

Богомолов А.Н., Богомолова О.А., Подтелков В.В., Богдан А.В., Либурацков Е.М. Зависимость величины предельно допустимой нагрузки от физико-механических свойств однородного основания штампа в условиях смешанной задачи // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 115–127. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.10

Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Podtelkov V.V., Bogdan A.V., Liburatskov E.M. Dependence of maximum permissible load on physical-mechanical properties of stamp homogeneous base in mixed problem. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2017. Vol. 8, no. 1. Pp. 115-127. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.10



ВЕСТНИК ПНИПУ.
СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
Т. 8, № 1, 2017
PNRPU BULLETIN.
CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE
<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.10

УДК 624.131

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКИ ОТ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДНОРОДНОГО ОСНОВАНИЯ ШТАМПА В УСЛОВИЯХ СМЕШАННОЙ ЗАДАЧИ

А.Н. Богомолов¹, О.А. Богомолова¹, В.В. Подтелков^{1, 2},
А.В. Богдан¹, Е.М. Либурацков¹

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

²Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 30 декабря 2016
Принята: 10 января 2017
Опубликована: 30 марта 2017

Ключевые слова:

смешанная задача теории упругости и теории пластичности грунта, физико-механические свойства, коэффициент бокового давления, несущая способность основания, области пластических деформаций

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты численных экспериментов по изучению влияния на несущую способность однородного грунтового основания жесткого штампа физико-механических свойств слагающего грунта: угла внутреннего трения, давления связности, удельного сцепления и коэффициента бокового давления. Вычисления проведены для условий лабораторных экспериментов по определению несущей способности оснований жестких штампов выполненных независимо от авторов другими исследователями.

В результате проведенных испытаний установлено, что величина предельно допустимой нагрузки на однородное основание штампа, вычисленная для условий смешанной задачи, существенным образом зависит от численных значений физико-механических свойств слагающего грунта: удельного сцепления, давления связности, угла внутреннего трения и коэффициента бокового давления. Для рассмотренных примеров изменение величины коэффициента бокового давления от 0,4 до 0,7 влечет за собой увеличение (при всех прочих равных условиях) величины интенсивности предельно допустимой нагрузки в 3,5–4,5 раза, изменение угла внутреннего трения – примерно в 4,5 раза; рост величины $\sigma_{св}$ – примерно в 2,5 раза; рост численного значения удельного сцепления от 0 до 5 МПа увеличивает предельное значение $q_{нд}$ в 12–16 раз. Учет влияния толщины и жесткости штампа может существенным образом скорректировать полученные результаты.

© ПНИПУ

© Богомолов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.
Богомолова Оксана Александровна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: boazaritcyn@mail.ru.
Подтелков Василий Владимирович – кандидат технических наук, профессор, e-mail: vvp2000@mail.ru.
Богдан Андрей Владимирович – соискатель, e-mail: bogdan1577@mail.ru.
Либурацков Евгений Михайлович – соискатель, e-mail: vgasu@mail.ru.

Aleksandr N. Bogomolov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: banzaritcyn@mail.ru.
Oksana A. Bogomolova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: boazaritcyn@mail.ru.
Vasilii V. Podtelkov – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, e-mail: vvp2000@mail.ru.
Andrei V. Bogdan – Aspirant, e-mail: bogdan1577@mail.ru.
Evgenii M. Liburatskov – Aspirant, e-mail: vgasu@mail.ru.

DEPENDENCE OF MAXIMUM PERMISSIBLE LOAD ON PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF STAMP HOMOGENEOUS BASE IN MIXED PROBLEM

**A.N. Bogomolov¹, O.A. Bogomolova¹, V.V. Podtelkov^{1,2},
A.V. Bogdan¹, E.M. Liburatskov¹**

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

²Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 30 December 2016

Accepted: 10 January 2017

Published: 30 March 2017

Keywords:

mixed problem of the theory of elasticity and theory of plasticity of soil, physical-mechanical properties, coefficient of lateral pressure, bearing capacity of base, strain ranges

ABSTRACT

The article presents the results of numerical experiments to study how physico-mechanical properties of components of the soil affect the bearing capacity of a homogeneous rigid stamp, such as the angle of internal friction, pressure, cohesion, adhesion, specific gravity, and coefficient of lateral pressure. Calculations were carried out for the conditions of laboratory experiments to determine the bearing capacity of rigid stamp bases; the calculations were carried out independently by other researchers.

As a result of researches it is established that the magnitude of the maximum permissible load on a homogeneous base of the stamp, calculated for the conditions of the mixed problem, essentially depends on the numerical values of physico-mechanical properties of components of soil: specific clutch, pressure connectivity, the angle of internal friction and coefficient of lateral pressure. For the conditions dealt with examples of the change in the value of coefficient of lateral pressure of 0.4 to 0.7 leads to an increase (with all other conditions being equal) the magnitude of the intensity of the maximum permissible load-ing 3.5–4.5 times; the change in the angle of internal friction about 4.5 times; the growth in the value σ_{sv} – approximately 2.5-fold increase in the numerical value of specific clutch from 0 to 5mpa increases the marginal value q_{pd} in 12–16 times. Considering the effect of thickness and hardness of the stamp can in a significant way to correct the results obtained.

© PNRPU

Известно, что величина несущей способности однородного основания зависит от физико-механических свойств слагающего грунта. Поставлена задача провести численные эксперименты по определению величины предельно допустимой нагрузки на однородное основание жесткого штампа для условий смешанной задачи теории упругости и теории пластичности в зависимости от численных значений физико-механических свойств слагающего грунта.

Все вычисления выполнены при помощи компьютерных программ¹, в которых формализовано приближенное аналитическое решение смешанной задачи [1–6] в постановке, сформулированной сначала Д.Е. Польшиным [7, 8], а затем М.И. Горбуновым-Посадовым [9]. При этом численные значения напряжений в активной зоне фундамента при условии их упругого распределения находятся с помощью методов теории функций комплексного переменного [10–13] или методом конечных элементов [14].

Для большей достоверности получаемых результатов в качестве исходных данных при проведении численного моделирования использованы сведения об экспериментальных исследованиях, выполненных сторонними авторами [15, 16]. Отметим, что величины предельно допустимых нагрузок, полученные при проведении модельных экспериментов [15, 16], с по-

¹ Устойчивость (напряженно-деформированное состояние): свид-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2009612297 / А.Н. Богомолов [и др.]; заявл. 19.05.2009; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009; ФЕА: свид-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2015614310 / А.Н. Богомолов [и др.]; заявл. 25.05.2015; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 23.07.2015; МТФКП: свид-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2015615389 / А.Н. Богомолов [и др.]; заявл. 22.06.2015; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 28.09.2015.

грешностью 5–40 % совпадают с аналогичными величинами, полученными при помощи расчетов по программам² для тех же условий, а формы пластических областей практически совпадают [1, 6].

При проведении численного эксперимента считаем, что величина предельно допустимой нагрузки на основание достигается в тот момент, когда происходит смыкание областей пластических деформаций (ОПД) под фундаментом.

Приведенное давление связности, определяемое по выражению

$$\sigma_{св} = c(\gamma b \tan \varphi)^{-1}, \quad (1)$$

где c , γ , φ – удельное сцепление, объемный вес, угол внутреннего трения грунта основания соответственно, b – ширина штампа, является универсальной безразмерной величиной, зависящей от физико-механических свойств грунта и ширины фундамента. В связи с этим оценка его влияния на процесс образования и развития ОПД в условиях смешанной задачи представляет интерес.

На рис. 1 и 2 приведены изображения областей пластических деформаций в активной зоне фундамента в момент достижения интенсивностью равномерно распределенной нагрузки предельно допустимого значения – области пластических деформаций сомкнулись.

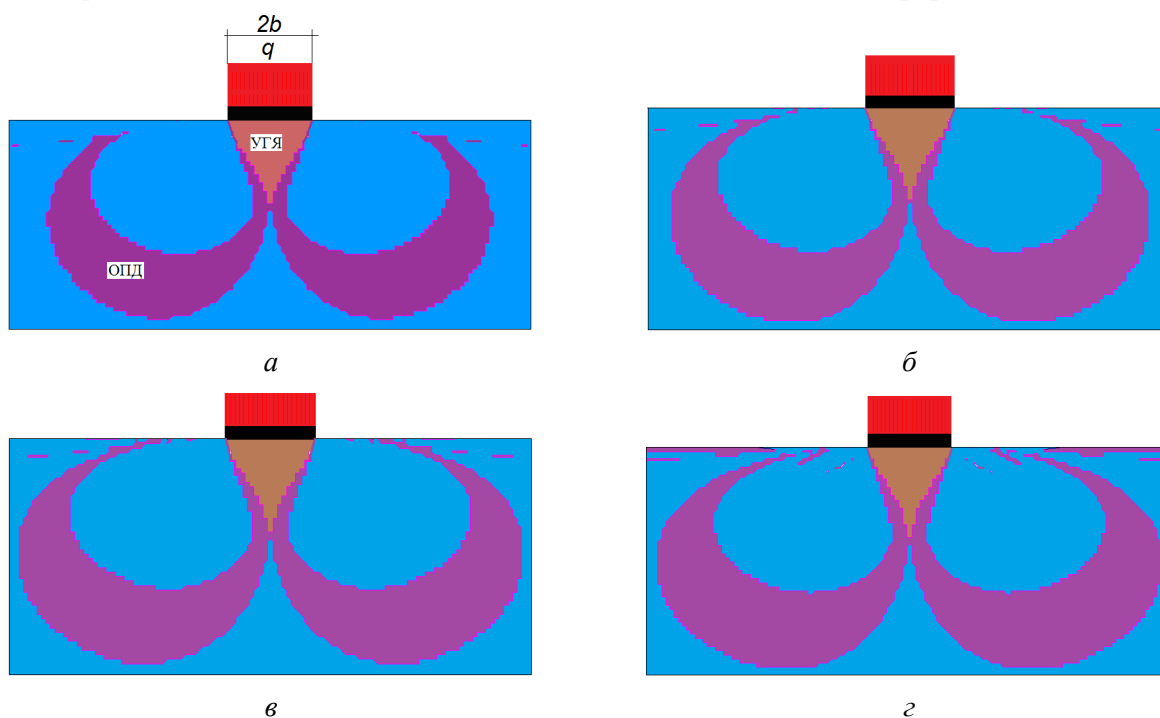


Рис. 1. Области пластических деформаций в момент достижения предельно допустимой нагрузки, построенные на основании «смешанного» решения, для условий работы [15], при $\varphi = 35^\circ$, $\xi_0 = 0,42$: а – $\sigma_{св} = 0$; б – $\sigma_{св} = 1$, в – $\sigma_{св} = 2$; г – $\sigma_{св} = 5$

Fig. 1. Strain ranges at the moment of reaching the maximum permissible load built on the basis of a “mixed” solution for the publication conditions of [15] when $\varphi = 35^\circ$, $\xi_0 = 0,42$, $\sigma_{sv} = 0$; 1; 2; 5 for a, b, c and d correspondingly

² Устойчивость (напряженно-деформированное состояние): свид-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2009612297 / А.Н. Богомолов [и др.]; заявл. 19.05.2009; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009; FEA: свид-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2015614310 / А.Н. Богомолов [и др.]; заявл. 25.05.2015; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 23.07.2015; МТФКП: свид-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2015615389 / А.Н. Богомолов [и др.]; заявл. 22.06.2015; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 28.09.2015.

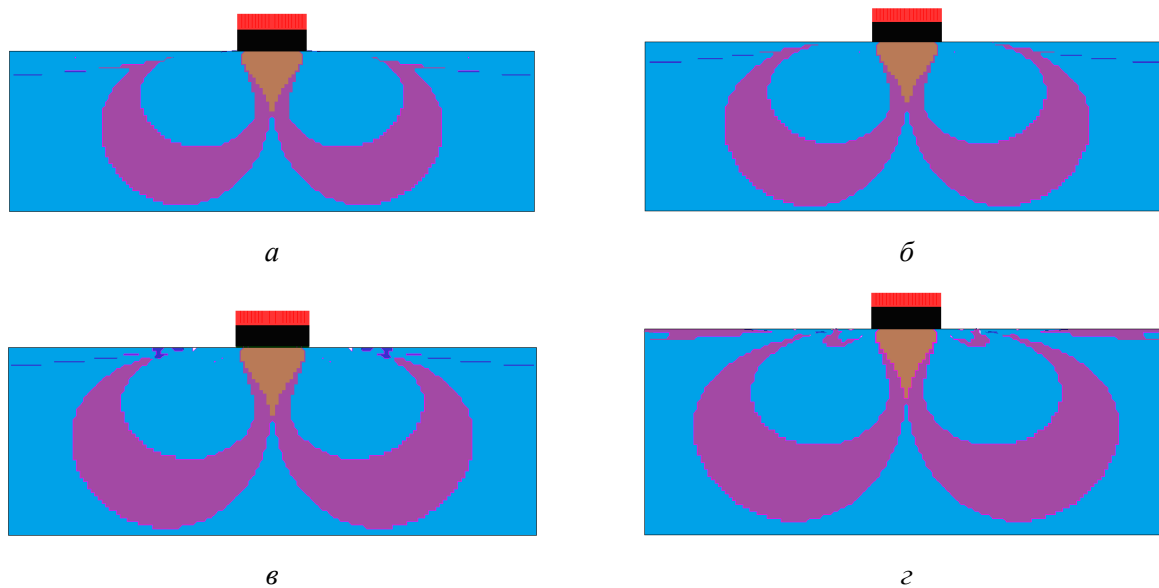


Рис. 2. Области пластических деформаций в момент достижения предельно допустимой нагрузки, построенные на основании «смешанного» решения, для условий работы [16] при $\varphi = 40^\circ$, $\xi_0 = 0,42$: $a - \sigma_{св} = 0$; $b - \sigma_{св} = 1$; $c - \sigma_{св} = 2$; $d - \sigma_{св} = 5$

Fig. 2. Strain ranges at the moment of reaching the maximum permissible load built on the basis of a “mixed” solution for the publication conditions of [16] when $\varphi = 40^\circ$, $\xi_0 = 0,42$ and $\sigma_{sv} = 0; 1, 2; 5$ for a, b, c and d correspondingly

Анализ рисунков показывает, что для условий, описанных в работах [15, 16], в момент смыкания ОПД имеют серпообразную форму, а между ними под штампом образуется жесткое ядро в виде равнобедренного треугольника, боковые стороны которого слегка вогнуты.

В обоих случаях справа и слева от ОПД в верхней части основания четко видны следы поверхностей сдвига.

В результате анализа и обработки расчетных данных построены графические зависимости вида $q_{пд}/\gamma b = f(\sigma_{св})$, которые с точностью 99 % аппроксимируются уравнениями прямых линий (рис. 3).

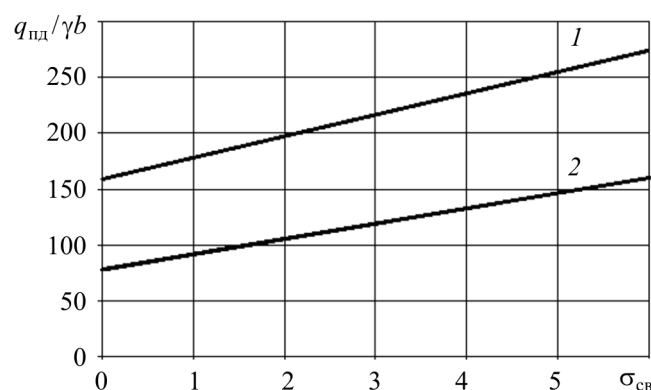


Рис. 3. Графические зависимости вида $q_{пд}/\gamma b = f(\sigma_{св})$: 1 – построенные для условий работы [15]; 2 – построенные для условий работы [16]

Fig. 3. The characteristic curves for the dependence of $q_{pd} / \gamma b = f(\sigma_{sv})$ built for the conditions of work [15] – 1; and [16] – 2

На рис. 4 и 5 приведены изображения пластических областей, построенные для тех же расчетных схем, соответствующих условиям, описанным в работах [15, 16], с одной лишь разницей, заключающейся в том, что величина угла внутреннего трения поочередно принимает значения 40, 35, 30, 25, 20, 15°.

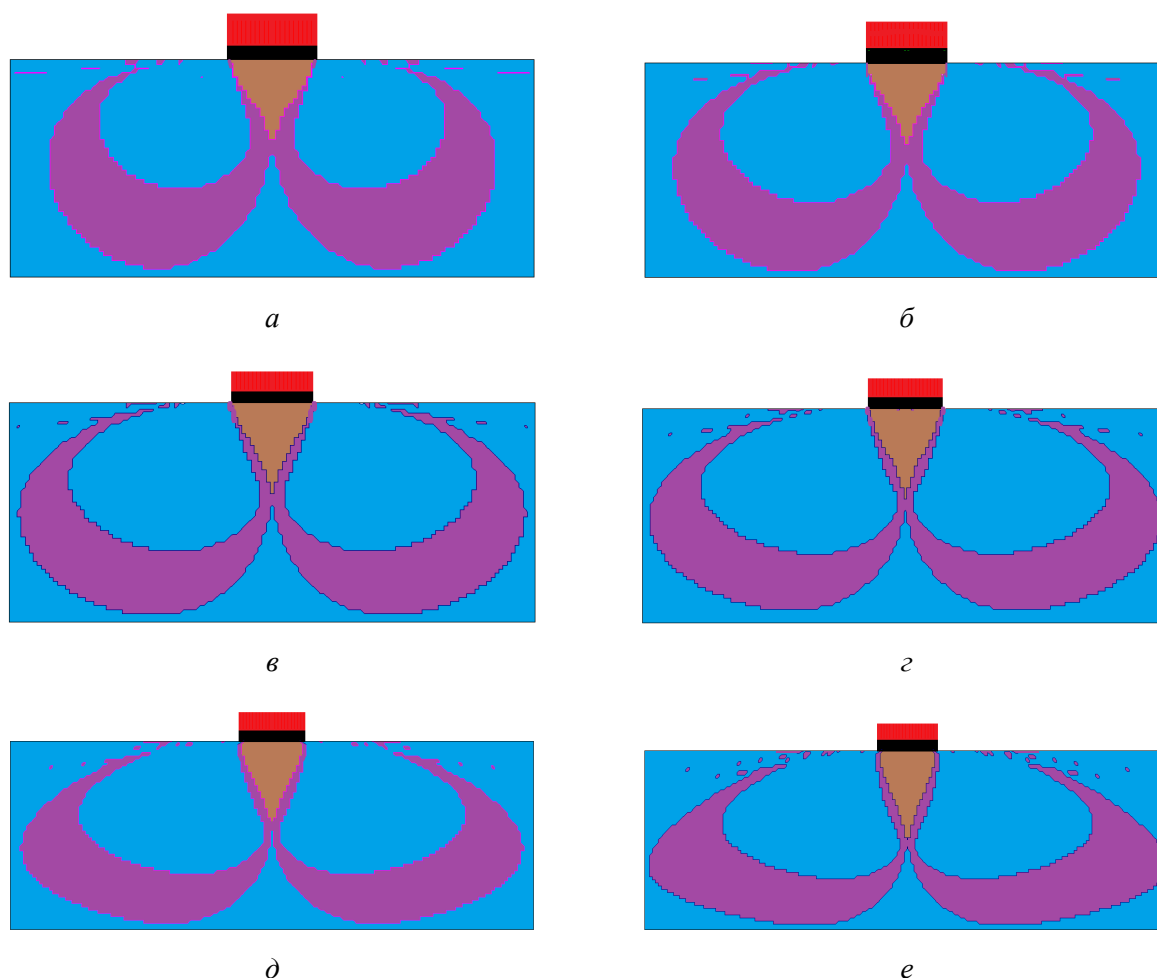


Рис. 4. Области пластических деформаций в момент достижения предельно допустимой нагрузки, построенные на основании «смешанного» решения, для условий работы [15] при $\sigma_{св} = 1,861$; $\xi_0 = 0,42$:

$a - \varphi = 40^\circ$; $b - \varphi = 35^\circ$; $c - \varphi = 30^\circ$; $d - \varphi = 25^\circ$; $e - \varphi = 20^\circ$; $f - \varphi = 15^\circ$

Fig. 4. Strain ranges at the moment of reaching the maximum permissible load built on the basis of a “mixed” solution for the publication conditions of [15] when $\sigma_{sv} = 1,861$; $\xi_0 = 0,42$ and $\varphi = 40, 35, 30, 25, 20, 15^\circ - a, b, c, d, e$ and f correspondingly

Как и в предыдущем случае, отметим, что пластические области имеют серпообразную форму, но не замыкаются на штампе, а постепенно расходятся в стороны от него. Следы поверхностного выпора также четко видны на всех рисунках, зато кривые зависимостей вида $q_{пд}/\gamma b = f(\varphi)$ уже не являются линейными (рис. 6), а с точностью 97–99 % аппроксимируются выражениями вида

$$q_{пд} / \gamma b = a e^{-n\varphi}, \quad (2)$$

где a и n – действительные коэффициенты, причем коэффициент a – безразмерный, а коэффициент n имеет размерность (град^{-1}).

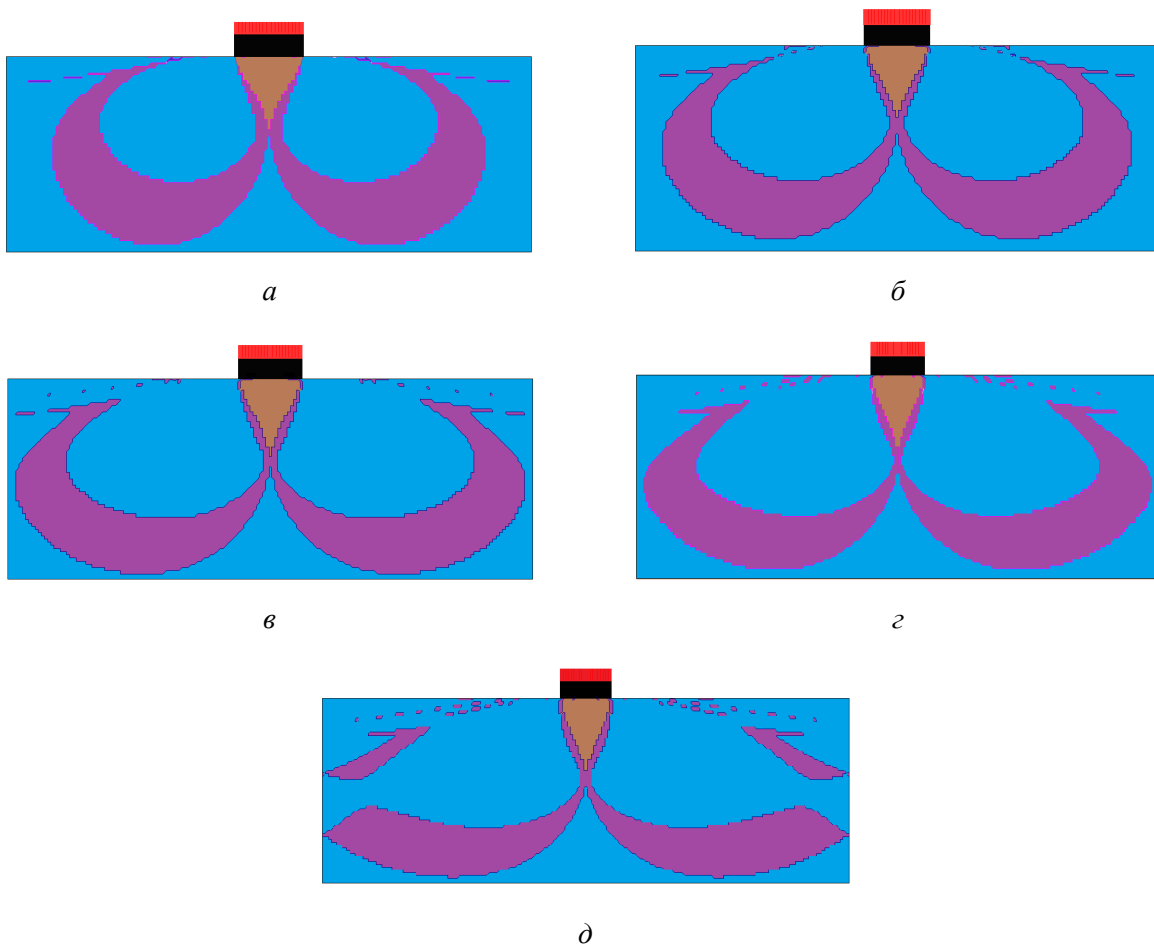


Рис. 5. Области пластических деформаций в момент достижения предельно допустимой нагрузки, построенные на основании «смешанного» решения, для условий работы [16] при $\xi_0 = 0,42$; $\sigma_{св} = 1,55$: а – $\varphi = 35^\circ$; б – $\varphi = 30^\circ$; в – $\varphi = 25^\circ$; г – $\varphi = 20^\circ$; д – $\varphi = 15^\circ$

Fig. 5. Strain ranges at the moment of reaching the maximum permissible load built on the basis of a “mixed” solution for the publication conditions of [16] when $\xi_0 = 0,42$; $\sigma_{sv} = 1,55$, $\varphi = 35, 30, 25, 20$ and 15° – a, b, c, d and e correspondingly

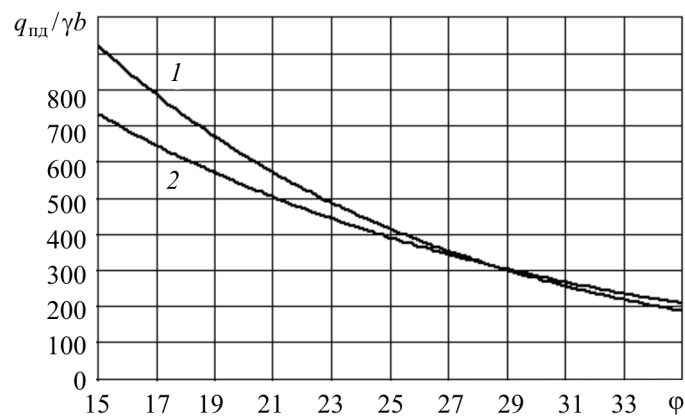


Рис. 6. Графические зависимости вида $q_{нд} / \gamma b = f(\varphi)$: 1 – построенные для условий работы [15]; 2 – построенные для условий работы [16]

Fig. 6. The characteristic curves for the dependence of $q_{pd} / \gamma b = f(\varphi)$ built for the conditions of work [15] – 1 and [16] – 2

Анализ кривых на рис. 6 говорит о, казалось бы на первый взгляд, странном результате: при увеличении численного значения угла внутреннего трения φ величина предельно допустимой нагрузки уменьшается. Однако это обстоятельство легко объяснимо: увеличение численного значения φ при неизменных значениях остальных величин, входящих в выражение (1), влечет за собой уменьшение численного значения величины $\sigma_{св}$, что, как видно на рис. 3, снижает величину интенсивности предельно допустимой нагрузки.

Следующей величиной, влияние которой на несущую способность основания было оценено, является коэффициент бокового давления ξ_0 . На рис. 7 и 8 изображены области пластических деформаций, образующиеся в активной зоне штампа, в момент достижения интенсивностью внешнего воздействия предельно допустимого значения при различных величинах коэффициента бокового давления, которому поочередно присваивались значения $\xi_0 = 0,4; 0,5; 0,6; 0,65$.

Как во всех предыдущих случаях, области пластических деформаций имеют серповидную форму, отмечаются следы поверхностей неглубокого выпора. При возрастании численного значения коэффициента бокового давления размеры ОПД увеличиваются, они размыкаются и уходят вглубь по обе стороны от штампа.

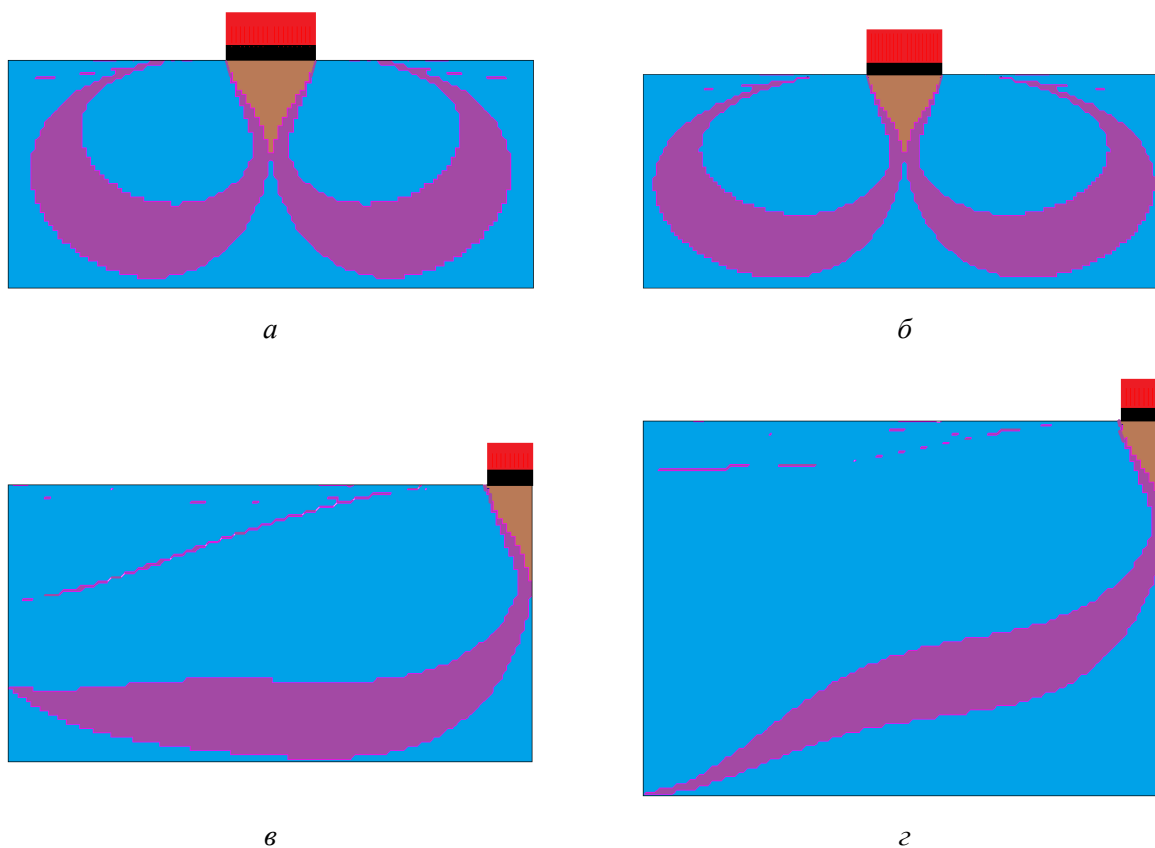


Рис. 7. Области пластических деформаций в момент достижения предельно допустимой нагрузки, построенные на основании «смешанного» решения, для условий работы [15]

при $\varphi = 35^\circ$, $\sigma_{св} = 1,861$: а – $\xi_0 = 0,4$; б – $\xi_0 = 0,5$; в – $\xi_0 = 0,6$; г – $\xi_0 = 0,65$

Fig. 7. Strain ranges at the moment of reaching the maximum permissible load built on the basis of a “mixed” solution for the publication conditions of [15]

when $\varphi = 35^\circ$, $\sigma_{sv} = 1,861$: $\xi_0 = 0,4; 0,5; 0,6; 0,65$ – a, b, c and d correspondingly

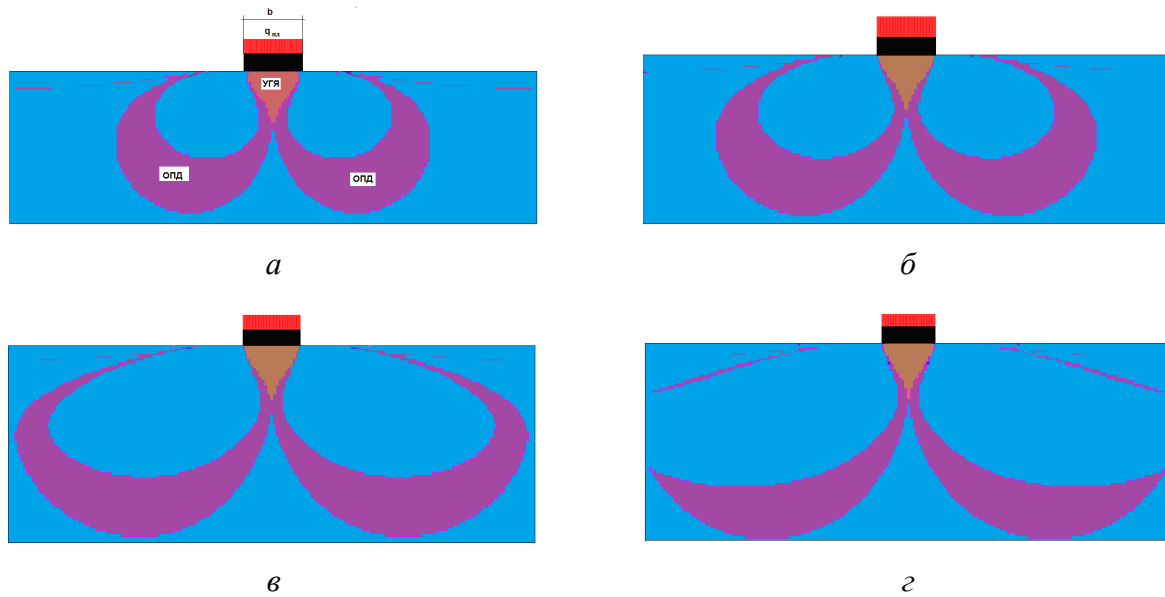


Рис. 8. Области пластических деформаций в момент достижения предельно допустимой нагрузки, построенные на основании «смешанного» решения, для условий работы [16] при $\varphi = 40^\circ$, $\sigma_{св} = 1,54$: а – $\xi_0 = 0,42$; б – $\xi_0 = 0,5$; в – $\xi_0 = 0,6$; г – $\xi_0 = 0,65$
 Fig. 8. Strain ranges at the moment of reaching the maximum permissible load built on the basis of a “mixed” solution for the publication conditions of [16] when $\varphi = 40^\circ$, $\sigma_{sv} = 1,54$: $\xi_0 = 0,42$; 0,5; 0,6; 0,65 – a, b, c and d correspondingly

На рис. 9 приведены кривые вида $q_{пл}/\gamma b = f(\xi_0)$, которые со 100%-й достоверностью аппроксимируются выражением

$$q_{пл}/\gamma b = m\xi_0^k, \quad (3)$$

где m и k – безразмерные коэффициенты.

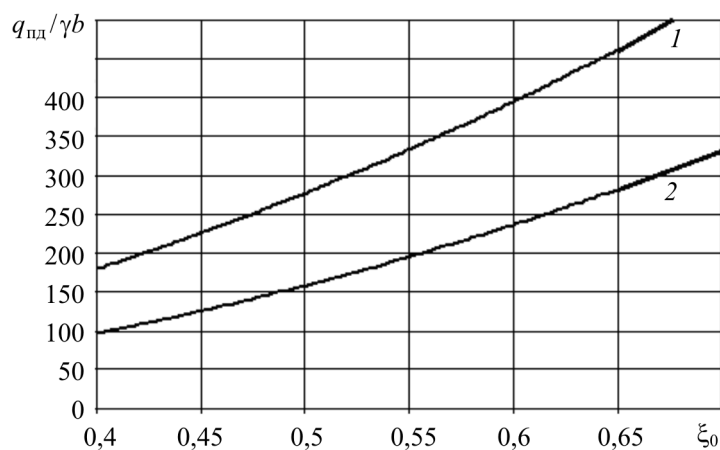


Рис. 9. Графические зависимости вида $q_{пл}/\gamma b = f(\xi_0)$:
 1 – построенные для условий работы [15]; 2 – построенные для условий работы [16]
 Fig. 9. The characteristic curves for the dependence of $q_{pd}/\gamma b = f(\xi_0)$ built for the conditions of [15] – 1 and [16] – 2

Оценка влияния величины удельного сцепления на величину интенсивности предельно допустимой нагрузки на основание штампа в условиях смешанной задачи выполнена на основе данных, приведенных в работе [17], при условии постоянства угла внутреннего трения $\varphi = 30^\circ$ и абсолютной гибкости штампа.

На рис. 10 приведена часть изображений ОПД, построенных в результате численного эксперимента. Эти области обладают особенностями, отмеченными при оценке влияния на величину $q_{\text{пд}}$ численных значений давления связности $\sigma_{\text{св}}$ и коэффициента бокового давления ξ_0 .

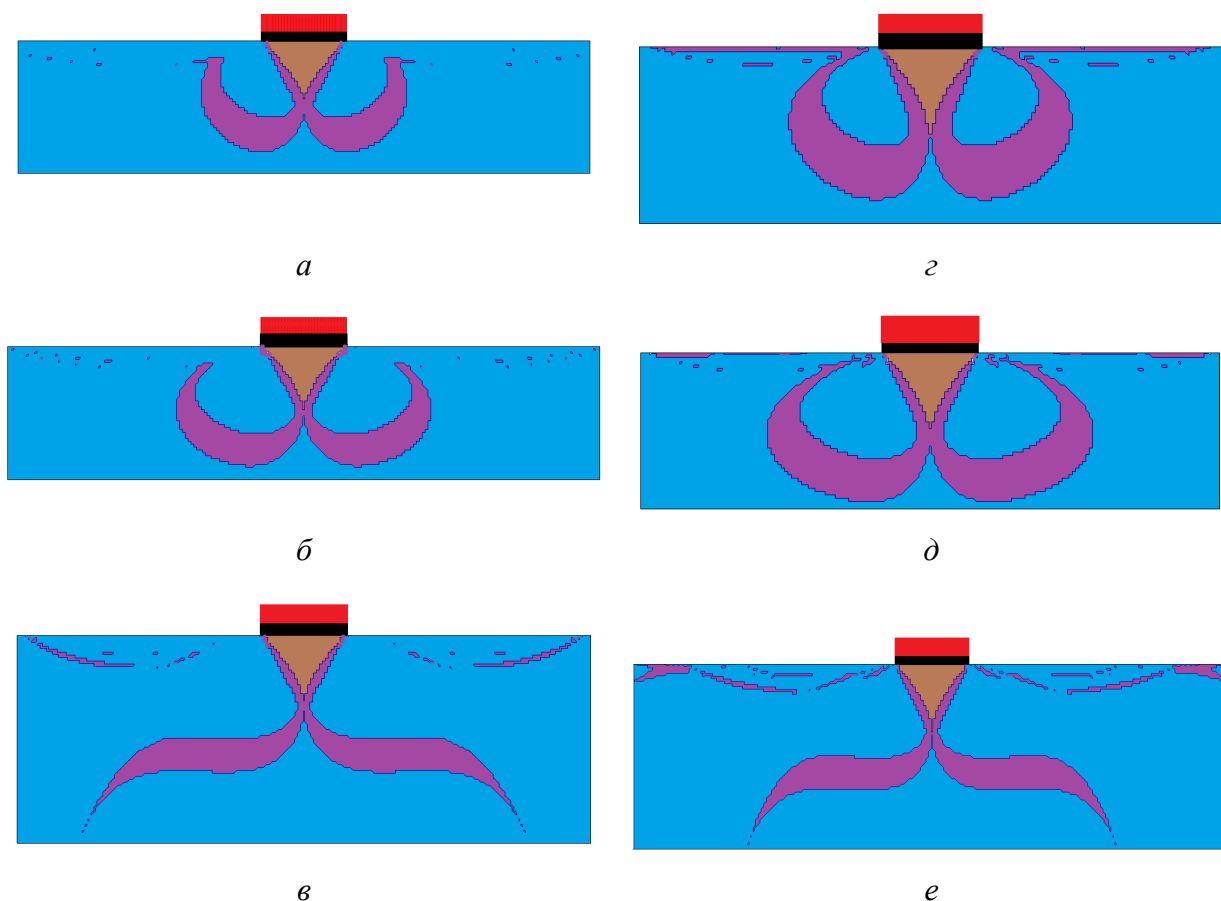


Рис. 10. Области пластических деформаций в основании гибкого штампа, построенные на основе аналитического решения смешанной задачи, для условий примера, приведенного в работе [17]

Fig. 10. Strain ranges at the base of the flexible stamp based on the analytical solution of a “mixed” problem for the conditions of the example in publication [17]

На рис. 11 приведены графические интерпретации зависимостей вида $q_{\text{пд}} = f(c)$, построенные по результатам соответствующего численного эксперимента. Видно, что графиками этих зависимостей являются прямые линии, аналогичные тому, что представлены на рис. 3.

В заключение работы сформулируем следующие выводы:

1. Величина предельно допустимой нагрузки на однородное основание штампа, вычисленная для условий смешанной задачи, существенным образом зависит от численных значений физико-механических свойств слагающего грунта: удельного сцепления, давления связности, угла внутреннего трения и коэффициента бокового давления. Графики зави-

симостей вида $q_{\text{пд}} = f(c)$ и $q_{\text{пд}} / \gamma b = f(\sigma_{\text{св}})$ представляют собой прямые линии – зависимость линейная. Графики зависимостей вида $q_{\text{пд}} / \gamma b = f(\varphi)$ и $q_{\text{пд}} / \gamma b = f(\xi_o)$ описываются экспонентой и степенной функцией соответственно.

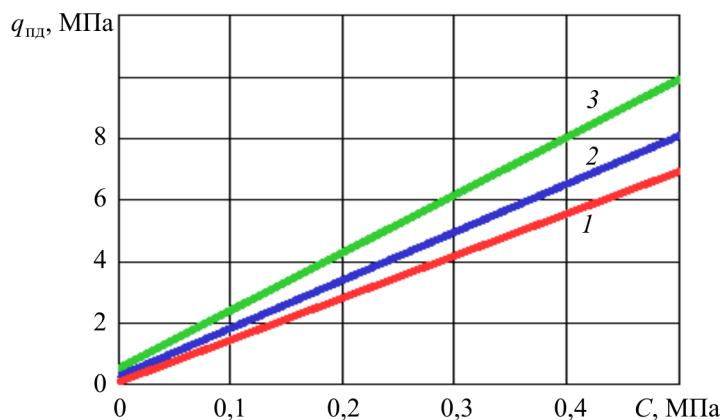


Рис. 11. Графики зависимостей вида $q_{\text{пд}} = f(c)$, построенные для условий примера, приведенного в работе [17]: 1 – при $\xi_o = 0,3$; 2 – при $\xi_o = 0,5$; 3 – при $\xi_o = 0,79$

Fig. 11. The dependence of species $q_{\text{pd}} = f(c)$ constructed for the examples in the publication [17], when $\xi_o = 0,3$ (1); $\xi_o = 0,5$ (2) and $\xi_o = 0,79$ (3)

2. В рассмотренных примерах изменение величины коэффициента бокового давления от 0,4 до 0,7 влечет за собой увеличение (при всех прочих равных условиях) интенсивности предельно допустимой нагрузки в 3,5–4,5 раза; изменение угла внутреннего трения от 15 до 34° – примерно в 4,5 раза; рост величины $\sigma_{\text{св}}$ от 0 до 6 – примерно в 2,5 раза; увеличение численного значения удельного сцепления от 0 до 5 МПа повышает предельное значение $q_{\text{пд}}$ в 12–16 раз.

3. Учет влияния толщины и жесткости штампа может существенным образом скорректировать полученные результаты.

Библиографический список

1. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A. Comparison of physical and computational experiment results to determine the load-bearing capability of a uniform plate bed calculation of settlements for a strip foundation // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2016. – Vol. 52, iss. 6. – P. 322–328.

2. Развитие областей пластических деформаций в однородном основании гибкого ленточного фундамента в рамках модели смешанной задачи теории упругости и теории пластичности грунта / А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, А.И. Вайнгольц, В.В. Подтелков // Интернет-вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Сер. Политематическая. – 2013. – Вып. 2 (27). – 5 с.

3. Напряженное состояние и области пластических деформаций в однородном основании ленточного фундамента в условиях смешанной задачи теории упругости и теории пластичности грунта / А.Н. Богомолов, О.А. Богомолова, А.И. Вайнгольц, А.В. Прокопенко, А.В. Соловьев // Инновационные конструкции и технологии в фундаментостроении и геотехнике: материалы науч.-техн. конф., Москва, 27–29 октября 2013 г. – М.: Палеотип, 2013. – С. 9–22.

4. Богомолов А.Н., Богомолова О.А. Смешанная задача теории упругости и теории пластичности грунта для однородного основания // Вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2013. – Вып. 33 (52). – С. 13–22.

5. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A. Mixed task of the theory of elasticity and theory of plasticity of soil for the uniform basis // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – 2013. – Т. 1, вип. 3 (38). – С. 3–15.

6. Богомолов А.Н., Богомолова О.А. Сопоставление результатов физических и численных экспериментов по определению несущей способности однородного основания штампа // ОФиМГ. – 2015. – № 6. – С. 7–11.

7. Польшин Д.Е. Определение напряжения в грунте при загрузке части его поверхности // Тр. ВИОС. Основания и фундаменты. – 1933. – № 1.

8. Польшин Д.Е. Примечания к статье П.И. Морозова «Определение допускаемой нагрузки по критическому напряженному состоянию» // Тр. ВИОС. Основания и фундаменты. – 1939. – № 9.

9. Горбунов-Посадов М.И. Устойчивость фундаментов на песчаном основании. – М.: Стройиздат, 1962. – 95 с.

10. Богомолов А.Н. Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. – Пермь, 1996. – 150 с.

11. Современные методы расчета фундаментов / А.Н. Богомолов, С.И. Евтушенко, А.Н. Ушаков, С.И. Шиян. – Новочеркасск: Изд-во Юж.-Рос. гос. техн. ун-та (НПИ), 2011. – 238 с.

12. Богомолов А.Н., Ушаков А.Н., Шиян С.И. Решение основных граничных задач для полуплоскости методами теории функций комплексного переменного. – Волгоград: Изд-во Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та, 2009. – 134 с.

13. Богомолов А.Н., Ушаков А.Н. Методы теории функций комплексного переменного в задачах геомеханики. – Волгоград: Изд-во Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та: Перемена, 2014. – 226 с.

14. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.

15. Болдырев Г.Г., Никитин Е.В. Деформации песка в основании полосового штампа // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1987. – № 1. – С. 26–28.

16. Саенков А.С., Елизаров С.А., Малышев М.В. Развитие областей предельного состояния грунта в основании квадратного штампа // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1991. – № 2. – С. 15–17.

17. Горшков Н.И., Краснов М.А. Способ оценки несущей способности основания и устойчивости системы «штамп – основание» на основе МКЭ // Вестник Тихоокеан. гос. ун-та. Строительство и транспорт. – 2010. – № 3 (18). – С. 141–150.

References

1. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A. Comparison of physical and computational experiment results to determine the load-bearing capability of a uniform plate bed Calculation of settlements for a strip foundation. *Soil mechanics and foundation engineering*, January 2016, vol. 52, iss. 6, pp. 322-328.

2. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Vaingol'ts A.I., Podtelkov V.V. Razvitie oblastei plasticheskikh deformatsii v odnorodnom osnovanii gibkogo lentochного fundamenta v ram-

kakh modeli smeshannoi zadachi teorii uprugosti i teorii plastichnosti grunta [The development of areas of plastic deformation in a homogenous basis of the flexible strip foundation within the model of the mixed problem of the theory of elasticity and theory of plasticity of soil]. *Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaja*, 2013, iss. 2 (27), 5 p.

3. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A., Vaingol'ts A.I., Prokopenko A.V., Solov'ev A.V. Napriazhennoe sostoianie i oblasti plasticheskikh deformatsii v odnorodnom os-novanii lentchnogo fundamenta v usloviakh smeshannoi zadachi teorii uprugosti i teorii plastichnosti grunta [The state of stresses and plastic deformation in a homogenous basis of strip Foundation in the conditions of the mixed problem of the theory of elasticity and theory of plasticity of soil]. *Innovatsionnye konstruksii i tekhnologii v fundamentostroenii i geotekhnike. Materialy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii 27-29 oktiabria 2013 g.* Moscow, Paleotip, 2013, pp. 9-22.

4. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A. Smeshannaia zadacha teorii uprugosti i teorii plastichnosti grunta dlia odnorodnogo osnovaniia [A mixed problem of the theory of elasticity and theory of plasticity of soil for uniform base]. *Vestnik VolgGASU. Ser.: Stroitelstvo i arkhitektura*, 2013, iss. 33 (52), pp. 13-22.

5. Bogomolov A.N., Bogomolova O.A. Mixed task of the theory of elasticity and theory of plasticity of soil for the uniform basis. *Sbornik nauchnykh trudov (mascinostroenie, stroitelstvo)*, iss. 3 (38), vol. 1, 2013, pp. 3-15.

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

7. Pol'shin D.E. Opredelenie napriazheniia v grunte pri zagruzke chasti ego poverkhno-sti [The definition of stress in the ground when loading of the surface]. *Trudy VIOS: Osnovaniia i fundamenty*. Sbornik, 1933, no. 1.

8. Pol'shin D.E. Primechaniia k stat'e P.I.Morozova «Opredelenie dopuskaemoi nagruzki po kriticheskomu napriazhennomu sostoianiiu» [Notes to the article of P.I. Morozov «Determination of allowable loads at a critical stress condition». *Trudy VIOS: Osnovaniia i fundamenty*. Sbornik, 1939, no. 9.

9. Gorbunov-Posadov M.I. Ustoichivost' fundamentov na peschanom osnovanii [The stability of foundations on sandy bases]. Moscow: Stroiizdat, 1962. 95 p.

10. Bogomolov A.N. Raschet nesushchei sposobnosti osnovanii sooruzhenii i ustoychivosti gruntovykh massivov v uprugoplasticheskoi postanovke [Calculation of bearing capacity foundations of structures and stability of soil slopes in the elastic-plastic formulation]. Perm, Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1996. 150 p.

11. Bogomolov A.N., Evtushenko S.I., Ushakov A.N., Shiian S.I. Sovremennye metody rascheta fundamentov [Modern methods of calculation of foundations]. Novocherkassk, Yuzgno-Rossiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011. 238 p.

12. Bogomolov A.N., Ushakov A.N., Shiian S.I. Reshenie osnovnykh granichnykh zadach dlia poluploskosti metodami teorii funktsii kompleksnogo peremennogo [The solution of the basic boundary value problems for half-plane methods of the theory of functions of a complex variable]. Volgograd, VolgGASU, 2009. 134 p.

13. Bogomolov A.N., Ushakov A.N. Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo v zadachakh geomekhaniki [Methods of the theory of functions of a complex variable in problems of geomechanics]. Volgograd: VolgGASU, VGSPU «Peremena», 2014, 226 p.

14. Fadeev A.B. Metod konechnykh elementov v geomekhanike [Finite element method in geomechanics]. Moscow: Nedra, 1987. 221 p.

15. Boldyrev G.G., Nikitin E.V. Deformatsii peska v osnovanii polosovogo shtampa [Deformation of sand at the base of the strip stamp]. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*. 1987, no. 1, pp. 26-28.

16. A.S.Saenkov, S.A.Elizarov, M.V.Malyshev Razvitie oblastei predel'nogo sostoianiia grunta v osnovanii kvadratnogo shtampa [Development of areas of limit state of soil at the base of the square stamp]. *Osnovaniia, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1991, no. 2, pp. 15-17.

17. Gorshkov N.I., Krasnov M.A. Sposob otsenki nesushchei sposobnosti osnovaniia i us-toichivosti sistemy «shtamp-osnovanie» na osnove MKE [Method of evaluation the bearing capacity of foundations and stability of the system «stamp-based» on the basis of FEM]. *Vestnik TOGU. Seriia Stroitel'stvo i transport*, 2010, no. 3 (18), pp. 141-150.