений выработок с крепью КМП-А3;

$\Phi_4 = 0,266S_{св}^{0,47}$  – для типовых сечений выработок с крепью КШПУ.

Горизонтальное перемещение рамной крепи в зоне прохода лю-

дей

$$U_{4,5}^x = \frac{0,052 \Phi_{5,6} \left( \frac{M_1^K}{E_1^K} \right)^{0,31}}{\exp \left[ (E_1^K - 0,3E_2^K + 0,2E_1^\Pi) \cdot 10^{-4} \right]} \left[ \frac{\sigma_{сж1}^K}{(\sigma_{сж1}^K)^0} \right]^{0,9} \left( \frac{2\sigma_{сж2}^K}{\sigma_{сж1}^K + \sigma_{сж1}^\Pi} \right)^{0,2} \times$$

$$\times \left[ (1,62 - 0,068\sigma_{сж1}^K)H + \frac{5,1 \cdot 10^{-2} H^2}{(0,7\sigma_{сж1}^K + 0,3\sigma_{сж1}^\Pi)^{1,43}} \right], \quad (5.16)$$

где  $\Phi_5 = 0,234S_{св}^{0,57}$  – для типовых сечений выработок с крепью КМП-А3;

$\Phi_6 = 0,25S_{св}^{0,6}$  – для типовых сечений выработок с крепью КШПУ.

Опускание замка свода выработки

$$U_9^y = 0,055 \Phi_{3,4} \frac{\exp(-0,023\sigma_{сж2}^K) \left( \frac{M_1^K}{E_1^K} \right)^{0,26}}{\exp \left[ (0,8E_1^K + 0,2E_2^K) \cdot 10^{-4} \right]} \cdot \frac{\sigma_{сж1}^K}{(\sigma_{сж1}^K)^0} \times$$

$$\times \left[ (1,5 - 0,06\sigma_{сж1}^K)H + \frac{5,8 \cdot 10^{-2} H^2}{(0,85\sigma_{сж1}^K + 0,15\sigma_{сж2}^K)^{1,5}} \right] \ln \left[ \frac{\sigma_{сж2}^K}{(\sigma_{сж2}^K)^0} + 8,7 \right]. \quad (5.17)$$

Горизонтальное перемещение опор стоек рамной крепи

$$U_{17}^x = 0,12 \Phi_{5,7} \frac{\left( \frac{\sigma_{сж1}^K}{\sigma_{сж1}^\Pi} \right)^{0,22} \left( \frac{M_1^\Pi}{E_1^\Pi} \right)^{0,27}}{\exp \left[ (E_1^\Pi - 0,3E_1^K) \cdot 10^{-4} \right]} \cdot \left[ \frac{\sigma_{сж1}^\Pi}{(\sigma_{сж1}^\Pi)^0} \right]^{0,7} \times$$

$$\times \left[ (1,45 - 0,055\sigma_{сж1}^\Pi)H + \frac{4,58 \cdot 10^{-2} H^2}{(\sigma_{сж1}^\Pi)^{1,3}} \left( \frac{E_1^K}{M_1^K} \right)^{0,16} \right], \quad (5.18)$$

где  $\Phi_7 = 0,24S_{св}^{0,69}$  – для типовых сечений выработок с крепью КШПУ.

Пучение почвы по середине ширины выработки

$$U_{20}^y = \frac{0,049\Phi_8 \left( \frac{M_1^{\Pi}}{E_1^{\Pi}} \right)^{0,35}}{\exp[(0,9E_1^{\Pi} - 0,25E_1^K) \cdot 10^{-4}]} \left[ \frac{\sigma_{сжс1}^{\Pi}}{(\sigma_{сжс1}^{\Pi})^0} \right]^{1,1} \times$$

$$\left\{ \left[ 1,37 - 0,048(1,1\sigma_{сжс1}^{\Pi} - 0,32\sigma_{сжс1}^K) \right] H + \frac{5,2 \cdot 10^{-2} H^2}{(\sigma_{сжс1}^{\Pi} - 0,1\sigma_{сжс1}^K)^{1,62}} \right\}, \quad (5.19)$$

где  $\Phi_8 = 0,152S_{св}^{0,74}$  – функция, постоянная для обеих серий крепей: КМП-А3 и КШПУ.

В выражениях (5.14)-(5.19) механические характеристики породных слоев подставляются в МПа, глубина расположения выработки – в метрах, площадь ее поперечного сечения – в квадратных метрах. Результат вычисления перемещений имеет размерность в миллиметрах.

Величина потери сечения  $\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}}$  выработки в процессе осадки

крепи определяется в процентах по выражениям:

– для типовых сечений выработок с крепью КМП-А3

$$\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}} = S_{св}^{-0,5} (1,04U_9^y + 1,51U_{4,5}^x + 0,84U_{20}^y + 1,29U_1^y); \quad (5.20)$$

– для типовых сечений выработок с крепью КШПУ

$$\frac{\Delta S_{св}}{S_{св}} = S_{св}^{-0,5} (0,93U_9^y + 1,46U_{4,5}^x + 0,52U_{17}^x + 0,69U_{20}^y + 1,09U_1^y). \quad (5.21)$$

Зависимости (5.14)-(5.21) совместно с критериями (5.1)-(5.13) позволяют оценить надежность и безопасность эксплуатации предусмотренного проектом конкретного типоразмера выработки после осадки рамной податливой крепи из спецпрофиля СВП.

## 5.6 Алгоритм оценки проектного решения по выбору типового сечения пластовой выработки

Порядок расчета перемещений контура выработки, сравнения результатов с соответствующими критериями и оценка предусмотренного проектом типового сечения пластовой выработки предполагает выполнение ряда последовательных операций.

1. Определяются исходные горно-геологические данные размещения пластовой выработки в слоистом породном массиве.

Глубина расположения выработки  $H$  выбирается по максимальной отметке на плане горных работ для повышения надежности результатов прогноза. При наличии геологических нарушений в окрестности проводимой выработки расчетная глубина разработки определяется по методикам [41, 43].

Механические характеристики близлежащих породных слоев (первый и второй в кровле и первый слой в почве пласта) уточняются по данным геологической службы шахты с пополнением отсутствующей информации из литературных источников, например, для Западного Донбасса [45, 48, 49, 63]. Расчетная прочность пород на сжатие определяется с учетом ослабляющих факторов по нормативным методикам [41-43]. Механические характеристики запредельного состояния породных слоев в данных геологической службы шахты, как правило, отсутствуют. Поэтому, на основе исследований [45, 48-50, 60] рекомендуются следующие расчетные значения для условий слабых пород Западного Донбасса:

– остаточная прочность на сжатие  $\frac{(\sigma_{сж_i}^{К,П})^0}{\sigma_{сж_i}^{К,П}}$ : песчаный сланец –

0,1; песчано-глинистый сланец – 0,15; глинистый сланец – 0,2;



– отношение модуля спада к модулю деформации  $\frac{M_i^{K,П}}{E_i^{K,П}}$ : песчаный сланец – 2...3; песчано-глинистый сланец – 1...2; глинистый сланец – 0,5...1.

2. Определяются исходные горнотехнические параметры выработки в соответствии с ее назначением по факторам транспорта и вентиляции. В результате по нормативным методикам выбирается проектное типовое сечение выработки [58, 59] с площадью в свету до  $S_{св}$  и после  $S_{св}^{n.o}$  осадки рамной крепи.

3. Выполняется расчет прогнозируемых перемещений проектного контура выработки  $U_i^{x,y}$  по формулам (5.14)-(5.19) и потери ее сечения в свету по формулам (5.20) или (5.21).

4. Проверяется принятый проектом типоразмер сечения по критериям устойчивости рамной крепи, безопасности транспорта и прохода людей (5.1)-(5.12). Проверяется сечение выработки в свету после осадки по критерию (5.13) требуемого расхода воздуха.

5. Оценивается степень выполнения всех критериев.

При полном удовлетворении критериев (5.1)-(5.13) выбранное проектом типовое сечение пригодно к эксплуатации без проведения каких-либо дополнительных мероприятий.

При частичном невыполнении некоторых условий надежного и безопасного функционирования выработки следует оценить возможность усиления рамной крепи (например, установкой системы анкеров, увязанных с рамой в единую конструкцию) или применения конструкций рамной крепи с более высокими значениями допустимой податливости и несущей способности.

6. При невыполнении большинства условий (5.1)-(5.13) следует выполнить технико-экономический анализ сравнения двух вариантов:

– увеличение проектного типового сечения выработки с допол-

нительными затратами на ее проведение и крепление;

– затраты на проведение специальных мероприятий: анкерное упрочнение приконтурного массива по наиболее опасным участкам контура выработки или всего ее периметра; тампонаж закрепного пространства; установка обратного свода рамы по почве как самостоятельный вид крепи, так и в сочетании с анкерным упрочнением; возведение металлобетонной или кольцевой типов крепей с тампонажом или без него; периодическая подрывка почвы; перекрепление выработки с выпуском породы в кровле и боках и другие способы повышения устойчивости выработки.

7. Предлагаемый алгоритм позволяет уже на стадии проектирования оперативно спрогнозировать эксплуатационное состояние пластовой выработки, пройденной в слоистом массиве слабых пород, и заложить в проект (при необходимости) выполнение специальных мероприятий по повышению ее устойчивости.

### **Выводы**

1. Влияние площади поперечного сечения выработки в свету имеет степенную закономерность воздействия на перемещения всех участков ее контура (с различным показателем степени на разных участках контура) для обоих типоразмеров: с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ. Этот факт отличается от принципов прогноза перемещений в нормативных методиках, где  $S_{ce}$  учитывается линейно возрастающим поправочным коэффициентом, а тип крепи (КМП-А3 или КШПУ) единым коэффициентом ее работоспособности на все горно-геологические условия поддержания выработки.

2. С увеличением площади поперечного сечения выработки в свету выявлены отличия в интенсивности роста перемещений ее контура для двух групп типоразмеров – с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ:

– в кровле выработок с крепью КШПУ величина и интенсивность роста вертикальных перемещений несколько ниже (до 18,7%) за счет уменьшенного (по сравнению с КМП-А3) радиуса свода верхняка и криволинейной части стойки;

– в боках выработки горизонтальные перемещения в зоне прохода людей и особенно в опорах стоек рамы у крепи КШПУ существенно выше (до 44,3%) за счет увеличенной высоты выработки и высоты расположения пластического шарнира в раме, вокруг которого происходит поворот удлиненной стойки;

– максимумы перемещений пород почвы несущественно отличаются для разных типов крепей в силу примерного равенства ширины выработки по почве для типоразмеров сечений с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ;

– вдавливание стоек рамы в почву у крепи КШПУ до 20,6% выше за счет пониженного сопротивления внедрению стойки из-за ее менее интенсивного изгиба в полость выработки.

3. Геомеханические параметры системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» влияют на перемещения различных участков контура выработки с закономерностями, не зависящими от ее типового сечения, что позволяет произвести учет типоразмера выработки в виде функций – сомножителей к стабильным функциям связи перемещений  $U(x, y)$  с параметрами системы.

4. Выявлена высокая стабильность (отклонения до 10,6%) величины относительной потери сечения от типоразмера выработки, что объясняется компенсацией прироста (убывания) перемещений контура штрека при изменении его площади поперечного сечения в свету  $S_{ce}$ . Поэтому величина относительной потери сечения фактически определяется только глубиной расположения выработки и механическими характеристиками близлежащих породных слоев углевмещаю-

щей толщи.

5. Оценка достоверности расчета напряженно-деформированного состояния системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» дала вполне удовлетворительные результаты: во-первых, закономерности развития перемещений контура выработки не противоречат известным геомеханическим тенденциям, установленным как экспериментальными, так и аналитическими исследованиями; во-вторых, благодаря учету всех основных механических характеристик элементов системы разработанный алгоритм обладает более высокой общностью прогноза перемещений контура выработки.

6. Выделены четыре основных позиции надежной и безопасной эксплуатации выработки в соответствии с требованиями нормативных документов: устойчивость рамной крепи; условия безопасного движения транспортных средств; условия безопасного прохода людей; надежная вентиляция участков шахтного поля. Для каждой из позиций записаны системы критериев, руководствуясь которыми возможно комплексно оценить выбранное проектом типовое сечение пластовой выработки в конкретных горно-геологических и горнотехнических условиях.

7. На базе методов корреляционно-дисперсионного анализа получена система уравнений регрессии для прогноза эпюры перемещений контура выработки, что в сочетании с критериями надежной и безопасной ее эксплуатации позволяет в замкнутом виде уже на стадии проектирования оперативно спрогнозировать состояние выработки по основным параметрам ее функционирования в слоистом массиве слабых пород и заложить в проект (при необходимости) выполнение специальных мероприятий по повышению ее устойчивости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе с учетом публикации авторов в книгах [1, 2] изложено новое решение научно-технической задачи обеспечения надежной и безопасной эксплуатации пластовых горных выработок за счет повышения достоверности прогноза проявлений горного давления неоднородного углевмещающего массива слабых пород по всему контуру пластовой выработки с учетом полных диаграмм деформирования каждого из элементов системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки».

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Обоснование геомеханической модели пластовых подготовительных выработок, расположенных в слоистом массиве слабых пород, проведено по комплексу основных горно-геологических и горно-технических факторов, что позволило максимально адекватно реальным условиям смоделировать процесс сдвижения неоднородной слоистой углевмещающей толщи в полость выработки:

– размеры модели выбраны с учетом незначительного влияния выработки на граничных поверхностях, где выполняются исходные негидростатические условия распределения вертикальных и горизонтальных компонент напряжений;

– установлено, что при слабых связях между смежными породными слоями действующие касательные напряжения их разрушают и слои деформируются по плоскостям напластования как несвязная структура в окрестности выработки; этот фактор существенно изменяет НДС системы и учтен в разработанной модели;

– для условий Западного Донбасса по стратиграфическим колонкам угольных пластов построено три наиболее характерных структуры углевмещающей толщи, анализ НДС которых позволил с доста-

точной точностью обосновать единую усредненную структуру, погрешность которой не превышает 10% во всем диапазоне изменения геомеханических параметров вмещающего массива;

– оценено влияние деформационных характеристик близлежащих к пластовой выработке породных слоев на НДС системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки», что позволило установить: несмотря на различные соотношения деформационных характеристик в кровле и один слой в почве; в боках выработки наблюдается ярко выраженная область опорного давления, размеры которой определяются в основном глубиной разработки и прочностными характеристиками близлежащих породных слоев – снижение  $\sigma$  происходит в случае залегания в кровле хотябы одного слоя повышенной жесткости;

– проведенное тестирование модели на предмет соответствия результатов расчета классическим представлениям о механизме сдвижения слоистого массива в окрестности выработки подтвердило целесообразность ее использования для изучения геомеханических процессов.

2. Во вмещающей пластовую выработку слоистой толще слабых пород переход в предельное и запредельное состояния наступает в различных областях и элементах системы. Поэтому для повышения адекватности геомеханической модели НДС каждого ее элемента должно рассчитываться по полной диаграмме деформирования с учетом особенностей конкретного материала, что впервые выполнено для условий Западного Донбасса и позволило глубже раскрыть механизм развития геомеханических процессов в окрестности выработки.

3. Установлены отдельные закономерности влияния прочностных и деформационных характеристик каждого из близлежащих породных слоев на изменение поля напряжений и перемещений с ростом глубины расположения пластовой выработки. Определяющим факто-

ром является вид состояния и размеры его области в близлежащих породных слоях и угольном пласте (допредельное, предельное, запредельное) при конкретной глубине разработки:

- при повышенных прочностных характеристиках породных слоев их частично допредельное состояние предопределяет связь напряжений и перемещений с параметром  $H$ , близкую к линейной; вариация модуля деформации слоев в интервале  $E_i^{K,II} = (0,3...1) \cdot 10^4$  МПа изменяет напряжения до 55%, а перемещения контура выработки до 131%;

- при пониженных прочностных характеристиках породных слоев зависимость НДС массива от параметра  $H$  становится нелинейной с наступлением предельного состояния хотябы одного из слоев; в запредельном состоянии интенсивность роста перемещений контура выработки существенно увеличивается, а напряжений – уменьшается; при этом модули деформации слоев несущественно влияют на поле напряжений, а смещения контура выработки, особенно в ее почве, могут изменяться до 2,5 раз.

4. Выявлено, что относительная независимость деформирования породных слоев при их проскальзывании относительно друг друга в окрестности выработки порождает высокую степень независимости поля напряжений отдельного породного слоя от вида состояния соседних слоев:

- слои пониженной прочности с ростом  $H$  переходят в предельное и запредельное состояние практически независимо от прочностных характеристик соседних более крепких породных слоев;

- поле напряжений в более крепких породных слоях в малой степени зависит от перехода соседнего слоя в предельное и запредельное состояние;

- поле напряжений в угольном пласте, втором слое почвы и третьем слое кровли достаточно стабильно по отношению к виду со-

стояния какого-либо близлежащего породного слоя.

5. Установленные закономерности развития эпюры перемещений по контуру пластовой выработки, сооружаемой в слоистом массиве слабых пород, определяют разную связь смещений отдельных участков контура с геомеханическими параметрами:

– в кровле происходит выполаживание свода рамы (снижающее ее несущую способность) со стабильным отношением 0,64...0,71 вертикальных перемещений в зоне прохода людей в сравнении с опусканием замка свода; здесь существенное влияние (более 10%) оказывают механические характеристики первого и второго породных слоев

кровли:  $E_{1,2}^K, M_1^K / E_1^K, \sigma_{сж1,2}^K, (\sigma_{сж1,2}^K)^0 / \sigma_{сж1,2}^K$ ;

– в боках выработки происходит изгиб стоек рамной крепи, снижающий ее устойчивость, на величину которого оказывают существенное влияние механические характеристики не только первого и второго породных слоев кровли, но также и первого слоя почвы:

$E_{1,2}^{K,П}, M_1^{K,П} / E_1^{K,П}, \sigma_{сж1,2}^{K,П}, (\sigma_{сж1,2}^{K,П})^0 / \sigma_{сж1,2}^{K,П}$ ; опережающее сближение

опор стоек рамы обусловлено действием «эффекта штампа», когда в условиях залегания более жесткого и менее разупрочненного первого породного слоя кровли он под воздействием опорного давления в боках выработки интенсифицирует выдавливание пород почвы в полость выработки;

– эпюра пучения почвы выработки имеет асимметрию в сторону восстания пласта таким образом, что в зоне прохода людей в этой стороне выработки поднятие почвы составляет 0,65...0,67 от максимального (в центральной части выработки), а в зоне прохода людей со стороны падения пласта – 0,57...0,60 от максимального вне зависимости от сочетания геомеханических факторов; на величину пучения почвы существенное влияние оказывают только механические характери-



ки первых породных слоев кровли и почвы:  $E_1^{K,II}$ ,  $M_1^{II} / E_1^{II}$ ,  $\sigma_{сж1}^{K,II}$ ,  $(\sigma_{сж1}^{II})^0 / \sigma_{сж1}^{II}$ ;

– общая величина поднятия почвы выработки включает две составляющие, отличающиеся между собой механизмом развития перемещений: собственно пучение – перемещение пород почвы в полость выработки под воздействием опорного давления в ее боках и разгруженной зоны непосредственно под выработкой; вдавливание опор стоек рамной крепи, обусловленное совместным действием вертикальной нагрузки на крепь и разупрочняющимися породами почвы под опорами стоек; величина вдавливания определяется механическими характеристиками:  $E_1^{II}$ ,  $\sigma_{сж1,2}^{K,II}$ ,  $(\sigma_{сж1}^{II})^0 / \sigma_{сж1}^{II}$ .

6. Анализ закономерностей развития перемещений контура выработки и НДС ее крепи позволил выявить область горно-геологических условий, когда возможно сохранение эксплуатационного состояния выработки с помощью ресурсосберегающих технологий усиления рамы системой анкеров: при  $H \leq 400$  м  $\sigma_{сжi}^{K,II} = 10...15$  МПа; при  $400 \text{ м} < H \leq 600$  м  $\sigma_{сжi}^{K,II} > 15$  МПа. Такая возможность в указанных условиях обусловлена относительно умеренными перемещениями контура выработки и ограниченными областями предельного и запредельного состояния массива. Для частичной компенсации перемещений на опасных (с точки зрения эксплуатационных норм и правил безопасности) участках контура выработки целесообразно применять податливые трубчатые анкера ГА-2, развивающие высокую реакцию сопротивления даже в разупрочненных слабых породах.

7. Влияние площади поперечного сечения выработки в свету  $S_{св}$  имеет индивидуальные степенные закономерности воздействия на перемещения различных участков ее контура для обоих типоразмеров –

с крепью КМП-А3 и крепью КШПУ. Этот результат отличается от принципов усреднения в нормативных методиках на все горно-геологические условия поддержания выработок. Наряду с этим одинаковые геомеханические факторы поддержания выработок стабилизируют величину ее относительной потери сечения независимо от типа-размера и вида применяемой крепи – КМП-А3 или КШПУ.

8. Оценка достоверности расчета НДС системы «слоистый массив-крепь подготовительной выработки» дала удовлетворительные результаты:

- закономерности развития перемещений контура выработки не противоречат известным геомеханическим тенденциям, установленным как экспериментальными, так и аналитическими исследованиями;

- благодаря учету всех основных механических характеристик по полной диаграмме деформирования каждого из элементов системы установленные закономерности обладают более высокой общностью прогноза.

9. Выделены четыре основных позиции надежной и безопасной эксплуатации выработки в соответствии с требованиями нормативных документов: устойчивость рамной крепи, условия безопасного прохода людей, условия безопасного движения транспортных средств, надежная вентиляция участков шахтного поля. Для каждой из позиций сформулированы системы критериев и получены уравнения регрессии входящих туда параметров, что позволяет в замкнутом виде уже на стадии проектирования оперативно спрогнозировать комплексное состояние пластовой выработки по основным условиям ее функционирования в слоистом массиве слабых пород и заложить в проект (при необходимости) выполнение специальных мероприятий по повышению устойчивости выработки, например, упрочнение боковых пород анкерами, твердеющими смесями и др.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга 1. Допредельная стадия деформирования системы «порода-крепь» /В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 172 с.
2. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния мелкослоистого породного массива вокруг пластовой выработки. Книга 2. Предельное и запредельное состояние системы «порода-крепь» /В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – 198 с.
3. Стренг К., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977. – 349 с.
4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986. – 318 с.
5. Норри Д., де Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981. – 304 с.
6. John F. Lectures on advanced numerical analysis. New York: Nelson, 1966. – 180 p.
7. Courant R., Lax P.D. On nonlinear partial differential equation with two independent variables / Comm. Pure Applied Math, №2, 1949. – P.255-274.
8. Ильюшин А.А. Пластичность. М.-Л.: Гостехтеориздат, 1948. – 376 с.
9. Traub J.F. Iterative Methods for the Solution of Equations. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1964. – 282 p.

10. Strang G., Fix G. An Analysis of the Finite Element Method. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1964. – 366 p.
11. Donea J., Huerta A. Finite Element Methods for Flow Problems. Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 2003. – 364 p.
12. Расчеты элементов конструкций на прочность и жесткость. Интегрированная система автоматизации конструирования и прочностных расчетов изделий машиностроения Кипр-ЕС: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В.И. Мяченкова. М.: Мосстанкин. 1987. – 188 с.
13. Forsythe G.F., Wasow W.R. Finite Difference Methods for Partial Differential Equations. New York: John Wiley and Sons, 1960. – 324 p.
14. Морозов Е. М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. М.: Наука, 1980. – 254 с.
15. Сиратори М., Миес Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения. – М.: Мир, 1986. – 342 с.
16. Хеллан К. Введение в механику разрушения. – М.: Мир, 1988. – 286 с.
17. Вычислительные методы в механике разрушения / Под ред. С. Атлури. – М.: Мир, 1990. – 392 с.
18. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. Solid mechanics. Vol. 2. – Oxford: Butterworth Heinemann, 2000. – 480 p.
19. Амусин Б.З., Фадеев А.Б. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М.: Недра, 1975. – 143 с.
20. Методы и средства решения задач горной геомеханики / Г.Н. Кузнецов, К.А. Ардашев, Н.А. Филатов и др. – М.: Недра, 1987. – 248 с.
21. Курленя М.В., Миренков В.Е., Шутов А.В. Расчет напряженного состояния массива пород с использованием натуральных данных о деформировании // ФТПРПИ. – 1999. – №3. – С. 27-35.

22. Бушманова О.П., Ревуженко А.Ф. Напряженное состояние породного массива вокруг выработки при локализации деформаций сдвига // ФТПРПИ. – 2002. – №4. – С. 18-26.

23. Миренков В.Е. Метод расчета деформирования пород около выработки в нелинейной постановке // Изв. вузов. Горный журнал. – 2003. – №6. – С. 84-87.

24. Сухарникова В.А., Привалов А.А., Евстратова А.В. Напряженное состояние пород вблизи горных выработок // Неделя горняка-2003. Семинар №10. – С. 110-112.

25. Гуджабидзе И.К., Гудавадзе З.Г., Лебанидзе З.Б. Обоснование конструкций крепления и параметров горных выработок в условиях сводообразования // Горный журнал. – 2004. – №4. – С. 87-88.

26. Управление напряженным состоянием породного массива и устойчивостью горных выработок / Полухин В.А., Калоеров С.А., Грядущий Ю.Б., Горянская Е.С. – Донецк: Юго-Восток, 2002. – 302 с.

27. Бульчев Н.С., Фотиева Н.Н., Стрельцов Е.В. Проектирование и расчет крепи капитальных выработок. – М.: Недра, 1986. – 288 с.

28. Вылегжанин В.Н., Егоров П.В., Мурашев В.И. Структурные модели горного массива в механизме геомеханических процессов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 295 с.

29. Фисенко Г.Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок. – М.: Недра, 1976. – 212 с.

30. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.

31. Тулуб С.Б. Вероятностно-статистическая оценка устойчивости магистральных выработок шахт Западного Донбасса // Науковий вісник НГА України. – 1998. – № 2. – С. 22-26.

32. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей. – М.: Недра, 1984. – 415 с.
33. Сдвижкова Е.А. Математическое моделирование случайной загрузки на крепь горной выработки // Науковий вісник НГА України. – 2002. – № 2. – С. 22-25.
34. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
35. Потапов А.В. Численное моделирование нестационарных геомеханических процессов с низким внутренним трением: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: ИГД РАН, 1991. – 168 с.
36. Рязанцев А.П., Коваленко В.В., Гладкий А.В. Компьютерное моделирование способа повышения устойчивости капитальных выработок в условиях пучения пород почвы // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений. Сб. научн. трудов. – Донецк: «Норд-пресс», 2004. – С. 52-53.
37. Болтенгаген И.Л. Влияние ориентации главных начальных напряжений на механическое состояние массива горных пород вокруг выработок // ФТПРПИ. – 2002. – №3. – С. 35-43.
38. Самоделкина Н.А. Об одном способе учета реологических свойств пород в конечноэлементном анализе геомеханических процессов // ФТПРПИ. – 2003. – №3. – С. 14-20.
39. Булат А.Ф., Виноградов В.В. Опорно-анкерне кріплення гірничих виробок вугільних шахт / Ін-т геотехнічної механіки НАН України. – Дніпропетровськ, 2002. – 372 с.
40. Ержанов Ж.С., Каримбаев Т.Д. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 238 с.
41. Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. – М.: Стройиздат, 1983. – 273 с.

42. Руководство по поддержанию горных выработок на шахтах Западного Донбасса. – Спб.: ВНИМИ, 1992. – 51 с.

43. Руководящий нормативный документ Министерства угольной промышленности КД 12.01.01.201-98. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах. Методические указания. – Киев: УкрНИМИ, 1998. – 149 с.

44. Байсаров Л.В., Ильяшов М.А., Демченко А.И. Геомеханика и технология поддержания повторно используемых горных выработок. – Днепропетровск: ЧП «Лири ЛТД», 2005. – 240 с.

45. Усаченко Б.М., Кириченко В.Я., Шмиголь А.В. Охрана подготовительных выработок глубоких горизонтов шахт Западного Донбасса. – М.: ЦНИИЭуголь, 1992. – 168 с.

46. Правила безопасности в угольных и сланцевых шахтах. – М.: Недра, 1986. – 447 с.

47. Правила безпеки у вугільних шахтах / ДНАОП. – Київ: Основа, 1996. – 418 с.

48. Усаченко Б.М. Свойства пород и устойчивость горных выработок. – Киев: Наукова думка, 1979. – 136 с.

49. Усаченко Б.М., Чередниченко В.Н., Головчанский И.Е. Геомеханика охраны выработок в слабометаморфизованных породах. – Киев: Наукова думка, 1990. – 144 с.

50. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.

51. Курленя М.В., Миренков В.Е., Шутов А.В. Расчет напряженного состояния массива пород с использованием натуральных данных о деформировании // ФТПРПИ. – 1999. – №3. – С. 27-35.

52. Ковалевская И.А., Поротников В.В., Фомичев В.В. Анализ подходов к разработке методов расчета параметров упрочнения вмещающих горную выработку слабых пород анкерами // Науковий віс-

ник НГУ. – 2005. – №8. – С.7-8.

53. Ковалевская И.А. Взаимодействие анкерной и комбинированной крепей с породным массивом и разработка методов расчета их рациональных параметров. – Дис...канд. техн. наук. – Днепропетровск: ГГА Украины, 1995. – 200 с.

54. Ковалевская И.А. Геомеханика взаимодействия элементов системы «горный массив-упрочненные породы-крепь подземных выработок». – Днепропетровск: Редакційно-видавничий комплекс НГА України, 2003. – 235 с.

55. Ковалевская И.А. Геомеханика управления устойчивостью пространственной системы «массив-упрочненные породы-крепь подземных выработок». – Дисс...д-ра. техн. наук. – Днепропетровск: НГУ, 2004. – 349 с.

56. Технология изготовления и установки трубчатых анкеров взрывным способом /В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович и др. – Днепропетровск: Системные технологии, 2006. – 56 с.

57. Временное руководство по расчету параметров трубчатой анкерной крепи /В.И. Бондаренко, И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович и др. – Системные технологии, 2005. – 46 с.

58. Унифицированные типовые сечения горных выработок. Т.1. – Киев: Будівельник, 1971. – 416 с.

59. Сечения горных выработок, закрепленных металлической арочной шатровой крепью для условий шахт Западного Донбасса. – Днепропетровск: Фонды института «Днепрогипрошахт» (архивный №188406), 1988. – 274 с.

60. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. – М.: Недра, 1985. – 271 с.



61. Шмиголь А.В. Обоснование способа и средств крепления выемочных штреков в условиях шахт Западного Донбасса: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск: ДГИ, 1989. – 17 с.

62. Тулуб С.Б. Підвищення стійкості підготовчих виробок з підошвою, що зривається, в умовах шахт Західного Донбасу //Науковий вісник НГУ. – 2003. – №1. – С.49-50.

63. Прогнозный каталог шахтопластов Донецкого угольного бассейна с характеристикой горно-геологических факторов и явлений. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1982. – 267 с.

64. Фесенко Э.В. Прогноз и закономерности пучения слоистых пород почвы горных выработок: Дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск: НГУ. – 187 с.

65. Заславский Ю.З. Исследование проявлений горного давления в капитальных выработках глубоких шахт Донецкого бассейна. – М.: Недра, 1966. – 180 с.

66. Шестаков Г.П. Влияние структурно-геологических особенностей на определение напряжений и устойчивости почвы горных выработок шахт Донбасса //Сб. научн. тр.: Приложение результатов исследований полей напряжений к решению задач горного дела и инженерной геологии. – Апатиты: гор. Типография. – 1985. – С.100-104.

67. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.

68. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. – М.: Высшая школа, 1988. – 233 с.

69. Афифи А., Айзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. – М.: Мир, 1982. – 488 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАДАЧАХ ГЕОМЕХАНИКИ .....	6
1.1 Общие положения метода конечных элементов для решения пространственных задач геомеханики в упругой постановке .....	6
1.2 Обобщенная постановка задачи с учетом реологических свойств пород .....	11
1.3 Решение плоской задачи геомеханики в упруго-пластической постановке .....	16
1.4 Решение задачи геомеханики с использованием объемных конечных элементов .....	19
1.5 Обобщенная модель запредельного поведения пород .....	24
1.6 Теории пластичности и ползучести в задачах геомеханики при сложном нагружении .....	32
2 ЭВОЛЮЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В РЕШЕНИЯХ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ .....	39
2.1 Развитие математических моделей .....	39
2.2 Технология вычислительного эксперимента .....	51
2.3 Алгоритм постановки вычислительного эксперимента .....	62
3 МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА И ХАРАКТЕРИСТИКА ЭТАПОВ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗА ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПЛАСТОВЫХ ВЫРАБОТКАХ .....	67
4 ЗАКОНОМЕРНОСТИ СВЯЗИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТУРА ВЫРАБОТКИ С ГЕОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ СИСТЕМЫ «СЛОИСТЫЙ МАССИВ-КРЕПЬ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ .....	78
4.1 Методика проведения вычислительного эксперимента .....	79
4.2 Влияние геомеханических параметров углевмещающего массива на смещения кровли выработки .....	88

4.3 Закономерности сближения боков выработки .....	99
4.4 Влияние геомеханических параметров углевмещающего массива на пучение почвы выработки .....	113
4.5 Закономерности изменения контура пластовой выработки .....	123
Выводы .....	127
5 ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКИ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ ПО ВЫБОРУ ЕЕ ТИПОРАЗМЕРА .....	131
5.1 Методика исследования влияния типоразмера выработки на перемещения ее контура .....	131
5.2 Закономерности влияния типоразмера пластовой выработки на эпюру перемещений ее контура .....	135
5.3 Оценка достоверности прогноза перемещений контура выработки .....	150
5.4 Обоснование критериев оценки эксплуатационной пригодности выработки .....	166
5.5 Построение уравнений регрессии для расчета эпюры перемещений контура пластовой выработки .....	171
5.6 Алгоритм оценки проектного решения по выбору типового сечения пластовой выработки .....	175
Выводы .....	177
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	180
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК .....	186
СОДЕРЖАНИЕ .....	193

Наукове видання

Бондаренко В.І., Ілляшов М.О.,  
Ковалевська І.А., Симанович Г.А., Фомичов В.В

**ПРОГНОЗ ПЕРЕМІЩЕНЬ КОНТУРА  
ПЛАСТОВОЇ ВИРОБКИ В ШАРУВАТОМУ  
МАСИВІ СЛАБКИХ ПОРІД**

Монографія

Російською мовою

Здано в набір 01.09.08. Підписано до друку 15.09.08.  
Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк-різограф.  
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк.11,09.  
Наклад – 300 прим. Замовлення № 05/08.

---

ДНВП Міністерства освіти і науки «Системні технології»  
49005, м. Дніпропетровськ, а/с 493  
E-mail: st@dmegi.dp.ua

**Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до  
державного реєстру видавців:**

**Серія ДК №429**