

**МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

На правах рукописи

Аспирант Л. С. ЛАПИДУС

**Перемещения земной поверхности,
вызванные подземными работами**

(Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук)

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор
М. Н. ГОЛЬДШТЕЙН.

На правах рукописи

Аспирант Л. С. ЛАПИДУС

**Перемещения земной поверхности,
вызванные подземными работами**

1736р (Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук).

Научный руководитель—доктор технических наук,
профессор М. Н. ГОЛЬДШТЕЙН.

Днепропетровск — 1962

Публичная защита диссертации состоится на заседании
Объединенного Ученого Совета

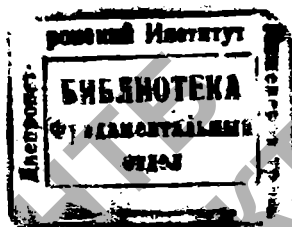
„ 16 ” октября 1962 г.

Автореферат разослан

„ 14 ” августа 1962 г.

Отзывы по настоящему автореферату просьба направлять
по адресу: г. Днепропетровск-10, Севастопольская 15,
ДИИТ.

Ученому секретарю Объединенного Ученого Совета.



1. ВВЕДЕНИЕ

Опыт строительства и эксплуатации различных сооружений в зоне влияния подземных разработок показывает, что вызываемые подработками перемещения земной поверхности могут привести к повреждению или даже к полному разрушению сооружений. Степень опасности подработки для данного сооружения определяется величинами перемещений и деформаций земной поверхности, а также скоростями их изменения. В частности, для оценки влияния подработки на железнодорожный путь, очень важно знать скорость перемещения поверхности, так как именно эта величина главным образом определяет возможность и необходимую периодичность ремонта пути. В соответствии с этим, расчет конечных величин и скоростей перемещения земной поверхности, вызванных подземными работами, имеет важное практическое значение.

Диссертация посвящена разработке одного из возможных направлений теории сдвижений земной поверхности, вызванных проведением подземных работ. Были проведены теоретические исследования и разработана методика расчета конечных величин перемещений на основе приближенного решения упруго-пластической задачи, учитывающая образование над выработкой области разрушения. Исследован процесс деформирования массива породы во времени с учетом ползучести породы и приведена соответствующая методика расчета. Для обоснования и проверки ряда положений теории было проведено центробежное моделирование процесса оседания поверхности с дистанционным измерением перемещений точек модели во времени. Получены условия подобия при моделировании с учетом ползучести материала.

Диссертация состоит из следующих глав:

Глава I — Состояние теории расчета перемещений земной поверхности, вызванных проведением подземных выработок.

Глава II — Определение конечных величин перемещений земной поверхности.

Глава III — Расчет процесса сдвижения земной поверхности во времени.

Глава IV — Исследование процесса сдвижения горных пород методом центрбежного моделирования.

Глава V — Сравнение результатов расчета с данными наблюдений и моделирования.

Закключение.

Следует отметить, что разработка теоретических методов расчета перемещений земной поверхности под влиянием подземных выработок впервые начата в Советском Союзе, в работах С. Г. Авершина, который применил для решения этой задачи методы механики сплошной среды. В дальнейшем, трудами, главным образом, советских ученых С. Г. Авершина, Р. А. Муллера и других, а также ученых Польской Народной Республики Е. Литвинишина, А. Салустовича и других теории сдвижения горных пород достигла значительных успехов.

Несмотря на это, не все теоретически и практически важные вопросы получили в настоящее время окончательное разрешение.

В частности, не учитывалось пока влияние на процесс сдвижения таких факторов, как образование области разрушения над выработкой и влияние ползучести породы.

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЕЧНЫХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Расчет конечных величин перемещений земной поверхности должен проводиться с учетом образования над выработкой области разрушенной породы. Следовательно, должна рассматриваться смешанная упруго-пластическая задача. Последовательность решения такой задачи можно представить следующим образом. Сначала определяется граница области разрушения и перемещения этой границы из условия заполнения выработки разрушенной породой. После этого, решив задачу теории упругости для двухсвязного контура, ограниченного границей области разрушения и поверхностью земли, можно по известным перемещениям границы определить перемещения земной поверхности. Очевидно, что решение такого

комплекса задач в достаточно строгой постановке сопряжено с исключительными трудностями. В то же время, вследствие сложности законов деформирования реальных пород и неоднородности массива, нельзя ожидать, что такое решение будет точным для реальных условий.

Учитывая все это, в качестве первого приближения в диссертации предлагается упрощенный подход к решению этой задачи, который позволяет получить, повидимому, достаточно приемлемые для практических целей результаты.

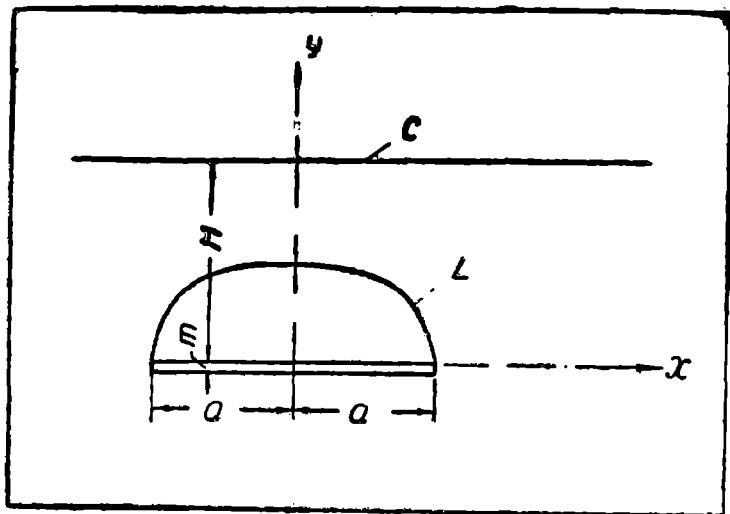


Рис. 1.

Рассмотрим плоскую задачу. В этом случае для любой точки породы вне контура области разрушения L (рис. 1) справедливы уравнения Ламе:

$$\begin{aligned}\nabla^2 v &= -\frac{\lambda + G}{G} \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \frac{\gamma}{G} \\ \nabla^2 u &= -\frac{\lambda + G}{G} \frac{\partial \Theta}{\partial x}\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь u и v — перемещения вдоль осей x и y , соответственно, λ и G — коэффициенты Ламе, γ — объемный вес породы, Θ — деформация изменения объема.

Определению подлежат перемещения земной поверхности по заданным перемещениям контура L . Определение контура L и перемещений на нем будет рассмотрено далее:

Для упрощения решения задачи будем пренебрегать в уравнениях (1) влиянием членов, зависящих от деформации изменения объема и от объемных сил. Как показано в диссертации, погрешность в определении перемещений земной поверхности, возникающая из-за такого допущения, не превышает 10%.

Приближенное решение задачи сводится к определению значений на поверхности гармонических функций u и v по их значениям на контуре L . Рассматривая гармоническую функцию как действительную часть некоторой аналитической функции комплексного переменного, на основании формулы Коши можно получить для перемещения земной поверхности уравнение

$$v = \operatorname{Re} \frac{1}{\pi i} \int_L \frac{f(\xi) d\xi}{\xi - z} \quad (2)$$

Здесь Re — означает действительную часть функции, $i = \sqrt{-1}$, а $f(\xi)$ определяется перемещениями на контуре L . Таким образом перемещения земной поверхности можно определить, если знать контур области разрушения и перемещения на контуре:

Следует отметить, что при таком методе решения нельзя полностью удовлетворить граничным условиям на поверхности земли. Однако, получающиеся при решении напряжения на поверхности соответствуют, как правило, пригрузке дополнительным слоем грунта всего 50—80 см. Корректировка граничных условий (приложение к поверхности напряжений обратного знака) показала, что вызываемые корректирующими напряжениями перемещения земной поверхности малы по сравнению с перемещениями, полученными в результате приближенного решения задачи. Таким образом, в практических расчетах нет надобности производить такую корректировку.

Для определения контура области разрушения в качестве первого приближения проведено упрощенное решение упруго-пластической задачи. Предполагалось, что граница области разрушения является линией скольжения или их огибающей. Тогда для точек контура области разрушения будут справедливы одновременно уравнения Кеттера и М. Леви. Координаты контура области разрушения определяются в этом случае из уравнений.

$$x = \frac{a}{A} \int_{\beta}^{\pi/2} \frac{e^{-2\omega \operatorname{tg} \varphi} d\omega}{\sin \omega} \quad (3)$$

$$y = \frac{a}{A} \int_{\beta}^{\pi/2} \frac{e^{-2\omega \operatorname{tg} \varphi} d\omega}{\cos \omega}$$

Здесь a — половина ширины выработки $A = \frac{k}{\gamma H} + \operatorname{tg} \varphi$,

γ — объемный вес породы,

k — сцепление, φ — угол внутреннего трения,

H — глубина работ, β — угол наклона контура области разрушения к оси абсцисс.

Интегралы в уравнениях (3) не выражаются через конечное число элементарных функций и их следует вычислить методами численного интегрирования. Для $\varphi = 10^\circ, 20^\circ$ и 30° в диссертации приведены таблицы значений этих интегралов для разных значений параметра β .

На рис. 2 приводится сопоставление контура области раз-

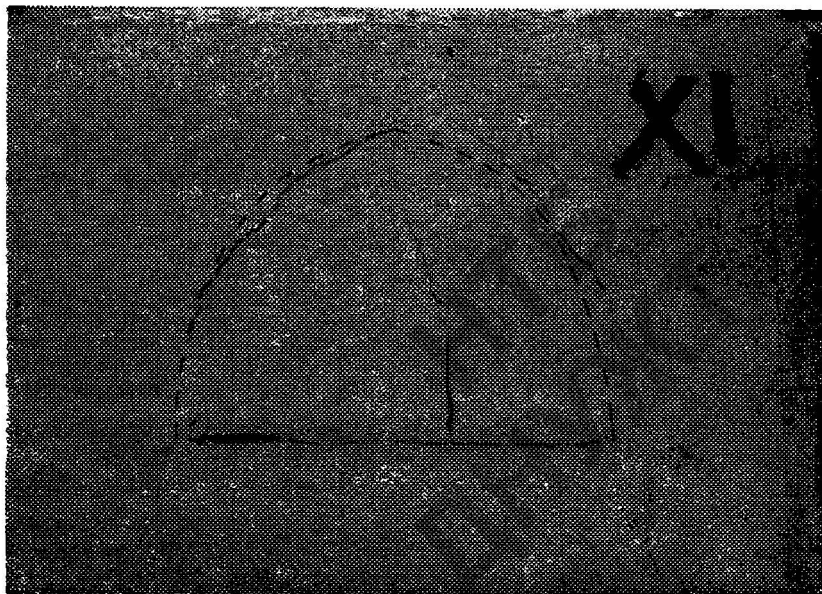


Рис. 2.

рушения построенного на основании формул (3) и контура, полученного при испытании модели в центробежной машине.

Как показали расчеты проведенные нами на электроинтеграторе ЭГДА-6/51, при заданных перемещениях на контуре области разрушения перемещения поверхности почти не зависят от формы контура, а зависят лишь от высоты этой области над выработкой h . Определение h , естественно, также может быть произведено с помощью формул (3). Однако следует отметить, что характеристики прочностных свойств массива породы k и φ нельзя получить из лабораторных испытаний, а нужно определить путем сопоставления результатов расчетов с данными наблюдений. Учитывая это можно предложить для определения высоты области разрушения более простую формулу типа формулы Протодяконова

$$h = \frac{a}{f}$$

Здесь, однако, коэффициент крепости f зависит не только от прочностных свойств массива породы, но и от глубины и должен определяться также, как и k и φ , путем сопоставления рассчитанных и наблюдаемых величин. Для условий Донбасса в диссертации приведен график, с помощью которого можно определять коэффициент крепости, нужный для расчета высоты области разрушения. Форму контура области разрушения можно для упрощения принимать в виде прямоугольника.

Специально поставленные эксперименты показали, что если область разрушения не достигает поверхности, то кривую перемещений точек контура области разрушения по нормали к выработке можно аппроксимировать ломаной линией, показанной на рис. 3. Причем, если порода полностью заполняет выработку, наибольшее перемещение может быть принято равным мощности выработанного пласта m . Размер b определяется с учетом разрыхления породы в области разрушения.

$$b = a - \frac{4 k_p a^2}{3 f m} \quad (4)$$

где k_p — коэффициент разрыхления.

Зная высоту области разрушения и перемещения границы этой области можно определить перемещения земной поверхности по формуле (2). Для упрощения расчета в диссертации

В диссертации получены также формулы для расчета величины наибольшего оседания при горизонтальной и наклонной выработке, положения точки с наибольшим оседанием для наклонной выработки, формулы для определения наибольших горизонтальных перемещений и их местоположения при горизонтальных выработках и другие.

В частности, для наиболее простого случая граничных условий, когда эпюра перемещений на контуре области разрушения принята прямоугольной, наибольшее оседание при горизонтальной выработке равно

$$v_m = \frac{2m}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{a}{H-a/f}$$

а наибольшее горизонтальное смещение

$$u_m = \frac{m}{\pi f} \left\{ 2 \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{a^2 + (H-a/f)^2}}{\sqrt{3} (H-a/f)} - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \frac{a \sqrt{3} + \sqrt{a^2 + (H-a/f)^2}}{\sqrt{3} (H-a/f)} - \right. \\ \left. - \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{a^2 + (H-a/f)^2} - a\sqrt{3}}{\sqrt{3} (H-a/f)} \right\}$$

Здесь:

m — мощность пласта;

H — глубина работ;

a — половина ширины выработки;

f — коэффициент крепости породы, который определяется при построении контура области разрушения по формулам (3) или по графику, приведенному в диссертации.

Сравнение величин, рассчитанных по выведенным в диссертации формулам с наблюдаемыми в натуре, а также с данными, полученными при центробежном моделировании показало достаточную для практических целей сходимость. На рис. 4 приводится пример такого сопоставления для шахты № 19 треста «Чистяковантрацит» в Донбассе.

Изложенная теория применима к расчету перемещений земной поверхности, вызванных проведением тоннелей метрополитенов. Эта теория позволяет учесть также влияние на оседание поверхности выпучивания лба забоя при проходке

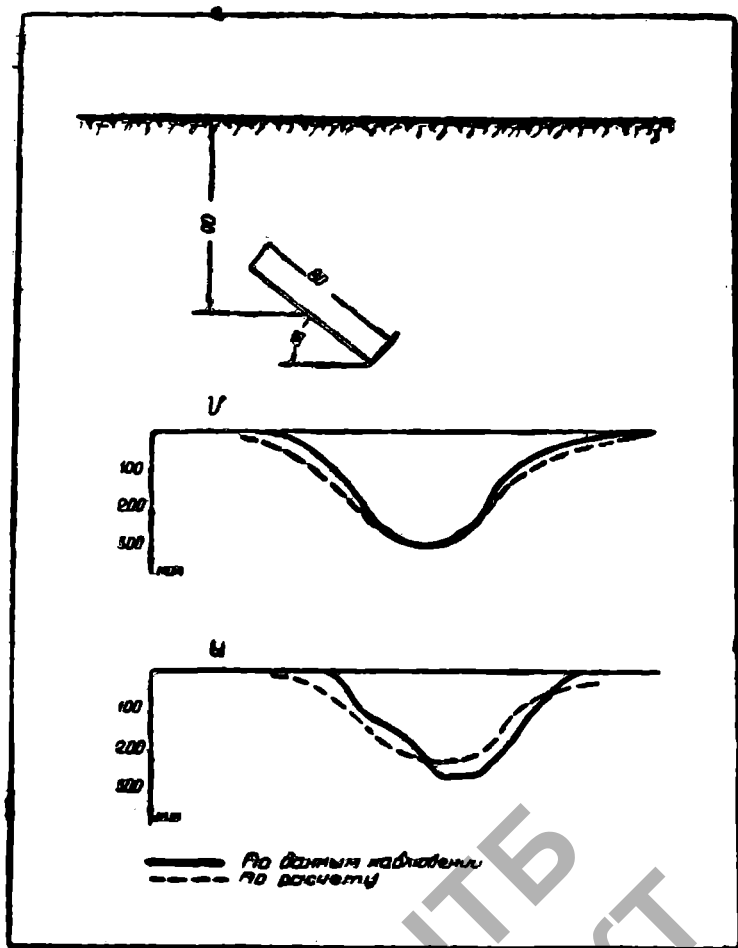


Рис. 4.

тоннеля в нескальных грунтах. Дополнительное наибольшее оседание поверхности, вызванное этим фактором приближенно выражается следующей формулой

$$v_{\max} = \frac{0,85 \pi \sqrt{\pi} p_0 r^2 (1-\mu^2)}{E l_0} \quad (6)$$

Здесь p_0 — боковое бытовое давление на уровне центра выработки, r — радиус выработки, μ — коэффициент Пуассона, E — модуль упругости породы, l_0 — длина заходки при разработке породы в забое.

Результаты расчета удовлетворительно согласуются с данными наблюдений за оседанием поверхности при проведении тоннелей метрополитенов.

Величины перемещений, получающиеся при расчете по предлагаемой в работе теории зависят от граничных условий, которые в каждом частном случае могут несколько отличаться от расчетных в силу действия различных причин, учесть которые заранее невозможно. Проведенный в диссертации методами теории случайных функций анализ влияния отклонений от расчетных граничных условий на результаты расчета показал, что в большинстве случаев это влияние несущественно.

III. РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВО ВРЕМЕНИ

Протекание процесса сдвижения горных пород во времени определяется действием, в основном, двух факторов — изменения геометрических размеров выработки и свойств ползучести массива горных пород. Для расчета во времени процесса сдвижения, вызванного действием только первого фактора вполне достаточно теории расчета конечных величин перемещений. Влияние второго фактора, ползучести породы, должно быть произведено на основе теории, учитывающей свойства ползучести массива горных пород.

После рассмотрения различных видов уравнений деформирования материалов и горных пород во времени принято уравнение деформирования в виде решенном относительно скорости деформации:

$$\dot{\epsilon} = f(\sigma) B(t) \quad (7)$$

Здесь $f(\sigma)$ и $B(t)$ — некоторые функции, соответственно, напряжений и времени. При выводе рабочих формул использовались частные виды уравнения (7), линейаризованные относительно напряжений

$$\dot{\epsilon}_x = n(\sigma_x - \sigma_{cp}) B(t); \quad \dot{\epsilon}_y = n(\sigma_y - \sigma_{cp}) B(t); \quad \dot{\gamma}_{xy} = 2n\tau_{xy} B(t) \quad (8)$$

и

$$\dot{\epsilon}_x = n(\sigma_x - \sigma_{cp}) t^{-\alpha} \text{ и т. д.} \quad (9)$$

Используя расчетную схему, описанную в предыдущей главе, и предполагая, что деформация породы во времени описывается формулами (8), получено исходное уравнение для перемещений точек массива породы и земной поверхности в виде

$$2 \pi G B(t) \nabla^2 v = \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 v. \quad (10)$$

с начальными условиями:

$$t = 0 \quad v(x, y, 0) = 0$$

$$t = \infty \quad v(x, y, \infty) = v_0(x, y)$$

где $v_0(x, y)$ — конечные величины перемещения, соответствующие данным граничным условиям. Решение уравнения (10) разыскивалось в виде произведения двух функций, одна из которых является функцией только времени, а вторая — только координат. Это решение имеет вид

$$v(x, y, t) = e^{2 \pi G \int_0^t B(\theta) d\theta} v_0(x, y) \quad (11)$$

Предложена также методика учета влияния ползучести породы на перемещения поверхности во времени для горизонтальных выработок применительно к расчетной схеме, предложенной в 1957 г. Р. А. Муллером.

Для случая горизонтальной выработки, когда ползучесть породы описывается выражением (9), исходное уравнение имеет вид:

$$\pi E c^2 y \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial t} t^\alpha \quad (12)$$

при тех же начальных условиях, что и уравнение (10).

Решение этого уравнения может быть получено в виде

$$v = \frac{1}{2} v_m e^{\frac{\pi E}{1-\alpha} t^{1-\alpha}} \left\{ \Phi\left(\frac{p+s t-x}{c y}\right) + \Phi\left(\frac{x}{c y}\right) \right\} \quad (13)$$

Здесь p — протяженность выработки, при которой подземные работы начинают сказываться на поверхности, s — скорость подвигания забоя, c — коэффициент, зависящий от механических свойств горных пород, v_m — наибольшее оседание при полной подработке, $\Phi(\theta)$ — интеграл вероятности. Скорость оседания поверхности легко может быть получена дифференцированием (13) по времени.

Результаты расчетов процесса оседания земной поверхности во времени, проведенных по изложенной выше методике, показали удовлетворительную сходимость с данными, полученными при центробежном моделировании и наблюдениях в натуре. Установлено также, что ползучесть породы оказывает

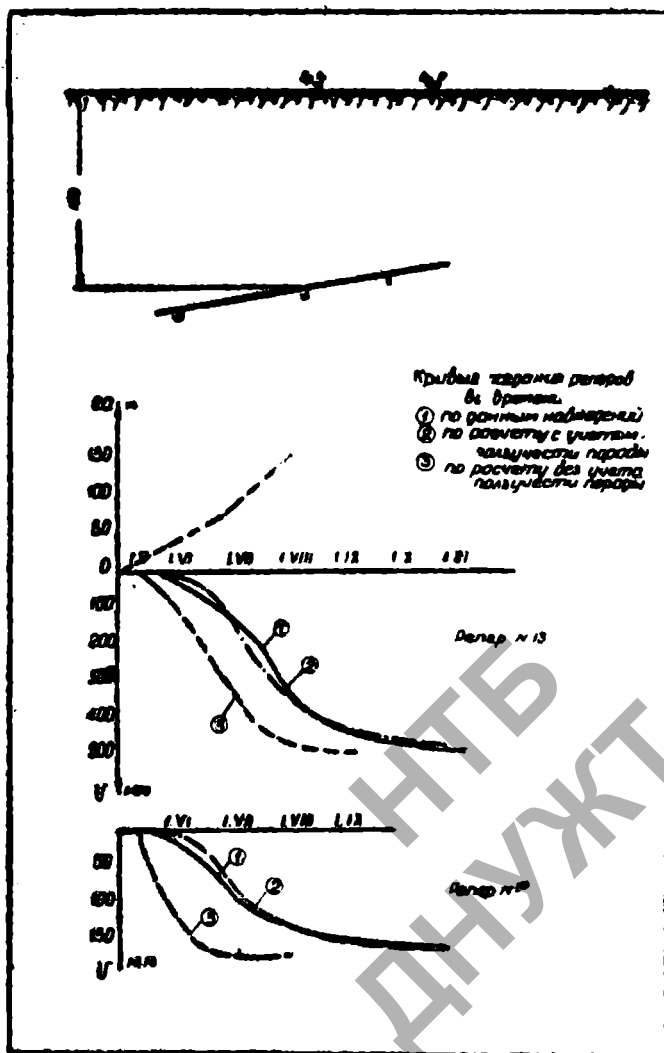


Рис. 5.

большое влияние на протекание процесса оседания во времени, и что расчет скорости оседания, сделанный без учета ползучести породы, может в ряде случаев дать завышенные величины.

В качестве примера на рис. 5 приводятся графики оседания во времени реперов, установленных на шахте Дельта (Донбасс). На рисунке показаны графики построенные на основании данных наблюдений, а также по расчету с учетом и без учета ползучести породы.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ПОРОД

Главными задачами экспериментальных работ являлось исследование влияния ползучести породы на процесс оседания во времени, а также исследования явлений образования области разрушенного материала над выработкой. В соответствии с этим, в качестве основного метода экспериментальных исследований принято центробежное моделирование, которое ввиду большого масштаба времени обладает преимуществами при исследовании длительных процессов.

В диссертации рассмотрены условия подобия при моделировании с учетом ползучести материала, при достаточно общем уравнении деформирования (7). Показано, что одним из условий подобия является однородность функций $f(\sigma)$ и $B(t)$. При соблюдении этого условия зависимость между масштабами при любом виде моделирования может быть выражена уравнением

$$m_t = m_e \frac{2}{1-a_B} m_\sigma \frac{a_f-1}{1-a_B} \quad (14)$$

где m_e — масштаб линейных размеров, m_σ — масштаб напряжений, m_t — масштаб времени, a_f и a_B — коэффициенты однородности функций $f(\sigma)$ и $B(t)$, соответственно.

При центробежном моделировании для случая пластического течения материала с постоянной скоростью ($a_f = 1$, $a_B = 0$), уравнение (14) совпадает с известной формулой Г. И. Покровского, полученной им другим путем:

$$m_t = m_e^2$$

Опыты проводились на большой центробежной машине ДИИТа с моделями размером 700 x 500 x 100 мм, изготавливаемыми из алебастрово-песчаного раствора. Линейный масштаб моделирования составлял в опытах от 100 до 300. В модели на определенном расстоянии от поверхности устраивалось щелеобразное отверстие, моделировавшее выработку. При испытании модели в центробежной машине над «выработкой» образовывалась область разрушения, «выработка» заполнялась разрушенным материалом, а на поверхности образовывалась муфта оседания. Модель до и после испытания фотографировалась и измерялась. Перемещения поверхности и контура области разрушения измерялись в фиксированных точках по заранее заложенным металлическим реперам. Точность измерения перемещений поверхности модели составляла 0,01 мм, а контура области разрушения 0,1 мм. Прочностные свойства и свойства ползучести материала моделей определялись в лаборатории.

Для исследования процесса оседания во времени на центробежной машине была смонтирована специальная дистанционная измерительная и телевизионная аппаратура. На поверхности модели в каретке центробежной машины устанавливался потенциометрический датчик перемещений конструкции Бомбинского (Гидропроект), включенный в одно из плеч моста. Выдвижной штырек датчика струной прикреплялся к неподвижной кассете. В процессе опыта при вращении машины поверхность модели оседала и увлекала за собой корпус датчика, сопротивление датчика изменялось, мост разбалансировался и на пленке осциллографа МПО-2, включенного в измерительную диагональ моста, фиксировалось отклонение светового луча. Тарировка датчика производилась перед каждым опытом, ввиду возможных изменений напряжения источника питания. Электрическая связь между вращающимися вместе с моделью в машине датчиком и неподвижными источником питания и осциллографом осуществлялась через специальный токосъемник.

Телевизионная аппаратура состояла из телекамеры с объективом, укрепленной на главной балке центробежной машины и видеоконтрольного устройства в лаборатории, на экране которого была видна поверхность модели.

Данные измерений и фотографии моделей, а также полученные в опытах осциллограммы перемещений поверхности моделей во времени подтвердили качественные и количественные выводы теории.

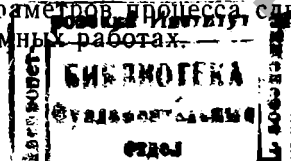
V. ВЫВОДЫ

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика приближенного расчета перемещений поверхности с учетом образования над выработкой области разрушенной породы для условий плоской задачи и выведены соответствующие рабочие формулы. Разработанный метод расчета может применяться в случае проведения горизонтальных и наклонных очистных выработок, а также тоннелей метрополитенов. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными и с данными наблюдений в натуре.

1736p Показано, что на скорость и продолжительность оседания земной поверхности оказывает большое влияние ползучесть горных пород. Расчет скорости оседания поверхности, сделанный без учета ползучести породы, в ряде случаев дает завышенные величины, в результате чего при проектировании могут быть приняты экономически нецелесообразные решения. В диссертации разработан метод расчета процесса оседания во времени с учетом ползучести породы, который, как показало сравнение с данными наблюдений и центробежного моделирования, дает удовлетворительные результаты.

Выведены условия подобия при моделировании с учетом ползучести материала. Эти условия должны выполняться при любом способе моделирования таких процессов, в которых существенную роль играет ползучесть материала сооружения.

Исследования, проведенные в диссертации, представляют один из возможных путей развития теории сдвижения горных пород и, в силу ряда сделанных допущений, не могут претендовать на окончательное решение вопроса. Однако, разработанные методы расчета перемещений поверхности дают возможность учесть некоторые новые факторы, влияющие на процесс сдвижения, которые ранее не учитывались. Поэтому можно полагать, что предложенные методы расчета позволят с большей достоверностью рассчитывать ряд важных для практики параметров процесса сдвижения земной поверхности при подземных работах.



Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории механики грунтов Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта под руководством профессора М. Н. Гольдштейна.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. О влиянии фактора времени на процесс деформации горных пород. Сборник «Вопросы геотехники», № 3, Днепропетровск, 1959 г.

2. Условия подобия при моделировании с учетом ползучести материала. «Строительная механика и расчет сооружений», 1960 г., № 6.

3. К вопросу о расчете перемещений, вызванных подземными работами «Основания, фундаменты и механика грунтов», 1961 г., № 1.

4. The Theory of Probability and Statistics In Relation to the Rheology of Soils. „Proceedings of the Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering“ Paris 1961.

(Совместно с проф. М. Н. Гольдштейном и доц. В. А. Мизюмским).

На русском языке эта же работа опубликована в сборнике «Доклады к V международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению». Москва, 1961.

5. К расчету перемещений земной поверхности, вызванных подземными разработками. Сборник «Вопросы геотехники», № 4, Днепропетровск, 1961.



Перемещение земной поверхности, вызванные подземными работами.

БТ 12282. Подписано к печати 9 июля 1962 г., формат бумаги 60 x 90,
 $\frac{1}{16}$ печ. листа, кол. печ. листов $1\frac{3}{4}$, заказ № 3681, тираж 150.

Никопольская городская типография Днепропетровского облздата.

НТБ
ДНУЖТ