

СССР МПС

ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

На правах рукописи

Аспирант И.Л. Дудинцева

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОДПОРНЫЕ СТЕНЫ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ВАРИАЦИОННОГО МЕТОДА

Специальность № 48I " Основания, фундаменты
и подземные сооружения"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск

1969

37242

3724a

Работа выполнена в Научно-исследовательской лаборатории механики грунтов Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

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

Официальные оппоненты:

доктор технических наук М.В.Малышев,
доктор технических наук Б.Н.Тартаковский.

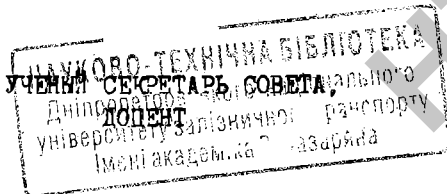
Ведущее предприятие — ГПИ Фундаментпроект.

Автореферат разослан "20" 1969 года

Защита диссертации состоится "24" 1969 года на заседании Ученого Совета Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

Адрес института: г.Днепропетровск, Ю; ул.Университетская,2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.



(Л.Н.ЛЕБЕДИНЦ)

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация посвящена исследованию оползневой нагрузки на подпорную стену и устойчивости против выпирания пристенной части оползневого массива.

В теоретической части исследования применен вариационный метод, впервые введенный в механику грунтов Н.М.Герсевановым.

В диссертации вариационным методом получено решение задачи о давлении грунта на наклонную шероховатую подпорную стену при произвольном очертании свободной поверхности, выполнен анализ переползания и величины оползневой нагрузки на подпорную стену при произвольной форме поверхности скольжения и дневной поверхности склона, а также получено обоснование некоторых допущений в ранее известных расчетах (форма линии скольжения, эпюры напряжений и т.д.). Рекомендуемые расчеты включены в проект "Технических указаний по проектированию противооползневых мероприятий на железных дорогах", составленных в 1968 году Научно-исследовательской лабораторией механики грунтов Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений (вариационное исчисление, пассивное давление).
Текста - 108 страниц, рисунков - 41, таблиц - 3, библиография - 174 названия.

Г л а в а I

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ СКЛОНОВ

Глава посвящена обзору современного состояния экспериментальных и теоретических исследований устойчивых (неоползневых) и оползневых склонов. Приводятся основные сведения об оползневых процессах и удерживающих сооружениях. Рассматриваются особенности условий работы подпорных стен на оползневых склонах. Особенности эти заключаются, прежде всего, в том, что подпорная стена воспринимает оползневое давление, которое отличается от активного (и даже может быть пассивным), и в том, что при оползневом давлении, превышающем предел прочности грунта, образуется поверхность выпора — поверхность, по которой оползневая масса переползает через подпорную стену. При этом за стеной сохраняется клинообразный блок грунта.

Рассматриваются экспериментальные исследования давления грунта на подпорные стены (как лабораторные, так и натурные) и формулируются главные результаты этих исследований.

Приводится краткий обзор и анализ существующих способов расчёта устойчивости склонов и давления на подпорные стены: по теории упругости, по теории предельного равновесия, по методам, основанным на задании формы линии скольжения, и по вариационному методу.

Подробно рассматриваются исследования оснований и откосов методами вариационного исчисления работы Н.М.Герсеванова,

И.Копачи, Ю.И.Соловьева, А.Г.Дорфмана, М.Н.Гольдштейна.

Глава завершается общей классификацией способов расчета устойчивых и оползневых склонов по форме поверхности скольжения (принимаемой или получаемой расчётом), модели грунта, схеме сил и определению коэффициента устойчивости.

Г л а в а П

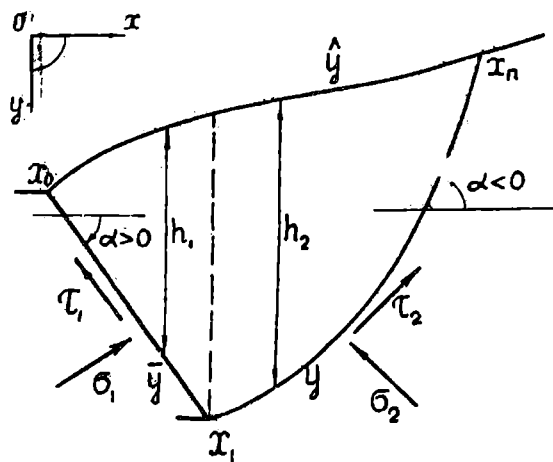
ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИОННОГО МЕТОДА К РАСЧЕТУ ДАВЛЕНИЯ ОДНОРОДНОГО ГРУНТА НА ПОДПОРНУЮ СТЕНУ

Глава посвящена исследованию активного и пассивного давления однородного связного грунта на наклонную шероховатую подпорную стену при произвольном очертании свободной поверхности.

Примыкающая к стене призма грунта x, x_1, x_2 (рис. I, a), определяемая линией скольжения $y = y(x)$ произвольной формы, рассматривается как сплошное тело. Нормальные и касательные напряжения σ_i, τ_i ($i = 1, 2$) по линии стены $y = \bar{y}(x)$ к x и по линии скольжения $y = y(x)$ вместе с объемным весом γ подчиняются трём уравнениям равновесия:

$$\sum X = 0, \quad \int_{x_0}^{x_1} (-\tau_1 + \sigma_1 \bar{y}') dx + \int_{x_1}^{x_2} (\tau_2 + \sigma_2 y') dx = 0,$$

a)



b)

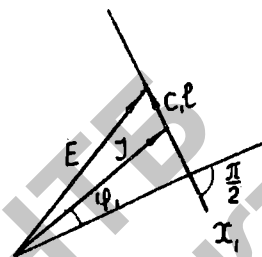
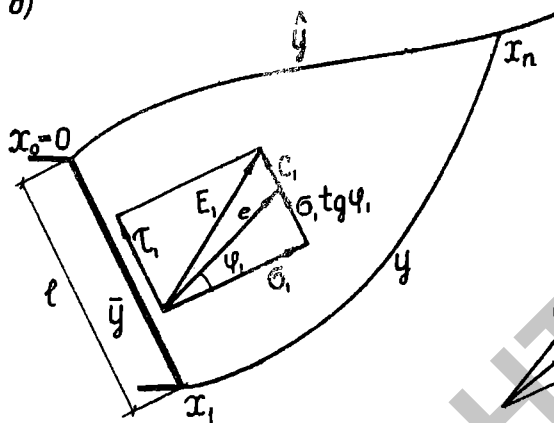


рис. 1

$$\Sigma Y = 0 \quad \int_{x_0}^{x_1} (-\tau_x \bar{y}' - \sigma_x + \gamma h_x) dx + \int_{x_1}^{x_n} (\tau_x y' - \sigma_x + \gamma h_x) dx = 0,$$

$$\begin{aligned} \Sigma M = 0, \quad & \int_{x_0}^{x_1} (-x \tau_x \bar{y}' + \bar{y} \tau_x - x \sigma_x - \bar{y} \bar{y}' \sigma_x + x \gamma h_x) dx + \\ & + \int_{x_1}^{x_n} (x \tau_x y' - y \tau_x - x \sigma_x - y y' \sigma_x + x \gamma h_x) dx = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Предлагается, что $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\tau}_x$ связаны уравнением предельного равновесия $\bar{\tau}_x = \bar{\sigma}_x \operatorname{tg} \varphi_x + c_x$, где φ_x , c_x — соответственно угол трения и удельное сцепление вдоль составной линии $x_0 x$, x_n .

Давление на стену $x_0 x$, (рис. 1.6) выражается векторной суммой

$$E = c_x l + \frac{A}{\cos \varphi_x} \int_{x_0}^{x_1} \bar{\sigma}_x dx, \quad A = \sqrt{1 + \bar{y}'^2} \quad (2)$$

Первое слагаемое этой суммы постоянно. Поэтому экстремум E определяется экстремумом интеграла

$$J = \frac{A}{\cos \varphi_x} \int_{x_0}^{x_1} \bar{\sigma}_x dx, \quad (3)$$

названным функционалом давления.

Задача о давлении грунта на подпорную стену формулируется следующим образом.

Дан функционал (3) и даны условия (1). Требуется найти линию скольжения $y = y(x)$ и напряжения $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\tau}_x$ по составной линии $x_0 x$, x_n , удовлетворяющие условиям (1) и сообща-

щие экстремум функционалу (3).

Сформулированная вариационная задача является разрывной изопериметрической задачей и решается методом неопределенных множителей Лагранжа.

В соответствии с этим составляются и интегрируются уравнения Эйлера-Лагранжа. Эти уравнения записываются в виде

$$\begin{aligned} \frac{A}{\cos \varphi_1} + \lambda_1 (\kappa - \operatorname{tg} \varphi_1) - \lambda_2 (\kappa \operatorname{tg} \varphi_1 + 1) - \lambda_3 A^2 x &= 0, \\ \lambda_1 y' - \lambda_2 - \lambda_3 x - \lambda_3 y y' + (\lambda_1 + \lambda_2 y' + \lambda_3 x y' - \lambda_3 y) \operatorname{tg} \varphi_2 &= 0, \\ \lambda_2 y - 2\lambda_3 x - \lambda_3 x y' - \lambda_1 \sigma_2' - \lambda_2 \tau_2' - \lambda_3 x \tau_2' + \lambda_3 \sigma_2' y &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где λ_i — множители Лагранжа. Неизвестные постоянные определяются из граничных условий, соотношений между множителями Лагранжа, уравнений равновесия (I) и условия трансверсальности

$$\sigma_2(x_n) = \frac{c_2(\lambda_1 + \lambda_2 \hat{y}'_n)}{\lambda_2 - \lambda_1 \operatorname{tg} \varphi_2 - (\lambda_1 + \lambda_2 \operatorname{tg} \varphi_2) \hat{y}'_n}, \quad (5)$$

где $\hat{y}'_n = \hat{y}'(x_n)$.

Таким образом, получено замкнутое решение общей вариационной задачи, позволяющее находить одновременно критическую линию скольжения, напряжения по составной линии x_0, x_1, x_n и экстремальное давление на подпорную стену. Разработан алгоритм аналитического расчёта давления грунта на наклонную шероховатую подпорную

стену при произвольном очертании свободной поверхности. Составлены также алгоритмы расчетов давления для ряда практически важных случаев: вертикальная стена, гладкая стена, сыпучий грунт, линейная засыпка и др. Аналитические расчеты легко выполняются на ЭВМ.

Показано, что в случае сыпучего грунта и линейной засыпки из общего алгоритма вариационного расчета следует известная формула Кулона. Кроме того, получена новая формула для критического угла наклона линии скольжения.

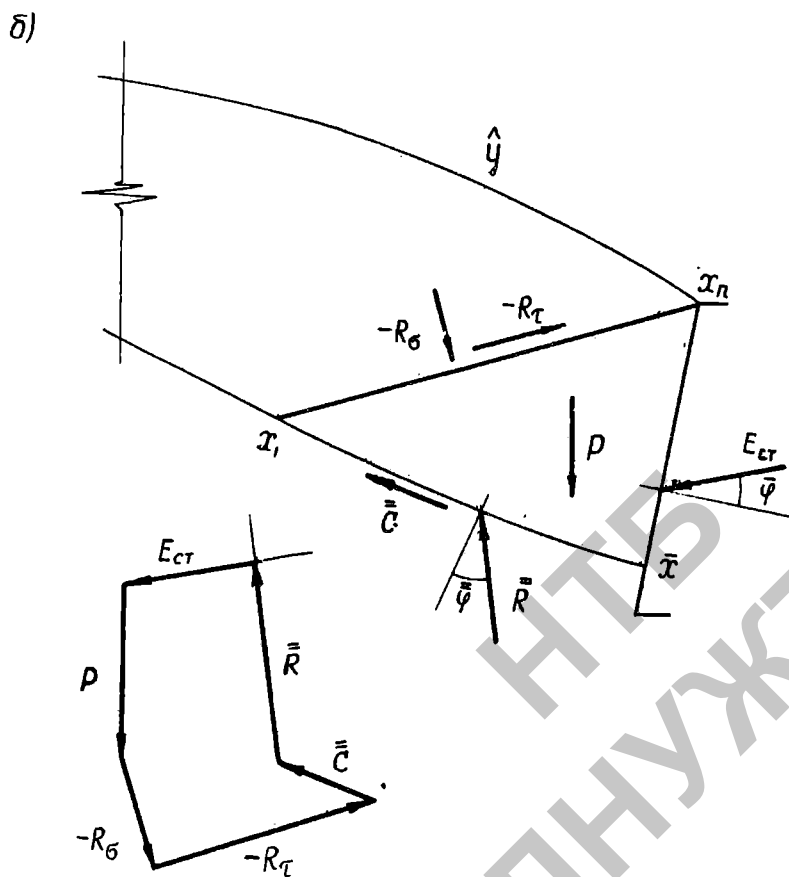
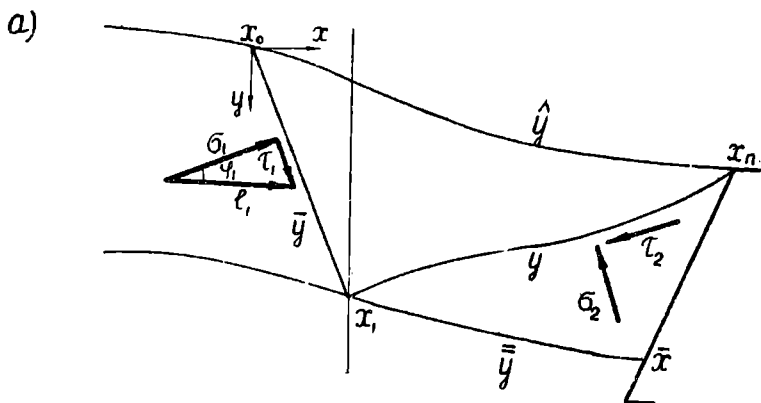
Приводятся числовые примеры аналитических расчетов давления грунта на подпорные стены.

Г л а в а Ш

ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИОННОГО МЕТОДА К РАСЧЕТУ ПЕРЕПОЛЗАНИЯ ГРУНТА И ДАВЛЕНИЯ НА ПОДПОРНУЮ СТЕНУ

Глава посвящена исследованию переползания грунта и давления на подпорную стену.

Принятая расчетная схема показана на рис. 2, а. Рассматривается оползневой склон с линией скольжения $y = \bar{y}(x)$ и дневной поверхностью $y = \hat{y}(x)$. Искомая линия выпора определяется уравнением $y = y(x)$. Начальная точка (x_1, y_1) этой линии находится на линии скольжения, конечная точка (x_n, y_n)



совпадает с верхней точкой подпорной стены.

Призма выпирания $x_0 x_1 x_n$, определяемая наклонным (или вертикальным) сечением $x_0 x_1$ с уравнением $y = \bar{y}(x) = \kappa x$ и линией выпора $x_1 x_n$, рассматривается как сплошное тело. Предполагается, что нормальные и касательные напряжения σ_i, τ_i в сечении $x_0 x_1$ связаны зависимостью $\tau_i = \sigma_i \operatorname{tg} \varphi_i$, в которой φ_i — средний угол отклонения от нормали полных напряжений (в сечении $x_0 x_1$ предельное равновесие, вообще говоря, отсутствует). Нормальные и касательные напряжения σ_2, τ_2 по линии выпора связаны уравнением предельного равновесия $\tau_2 = \sigma_2 \operatorname{tg} \varphi_2 + c_2$. Напряжения σ_i, τ_i и объемный вес γ подчиняются трем уравнениям равновесия:

$$\begin{aligned} \Sigma X = 0, \quad & \int_{x_0}^{x_1} (\tau_i + \sigma_i \bar{y}') dx + \int_{x_1}^{x_n} (-\tau_2 + \sigma_2 y') dx = 0, \\ \Sigma Y = 0, \quad & \int_{x_0}^{x_1} (\tau_i \bar{y}' - \sigma_i + \gamma h_i) dx + \int_{x_1}^{x_n} (-\tau_2 y' - \sigma_2 + \gamma h_2) dx = 0, \\ \Sigma M = 0, \quad & \int_{x_0}^{x_1} (x \tau_i \bar{y}' - \bar{y} \tau_i - x \sigma_i - \bar{y} \bar{y}' \sigma_i + x \gamma h_i) dx + \\ & + \int_{x_1}^{x_n} (-x \tau_2 y' + y \tau_2 - x \sigma_2 - y y' \sigma_2 + x \gamma h_2) dx = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Линия выпора грунта рассматривается как линия наименьшего сопротивления сдвигу или как линия, соответствующая наименьшему оползневому давлению на призму выпирания. В соответствии с этим вводится "функционал сдвига"

$$J = \int_{x_1}^{x_2} (\sigma_2 \operatorname{tg} \varphi_2 + c_2) \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (7)$$

или "функционал давления"

$$J = \frac{A}{\cos \varphi_1} \int_{x_0}^x \sigma_1 dx, \quad A = \sqrt{1 + \bar{y}'^2} \quad (8)$$

Введенные функционалы зависят от линии выпора и нормальных напряжений по внутреннему контуру призмы выпирания.

Таким образом, исследование переползания и давления грунта приводится к решению вариационных задач для функционалов сдвига и давления. Применительно к функционалу сдвига задача формулируется следующим образом.

Дан функционал (7) и даны условия (6). Требуется найти линию выпора $y = y(x)$ и напряжения σ_2, τ_2 по составной линии x_0, x_k , удовлетворяющие условиям (6) и доставляющие минимум функционалу (7).

Аналогично формулируется вариационная задача для функционала (8).

Обе задачи являются разрывными изопериметрическими задачами и решаются так же, как и в главе II, методом неопределенных множителей Лагранжа.

Соответствующие уравнения Эйлера-Лагранжа в случае функционала сдвига записываются в виде

$$\lambda_1 (\operatorname{tg} \varphi_1 + \kappa) + \lambda_2 (\kappa \operatorname{tg} \varphi_1 - 1) - \lambda_3 A^2 x = 0,$$

$$\lambda_1 (tg \varphi_2 - y') + \lambda_2 (y' tg \varphi_2 + 1) = \sqrt{1+y'^2} \, tg \varphi_2,$$

$$\lambda_2 y - \lambda_1 \sigma_2' + \lambda_2 \sigma_2' tg \varphi_2 - \frac{y' \sigma_2' tg \varphi_2}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{y'' \tau_2}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

а в случае функционала давления в виде

$$\frac{A}{\cos \varphi_1} + \lambda_1 (tg \varphi_1 + \kappa) + \lambda_2 (\kappa tg \varphi_1 - 1) - \lambda_3 A^2 x = 0,$$

$$\lambda_1 y' - \lambda_2 - \lambda_3 x - \lambda_3 y y' + (\lambda_3 y - \lambda_3 x y' - \lambda_2 y' - \lambda_1) tg \varphi_2 = 0,$$

$$\lambda_2 y + 2 \lambda_3 \tau_2 + \lambda_3 x y - \lambda_1 \sigma_2' + \lambda_2 \sigma_2' + \lambda_3 x \tau_2' + \lambda_3 \sigma_2' y = 0 \quad (10)$$

Неизвестные постоянные определяются из граничных условий, соотношений между множителями Лагранжа и уравнений равновесия.

Таким образом, получены в замкнутом виде решения вариационных задач, позволяющих находить одновременно опаснейшую линию выпора, напряжения по внутреннему контуру призмы выпирания и минимальное значение принятого функционала.

Разработаны алгоритмы и блок-схемы этих аналитических расчётов.

Давление грунта на подпорную стену в начальный момент перемещения определяется из условий равновесия примыкающей к стене призмы грунта $x, x_0, \bar{x}$ (рис. 2, б), образованной линией выпора x, x_0 , линией стены $x_0, \bar{x}$ и линией скольжения $x, \bar{x}$. На эту призму действуют следующие силы: D — собственный вес, $-R_c$ и $-R_\tau$ — результирующие эпюры нормальных и касательных

напряжений по линии выпора, взятые с обратным знаком (рис.2,а),
 $\bar{R}$ – реакция по $x, \bar{x}$ $\bar{C}$ – полное сцепление по $x, \bar{x}$
 E_{cm} – реакция подпорной стены $x, \bar{x}$. Силы $\bar{R}$ и E_{cm}
 определяются построением векторного многоугольника (рис.2,б).

Рассматриваются практически важные специальные случаи переползания и давления грунта на подпорные стены (движение грунта по грани стены, накопление оползневых масс за подпорной стеной и др.).

Аналитические расчеты легко выполняются на ЭВМ.

Из расчета по функционалу давления следует в частном случае ($x_0 = x$, $tg \varphi_0 = \bar{\varphi}'$) расчет, рекомендованный в 1967 году ЦНИИС.

В главе приводятся числовые примеры расчета переползания и давления грунта на подпорную стену для функционалов сдвига и давления.

Г л а в а I V

СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выполненные в двух предшествующих главах расчеты давления и переползания грунта через подпорные стены сопоставляются между собой и с расчётами по другим методам (по Кулону, Л.П.Петровой, теории предельного равновесия).

Исследования показывают, что изложенные в главе III два подхода к расчёту переползания грунта через подпорные стены приводят к сравнительно близким результатам. Контур клина выпирания и напряжения по этому контуру зависят от угла наклона оползневой поверхности в сечении *х,х*. С уменьшением этого угла увеличивается наклон линии выпора и уменьшается оползневое давление. Эпюры напряжений по сечению *х,х*, значительно больше зависят от наклона оползневой поверхности, чем эпюры напряжений по линии выпора.

Оползневое давление грунта на подпорную стену, определенное по вариационному методу, обычно меньше пассивного давления, рассчитанного по теории предельного равновесия (и тем более по методу Кулона).

Применение теории предельного равновесия к расчету переползания и давления грунта на подпорные стены приводит к результатам, не подтверждающимся в натуре (разрывное решение, нереальный перелом линии выпора).

Представление о соотношении результатов расчетов, выполненных для одного склона различными методами, даёт таблица I.

Приводятся результаты лабораторных исследований автора, выполненных на центробежной машине лаборатории механики грунтов ДИИТ в 1967 году. Испытывались модели неоползневых и оползневых склонов, укрепленных подпорной стеной. Поверхность скольжения склона моделировалась прокладкой из двух пленок фторопласта. Грунт модели — глина из мезотической глины. Эти эксперименты показали, что в оползневом склоне, укрепленном подпорной стеной, при переползании грунта возникает дополнительная поверхность скольжения —

Таблица I

№	Метод расчета		φ [град]	$(x_n)_{кр}$ [м]	Давление в сечении [т]	Давление на стену $E_{ст}$ [т]		
						$\bar{\varphi} = 0^\circ$	$\bar{\varphi} = 7,5^\circ$	$\bar{\varphi} = 15^\circ$
I	В а р и а - ц и о б - н ы й	функционал	30	5,3	27	35	38	41
2		давления	0	3,4	18	22	24	26
3		функционал	30	4,2	28	37	40	44
4		сдвига	0	2,7	19	23	25	28
5	Кулона (пассивного давления)		-	-	-	74,8	III	175
6	Л.П.Петровой (переползания)		30	3,2	22	-	-	-
7	Теория пре- дельного равновесия	переползания	0	2,8	15	18	19	21
8		пассивного давления	-	-	-	69	80	88

-поверхность выпора. Она имеет незначительную кривизну и почти горизонтальна.

Приводятся также полученные Л.П.Петровой, результаты многолетних натурных измерений оползневоего давления на подпорные стены.

Расчеты по вариационному методу находятся в хорошем соответствии с лабораторными и натурными данными.

З а к л ю ч е н и е

Основные результаты настоящей работы сводятся к следующему.

1. Исследование давления и переползания грунта через подпорные стены приврдится к решению разрывной изопериметрической задачи вариационного исчисления.

Задача определения критической линии скольжения, эпюр напряжений по этой линии и реакции подпорной стены (или давления в расчетном сечении) допускает единственное решение.

3. К совокупности условий задачи (три уравнения равновесия, уравнение предельного равновесия по линии скольжения и требование экстремума давления) можно присоединить другие условия, приближающие теоретические результаты к наблюдаемым в натуре. В частности, соответствующим выбором параметров функции давления можно с высокой точностью аппроксимировать кривизну действительной эпюры давления.

4. Критическая линия скольжения, напряжения по этой линии

и экстремальное давление грунта на подпорную стену (или в расчётном сечении) находятся одновременно – как результат решения одной вариационной задачи.

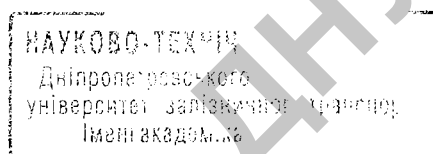
5. Плоская форма линии скольжения, условно принятая сначала Кулоном, а вследствие другими авторами, оказывается единственно возможной формой такой линии, не противоречащей всем остальным допущениям задачи.

6. Разработан аналитический расчет давления грунта на наклонную шероховатую подпорную стену при произвольном очертании свободной поверхности. Из этого расчёта следует, в частности (сыпучий грунт, линейная засылка), известная формула Кулона и новая формула для критического угла наклона линии скольжения.

7. Разработан аналитический расчёт давления и переползания грунта через подпорные стены при произвольной форме поверхности скольжения и днелной поверхности склона. Из этого расчета следует (в случае функционала давления при $\alpha = \alpha_0$ и $tg \varphi = g'$) расчет, рекомендованный ЦНИИС в 1967 году.

8. Составлены алгоритмы и блок-схемы для выполнения аналитических расчетов на ЭВМ.

9. Вариационные расчеты давления и переползания грунта через подпорные стены находятся в хорошем соответствии с лабораторными и натурными наблюдениями.



Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Дудинцева И.Л. Применение вариационного метода для решения задачи устойчивости подпорных стен. Тезисы докладов ХУП научно-технической конференции института, Днепропетровск, 1967.

2. Дудинцева И.Л. Применение вариационного метода к расчету устойчивости подпорных стен. В сб. ДИИТ "Вопросы геотехники", № 12, Киев, БудІвельник, 1968.

3. Дудинцева И.Л. Применение вариационного метода к расчету оползневото давления грунта на удерживающие сооружения. Тезисы докладов республиканской конференции молодых ученых-железнодорожников, Днепропетровск, 1969.

4. Дудинцева И.Л. Применение вариационного метода к расчету давления грунта на подпорные стены. Основания, фундаменты и механика грунтов (в печати).

Ответственный за выпуск ЛЕБЕДИНЦ Л.Н.

Подписано к печати 8.IV.1969 г. Л.Л.1,2. Тираж 200 экз.

Зам. № 167 ДИИТ, ретипр. БТ 00044.