Богомолов А.Н., Абрамов Г.А., Богомолова О.А., Пристансков А.А., Ермаков О.В. Влияние горизонтальной подземной выработки, ориентированной параллельно фронту однородного откоса, на его устойчивость // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – № 1. – С. 82–92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.08

Bogomolov A.N., Abramov G.A., Bogomolova O.A., Pristanskov A.A., Ermakov O.V. The effect of horizontal underground tunnels oriented parallel to the front of the uniform slope on its stability. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2018. No. 1. Pp. 82-92. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.08

**ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
№ 1, 2018
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.08

УДК 624.137

ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ, ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНО ФРОНТУ ОДНОРОДНОГО ОТКОСА, НА ЕГО УСТОЙЧИВОСТЬ

**А.Н. Богомолов^{1,2}, Г.А. Абрамов², О.А. Богомолова²,
А.А. Пристансков², О.В. Ермаков²**

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 06 октября 2017
Принята: 10 января 2018
Опубликована: 30 марта 2018

Ключевые слова:

однородный откос, горизонтальная выработка, геометрические параметры выработки, напряженное состояние приоткосного массива, физико-механические свойства грунта, коэффициент запаса устойчивости, области пластических деформаций, устойчивость выработки

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты анализа численного моделирования трансформации напряженного состояния однородного откоса при его подработке горизонтальными выработками квадратного и круглого сечений, ориентированных параллельно фронту откоса. Расчеты выполнены при помощи компьютерных программ, в которых для анализа напряженного состояния грунтового массива формализован метод конечных элементов, решение смешанной задачи теории пластичности и теории упругости – для построения пластических областей (областей разрушения) – и методика построения наиболее вероятной поверхности скольжения, которая основана на анализе напряженного состояния объекта. Установлено, что подработка однородного откоса подземной выработкой, при всех прочих равных условиях, влечет за собой существенное перераспределение напряжений в приоткосном массиве и, как следствие, изменение положения и формы наиболее вероятной поверхности скольжения и величины коэффициента запаса устойчивости. Для рассмотренных в работе примеров разница величин коэффициентов запаса составляет от 13 до 25 %. На процесс перераспределения напряжений в грунтовой массе значительное влияние оказывают форма и размеры выработки, ее положение и ориентация в приоткосной области, геометрические параметры откоса. При расчете устойчивости подработанных откосов следует одновременно проводить проверку отсутствия зон разрушения на контуре выработок, чтобы обеспечить возможность их безопасной эксплуатации.

© ПНИПУ

© **Богомолов Александр Николаевич** – доктор технических наук, профессор, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.

Абрамов Генрих Артурович – аспирант, e-mail: z_genrih@mail.ru.

Богомолова Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: boazaritcyn@mail.ru.

Пристансков Андрей Александрович – аспирант, e-mail: grafaska@mail.ru.

Ермаков Олег Владимирович – докторант, e-mail: helgerm@bk.ru.

Alexander N. Bogomolov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.

Genrikh A. Abramov – Postgraduate Student, e-mail: z_genrih@mail.ru.

Oksana A. Bogomolova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: boazaritcyn@mail.ru.

Andrei A. Pristanskov – Postgraduate Student, e-mail: grafaska@mail.ru.

Oleg V. Ermakov – Doctoral Candidate, e-mail: helgerm@bk.ru.

THE INFLUENCE OF HORIZONTAL UNDERGROUND TUNNELS, ORIENTED PARALLEL TO THE FRONT OF THE UNIFORM SLOPE, ON ITS STABILITY

A.N. Bogomolov^{1, 2}, G.A. Abramov², O.A. Bogomolova²,
A.A. Pristanskov², O.V. Ermakov²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 06 October 2017

Accepted: 10 January 2018

Published: 30 March 2018

Keywords:

homogeneous slope, horizontal excavation, geometric parameters of the excavations, stress state of near-slope massif, physical and mechanical properties of soil, stability factor, regions of plastic deformations, stability of excavation

ABSTRACT

The paper presents the results of analyzing the numerical modeling of the stress state transformation of a homogeneous slope when it is undermined with horizontal workings having square and circular cross-sections oriented parallel to the slope' front. The calculations are performed using computer programs which formalize the finite element method to analyze the stress state of the soil massif, provide the solution of the mixed problem of the theory of plasticity and theory of elasticity to build plastic areas (areas of destruction) and the method of constructing the most probable sliding surface which is based on the analysis of the object's stress state. It is established that the undermining of a homogeneous slope in underground development, in all other equal conditions, leads to a significant redistribution of stresses in a near-slope massif and, as a consequence, changes the position and shape of the most probable sliding surface, as well as the value of the stability factor. The difference between the stability factors among the investigated samples ranges from 13 % to 25 %. The shape and size of the excavation, its location and orientation in the near-slope region, as well as slope's geometrical parameters, significantly affect the redistribution of stresses in the soil mass. When calculating the stability of undermined slopes it is necessary to check that there are no fracture zones at an excavation's contour in order to enable its safe operation.

© PNRPU

Известно, что проведение подземных строительных работ, связанных с образованием в грунтовых массивах полостей различного объема и формы (тоннели, подземные хранилища и т.д.), а также разработка полезных ископаемых закрытым способом существенным образом меняют напряженно-деформированное состояние (НДС) вмещающего грунта в окрестностях производства работ. Если такие работы производятся в грунтовых массивах, представляющих собой откосы и склоны, то данное обстоятельство непременно должно сказаться и на их общей устойчивости.

Анализу напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов, наведенного образованием полостей, посвящен целый ряд работ. Так, в работах [1–4] исследуются вопросы, связанные с изучением НДС откосов карьеров, подработанных подземными выработками (плоская постановка).

На рис. 1, 2 показаны изолинии напряжений в откосах, подработанных подземными выработками. Из рисунков отчетливо видно, что вокруг выработок поле напряжений существенно трансформируется, наблюдается значительная их концентрация.

В работах [5–7] рассмотрены вопросы, связанные с изучением закономерностей распределения напряжений вокруг подземных выработок различной формы и размеров. Установлено, что форма, размер выработки и глубина ее заложения существенным образом влияют на картину поля напряжений во вмещающем объеме скального грунта. Однако в этих работах не анализируется влияние отмеченного факта на устойчивость карьерных откосов и грунтовых массивов.

Рис. 1. Изолинии главных нормальных напряжений σ_1 (а, б) и σ_3 (в, г) до проведения горных работ (а, в) и после (б, г) соответственно [1]
Fig. 1. Isolines of main normal stresses σ_1 (a, b) and σ_3 (c, d) before mining operations (a, c) and after them (b, d), respectively (cited according to [1])

В работе [4] рассматривается вопрос об определении предельной высоты подработанного откоса подземными выработками при действии объемных сил. Здесь приведены формулы, позволяющие, по мнению авторов, определить предельную высоту подработанного карьерного откоса. Для использования этих формул «необходимо задаться физико-механическими свойствами пород с необходимым запасом устойчивости» [4].

$$H = \frac{2\cos\gamma_m \cos\beta_0 \left(c\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\alpha} - T(\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\varphi) \right)}{(\operatorname{tg}\alpha - \operatorname{tg}\varphi) \nu \gamma g (1 + \operatorname{tg}\varphi)}, \quad (1)$$

где $\gamma_m = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg}\beta_0}{\sin\delta}$; $\delta = \operatorname{arctg} \frac{x}{z}$; $x = -2c \operatorname{ctg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)$; $z = \nu \gamma g H_{90}$; $H_{90} = \frac{2c \operatorname{ctg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right)}{\nu \gamma g (1 + \operatorname{tg}\varphi)}$; α –

угол откоса; ν – коэффициент Пуассона; H – высота откоса, м; β – угол наклона элементарной площадки линии скольжения, град; c – сцепление пород в массиве, Па; φ – угол внутреннего трения, град; P – сила тяжести, Н; N – нормальная сила, Н; T – касательная сила, Н [4].

Однако в формулу (1) и в ее экспликацию не входят параметры выработки: ее размеры, форма, положение в породном массиве и т.д. В статье они не обсуждаются и не отражены в расчетной схеме (рис. 3, а). При этом вычисление величины предельной высоты устойчивого подработанного откоса выполнено без учета трансформации поля напряжений при возникновении подземной выработки.

В результате вычислений, выполненных авторами при помощи формулы (1), построены графики, позволяющие определить предельное значение высоты подработанного карьерного откоса, один из которых в качестве примера приведен на рис. 3, б.

Рис. 2. Распределение напряжений в прибортовом массиве пород до (а, б, в) и после (г, д, е) образования камеры: а, г – вертикальные σ_z ; б, д – горизонтальные σ_x ; в, е – касательные τ_{zx} [2]

Fig. 2. Stress distribution in adjacent rock mass before (a, b, c) and after (d, e, f) formation of a chamber: a, d – vertical σ_z ; b, e – horizontal σ_x ; c, f – shear τ_{zx} (cited according to [2])

Рис. 3. Схема действия сил по элементарной площадке (а); график зависимости высоты устойчивого откоса подработанного борта от его угла наклона при $c = 0,3 \text{ МПа}$, $\varphi = 28^\circ$, $\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$ без учета тектонических сил (б) [4]
 Fig. 3. The action of forces along the elementary area (a); the dependence graph between the height of a stable slope of the undermined board and its angle at $c = 0,3 \text{ МПа}$, $\varphi = 28^\circ$, $\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$ without regard to tectonic forces (b) (cited according to [4])

Анализ кривых, приведенных на рис. 3, б, показывает, что подработка откоса практически не оказывает влияния на величину коэффициента запаса устойчивости при условии, что $\alpha \geq 40^\circ$, так как кривые, соответствующие величинам коэффициента запаса устойчивости $K_y = 1; 1,1; 1,3$, практически сливаются при данных значениях угла α . В свою очередь при $K_y = 1$ и $\alpha = 50^\circ$ предельная высота подработанного откоса оказывается меньшей, чем при $K_y = 1,1$ и $K_y = 1,3$. Но очевидным является утверждение о том, что чем больше величина проектного (заданного) коэффициента запаса устойчивости откоса, тем меньше при всех прочих равных условиях должна быть его высота. Поэтому вывод, сделанный на основании анализа кривых, изображенных на рис. 3, б, не может не настораживать.

Для установления качественных и количественных данных о влиянии подземной выработки на общую устойчивость однородного подработанного откоса выполнены численные эксперименты при помощи компьютерных программ [8, 9].

На рис. 4 приведены размеры расчетной схемы однородного откоса, подработанного выработкой квадратного сечения, а также показана картина ее дискретизации на конечные элементы.

Рис. 4. Размеры расчетной схемы однородного откоса, подработанного выработкой квадратного сечения (а), дискретизация расчетной схемы на конечные элементы (б)
 Fig. 4. The size of the design scheme of a homogeneous slope undermined with an excavation having a square cross-section (a), sampling of design scheme into finite elements (b)

Угол откоса β при выполнении вычислений принят равным 45° , высота откоса H составляет 200 м, а физико-механические свойства грунта соответствуют средним значениям для аргиллитов. При этом численные значения удельного сцепления и угла внутреннего трения породы определены при помощи известных выражений, предложенных проф. В.В. Соколовским [10, 11], связывающих соответствующие сдвиговые характеристики со значениями пределов прочности при растяжении R_p и сжатии $R_{сж}$ для данной породы:

$$c^{э\kappa\beta} = 0,5(R_p R_{сж})^{0,5}, \quad (2)$$

$$\varphi^{э\kappa\beta} = \arcsin \cdot \left(\frac{R_{сж} - R_p}{R_p + R_{сж}} \right). \quad (3)$$

Величина коэффициента бокового давления определена выражением

$$\zeta_0 = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (4)$$

На рис. 5 изображены картины изолиний напряжений, действующих в окрестности выработки, и областей пластических деформаций, построенных на основе решения смешанной задачи теории упругости и теории пластичности грунта [12] при расстоянии d от выработки до подошвы откоса, равном $0,2H$.

Рис. 5. Картины изолиний горизонтальных σ_x (а), вертикальных σ_z (б), касательных τ_{zx} (в) напряжений и области пластических деформаций (г) в окрестности выработки квадратного сечения
Fig. 5. Isolines of horizontal σ_x (a), vertical σ_z (b), τ_{zx} tangential (c) stresses and plastic strains (d) around the excavation having a square section

Анализ картин напряжений показывает, что наличие подземной выработки в приоткосной области вносит существенную неоднородность в напряженное состояние массива – наблюдается значительная концентрация напряжений в окрестности выработки. Причем горизонтальные σ_x и касательные τ_{zx} напряжения концентрируются вокруг верхнего левого и нижнего правого углов выработки, вертикальные же напряжения σ_z – по ее боковым граням. Численные значения этих напряжений в несколько раз превышают напряжения, которые наблюдаются в соответствующих точках неподрезанного откоса. Области пластических деформаций (зоны разрушения) развиты вдоль верхней и правой граней сечения выработки и в окрестностях ее углов (кроме нижнего левого), которые, как видно из рис. 5, являются концентраторами напряжений. Кроме того, зоны разрушения возникли в области перехода откоса в подошву, что объясняет часто возникающее здесь явление «стреляния» породы.

Рис. 6. Следы наиболее вероятной поверхности скольжения (СНВПС) и зоны разрушения, построенные при расстоянии от выработки до подошвы откоса $d = 0,1H$ (а), $d = 0,2H$ (б), $d = 0,3H$ (в); кривые вида $K = f(d/H)$ (з) для квадратной (1) и круглой (2) формы поперечного сечения выработки
Fig. 6. Traces of the most probable sliding surface (SNVPS) and destruction zone built at a distance from the excavation to the slope's footing $d = 0,1 H$ (a), $d = 0,2 H$ (b), $d = 0,3 H$ (c); curves of the form $K = f(d/H)$ (d) for a square (1) and round (2) shape of the excavation's cross section

На рис. 6 изображены следы наиболее вероятной поверхности скольжения, построенные по методике [12], и кривые вида $K = f(d/H)$ при различном расстоянии от выработки до подошвы откоса. Анализ данных, приведенных на рис. 6, показывает, что при удалении выработки от подошвы откоса в глубь массива размеры и форма зон разрушения, обрамляющих выработку, практически не меняются, а зоны разрушения, расположенные в месте перехода откоса в подошву, уменьшаются в размерах. След наиболее вероятной поверхности скольжения представляет собой кривую, меняющую знак кривизны (вогнуто-выпуклая

кривая), причем это наиболее заметно при $d = 0,2H$. Объяснение этому – концентрация напряжений в окрестности выработки, ведь в случае неподработанного откоса знак кривизны этой кривой не меняется. Величина глобального коэффициента запаса устойчивости откоса K непостоянна и меняется при изменении значения d . В рассмотренном случае люфт составляет 13 % (рис. 6, з, кривая 1).

Рис. 7. Картины изолиний вертикальных σ_z (а), горизонтальных σ_x (б), касательных τ_{zx} (в) напряжений; области пластических деформаций и след наиболее вероятной поверхности скольжения (г) в однородном откосе с углом $\beta = 60^\circ$, ослабленного выработкой поперечного

круглого сечения, расположенной на расстоянии $d = 0,1H$ от подошвы откоса

Fig. 7. Isolines of the vertical σ_z (a), horizontal σ_x (b), τ_{zx} tangential (c) stresses; areas of plastic deformations and a track of the most probable sliding surface (g) in a uniform slope with an angle $\beta = 60^\circ$ which is weakened by an excavation having a transverse circular cross-section which is located at a distance $d = 0,1 H$ from the slope's footing

Аналогичные вычисления выполнены и для однородного откоса с углом $\beta = 60^\circ$, сложенного твердыми известняками, который ослаблен подземной выработкой круглого поперечного сечения, ориентированной также параллельно фронту откоса. Графическая интерпретация части полученных результатов приведена на рис. 7. Здесь, как и в предыдущем случае, наблюдаются концентрации напряжений вокруг выработки, а по мере удаления ее в глубь откосного массива происходит изменение величины глобального коэффициента запаса устойчивости, причем разница между его максимальным и минимальным значением составляет более 25 % (рис. 6, з, кривая 2).

Выводы

1. Подработка однородного откоса подземной выработкой, ориентированной параллельно его фронту, при всех прочих равных условиях влечет за собой существенное перераспределение напряжений в приоткосном массиве и, как следствие, изменение положения и формы наиболее вероятной поверхности скольжения и величины коэффициента запаса устойчивости K , которое для рассмотренных случаев составляет 13 % и 25 % соответственно.

2. На процесс перераспределения напряжений в массиве значительное влияние оказывают форма и размеры выработки, ее положение в приоткосной области, геометрические параметры откоса.

3. При расчете устойчивости подработанных откосов следует одновременно проводить проверку отсутствия зон разрушения на контуре выработок, чтобы обеспечить возможность их безопасной эксплуатации.

Библиографический список

1. Мажитов А.М. Оценка влияния подземных горных работ на напряженно-деформированное состояние прикарьерного массива месторождения Камаганское // Актуальные проблемы горного дела. – 2016. – № 1. – С. 30–36.

2. Абдылдаев Э.К., Салимова Г.Е. Напряженно-деформированное состояние прибортового массива в условиях подработки камерами // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. Сер.: Науки о земле. – 2008. – Т. 8, № 3. – С. 157–159.

3. Распределение напряжений в однородном изотропном откосе, ослабленном горизонтальной круглой выработкой, расположенной на уровне его подошвы / А.Н. Богомолов, Г.А. Абрамов, О.А. Богомолова, А.А. Пристансков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 15–26. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.02

4. Кузнецова Т.С., Мещеряков Ю.Б., Некерова Т.В. Предельная высота подработанного откоса подземными выработками при действии объемных сил // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2009. – № 3. – С. 5–8.

5. Анализ напряженного состояния грунтового массива, вмещающего подземные пространства различной конфигурации [Электронный ресурс] / А.Н. Богомолов, С.В. Кузнецова, В.Н. Синяков, М.А. Шубин, В.П. Дыба, Г.М. Скибин, Ю.И. Олянский, О.А. Богомолова, А.Н. Ушаков // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительная информатика. – 2012. – Вып. 8 (24). – URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2012_8\(24\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2012_8(24).pdf) (дата обращения: 10.08.2017).

6. Определение предельной глубины заложения горизонтальных выработок различного поперечного сечения [Электронный ресурс] / А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, М.А. Шубин, Д.В. Павлов, М.В. Подлинев, А.В. Соловьев // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2013. – Вып. 2(27). – URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2(27).pdf) (дата обращения: 10.08.2017).

7. Пример определения безопасной глубины заложения горизонтальной выработки сложного сечения / А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, С.Л. Шелудько, А.В. Соловьев // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. – 2013. – Вып. 33 (52). – С. 6–12.

8. ФЕА: св-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2015617889 / А.Н. Богомолов [и др.]. Зарег. 23 июля 2015 г.
9. Устойчивость (напряженно-деформированное состояние): св-во о гос. рег. программы для ЭВМ № 2009613499 / А.Н. Богомолов [и др.]. Зарег. 30 июня 2009 г.
10. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Физ.-мат. лит., 1960. – 121 с.
11. Соколовский В.В. Теория пластичности. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
12. Богомолов А.Н., Богомолова О.А. Сопоставление результатов численных и физических экспериментов по определению несущей способности однородного основания штампа // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 6. – С. 7–11.

References

1. Mazhitov A.M. Otsenka vliianiia podzemnykh gornykh работ na napriazhenno-deformirovannoe sostoianie prikar'ernogo massiva mestorozhdeniia Kamaganskoe [Assessment of the impact of underground mining on the stress-strain state pricerange array field Kamaganskoe]. *Aktual'nye problemy gornogo dela*, 2016, no. 1, pp. 30-36.
2. Abdyl'daev E.K., Salimova G.E. Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie priborto-vogo massiva v usloviakh podrabotki kamerami [The stress-strain state priortovogo array in terms of undermining cameras]. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavianskogo universiteta. Nauki o zemle*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 157-159.
3. Bogomolov A.N., Abramov G.A., Bogomolova O.A., Pristanskov A.A. Raspredelenie napriazhenii v odnorodnom izotropnom otkose, oslablennom gorizonta'noi krugloj vy-rabotkoi, raspolozhennoi na urovne ego podoshvy [Distribution of stresses in a homogeneous isotropic slope weakened by a horizontal round working at a level of its base]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 15–26. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.2.02.
4. Kuznetsova T.S., Meshcheriakov Iu.B., Nekerova T.V. Predel'naia vysota podrabotannogo otkosa podzemnymi vyrabotkami pri deistvii ob»emnykh sil [The maximum height of the undermined slope underground workings under the action of body forces]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*, 2009, no. 3, pp. 5-8.
5. Bogomolov A.N., Kuznetsova S.V., Siniakov V.N., Shubin M.A., Dyba V.P., Skibin G.M., Olianskii Iu.I., Bogomolova O.A., Ushakov A.N. Analiz napriazhennogo sostoianiia gruntovogo massiva, vmeshchaiushchego podzemnye pro-stranstva razlichnoi konfiguratsii [Analysis of the stress state of the soil massif, enclosing the underground space of various configurations]. *Internet-vestnik VolgGASU. Stroitel'naia informatika*, 2012, iss. 8 (24). available at: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2012_8\(24\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/2_Bogomolov-2012_8(24).pdf) (accessed 10 August 2017).
6. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Shubin M.A., Pavlov D.V., Podlinev M.V., Solov'ev A.V. Opredelenie predel'noi glubiny zalozeniia gorizonta'nykh vyrabotok razlichnogo poperechnogo secheniia [Determining the limit depth of horizontal workings with different cross-sections]. *Internet-vestnik VolgGASU. Politematicheskai*, 2013, iss. 2(27). available at: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/BogomolovBogomolovaShubinPavlovPodlinevSolovev-2013_2(27).pdf) (accessed 10 August 2017).

7. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Shelud'ko S.L., Solov'ev A.V. Primer opredeleniia bezopasnoi glubiny zalozheniia gorizonta'noi vyrabotki slozhnogo secheniia [An example of definition of safe depth, the horizontal production of complex cross-section]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitecturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, iss. 33(52), pp. 6-12.

8. Bogomolov A.N. FEA. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2015617889*.

9. Bogomolov A.N. Ustoichivost' (Napriazhenno-deformirovannoe sostoianie) [Stability (Stress-strain state)]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2009613499*.

10. Sokolovskii V.V. Statika sypuchei sredy [Static granular medium]. 3rd ed. Moscow, Fiz.-mat. lit., 1960, 121 p.

11. Sokolovskii V.V. Teoriia plastichnosti [Theory of plasticity]. 3rd ed. Moscow, Vysshaia Shkola, 1969, 608 p.

12. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A. Sopostavlenie rezul'tatov chislennykh i fiziche-skikh eksperimentov po opredeleniiu nesushchei sposobnosti odnorodnogo osnovaniia shtampa [Comparison of results of numerical and physical experiments to determine the bearing capacity of uniform base of the stamp]. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2015, no. 6, pp. 7-11.