

## **ГЛАВА 8**

### **ПУЧЕНИЕ ПОРОД ПОЧВЫ В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ**

**8.1. Давление на крепь со стороны  
почвы выработки**

**8.2. Реологические методы оценки выдавливания  
пород почвы в выработках**

**8.3. Упругопластическая устойчивость  
породного массива в окрестности  
одиночной выработки**

**8.4. Эмпирические методы прогноза  
пучения пород почвы**

**8.5. Численное моделирование процесса  
вспучивания пород почвы в горных выработках**

## ПУЧЕНИЕ ПОРОД ПОЧВЫ В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Пучением называют значительные деформации, проявляющиеся в виде выдавливания породной массы со стороны почвы внутрь выработки. Поднятие пород почвы может достигать значительных величин (более 1 м) и даже привести к практически полной ликвидации выработки. В зависимости от горно-геологических условий этот процесс является либо затухающим, либо незатухающим во времени.

Существует несколько гипотез, объясняющих причину выдавливания пород в горных выработках:

- набухание пород под действием влаги;
- увеличение объема пород в зоне неупругих деформаций вследствие их пластического разрыхления;
- выпирание пород под влиянием опорного давления в боках выработки;
- вязкое течение пород в результате неравновесного состояния массива в почве выработки;
- сорбционное набухание газонасыщенных пористых сред;
- потеря упругопластической устойчивости пород в области неупругих деформаций и т.д.

В зависимости от используемых физических моделей все методы оценки явления выдавливания пород в горные выработки можно разделить на четыре группы:

- основанные на применении уравнений статики сыпучих сред (П.М.Цимбаревич [122], В.Д. Слесарев [130] и др.);
- основанные на использовании реологических уравнений (В.А. Лыткин [131], А.П. Максимов [8] и др.);
- основанные на уравнениях теории упругопластической устойчивости (А.Н. Шашенко [104]);
- основанные на эмпирических зависимостях (Ю.З. Заславский [12], И.Л. Черняк [132] и др.).

### 8.1. Давление на крепь со стороны почвы выработки

Достаточно детально задача определения давления на крепь со стороны почвы выработки была впервые решена П.М. Цимбаревичем [122] на основе подхода, предложенного К. Герцаги. Задача рассматривалась применительно к породной среде, которая обладает внутренним трением и лишена сцепления.

Породы почвы в выработке нагружены сверху по линии 1-1 рис. 8.1,а некоторой вертикальной нагрузкой, под влиянием которой происходит выдавливание пород внутрь выработки. Рассматривается условие взаимодействия призмы сползания  $ABC$  (активное давление) и призмы выпирания  $ACE$  (пассивное давление). При этом допускается, как было отмечено выше, что породы разрыхлены и не имеют сцепления, а высота столба пород, формирующего усилия выпирания в почве, равна  $h_1 = h + b$ , где  $h$  – высота выработки,  $a$   $b$  – высота свода естественного равновесия.

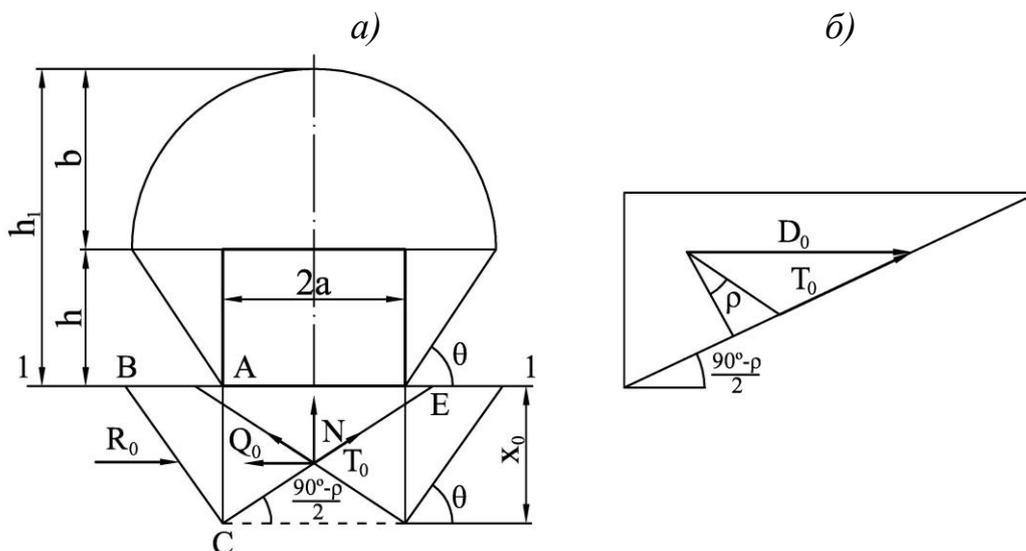


Рис. 8.1. Схема взаимодействия призм сползания и выпирания по П.М. Цимбаревичу

Задача решается в следующей последовательности. Вначале определяют глубину зоны сдвигающихся пород

$$x_0 = h_1 \frac{\operatorname{tg}^4 \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right)}{1 - \operatorname{tg}^4 \left( \frac{90^\circ - \rho}{2} \right)}.$$

Порода на глубине, превышающей  $x_0$ , находится в состоянии равновесия, а на глубине меньшей  $x_0$  – в состоянии движения в сторону выработки.

Горизонтальное давление со стороны почвы выработки равно

$$D_0 = R_0 - Q_0 = \frac{\gamma}{2} (x_0^2 - 2x_0 h_1) \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \rho}{2} - \frac{1}{2} \gamma x_0^2 \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ + \rho}{2},$$

где  $R_0$  – активное давление,  $Q_0$  – пассивное давление.

Горизонтальные силы  $D_0$  приводят к возникновению сил на наклонных площадках, которые в свою очередь, образуют нормальную равнодействующую  $N$ , направленную вверх (рис. 8.1.).

Величину силы  $T_0$  определяют из схемы, показанной на рис. 8.1,б по теореме синусов:

$$T_0 = \frac{D_0}{2 \sin \frac{90^\circ + \rho}{2}}.$$

Интересующую силу  $N$ , которая характеризует суммарное давление пород со стороны почвы, получают (рис. 8.1,а) по формуле:

$$N = 2T_0 \sin \frac{90^\circ - \rho}{2} = D_0 \operatorname{tg} \frac{90^\circ - \rho}{2}.$$

Подобным же образом В.Д. Слесарев [130] рассматривал давление со стороны почвы выработки как боковой распор второго порядка (рис. 8.2.).

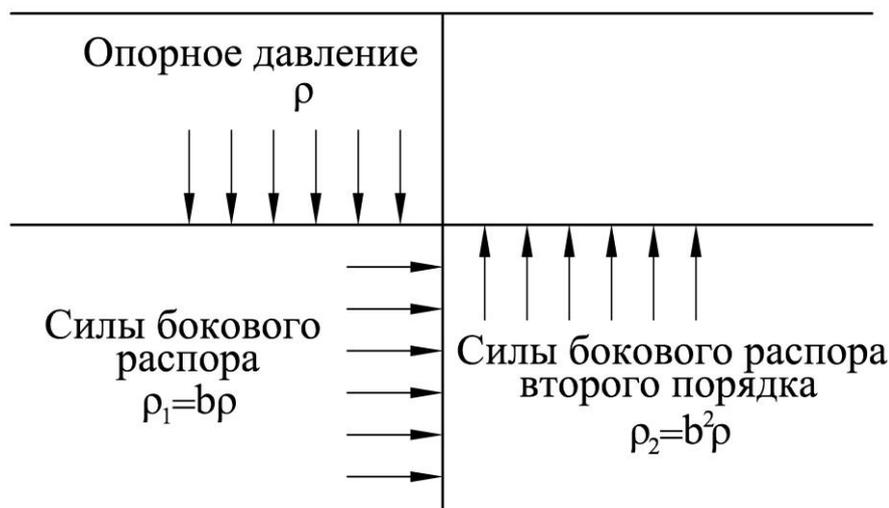


Рис. 8.2. Возникновение давления со стороны почвы по В.Д. Слесареву

Исходя из теории напряженного состояния, возникающего в сыпучей несвязанной среде, в почве выработки действуют силы бокового распора

$$p_1 = (\gamma H + p_0) \operatorname{tg}^2 \frac{90^\circ - \rho}{2},$$

где  $H$  – глубина расположения выработки;  $p_0$  – дополнительное давление на штрековые целики, вызванное ведением очистных работ и другими причинами.

Силы бокового распора  $p_1$  вызывают в свою очередь боковой распор второго порядка  $p_2$ , которые создает давление со стороны почвы

$$p_2 = (\gamma H + p_0) \operatorname{tg}^4 \frac{90^\circ - \rho}{2}.$$

Недостатками описанных выше задач является либо отсутствие явной зависимости между величиной давления и глубиной заложения выработки (П.М. Цимбаревич), либо настолько прямая зависимость между этими величинами (В.Д. Слесарев), что ни одна крепь не в состоянии выдержать такую нагрузку. Причина недостатков этой группы методов кроется, прежде всего, в чрезмерной идеализации породной среды, примитивных расчетных схемах и применяемом математическом аппарате.

## **8.2. Реологические методы оценки выдавливания пород почвы в выработках**

Практика показывает, что выдавливание пород почвы в горных выработках является типичным временным процессом. Внешние проявления процесса выдавливания обнаруживаются не мгновенно вслед за подвижением забоя, а проявляются со временем и длятся неделями, месяцами и даже годами. Таким образом, изучение пучения пород почвы в реологической постановке в большой степени отражают его физическую суть и представляют особый интерес с точки зрения математического моделирования явления.

Одна из таких задач была решена А.П. Максимовым [8]. Физическая модель представляет собой диффузор, имеющий вид двух плоских стенок, сходящихся под углом  $\alpha$  друг к другу, через который происходит истечение некоторой очень вязкой среды. Если положить угол  $\alpha=180$  градусов, то получим схему, изображенную на рис 8.3.

Необходимым условием возникновения вязкого течения является наличие в почве выработки напряжений, превышающих предельное сопротивление пород сдвигу. Исходными являются уравнения Навье-Стокса и уравнение среды Бингама-Шведова. В результате решения получены зависимости для определения смещений в почве выработки и величины нагрузки на крепь. Аналитические результаты качественно хорошо согласуются с результатами натурных измерений и физического моделирования. Как видно из рис. 8.3, смещения захватывают значительную область в почве выработки, уменьшаясь по мере удале-

ний вглубь массива, и практически затухают на расстоянии, равном, примерно, 7-8 радиусов выработки.

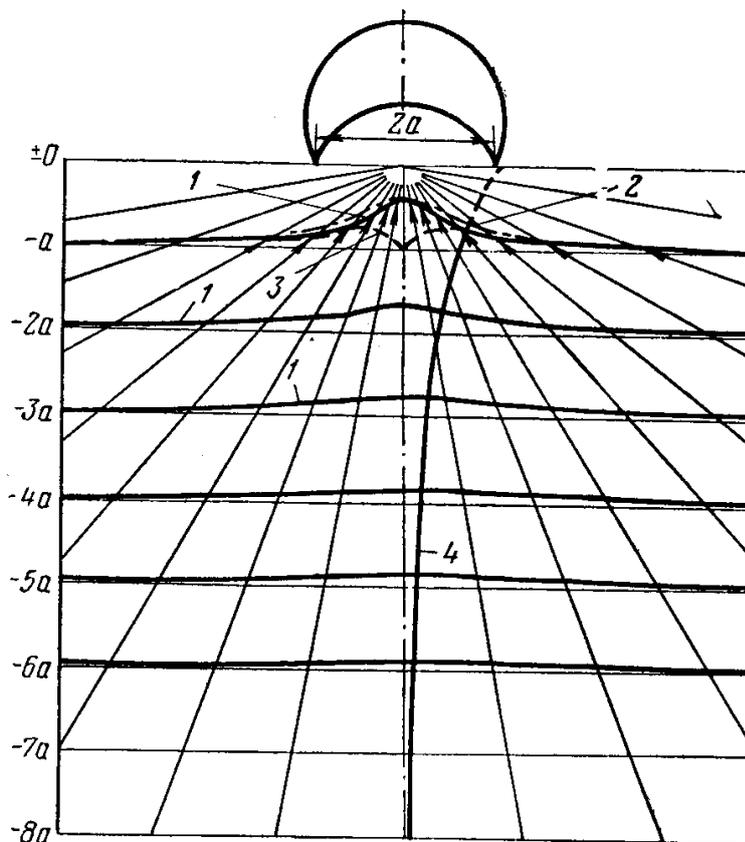


Рис. 8.3. Область деформирования пород в почве выработки: 1 – радиальные смещения; 2 – вертикальные смещения; 3 – горизонтальные смещения, 4 – вертикальные смещения точек, расположенных на оси выработки

Недостатком гидродинамического подхода к решению задач геомеханики является неизбежное использование констант, определение которых применительно к горным породам крайне затруднительно, например, числа Рейнольдса.

Несколько иное решение задачи о пучении пород почвы в выработках, выполнено В.А. Лыткиным [131] также на основе реологической модели Бингама-Шведова. Расчетная схема задачи показана на рис. 8.4.

Она принимается в виде залегающего в почве выработки слоя пучающей породы мощностью  $h_0$ , зажато между значительно более жесткими слоями. В связи с образованием выработки вокруг нее создается концентрация напряжений. Величина их вертикальной составляющей на уровне кровли пучающего слоя определяется из решения упругой задачи и может быть приближенно вычислена по формуле

$$\sigma_y^{yup} = \frac{\gamma H}{\sqrt{x^2 - a^2}}, \quad (8.1)$$

где  $a$  – полупролет выработки.

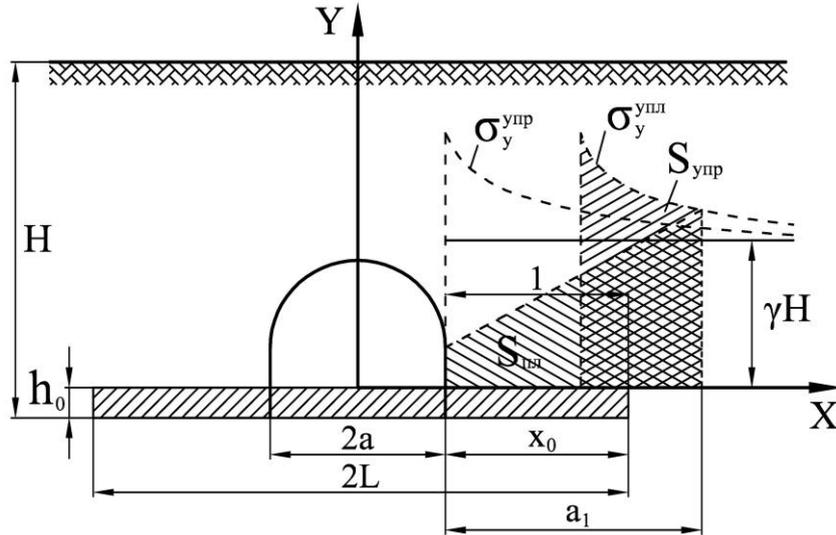


Рис. 8.4. Схема к определению объема пучения породы (по В.А. Лыткину)

Под действием этих напряжений в слабом слое в окрестности выработки образуются симметрично расположенные области пластического течения, вертикальные напряжения в которых могут быть определены из приближенного решения А.А. Ильюшина по формуле

$$\sigma_y^{nl} = 2k_1 \left( 2 + \frac{x-a}{h_0} \right), \quad (8.2)$$

где  $k_1$  – параметр, вытекающий из условия прочности, например, предел прочности на сдвиг  $R_\tau$ .

Граница пластической области приближенно может быть определена из условия равенства напряжений  $\sigma_y^{nl} = \sigma_y^{yup}$ . При образовании пластической области часть нагрузки, испытываемой пучающим слоем сразу после проходки выработки, определяемой из решения упругой задачи и превышающей нагрузку, полученную из решения пластической задачи, переместится в глубь массива. Параметр  $a$  – примет значение  $a_1$ . Положение границы пластической зоны  $l = x_0 - a$  определяется, исходя из площадей эпюр  $S^{nl} = S^{yup}$  по следующей формуле:

$$l^3 + 6h_0 l^2 + 2h_0(4 - k^{*2})l - 2k^* h_0^2 a = 0, \quad (8.3)$$

где  $k^* = \frac{\gamma H}{2k_1}$ .

Объем вспученной породной массы может быть найден из выражений

$$V = \frac{4(1-\mu^2)L^2}{E} \left[ \frac{1}{2} \pi \gamma H - 4k_1 A - \frac{2k_1 L}{h_0} B \right], \quad (8.4)$$

где  $A = \arccos \frac{a}{L} (1 - \sqrt{1 - (\frac{a}{L})^2})$ ,  $B = \frac{2}{3} \sqrt{1 - (\frac{a}{L})^2} - \frac{a}{L} \arccos \frac{a}{L}$ .

Высота поднятия почвы составит

$$v = \frac{V}{2a}. \quad (8.5)$$

Расчеты, выполненные по приведенным выше зависимостям, дают существенно заниженные значения определяемых величин.

### **8.3. Упругопластическая устойчивость породного массива в окрестности одиночной выработки**

В работе [104] на основе лабораторных натуральных и аналитических исследований предложен отличающийся от изложенных выше подход к изучению проблемы пучения пород почвы подземных выработок. В его основе лежит гипотеза о потере упругопластической устойчивости породного массива в окрестности одиночной выработки, которая была сформулирована в итоге обобщения большого количества результатов натуральных измерений смещений контура выработок в условиях пучения пород почвы и лабораторного моделирования на моделях из эквивалентных материалов. Эти исследования позволили выделить в окрестности выработки по мере удаления от забоя наличие четырех областей, характеризующихся различной интенсивностью протекания механических процессов:

I – область упругого деформирования;

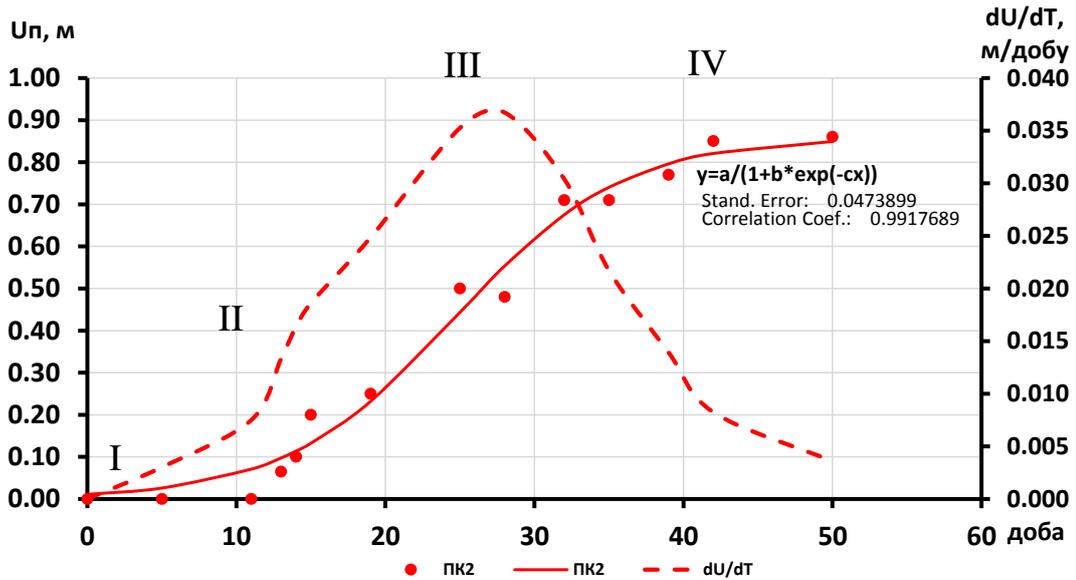
II – область пластических деформаций;

III – область вспучивания пород почвы;

IV – область стабилизации (2) или нестабилизации (1) процесса пучения пород почвы (рис. 8.5).

На рис. 8.5 приведены типичные графики смещений и скоростей смещений контура выработки для шахты «Добропольская» «ДТЭК-Добропольеуголь», где пучение пород почвы является наиболее характерным проявлением горного давления.

a)



б)

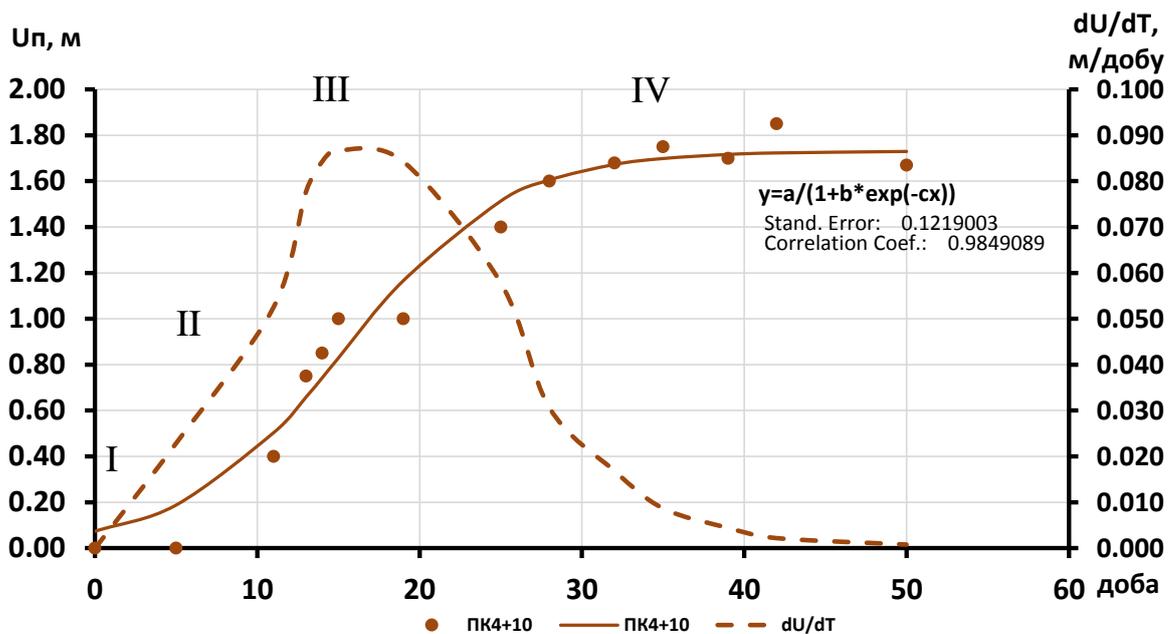


Рис. 8.5. Кинетика скорости вспучивания и перемещения подошвы на пикете

Область вспучивания пород почвы (III) слабо прослеживается на графике смещений, но отчетливо видна на графике интенсивности смещений рис. 8.5,б. Она характеризуется достаточно быстрым протеканием процесса и резким увеличением смещений после достижения ими некоторого критического предела в предшествующей области.

Четвертая область завершает процесс активного деформирования приконтурного породного массива. Интенсивность деформаций резко

падает, они либо стабилизируются (рис. 8.5,б), либо дестабилизируются во времени (рис. 8.5,а).

Кривые перемещений, приведенные на рис. 8.5,а,б достаточно близко аппроксимируются следующей зависимостью:

$$U_n = \frac{a}{1 + be^{-ct}}, \quad (8.6)$$

где  $U_n$  – величина поднятия пород почвы;  $t$  – время, сут.;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, получаемые в результате натуральных измерений.

Анализ натуральных и лабораторных исследований, аналогичных тем, которые были изложены выше на примере шахты «Добропольская», показывает, что все они с поправкой на конкретную горно-геологическую ситуацию, качественно достаточно близко отражают картину развития пучения пород почвы. Это обстоятельство уже само по себе говорит о том, что в основе явления лежит некоторая общая физическая закономерность.

Начало пучения пород почвы выработок всегда связано с образованием третьей области. Характерной ее особенностью является очень быстрый рост деформаций в течение достаточно короткого промежутка времени, происходящий после того, как пластические деформации достигают некоторых предельных (критических) значений. С энергетической точки зрения происходит следующее: при незначительном изменении напряженного состояния, связанным с удалением реперной станции от забоя, происходит относительно быстрое выделение потенциальной энергии, расходуемой на дополнительное разрушение структурных связей в породном массиве и его разрыхление, сопровождающееся существенным увеличением объема. После этого механическая система вновь обретает состояние равновесия.

Скорость перехода из одного энергетического состояния в другое определяется структурными особенностями пород в массиве. Для хрупких пород она может быть очень высокой, для пород, содержащих большое количество глинистых частиц, скорость перехода будет сравнительно небольшой, а дальнейший процесс – длительным, и, в зависимости от условий, затухающим или незатухающим.

В физике такие переходные процессы, которые характеризуются резким изменением одного параметра (перемещение на контуре выработки) при незначительном увеличении другого (компоненты напряжений на внешнем контуре), называют потерей устойчивости равновесия. В рассматриваемом явлении – это упругопластическая потеря устойчивости равновесия породного массива.

В работе [104] задача установления критериальных соотношений, позволяющих выполнять прогноз пучения пород почвы, решена на основе упрощенного подхода, разработанного А.Ю. Ишлинским – Л.С. Лейбензоном. Особенность его состоит в том, что параметр нагружения вводится только в граничные условия, которые учитывают изменения формы границы при выпучивании. При этом рассматривается породная среда с дилатансией.

В основу исследований положено решение упругопластической задачи, изложенной выше в параграфе 4.4. В общем случае при потере устойчивости уравнения искаженного внутреннего контура можно представить в виде  $r = 1 + d \cos \theta$ , где  $d$  – константа,  $\theta$  – полярный угол. При этом на основное напряженное состояние накладывается некоторое возмущенное состояние, вызванное изменением внутренних граничных условий. Это обстоятельство отражено на рис. 8.6,а,б, где  $K$  – коэффициент, учитывающий влияние забоя выработки на внешние граничные условия,  $\Delta K$  – малое приращение коэффициента  $K$ , вызывающее изменение геометрии внутренней границы.

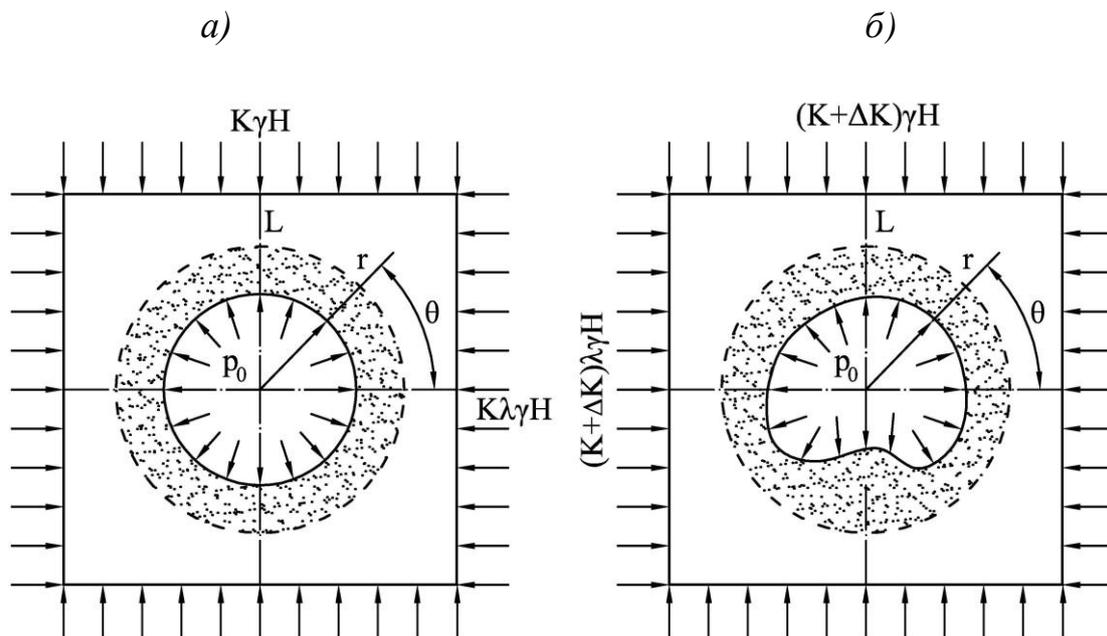


Рис. 8.6. Расчетная схема к решению задачи о потере упругопластического равновесия приконтурного массива: а – исходное состояние; б – возмущенное состояние

Сопрягая компоненты упругих и неупругих напряжений на границе  $L$  с учетом граничных условий на контуре выработки ( $r=1$ ), получим основное критериальное соотношение:

$$\varepsilon_v r_L^{*2} \ln^2 r_2^* + 2 = 0, \quad (8.7)$$

где  $\varepsilon_v$  - среднее значение коэффициента объемного разрыхления пород в приконтурной области,  $r_L^*$  - критический радиус области неупругих деформаций.

Изложенная выше теория пучения пород почвы в подземных выработках получила название бифуркационной. В последствии она была усовершенствована на случай негидростатического поля начальных напряжений [133].

Методика оценки геомеханической ситуации в проектируемой выработке состоит в следующем:

- по формуле (4.58) определяется возможное значение радиуса области неупругих деформаций –  $r_L$ ;
- по формуле (8.7) устанавливается величина критического радиуса области неупругих деформаций –  $r_L^*$ ;
- условия отсутствия пучения в выработке имеет вид

$$r_L < r_L^*. \quad (8.8)$$

Если же условие (8.7) не соблюдается, то необходимо предусматривать мероприятия, обеспечивающие возможность эксплуатации выработки в условиях пучения пород почвы.

#### **8.4. Эмпирические методы прогноза пучения пород почвы**

Методы определения параметров процесса пучения пород почвы в горных выработках, основанные на обобщении достаточно большого количества натуральных измерений, называются эмпирическими. Наиболее известными из них являются метод Ю.З. Заславского [12] и И.Л. Черняка [132].

Ю.З. Заславский считает, что основными факторами, определяющими наличие и параметры процесса пучения пород почвы, являются следующие: уровень напряжений в окрестности выработки, определяемый весом вышележающей толщи пород, прочность пород, угол их залегания, слоистость массива, ориентировку выработок по отношению к напластованию (параллельно или перпендикулярно), их обводненность, геометрические размеры и срок службы.

Основным критерием, по которому производится прогноз пучения пород почвы, является безразмерный параметр  $\frac{\lambda H}{R_c}$ . Приняв в качестве «порога пучения» величину поднятия почвы  $l_0=0,20$  м, т.е. такую величину, при которой процесс пучения начинает сказываться на состоянии выработки, Ю.З. Заславский предложил номограмму, позволяющую определять параметры процесса пучения. Эмпирический критерий для условий Донбасса, по которому оценивается склонность пород почвы к пучению для выработки шириной  $a$ , имеет вид:

$$a > \frac{1,22 R_c}{\lambda H}. \quad (8.9)$$

По данным автора, в выработках шириной 3-5 м пучение начинается проявляться при значениях безразмерного параметра  $\frac{\lambda H}{R_c} = 0,25 - 0,4$ . Эти результаты хорошо согласуются с данными других исследователей.

Для расчета величины поднятия пород почвы Ю.З. Заславским предложена схема, приведенная на рис. 8.7. Породные слои в почве выработки рассматриваются как заземленные балки, находящиеся под действием продольно-поперечной нагрузки. В процессе формирования сила  $P$  превосходит некоторое критическое значение  $P_{кр}$  после чего слой теряет устойчивость, вспучивается и терпит излом в центре, что приводит к потере его несущей способности.

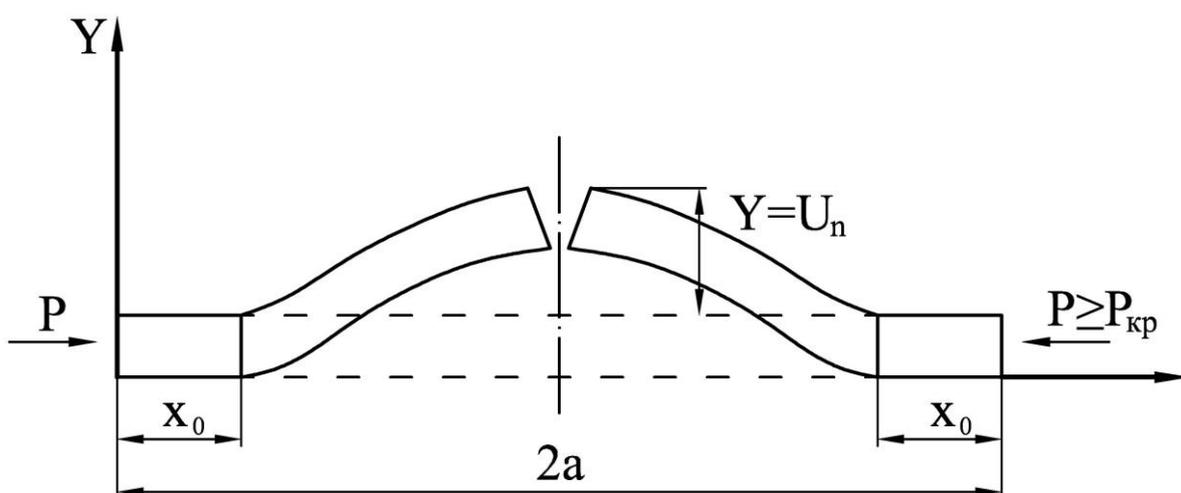


Рис. 8.7. Схема для определения величины поднятия пород почвы по Ю.З. Заславскому

Величина поднятия пород почвы  $U_n$  определяется по формуле:

$$U_n = 0,11 \sqrt{ah \left( \frac{0,85\gamma H - 0,15 \left( \frac{R_c}{R_0} \right)^2 p}{R_c} - 1 \right)} \quad (8.10)$$

где  $h$ ,  $a$  – высота и полупролет выработки;  $H$  – глубина расположения выработки,  $\gamma$  – объемный вес вышележащих пород,  $R_c$  – прочность пород на одноосное сжатие,  $R_0 = 30 \text{ МПа}$  – условная прочность горных пород;  $p$  – отпор крепи со стороны боков.

И.Л. Черняк [132] на основании обобщения большого количества натуральных наблюдений и результатов лабораторного моделирования на моделях из эквивалентных материалов разработал вероятностно-статистический метод прогноза пучения. Основными факторами, определяющими параметры процесса, являются: глубина разработки, прочность вмещающих пород, их мощность и петрографический состав, а также площадь поперечного сечения выработки.

Метод дает возможность не только констатировать наличие пучения, но и определить его интенсивность.

Общим недостатком любых эмпирических подходов является то, что применение установленных закономерностей ограничено теми регионами, в пределах которых производился отбор статистической информации.

### **8.5. Численное моделирование процесса вспучивания пород почвы в горных выработках**

Известные аналитические решения применительно к задачам, связанным с пучением пород почвы в горных выработках, основаны либо на методах строительной механики, либо на методах теории упругости, пластичности, ползучести. В любом случае в их основе лежит модель твердого деформированного тела. При этом предполагается, что зависимость между напряжениями и деформациями линейная, а сами деформации являются достаточно малыми. В случае пучения пород почвы последнее предположение нарушается, поскольку деформации в этом случае уже не являются малыми.

Теория описания подобных процессов в трехмерных телах в настоящее время отсутствует. Поэтому, единственная возможность обеспечить математическое моделирование такого сложного процес-

са, каким является пучение пород почвы в горных выработках, состоит в применении численных моделей. Впервые такая задача была решена в [134]. Ее суть состоит в следующем.

Предполагается, что в основе аналитического описания процесса пучения пород в горных выработках лежит бифуркационная теория. В соответствии с теорией существует некоторая критическая глубина  $H^*$ , начиная с которой параметры пластического состояния породного массива в окрестности выработки смещения на контуре  $U_0$  и размер зоны неупругих деформаций  $r_L$  достигают своих предельных значений -  $U_0^*$  и  $r_L^*$ . Так, например, для горно-геологических условий ПСП «Шахта Добропольская» ШУ «Добропольское» эти параметры составляют  $H^*=450$  м,  $r_L^*=3,3$  м,  $U_0^*=0,29$  м. Расчетная схема и конечно-элементная модель для рассматриваемых условий, представлена на рис. 8.8.

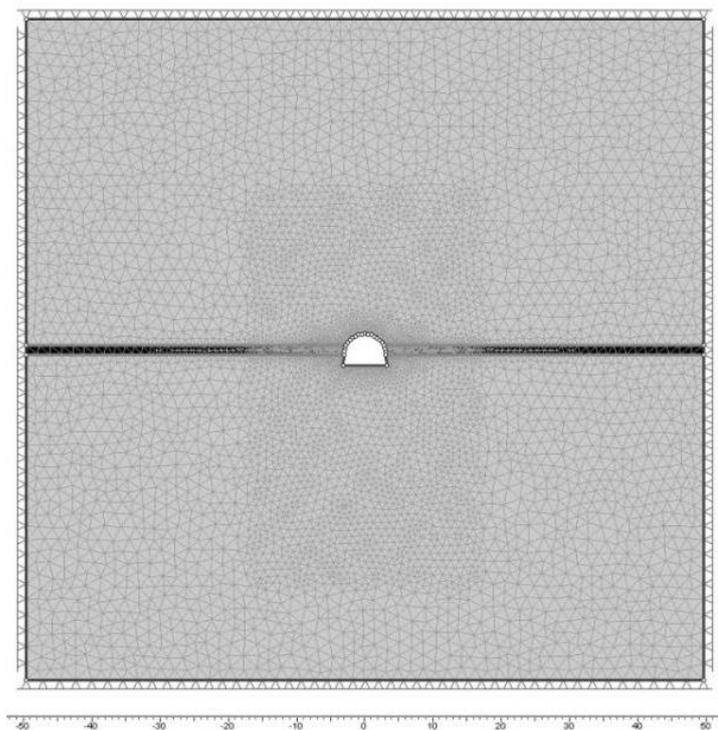


Рис. 8.8. Расчетная схема и конечно-элементная модель 2D-задачи

На рис. 8.9 представлена форма критической зоны напряженных деформаций вокруг 7-го конвейерного штрека, того его участка, который находится за пределами влияния забоя лавы, а на рис. 8.10 показаны векторы перемещений приконтурного породного массива. Точками указаны разрушающиеся зоны от растягивающих напряжений.

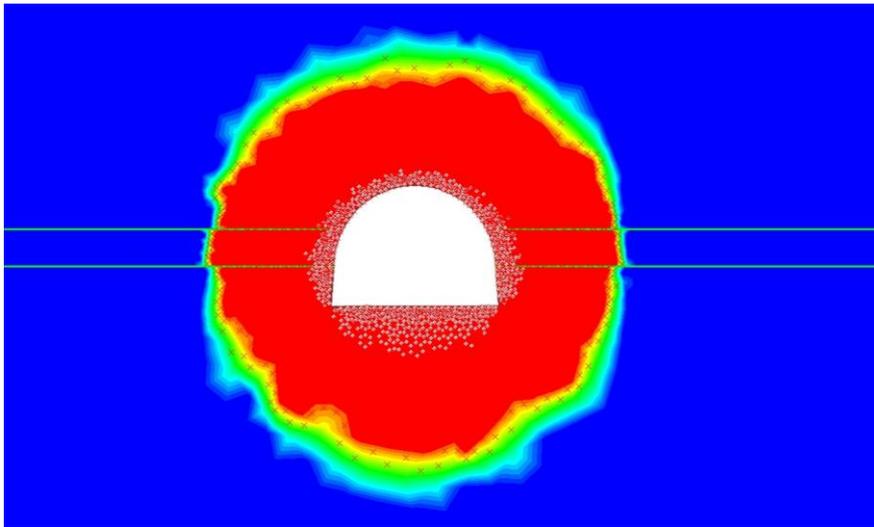


Рис. 8.9. Конфигурация зоны неупругих деформаций вокруг одиночной выработки в невозмущенном состоянии

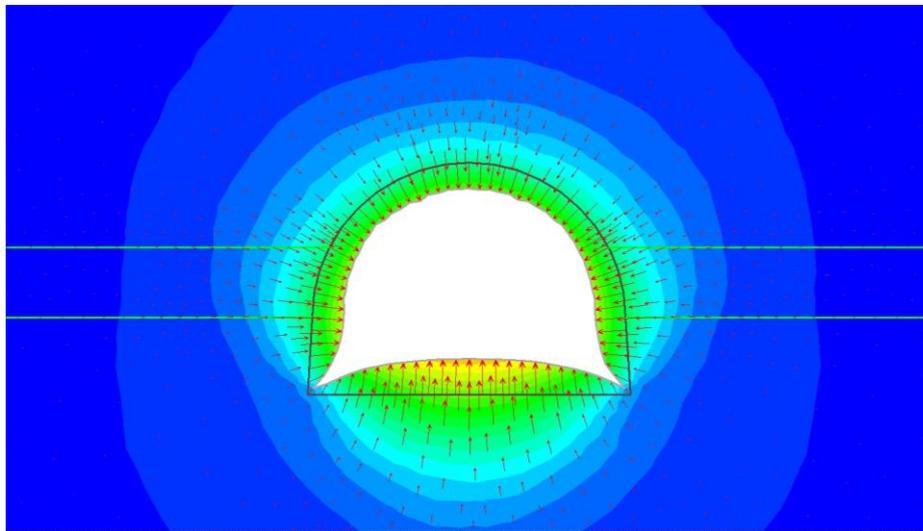


Рис. 8.10 Картина перемещений приконтурного породного массива в невозмущенном состоянии

Следующий искусственный прирост перемещений в центре подошвы выработки на 0,02 м приводит к резкому изменению деформационного состояния пород, залегающих в подошве выработки. На рис. 8.11 показаны конфигурация ЗНД и перемещения контура выработки для этого случая.

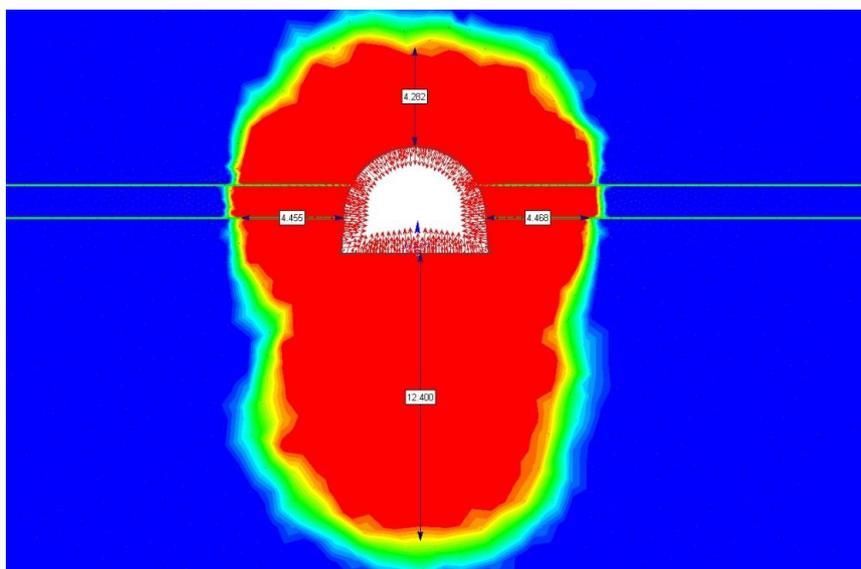


Рис. 8.11. Конфигурация ЗНД и перемещения контура одиночной выработки в возмущенном состоянии

При этом приконтурной породный массив переходит в новое напряженно-деформированное состояние с более низким уровнем потенциальной энергии. В зависимости от горно-геологических условий это состояние может быть или равновесным, когда процесс пучения со временем прекращается, или квазиравновесным, сопровождающееся непрерывным течением разрыхленных пород со стороны подошвы (рис. 8.12).

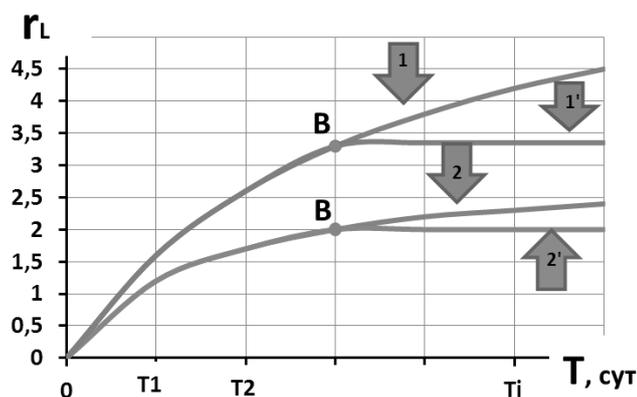


Рис. 8.12. Развитие геомеханических процессов вокруг выработки:  
 1 - незатухающий процесс в подошве; 1'- незатухающий процесс в кровле;  
 2 - затухающий процесс в подошве; 2' - затухающий процесс в кровле;  
 В - точка бифуркации

Анализируя ЗНД, приведенную на рис. 8.12, следует отметить, что со стороны подошвы выработки параметры ее существенно изменились. Глубина ЗНД со стороны подошвы увеличилась почти втрое

и теперь составляет 12,106 м. В боках и кровли выработки размеры ЗНД остались практически без изменений.

На рис. 8.13 показано точку бифуркации В и дальнейшее развитие перемещений в кровле, боках подошвы выработки в момент потери упругопластической устойчивости. Из него следует, что после некоторого критического момента геомеханические процессы в кровле и боках выработки затухают, но зато активизируются в породах подошвы.

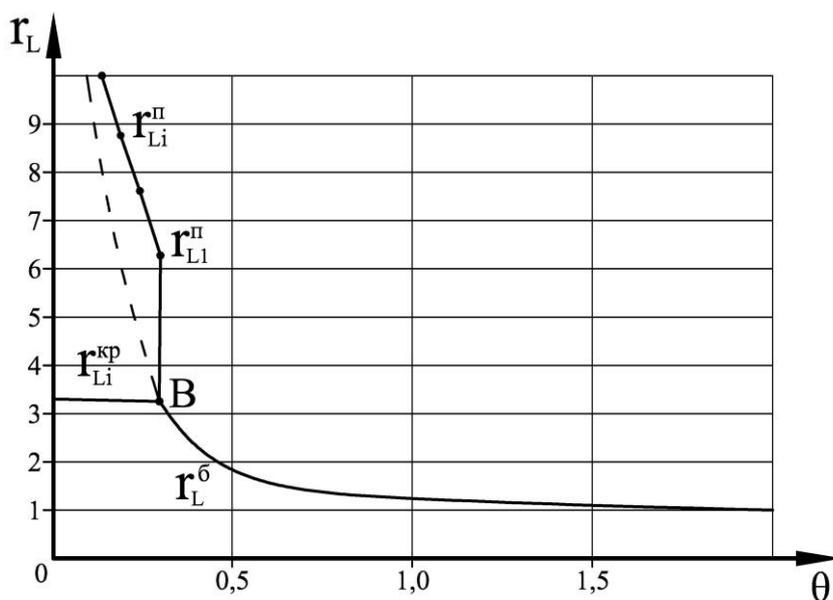


Рис. 8.13. Дальнейшее развитие перемещений в кровле и подошве выработки после достижения точки бифуркации В

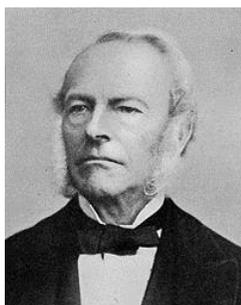
На практике это обычно сопровождается даже некоторым уменьшением обжатия крепления и условным снижением нагрузки на него. В подошве же выработки область разрушенных пород увеличивается до 8-10 и этот процесс, как уже на это обращалось внимание выше, может носить либо затухающий или незатухающей характер (см. рис. 8.12).

Установив на основе натуральных наблюдений закон нарастания деформаций почвы во времени —  $U_0 = f(t)$ , можно выполнить численное моделирование дискретно, для отдельных моментов времени —  $t_i$ . Таким образом, появляется возможность вести прогноз объемов работ, связанных с подрывкой пород почвы в конкретных горно-геологических условиях.

### *Биографическая справка*



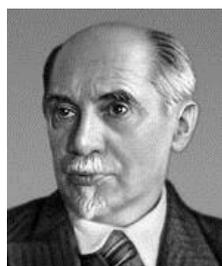
Навье, Луи Мари Анри (1785-1836) - французский инженер и ученый. Известен работами в области строительной механики, теории упругости, гидравлики и гидромеханики; вывел т.н. уравнение Навье-Стокса. Автор курса сопротивления материалов и др.



Стокс, Джордж Габриель (1819-1903) - английский физик и математик, президент Лондонского королевского общества. Фундаментальные исследования по гидродинамике (уравнение Навье-Стокса); изучал волновые процессы в различных средах.



Ильюшин, Алексей Антонович (1911-1981) – известный советский ученый в области механики. Основные труды по теории упругости, газодинамике и пластичности.



Лейбензон, Леонид Самуилович (1879-1951) – известный советский ученый в области механики, академик, основатель подземной гидравлики. Основные работы по теории упругости и прочности.



Ишлинский, Александр Юльевич (1913-1992) - известный советский ученый в области механики, академик. Основные труды по теории колебаний, механике деформируемых сред и гироскопов.

## *Контрольные вопросы и задания*

1. Назовите гипотезы, объясняющие причину выдавливания пород в горных выработках.
2. Как формируется нагрузка на почву выработки в соответствии с гипотезой П.М. Цимбаревича?
3. Объясните термин «боковой распор второго порядка» в теории В.Д. Слесарева.
4. Каковы физические предпосылки, лежащие в основе гидродинамической теории пучения горных пород А.П. Максимова?
5. Особенности физической модели пучения пород почвы в выработках по В.А. Лыткину?
6. Физическое обоснование модели пучения пород почвы в выработках, основанной на гипотезе потери упругопластической устойчивости приконтурного массива (бифуркационная модель явления вспучивания пород почвы).
7. В чем состоит основное отличие эмпирических методов теорий пучения пород почвы от аналитических? Каковы их достоинства и недостатки?
8. Охарактеризуйте эмпирические зависимости, предложенные Ю.З. Заславским для выработок с пучащей почвой.
9. В чем суть вероятностно-статистического метода определения параметров процесса пучения, разработанного И.Л. Черняком?
10. В чем состоит недостаток эмпирических методов оценки пучения в горных выработках?
11. Какова последовательность моделирования процесса пучения пород почвы в горных выработках на численных моделях?