УДК 624.131.

**А.Н. Богомолов^{1,2}, М.О. Подлинев¹, О.А. Богомолова¹,
Д.В. Павлов¹, С.А. Богомолов¹, Т.К. Акчурин¹**

¹Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет,
Волгоград, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ,
УСТРАИВАЕМОЙ В СВЯЗНОМ ГРУНТЕ ВБЛИЗИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ
ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМЕНТА**

В статье приведены результаты отыскания рационального с точки зрения прочности и устойчивости контура подземной выработки на основе использования условия прочности Кулона. Проведены расчёты по отысканию таких сочетаний физико-механических свойств вмещающего массива грунта и глубины заложения выработки, при которых на ее контуре отсутствуют точки, в которых выполняется условие прочности. В работе проведен анализ напряженного состояния вмещающего массива грунта, графики и формулы, позволяющие определить параметры устойчивой выработки и системы «основание заглубленного ленточного фундамента–выработка».

Ключевые слова: подземные сооружения, фундамент, устойчивость, область пластических деформаций, подземная выработка, эллипс, астроида, круг.

**A.N. Bogomolov^{1,2}, M.O. Podlinev¹, O.A. Bogomolova¹,
D.V. Pavlov¹, S.A. Bogomolov¹, T.K. Akchurin¹**

¹Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering,
Volgograd, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**SUSTAINING THE HORIZONTAL OUTPUT, ARRANGED
IN COHESIVE SOILS NEAR CORE STRIP FOUNDATION**

This article presents the results of finding the rational from the standpoint of strength and stability of underground opening circuit, based on the use of Coulomb strength conditions. The estimates are based on the finding of such combinations of physical-mechanical properties of the massif of the ground and the depth of the elaboration, under which in its contour missing the point, where the condition is met strength. The author made an analysis of the stressed state of a massif of the soil, the graphs and formulas allowing defining the parameters of sustainable production.

Keywords: underground structures, foundations, stability region of plastic deformation, underground output, ellipse, astroid, circle.

Активное строительство подземных сооружений и освоение подземного пространства ставит задачу обеспечения устойчивости подземных выработок с учетом минимизации затрат на поддержание их в работоспособном состоянии в период эксплуатации.

Очевидно, что для выработок, срок эксплуатации которых мал, не рационально использовать различного рода обделки для их крепления, что существенно повысит себестоимость строительства.

Устойчивость подземных выработок зависит от формы их поперечного сечения, напряженно-деформированного состояния и физико-механических свойств вмещающего грунтового массива.

Для оценки степени устойчивости подземных выработок, устраиваемых в связных грунтах без крепления, можно использовать критерий длительной устойчивости грунтового сооружения [1; 2] и условие пластичности Кулона, которое может быть записано одним из следующих способов:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_2 &= (\sigma_1 + \sigma_2 + 2\sigma_{св}) \sin \varphi, \\ (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2 &= (\sigma_x + \sigma_z + 2\sigma_{св})^2 \sin^2 \varphi, \\ \operatorname{tg} \theta &= \operatorname{tg} \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где σ_1 , σ_2 и σ_x , σ_z , τ_{xz} – безразмерные (в долях γh) главные нормальные напряжения и компоненты напряжения в рассматриваемой точке; $\sigma_{св} = C(\gamma h \operatorname{tg} \varphi)^{-1}$ – приведенное давление связности; $C, \varphi, \gamma, \theta$ и h – соответственно удельное сцепление, угол внутреннего трения, объемный вес грунта, угол максимального отклонения и определяющий размер рассматриваемого объекта (например, высота откоса, глубина заложения фундамента, глубина заложения выработки, ее размер и т.д.).

Использование критерия [1, 2] и формул (1) позволяет определить некоторые соотношения между величинами, приведенными в комментарии к формулам (1), обеспечивающие отсутствие на контуре выработки очагов зарождения областей пластических деформаций, что и определяет устойчивость выработки.

Естественно, что по прошествии некоторого времени, возможно, произойдет изменение главного вектора нагрузок в сторону увеличения (что изменит напряженное состояние вмещающего массива) и его физико-механических свойств в сторону снижения. Тогда контур выработки перестанет быть устойчивым, и произойдет его частичное раз-

рушение, которое обычно сводится к тому, что потолочина выработки принимает форму свода естественного равновесия [3]. Но все это произойдет уже после истечения срока эксплуатации выработки.

Рассмотрим подземные выработки, сечения которых изображены на рис. 1.

Рис. 1. Формы поперечных сечений подземных выработок: выработка со сводом в виде полукруга (а); выработка в виде полуэллипса (б); выработка со сводом в виде половины астроида (в)

Будем считать, что физико-механические свойства вмещающего массива грунта принимают следующие значения: объемный вес $\gamma = 2 \text{ т/м}^3$; угол внутреннего трения $\varphi \in [5 \dots 45^\circ]$, а величина приведенного давления связности $\sigma_{св} \in [0,03 \dots 11,92]$ при условии, что глубина заложения выработки принимает поочередно три значения $H = 6; 10; 16 \text{ м}$. Высота и ширина выработки равны соответственно 4 и 2 м.

Необходимо определить такие сочетания физико-механических свойств вмещающего массива грунта и глубины заложения выработки, при которых на ее контуре отсутствуют точки, в которых выполняются условия (1). Все расчеты, в том числе по определению напряжений, выполнены при помощи компьютерной программы, разработанной в ВолГАСУ [4].

На рис. 2 в качестве примера приведены изолинии безразмерных (в долях γH) напряжений σ_x ; σ_z ; τ_{xz} в окрестностях выработки при условии, что $H = 10 \text{ м}$.

Рис. 2. Изолинии безразмерных (в долях γH) горизонтальных нормальных σ_x (а–б); вертикальных нормальных σ_z (г–д) и касательных τ_{xz} (ж–и) напряжений в окрестностях выработок при условии, что $H = 10$ м

Расчетами установлено, что с изменением глубины заложения выработки характер изолиний не меняется, а численные значения напряжений увеличиваются пропорционально глубине.

На рис. 3 приведены графические зависимости вида $\varphi = f(\sigma_{св})$ для выработок с потолочиной в виде полукруга, полуэллипса и половины астроида при различных глубинах заложения выработок.

Рис. 3. Графические зависимости вида $\varphi = f(\sigma_{св})$ для выработок с потолочиной в виде полукруга (а); в виде полуэллипса (б) и в виде половины астроида (в) при различных глубинах заложения выработок

Используя эти зависимости, можно решить две задачи: во-первых, определить, какой должна быть величина давления связности, чтобы на контуре выработки той или иной формы при заданных глубине заложения H и величине угла внутреннего трения φ вмещающего массива грунта отсутствовали точки, «перешедшие» в предельное состояние. Затем, зная, что $\sigma_{св} = C(\gamma h \tan \varphi)^{-1}$, можно определить минимальное значение удельного сцепления, каким должен обладать массив вмещающего грунта, чтобы устойчивость выработки была обеспечена. Вторая задача является обратной, т.е. по известным физико-механическим свойствам грунта можно определить максимально возможную глубину заложения выработки, на которой последняя будет устойчивой.

Оказалось, что все кривые, приведенные на рис. 3, могут быть с погрешностью, не превышающей 4 %, аппроксимированы зависимостью

$$\varphi = a_{\text{св}}^{b\sigma}, \quad (2)$$

где b – безразмерный коэффициент; a – коэффициент, имеющий размерность [град].

Численные значения коэффициентов a и b могут быть определены по графикам, приведенным на рис. 4.

Рис. 4. Графики для определения коэффициентов a (a) и b (b), входящих в формулу (2)

Очевидно, что по истечении некоторого времени, вероятно, произойдет изменение главного вектора нагрузок в сторону увеличения (что изменит напряженно-деформированное состояние массива грунта) и его физико-механических свойств в сторону уменьшения. В этом случае контур подземной выработки перестанет условиям устойчивости и произойдет его частичное разрушение, которое, как правило, сводится к тому, что потолочина выработки принимает форму свода естественного равновесия [3]. Однако всё это произойдет уже после окончания срока эксплуатации подземного сооружения.

Рассмотрим теперь систему «основание заглубленного ленточно-го фундамента – горизонтальная выработка», сечения которых изображены на рис. 5.

Будем считать, что физико-механические свойства массива грунта в данных условиях будут принимать следующие значения: объемный вес $\gamma = 2 \text{ т/м}^3$; угол внутреннего трения, выраженный

в радианах, $\varphi \in [0,175...0,524]$, а величина приведенного давления связности $\sigma_{св} \in [10...64]$ при условии, что глубина заложения выработки имеет постоянное значение $H = 6$ м. Высота и ширина выработки равны $B = h = 2$ м. Геометрические параметры фундамента мелкого заложения принимают следующие значения: $df = 2$ м – глубина заложения подошвы фундамента; $hf = 0,8$ м – высота фундамента; $bf = 4$ м – ширина фундамента. В качестве материала фундамента принимаем бетон класса В15. Равномерно распределённая нагрузка q выражена в долях γh .

Рис. 5. Формы поперечных сечений подземных выработок: выработка со сводом в виде полукруга (а); выработка в виде половины астроида (б); выработка со сводом в виде полуэллипса (в)

Надлежит определить такие сочетания физико-механических свойств массива грунта и такое максимальное величины равномерно распределённой нагрузки q , при которых на контуре подземной выработки будут отсутствовать точки, в которых выполняются условия (1).

Все расчеты, в том числе по определению напряжений, выполнены при помощи компьютерной программы [4], разработанной в ВолГАСУ.

На рис. 6 в качестве примера приведены изолинии безразмерных (в долях γH) напряжений σ_x ; σ_z ; τ_{xz} в окрестностях выработки при значении $q = 37,5$. На рис. 7 представлены графические зависимости вида $q = f(\varphi)$ для выработок с потолочиной в виде полукруга, полуэллипса и половины астроида при различных значениях величины равномерно распределённой нагрузки, полученные в результате вычислений аналогичных описанных выше.

Рис. 6. Изолинии безразмерных (в долях γH) горизонтальных нормальных σ_x (а-б); вертикальных нормальных σ_z (г-д) и касательных τ_{xz} (ж-и) напряжений в окрестностях выработок при значении $q=37,5$.

Воспользовавшись этими зависимостями, можно решить следующие важные задачи: во-первых, определить, какой может быть максимальная величина равномерно распределённой нагрузки, чтобы на контуре выработки той или иной формы при заданном значении давления связности и величины угла внутреннего трения ϕ массива грунта отсутствовали точки, «перешедшие» в предельное состояние; во-вторых, зная максимальное значение нагрузки, которая передаётся на фундамент и что $\sigma_{св} = C(\gamma h \tan \phi)^{-1}$, можно определить минимальное

значение удельного сцепления, каким должен обладать массив вмещающего грунта, чтобы устойчивость выработки была обеспечена. Также из полученных графиков видно, что при одинаковых условиях наибольшую нагрузку способен воспринимать контур, который имеет в своей потолочине половину астроида.

Наименьшее восприятие нагрузки соответствует контуру, потолочина которого образована полуокружностью. Вариант подземной выработки, поперечное сечение которой представлено контуром с кровлей в виде полуэллипса, является неким средним вариантом, между первыми двумя.

Рис. 7. Графические зависимости вида $q = f(\varphi)$ для выработок с потолочиной в виде полукруга (а); в виде половины астроида (б) и в виде полуэллипса (в) при различных значениях величины равномерно распределённой нагрузки q

Проанализировав все графики, приведенные на рис. 7, можно сделать вывод, что все кривые могут быть, с погрешностью, не превышающей 4 %, аппроксимированы зависимостью

$$q = m \cdot \varphi^n, \quad (3)$$

где m , n – безразмерные коэффициенты, φ – угол внутреннего трения грунта, выраженный в радианах,

Численные значения коэффициентов a и b могут быть определены по графикам, приведенным на рис. 8.

Рис. 8. Графики для определения коэффициентов m (а) и n (б), входящих в формулу (2)

В результате проведённых расчётов и анализа получена формула и построены графические зависимости, которые позволяют определять:

1. Численные значения физико-механических свойств вмещающего грунтового массива и глубины заложения выработки, обеспечивающих ее кратковременную устойчивость.

2. Численные значения физико-механических свойств грунтового массива и максимальную величину равномерно распределённой нагрузки на фундамент, при которых обеспечена кратковременная устойчивость подземных выработок в составе системы «основание заглубленного ленточного фундамента - горизонтальная выработка».

Библиографический список

1. Критерий безопасной эксплуатации и коэффициенты запаса оползнеопасных склонов / А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, С.И. Шиян, А.В. Соловьев // Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво. Присвяч. пам'яті д-ра техн. наук, проф. О. Г. Онищенко. – Полтава, 2010. – Вып. 3 (28). – С. 49–54.

2. Новый критерий длительной устойчивости однородных откосов на основе анализа напряженно-деформированного состояния / А.Н. Богомолов, М.Ю. Нестратов, А.В. Соловьев, С.И. Шиян // Вестник ВолГАСУ. Строительство и архитектура. – 2009. – № 14. – С. 5–12.

3. Определение предельной глубины заложения горизонтальных выработок различного поперечного сечения [Электронный ресурс] / А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, М.А. Шубин, Д.В. Павлов, М.О. Подлинев, А.В. Соловьев // Интернет-вестник ВолГАСУ. Политематическая. – 2013. – Вып. 2(27). – URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2\(27\)](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2(27)).

4. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) / А.Н. Богомолов [и др.] // Свидетельство о государственной государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613499 от 30 июня 2009 г.

References

1. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Solovyov A.V., Shiyan S.I. Kriterij bezopasnoj ekspluatatsii i koeffitsienty zapasa opolzneopasnykh sklonov [Criterion for safe operation and safety factors of landslide-prone slopes]. *Sbornik nauchnykh trudov «Galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo»*, Poltava, 2010, no. 3(28), pp. 49-54.

2. Bogomolov A.N., Nestratov M.Yu., Solovyov A.V., Shiyan S.I. Novyj kriterij dlitel'noj ustojchivosti odnorodnykh otkosov na osnove analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya [A new criterion for long-term stability of homogeneous slopes based on an analysis of the stress-strain state]. *Vestnik VolgGASU, Building and Architecture*, 2009. no. 14. pp. 5-12.

3. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Shubin M.A., Pavlov D.V., Podlinev M.O. Determination of the limiting depth of the horizontal workings of various cross section, *Internet Vestnik VolgGASU, Politehnicheskaya*, 2013, no. 2(27). available at: [http://vestnik.vgasu.ru/ attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2\(27\)](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2(27)).

4. Bogomolov A.N. A. Sustainability (Stress-strain state) / A. Bogomolov etc. *The Certificate on the state registration of the computer program* № 2009613499 from June 30, 2009

Об авторах

Богомолов Александр Николаевич (Волгоград, Россия) – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Гидротехнические и земляные сооружения» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета; e-mail: banzaritcyn@mail.ru

Подлинев Максим Олегович (Волгоград, Россия) – аспирант кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета.

Богомолова Оксана Александровна (Волгоград, Россия) – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета.

Павлов Дмитрий Вадимович (Волгоград, Россия) – аспирант кафедры «Гидротехнические и земляные сооружения» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета.

Богомолов Сергей Александрович (Волгоград, Россия) – студент группы ГСХ-1-2010 Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета.

Акчури Талгат Кадимович (Волгоград, Россия) – кандидат технических наук, профессор заведующий кафедрой «Строительные материалы и специальные технологии» Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета.

About the authors

Bogomolov Aleksandr Nikolaevich (Volgograd, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, vice rector of the science, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering; e-mail: banzaritcyn@mail.ru

Podlinev Maksim Olegovich (Volgograd, Russian Federation) – Postgraduate Student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering.

Bogomolova Oksana Aleksandrovna (Volgograd, Russian Federation) – Ph.D in Technical Sciences, Associate Professor of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering.

Pavlov Dmitriy Vadimovich (Volgograd, Russian Federation) – Postgraduate Student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering.

Bogomolov Sergey Aleksandrovich (Volgograd, Russia) – student of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

Akchurin Talgat Kadimovich (Volgograd, Russian Federation) – Ph.D in Technical Science, Professor the Head of Construction Materials and Special Technologies Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering.

Получено 09.04.2014