

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.131.7

DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.3

Способ определения величины горизонтального давления на ограждение котлована

Александр Николаевич Богомолов¹, Оксана Александровна Богомолова²,
Сергей Александрович Богомолов³

¹ ОАО «НПЭК ОиФ»; г. Новосибирск, Россия;

² Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия;

³ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева
(РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Предложен метод определения бокового давления на ограждение котлована, который базируется на анализе напряженного состояния удерживаемой грунтовой массы. Он может быть использован как для несвязных, так и для связных грунтов, при однородном или неоднородном строении удерживаемого массива, как при наличии на его поверхности нагрузок, так и без них.

Материалы и методы. При выполнении сопоставительных расчетов использованы материалы, опубликованные российскими и иностранными учеными, в которых приведены результаты анализа проведенных экспериментов и теоретических исследований. Все вычисления осуществлены в оболочке компьютерной программы «Устойчивость», в которой определение полей напряжений проводится методом конечных элементов в линейной постановке.

Результаты. Установлено, что все полученные расчетом значения бокового давления с достаточной степенью точности (для экспериментальных исследований) совпадают с соответствующими значениями, приведенными в цитируемых работах. Полученные авторами представленной статьи значения бокового давления оказались на 25–40 % меньше аналогичных результатов, приведенных цитируемыми авторами. Формы эпюр бокового давления, построенные авторами каждой из цитируемых работ, конгруэнтны эпюрам бокового давления, построенным на основе сделанных в статье предложений. Отличие численных значений бокового давления, полученных авторами цитируемых работ, от значений, полученных нами, объясняется различием подходов к построению поверхности скольжения: в нашем случае не используется гипотеза о ее плоской форме, а ее построение проводится на основе анализа полей напряжений с учетом физико-механических свойств грунта.

Выводы. Имея в виду удовлетворительную сходимость сопоставляемых результатов, сделан вывод о возможности использования анонсированного метода при выполнении инженерно-технических расчетов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: борт котлована, напряженное состояние, коэффициент бокового давления, поверхность скольжения, удерживающая конструкция, эпюра бокового давления

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Богомолов А.Н., Богомолова О.А., Богомолов С.А. Способ определения величины горизонтального давления на ограждение котлована. 2025. Т. 15. Вып. 1. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.3

Автор, ответственный за переписку: Александр Николаевич Богомолов, banzaritcyn@mail.ru.

Method of finding the value of horizontal pressure on the excavation enclosure

Alexander N. Bogomolov¹, Oksana A. Bogomolova², Sergey A. Bogomolov³

¹ JSC “NPEC O&F”; Novosibirsk, Russian Federation;

² Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd; Russian Federation;

³ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A method for determining the lateral pressure on the excavation enclosure is proposed, which is based on the analysis of the stress state of the retained soil mass. It can be used both for non-cohesive and cohesive soils, for homogeneous or non-homogeneous structure of the retained mass, both with and without loads on its surface.

Materials and methods. Materials published by Russian and foreign scientists were used for comparative calculations, where the results of analyses, experiments and theoretical studies are given. All calculations are performed in the shell of the computer programme “Stability”, in which the determination of stress fields is carried out by the finite element method in a linear formulation.

Results. It was found that all the calculated values of lateral pressure with a sufficient degree of accuracy (for experimental studies) coincide with the corresponding values given in the cited works. The lateral pressure values obtained by the authors

of the presented paper turned out to be 25–40 % less than the similar results given by the cited authors. The forms of the lateral pressure plots constructed by the authors of each of the cited works are congruent to the lateral pressure plots based on the proposals made in the paper. The difference between the numerical values of the lateral pressure obtained by the authors of the cited works and the values obtained by us is explained by the difference in approaches to the construction of the sliding surface: in our case, the hypothesis of its flat shape is not used, but its construction is based on the analysis of stress fields taking into account the physical and mechanical properties of the soil.

Conclusions. Taking into account the satisfactory convergence of the compared results, we consider it possible to conclude that the announced method can be used in engineering calculations.

KEYWORDS: pit wall, stress state, lateral pressure coefficient, sliding surface, retaining structure, lateral pressure diagram

FOR CITATION: Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Bogomolov S.A. Method of finding the value of horizontal pressure on the excavation enclosure. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2025; 15(1):3. URL: <http://Inso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2025.1.3

Corresponding author: Alexander N. Bogomolov, banzaritcyn@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современное строительство невозможно без устройства котлованов для проведения работ нулевого цикла. Для безопасности этих работ необходимо обеспечивать устойчивость бортов строительных котлованов, что осуществляется путем сооружения различного рода ограждающих конструкций (рис. 1).

Расчет таких конструкций невозможен без предварительного определения силы бокового (оползневого) давления, величина которой устанавливается площадью эпюры бокового давления, а точка ее приложения — координатами центра тяжести этой эпюры. Следовательно, задача разработки и совершенствования методов расчета сил бокового давления является актуальной. Ее актуальность подтверждается и периодическими разрушениями ограждающих конструкций (рис. 2), которые могут происходить как из-за нарушений технологии их устройства, так и из-за несовершенства расчетных методов.

В работе [2] предложен метод определения величины бокового (горизонтального) давления на элементы крепления котлована или вертикального элемента противооползневой удерживающей конструкции. Этот

метод получил развитие, подробно изложен [3, 4] и сегодня успешно используется авторами настоящей статьи при решении прикладных задач.

Алгоритм вычисления сил бокового давления приводится ниже.

1. Генерируется конечно-элементная расчетная схема исследуемого объекта, и на основе решения линейной задачи определяются поля напряжений удерживаемого грунтового массива.

2. Отыскивается наиболее опасная линия разрушения (скольжения) (правильнее «следа» поверхности разрушения), при этом расчетными параметрами являются физико-механические свойства грунта (C ; φ ; γ ; ξ_0), геометрические размеры расчетной области, величина внешней нагрузки. В результате вычисляется численное значение глобального коэффициента запаса устойчивости $K_{\text{гл}}^{\min}$, которое равно отношению площадей эпюр удерживающих и сдвигающих сил, действующих в точках следа поверхности разрушения [5, 6].

3. На образующей вертикального откоса выбираются несколько точек (например, четыре, как в настоящей работе), из которых проводится построение так называемых «внутренних локальных» восходящих линий разрушения, а затем вдоль этих линий



Рис. 1. Ограждающая конструкция глубокого котлована с центральной вертикальной распоркой в аэропорту г. Франкфурта (а); усиление высокого борта котлована ориентированными под углом к вертикали буронабивными сваями (Zublin AG) (b) [1]

Fig. 1. The enclosing structure of a deep pit with a central vertical spacer at the airport of Frankfurt (a); reinforcement of the high side of the pit with bored piles oriented at an angle to the vertical (Zublin AG) (b) [1]



a



b

Рис. 2. Разрушение ограждающей конструкции котлована на строительстве кольцевой дороги в Сингапуре (a) и жилого здания в ОАЭ (b) [1]

Fig. 2. Destruction of the enclosing structure of the pit at the construction of the ring road in Singapore (a) and a residential building in the UAE (b) [1]

строятся эпюры удерживающих и сдвигающих сил, отношение площадей которых определяют значения локальных коэффициентов запаса устойчивости $K_i^{\text{лок}}$.

4. Учитывая, что устройство ограждений бортов строительных котлованов проводится в предположении о том, что его вертикальный откос может потерять устойчивость ($K_3^{\text{мин}} = 1$), то для каждой локальной восходящей линии скольжения определяем значения «дефицитной» удерживающей силы, которые обеспечивают выполнение условий $K_i^{\text{лок}} = 1$. Эта «дефицитная» сила в каждом отдельном случае равна разности $\Delta F_{\text{удер}}^{\text{лок}} = F_{\text{сдв}}^{\text{лок}} - F_{\text{удер}}^{\text{лок}}$.

5. Если из каких-либо соображений необходимо, чтобы коэффициент $K_{\text{гл}}^{\text{мин}}$ был больше 1, например $K_3^{\text{мин}} = 1,2$, то величина $\Delta F_{\text{удер}}^{\text{лок}}$ увеличивается в $K_{\text{гл}}^{\text{мин}}$ раз. Условие равенства величин $K_i^{\text{лок}}$ для всех построенных восходящих локальных линий скольжения обеспечивает целостность призмы сползания грунта, как это и наблюдается в экспериментах, поставленных И.Я. Лучковским и Д.А. Чепурным [7, 8] и З.В. Цигарели [9] (рис. 3).

6. Вдоль вертикальной оси удерживающего элемента строится эпюра горизонтальных составляющих $\Delta F_{\text{удер}}^{\text{лок}}$, которые определяются как $\Delta F_{\text{удер гор}}^{\text{лок}} = \Delta F_{\text{удер}}^{\text{лок}} \cos \alpha_i$, где α_i — угол наклона локальной линии

скольжения к горизонту в точке ее пересечения с вертикальной образующей засыпки. Это и будет эпюра оползневого давления.

7. Вертикальная составляющая $\Delta F_{\text{удер верт}}^{\text{лок}} = F_{\text{удер}}^{\text{лок}} \sin \alpha_i$ будет действовать вниз по поверхности ограждающей конструкции и может оказывать влияние на осадки удерживающей конструкции.

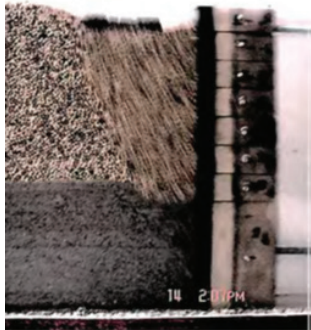
Предлагаемый метод, по мнению авторов, основанный на результатах расчета большого количества реальных объектов, может быть предложен для расчета бокового давления на удерживающие конструкции конечной и бесконечной жесткости, разница при этом будет лишь в граничных условиях, накладываемых на расчетную конечно-элементную схему.

Сопоставление результатов расчетов величины бокового давления, выполненных различными способами

Во всех рассмотренных примерах сохранены обозначения физических величин, принятые в цитируемых ниже работах.

1. Методика СП 22.13330.2011

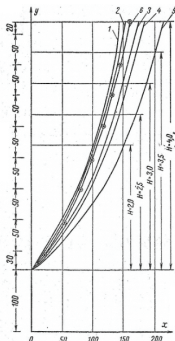
Рассмотрим гравитационную подпорную стенку, изображенную на рис. 4, a. Расчет сил бокового давления выполнен согласно методике, изложенной



a



b



c

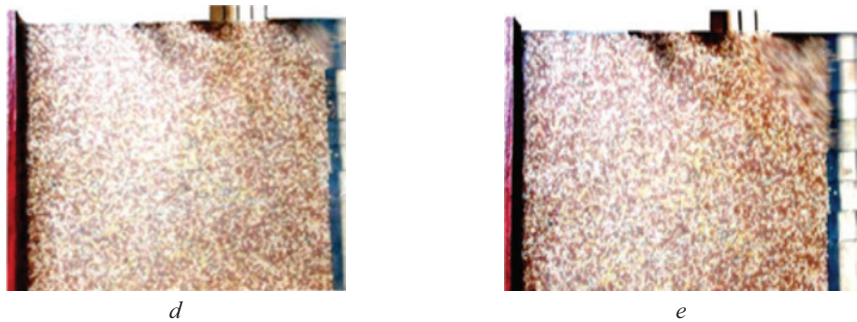


Рис. 3. Поверхности разрушения в слоистой засыпке: просо – песок (а) и песок – просо (б) при наличии и отсутствии нагрузки на ее поверхности; то же при горизонтальном смещении подпорной стенки (с); то же в однородной засыпке при действии внешней нагрузки (d, e) ([7] (a–c) и [8] (z, d))

Fig. 3. Failure surfaces in layered backfill: millet – sand (a) and sand – millet (b) in the presence and absence of load on its surface; the same at horizontal displacement of retaining wall (c); the same in homogeneous backfilling under the action of external load (d, e) ([7] (a–c), [8] (d, e))

в п.п. 9.17–9.23 [9]. Грунты, прилегающие к подпорной конструкции, считаем условно однородными с характеристиками, указанными в исходных данных. Грунтовые воды отсутствуют. Вертикальная составляющая усилий не учитывается.

Исходные данные для расчета: высота подпорной стенки $h = 3\text{ м}$; коэффициенты надежности по нагрузке и грунту $\gamma_{fq} = 1,20$ и $\gamma_{fq} = 1,15$; $q = 1\text{ т/м}^2$; $\gamma = 1,9\text{ т/м}^3$; $c = 0\text{ т/м}^2$; $\varphi = 25^\circ$; $\delta = 0^\circ$; грань подпорного сооружения ориентирована вертикально, а поверхность засыпки горизонтальна, поэтому $\theta = 0^\circ$; $\beta = 0^\circ$.

Величина коэффициента бокового давления рассчитана по формуле В.А. Флорина $\xi_0 = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) = 0,406$ [10, 11].

На рис. 4 показаны расчетная схема подпорной стенки и эпюры бокового давления, построенные методом, представленным в СП 22.13330.2011 и предложенным авторами [2–4], который базируется на результате конечно-элементного анализа напряженного состояния грунтовой массы. Все операции, связанные

с использованием этого метода, здесь и далее проводятся при помощи компьютерной программы [12].

Анализируя результаты вычислений, графическая интерпретация части которых представлена на рис. 4, с, можно сказать, что ординаты эпюр бокового давления в верхней, средней и нижней точках отличаются на 0; 44 и 9 %, причем, значения, посчитанные по методике СП, больше. Равнодействующая сил оползневых давлений, определенная согласно СП, равна $E_a^{\text{СП}} = 5,45\text{ т}$, а вычисленная на основе наших предложений — $E_a = 4,08\text{ т}$, т.е. на 25,1 % меньше.

2. Опыты З.В. Цигарели [13]

Автором работы [13] проведены лотковые эксперименты по исследованию процесса взаимодействия несвязной засыпки и вертикальной грани модели удерживающего сооружения. Размеры лотка $4 \times 1,2 \times 5\text{ м}$ и $4 \times 3,6 \times 3\text{ м}$. Засыпка — морской песок с зернами крупности 0,1–2 мм, $c = 0$ и $\varphi = 37^\circ$ [13]. Используя формулу В.А. Флорина, получим $\xi_0 = 0,37$.

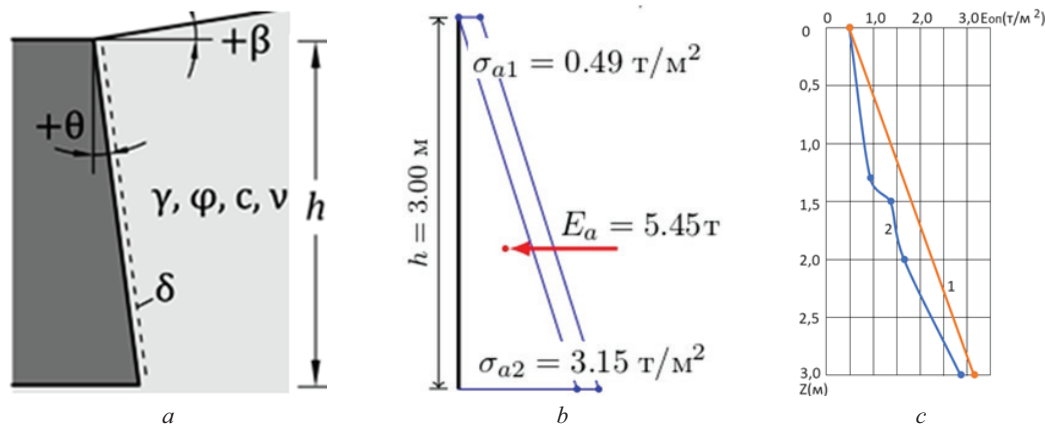


Рис. 4. Расчетная схема подпорной стенки (а); эпюра бокового давления, построенная по методике [9] (б); наложение расчетных эпюр горизонтального давления, построенных по методикам [2, 9] (с)

Fig. 4. Design diagram of the retaining wall (a); lateral pressure diagram constructed according to the method [9] (b); superimposition of design diagrams of horizontal pressure constructed according to the methods [2, 9] (c)

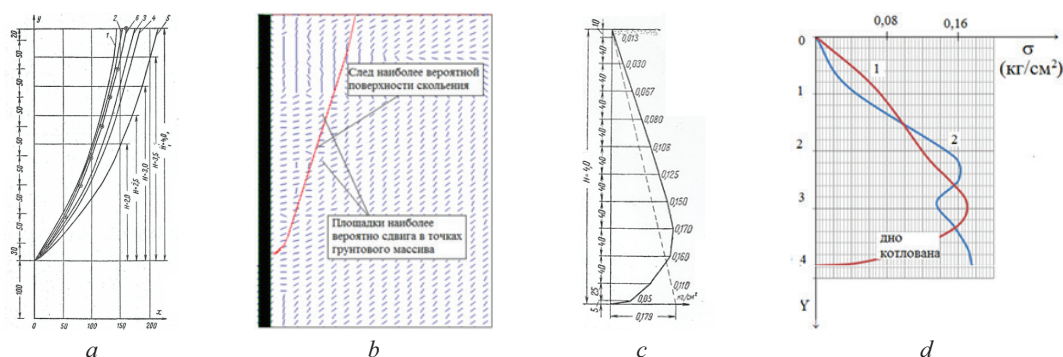


Рис. 5. Поверхности разрушения по данным работы [13] (a); поверхность разрушения, построенная в среде компьютерной программы «Устойчивость» при $\xi_0 = 0,37$ (b); эпюра бокового давления, полученная в [13] (c), и наложение эпюр (1) бокового, приведенных в работе [13] (1) и построенных в среде компьютерной программы [12] (2) (d)

Fig. 5. The fracture surface according to the data of [13] (a); the fracture surface constructed in the environment of the computer programme “Stability” at $\xi_0 = 0.37$ (b); the plot of the lateral pressure obtained in [13] (c) and the superimposition of the plots (1) of the lateral one given in [13] (1), and built in the environment of a computer programme [12] (2) (d)

После проведения расчетов установлено, что конфигурация, местоположение и размеры следов поверхностей разрушения, полученных экспериментально (рис. 5, a) и при помощи компьютерной программы [12] при $\xi_0 = 0,37$ (рис. 5, b), практически совпадают.

На рис. 5, c показана эпюра бокового давления, построенная автором работы [13], а на рис. 5, d — наложение этой эпюры и соответствующей эпюры бокового давления, построенной при помощи компьютерной программы [12]. Вычисления показали, что площади этих эпюр отличаются всего на 16,78 %, а вертикальные координаты точек их приложения — на 4 %.

3. Результаты экспериментов В.Ф. Раюка [14]

Лотковые эксперименты выполнены в НИИОСП (1957). Засыпкой служил сухой песок. Его физико-механические характеристики и параметры модели подробно описаны в исследовании [14].

Расчет величины оползневое давления проведен на основе описанного выше алгоритма, а его результаты приведены на рис. 6.

На рис. 6, a показаны эпюры бокового давления: полученная автором [14] при проведении эксперимента (1), методом Кулона [15] (2) и эпюра горизонтальных напряжений σ_x как эквивалент эпюры бокового давления (3).

На рис. 6, b представлена экспериментальная [14] эпюра бокового давления, на рис. 6, c — аналогичная эпюра, построенная при помощи исследования [12], на рис. 6, d — наложение этих эпюр (1) и (2) соответственно.

Анализ изображений показал, что экспериментальная и расчетная эпюры конгруэнтны, разница ординат сходственных точек эпюр не превышает 20–22 %.

Площади эпюр, определяющие численные значения их равнодействующих, отличаются по величине на 24 %, при этом равнодействующие сил бокового давления соответственно: $P_{\text{раюк}} = 0,75$ кг и $P_{\text{расч}} = 0,57$ кг, причем значение по В.Ф. Раюку больше.

При условии, что $\xi_0 = 0,26$ (это значение коэффициента бокового давления получается по формуле В.А. Флорина), расчетная величина равнодействующей эпюры бокового давления, полученной расче-

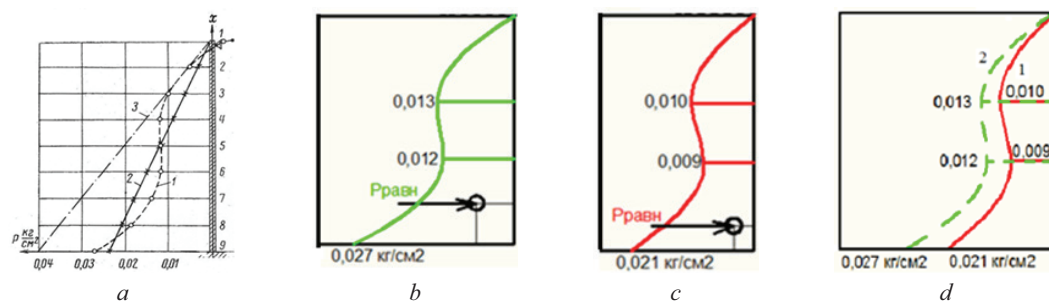


Рис. 6. Экспериментальная эпюра (1); расчетная по Кулону (2); эпюра горизонтальных напряжений σ_x при $\xi_0 = 0,4$ (3) (a); экспериментальная эпюра бокового давления (b) и построенная в оболочке программы [12] (c), наложение этих эпюр (1) и (2) соответственно (d)

Fig. 6. Experimental plot (1); calculated by Coulomb (2); plot of horizontal stresses σ_x at $\xi_0 = 0.4$ (3) (a); experimental plot of lateral pressure (b) and constructed in the shell of the programme [12] (c), the superimposition of these plots (1) and (2), respectively (d)

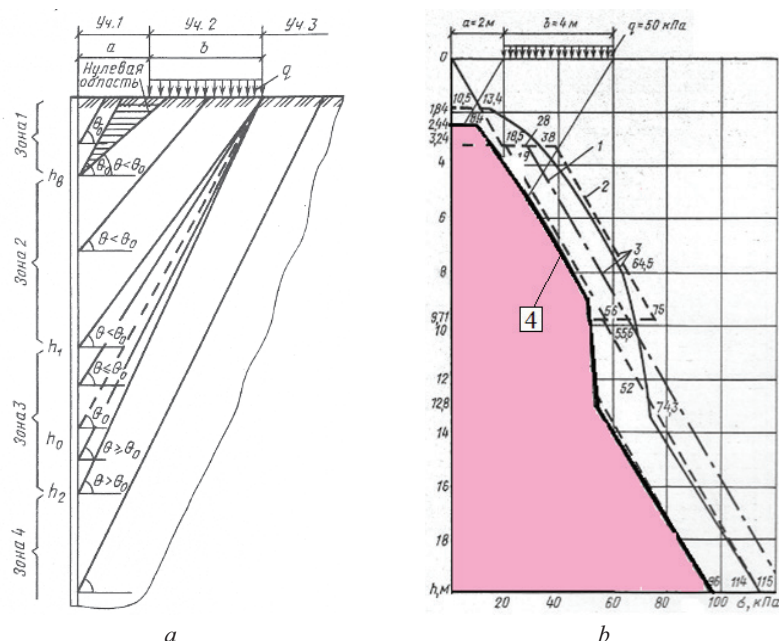


Рис. 7. Местоположение наиболее опасных плоскостей скольжения (разрушения) внутри удерживаемой грунтовой массы (по данным работы [16]) (а); эпюры горизонтального давления на подпорную стенку, построенные по СП 43.13330.2012 (1) [18]; по Г.К. Клейну (2) [19]; без учета удельного сцепления (3); по методу И.Я. Лучковского [14, 15] (4) (b) [16]

Fig. 7. The location of the most dangerous sliding planes (destruction) inside the retained soil mass (submitted by the work [16]) (a); diagrams of horizontal pressure on the retaining wall, built according to SP 43.13330.2012 (1) [18]; according to G.K. Klein (2) [19]; excluding specific adhesion (3); according to the method of I.Ya. Luchkovsky [14, 15] (4) (b) [16]

том, будет на 37 % меньше соответствующего значения для экспериментальной эпюры.

4. Экспериментально-теоретические данные И.Я. Лучковского [7, 8, 16, 17]

Работа [5] посвящена решению задачи об определении величины бокового давления грунта на подпорные стены, горизонтальная поверхность засыпки которой пригружена равномерной нагрузкой, имеющей произвольную ширину и интенсивность. В исследовании [16] приведен соответствующий пример при: $a = 2$ м; $b = 4$ м; $H = 20$ м; $\gamma = 15$ кН/м³; $C = 15$ кПа; $\varphi = 26,5^\circ$; $\text{tg}\varphi = 0,5$; $q = 50$ кПа (все исходные данные для расчета, в том числе геометрические размеры, заимствованы из работы [16]).

Эпюра бокового давления, построенная по методу И.Я. Лучковского [5], окрашена на рис. 7, b розовым цветом.

Для условий рассматриваемой в работе [16] задачи проведены вычисления в среде компьютерной программы [12], в результате которых построена соответствующая эпюра бокового давления, изображенная на рис. 8, а. Численное значение равнодействующей этой эпюры равно $P_{\text{расч}} = 909,1$ кН/м. Если сравнить его с соответствующим значением, приведенном в труде [16] $P_{\text{Лучк}} = 987,83$ кН/м, то видно, что их отличие составляет 8 %, причем рассчитанное авторами значение меньше.

Из рис. 8, с видно, что если при расчете в оболочке компьютерной программы [12] принять значение

величины коэффициента бокового давления $\xi_0 = 0,6$, то получим расчетную величину бокового давления, равную величине, приведенной И.Я. Лучковским [16].

Разберем следующий пример, представленный в исследовании [16].

Требуется определить распределение горизонтального давления на ограждение котлована, исходя из условий, описанных в труде [16]: $H = 20$ м; $\gamma = 15$ кН/м³; $c = 0$; $\varphi = 30^\circ$; $q = 10$; $b = 0,5$.

Используя компьютерную программу [12] и описанный выше алгоритм, построили эпюру бокового давления грунта, которая, наряду с эпюрой автора [16], приведена на рис. 9, а, b соответственно.

Величина коэффициента бокового давления при расчете принята равной $\xi_0 = 0,35$, что соответствует величине, вычисленной по формуле В.А. Флорина.

Сравнивая изображения этих эпюр, видим, что они конгруэнтны, а численные значения их площадей разнятся на 16,29 %, причем эпюра автора работы [16] имеет большую площадь, а значит, в таком же отношении находятся и равнодействующие эпюр: $P_{[16]}^{\text{Лучк}} = 1,9243$ и $P_{[12]}^{\text{Богом}} = 1,6108$.

Отметим, что отличие полученных авторами результатов от результатов, приведенных в труде [16], может быть частично объяснено отсутствием в предложенной методике допущения о прямолинейной форме следов поверхностей разрушения, которое присутствует в исследовании [5]. При этом на фотографиях И.Я. Лучковского и Д.А. Чепурного, приведенных в работе [5], четко зафиксирована кри-

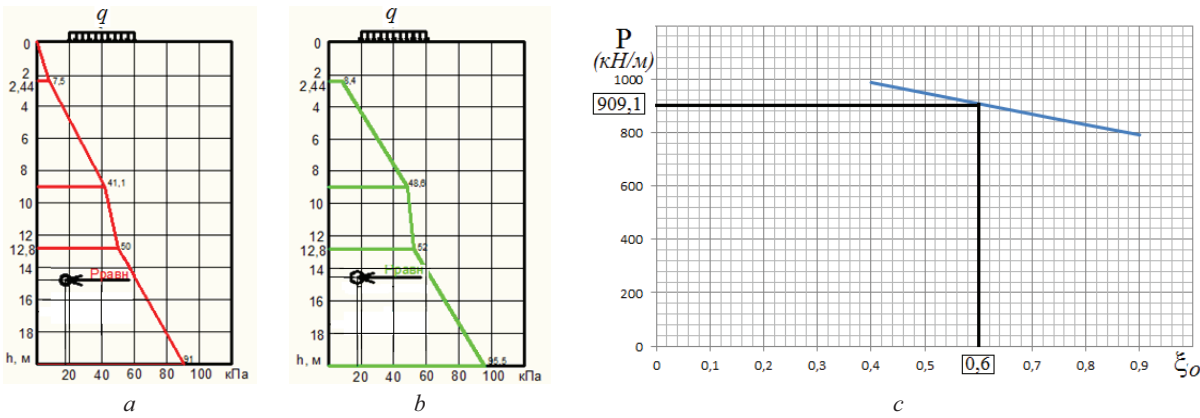


Рис. 8. Изображения эпюр бокового давления, построенных в оболочке компьютерной программы [12] (а) и по методу [5] (b); зависимость величины равнодействующей бокового давления от величины коэффициента бокового давления ξ_0 для рассмотренных условий (с)

Fig. 8. Images of lateral pressure plots constructed in the shell of a computer programme [12] (a) and according to the method [5] (b); dependence of the magnitude of the resultant lateral pressure on the magnitude of the lateral pressure coefficient ξ_0 for the conditions considered (c)

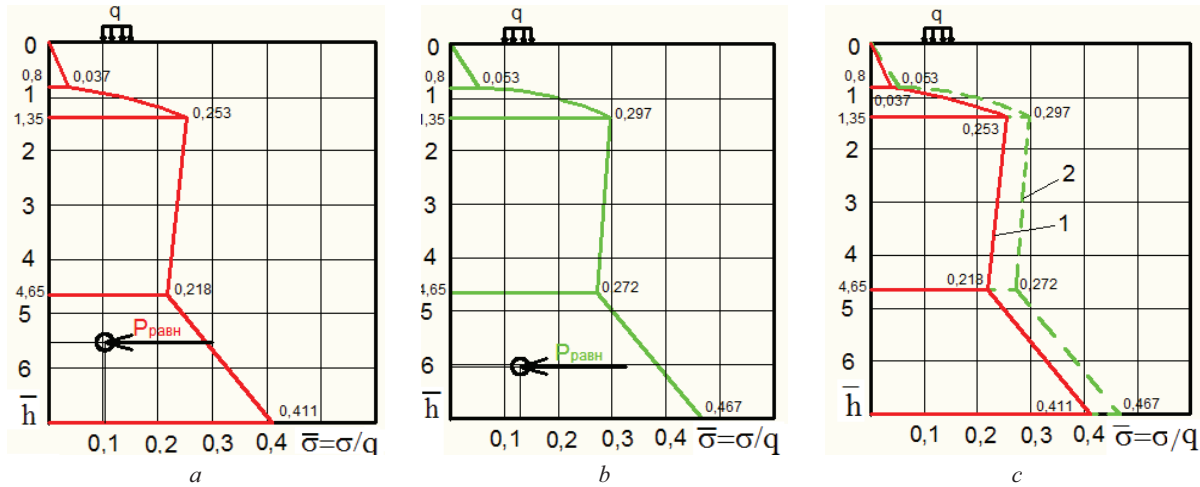


Рис. 9. Эпюры бокового давления, построенные в оболочке компьютерной программы [12] (а); на основе метода [5] (b); наложение этих эпюр (с)

Fig. 9. Lateral pressure plots constructed in the shell of a computer programme [12] (a); based on the method [5] (b); the superimposition of these plots (c)

волинейная форма следов поверхностей скольжения (разрушения) (см. рис. 3).

5. Данные натурных испытаний Г.Е. Лабезника [20]

Подпорная стенка, по поверхности которой измерялось боковое давление, служит частью конструкции здания насосной станции, является жесткой и практически несмещаемой (рис. 10, а).

Грунтовое основание — мелкозернистый песок с углом внутреннего трения $\varphi = 33\text{--}34^\circ$, нулевым сцеплением, удельным весом $\gamma = 16,6\text{--}17\text{ кН/м}^3$ и модулем деформации $E = 43\text{--}45\text{ МПа}$. Средние характеристики песчаной засыпки: $\varphi = 32^\circ$; $\gamma = 16\text{ кН/м}^3$, модули деформации верхней и нижней частей засыпки $E_3^a = 20\text{ МПа}$ и $E_3^h = 30\text{ МПа}$. Горизонтальное давление измерялось грунтовыми динамометрами типа

СДКС-7УКПЗ, которые устанавливались в стенку на 8 уровнях по высоте в трех параллельных створах. Протокол проведения эксперимента и его результаты, а также использованное оборудование подробно описаны в исследованиях [20–22].

На рис. 10, а приведены изображения подпорной стенки (стены насосной станции) и экспериментальной эпюры бокового давления (на этом рисунке обозначена цифрой 4), которая построена «через 10 месяцев после полной засыпки стенки (декабрь 1990 г.)».

На рис. 10, б показаны: та же эпюра (1), эпюра горизонтального давления, построенная в оболочке компьютерной программы [12] (2) (b), и эпюра горизонтальных напряжений, действующих вдоль внутренней вертикальной поверхности подпорной стенки (3).



гаемым методом, можно объяснить тем, что применение последнего не подразумевает использования гипотезы о плоских поверхностях скольжения, а построение ее следа проводится на основе конечно-элементного анализа напряженного состояния грунтов засыпки с учетом реальных значений ее физико-механических свойств. Установлено, что величины горизонтального давления, приведенные в рассмотренных работах, могут быть получены путем расчета в оболочке компьютерной программы [12] при определенных значениях коэффициента бокового давления грунта засыпки. Упомянутое выше отличие может быть частично объяснено и положением о том,

что под боковым давлением авторы настоящей статьи, в отличие от авторов цитируемых работ, считают, что равнодействующая сил оползневого давления не является нормальной к внутренней поверхности ограждения и под горизонтальным давлением следует понимать лишь ее горизонтальную составляющую.

В связи с удовлетворительной сходимостью многочисленных результатов экспериментально-теоретических исследований, выполненных сторонними авторами, с результатами расчетов предлагаемым методом считаем возможным рекомендовать его использование в инженерно-технических расчетах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кунтис К. Устройство глубоких котлованов и откосов в условиях городской застройки // Развитие городов и геотехническое строительство. 2010. № 2. С. 2–17.
2. Bogomolov A.N., Vikhareva O.A., Ushakov A.N., Shiyan S.I. Evaluating the stress-strain state, the stability factor magnitude and the landslide pressure forces in order to manage the landslide processes // Geotechnical Engineering for Disaster Prevention & Reduction: proceedings of the International Geotechnical Symposium (IGSS, 2007). 2007. Pp. 281–285.
3. Богомолов А.Н., Иванов А.С., Богомолова О.А., Ушаков А.Н. Два новых подхода к вопросу об определении горизонтального давления грунта на ограждающие конструкции котлована // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. № 29 (48). С. 26–35.
4. Богомолова О.А., Иванов А.И., Иванов В.С., Соловьев А.В., Шиян С.И. Длительная устойчивость вертикальных стенок траншей // Вестник ВолгГАСУ. 2012. № 28 (47). С. 47–53.
5. Цветков В.К. Расчет устойчивости откосов и склонов. Волгоград : Нижне-Волжское книжное издательство, 1979. 238 с.
6. Богомолов А.Н. Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь : ПГТУ, 1996. 150 с.
7. Лучковский И.Я., Чепурной Д.А. Распределение горизонтального давления грунта на подпорные стены при многослойном основании // Науковий вісник будівництва. 2009. С. 281–285.
8. Лучковский И.Я., Данько А.М., Данько Н.М. Экспериментальное исследование положения плоскостей скольжения в засыпке, удерживаемой подпорной стенкой, при наличии местной нагрузки на поверхности // Науковий вісник будівництва. 2009. С. 90–95.
9. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. М. : Минрегионразвития РФ, 2011. 155 с.
10. Флорин В.А. Основы механики грунтов. М. : Гостройиздат, 1961. Т. 2. 543 с.
11. Богомолов А.Н., Вихарева О.А., Шиян С.И. К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов // Вестник ВолгГАСУ. 2007. № 7 (26). С. 6–10.
12. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2009613499. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) / Богомолов А.Н. и др.; заявл. от 19.05.2009; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009. 1 с.
13. Цигарели З.В. Экспериментальное исследование давления сыпучей среды на подпорные стены с вертикальной задней гранью и горизонтальной поверхностью засыпки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1965. № 4. С. 1–3.
14. Раяк В.Ф. Метод экспериментального определения давления грунта на гибкие подпорные стенки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1961. № 2. С. 8–10.
15. Coulomb C. Application des rigles de maximum et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture. Memories de savants strangers de L'Academiie des sciences de Paris, 1773.
16. Лучковский И.Я. Влияние местных нагрузок на характер распределения давления грунта на ограждающие конструкции // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1991. № 4. С. 24–27.
17. Лучковский И.Я., Данько А.М. Распределение давления грунта на подпорные стены при «узких» площадках нагружения поверхности полосовой нагрузкой // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. 2010. № 93. С. 471–479.
18. СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85 : утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации от 29.12.2011 № 620 и введен в действие с 01.01.2013.

19. Клейн Г.К. Расчет подпорных стен. М. : Высшая школа, 1964. 196 с.
20. Лазебник Г.Е. Давление грунта на сооружения. Киев : ПНВП, 2005. 243 с.
21. Лазебник Г.Е., Смирнов А.А., Иванов Д.Г. Комплекс приборов и устройств для измерения да-

лений грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1973. № 2. С. 7–12.

22. Лазебник Г.Е., Сиволан П.Г. Комплексные устройства для определения модуля деформации и коэффициента бокового давления сыпучих тел «в состоянии покоя» // Труды ВНИИГС. 1977. № 45. С. 35–41.

Поступила в редакцию 28 августа 2024 г.

Принята в доработанном виде 20 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 25 сентября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Александр Николаевич Богомолов** — доктор технических наук, профессор; ОАО «НПЭК ОнФ»; г. Новосибирск, ул. Телевизионная, д. 15; banzaritcyn@mail.ru;

Оксана Александровна Богомолова — кандидат технических наук, доцент кафедры математики и естественнонаучных дисциплин; **Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)**; 400005, г. Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28; boazaritcyn@mail.ru;

Сергей Александрович Богомолов — кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственного строительства и экспертизы объектов недвижимости; **Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева)**; 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49; bogomolov@rgau-msha.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Kuntshe K. The device of deep pits and slopes in urban conditions. *Urban development and geotechnical construction*. 2010; 2:2-17. (rus.).
2. Bogomolov A.N., Vikhareva O.A., Ushakov A.N., Shiyan S.I. Evaluating the stress-strain state, the stability factor magnitude and the landslide pressure forces in order to manage the landslide processes. *Geotechnical Engineering for Disaster Prevention & Reduction: proceedings of the International Geotechnical Symposium (IGSS, 2007)*. 2007; 281-285.
3. Bogomolov A.N., Ivanov A.S., Bogomolova O.A., Ushakov A.N. Two new approaches to the question of determining the horizontal pressure of soil on the enclosing structures of the pit. *Bulletin of Volgograd state university of architecture and civil engineering*. 2012; 29(48):26-35. (rus.).
4. Bogomolova O.A., Ivanov A.I., Ivanov V.S., Solovyov A.V., Shiyan S.I. Long-term stability of vertical trench walls. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2012; 28(47):47-53. (rus.).
5. Tsvetkov V.K. *Calculation of stability of slopes and slopes*. Volgograd, Nizhne-Volzhscoe book publishing house, 1979; 238. (rus.).
6. Bogomolov A.N. *Calculation of the bearing capacity of the foundations of structures and the stability of soil massifs in an elastic-plastic formulation*. Perm, PSTU, 1996; 150. (rus.).
7. Luchkovsky I.Ya., Chepurnoy D.A. Distribution of horizontal soil pressure on retaining walls with a multilayer base. *Scientific Bulletin of Construction*. 2009; 281-285. (rus.).
8. Luchkovsky I.Ya., Danko A.M., Danko N.M. Experimental study of the position of sliding planes in a filling held by a retaining wall in the presence of local load on the surface. *Scientific Bulletin of Construction*. 2009; 90-95. (rus.).
9. SP 22.13330.2011. *Foundations of buildings and structures. Updated version of SNiP 2.02.01-83**. Moscow, Ministry of Regional Development of the Russian Federation. 2011; 155.
10. Florin V.A. *Fundamentals of soil mechanics*. Moscow, Gosstroyizdat, 1961; 2:543. (rus.).
11. Bogomolov A.N., Vikhareva O.A., Shiyan S.I. The question of the minimum values of the lateral pressure coefficient of soils. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2007; 7(26):6-10. (rus.).
12. Certificate of state registration of computer programmes No. 2009613499. *Stability (stress-strain state) / Bogomolov A.N. et al.; application dated 05/19/2009; reg. in the Register of computer programmes 30.06.2009; 1*.
13. Tsigareli Z.V. Experimental study of the pressure of a loose medium on retaining walls with a vertical back face and a horizontal filling surface. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 1965; 4:1-3. (rus.).
14. Rayuk V.F. Method of experimental determination of soil pressure on flexible retaining walls. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 1961; 2:8-10. (rus.).

15. Coulomb C. *Application des rigles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture*. Memories de savants strangers de L'Academlie des sciences de Paris, 1773.

16. Luchkovsky I.Ya. The influence of local loads on the nature of the distribution of soil pressure on enclosing structures. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 1991; 4:24-27. (rus.).

17. Luchkovsky I.Ya., Danko A.M. Distribution of soil pressure on retaining walls at “narrow” sites of surface loading with a strip load. *Municipal services of cities : scientific and technical collection*. 2010; 93:471-479. (rus.).

18. SP 43.13330.2012. *Structures of industrial enterprises. Updated version of SNIIP 2.09.03-85*. Approved by Order No. 620 of the Ministry of Regional Develop-

ment of the Russian Federation dated December 29, 2011 and put into effect on January 01, 2013.

19. Klein G.K. *Calculation of retaining walls*. Moscow, Higher school, 1964; 196. (rus.).

20. Lazebnik G.E. *Ground pressure on structures*. Kiev, PNVP. 2005; 243. (rus.).

21. Lazebnik G.E., Smirnov A.A., Ivanov D.G. Complex of devices and devices for measuring ground pressures. *Foundations, foundations and soil mechanics*. 1973; 2:7-12. (rus.).

22. Lazebnik G.E., Sivolap P.G. Complex devices for determining the modulus of deformation and the coefficient of lateral pressure of bulk solids “at rest”, Special construction works. *Proceedings of VNIIGS*. 1977; 45:35-41. (rus.).

Received August 28, 2024.

Adopted in revised form on September 20, 2024.

Approved for publication on September 25, 2024.

BIONOTES: **Aleksandr N. Bogomolov** — Doctor of Technical Sciences, Professor; JSC “NPEC O&F”; 15 Tele-
vizionnaya st., Novosibirsk, Russian Federation; banzaritcyn@mail.ru;

Oksana A. Bogomolova — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics and Natural Science Disciplines; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 28 Lenin Avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation; boazaritcyn@mail.ru;

Sergey A. Bogomolov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agricultural Construction and Expertise of Real Estate Objects; **Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy**; 49 Timiryazevskaya st., Moscow, 127434, Russian Federation; bogomolov@rgau-msha.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.