

УДК 624.131

К.Н. ЯКОВЛЕВ, Г.Н. ПОЛЯНКИН, К.В. КОРОЛЕВ

**МЕТОД РАСЧЕТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ С УЧЕТОМ НАЛИЧИЯ
В МАССИВЕ МЕРЗЛОГО СЛОЯ ГРУНТА**

Рассмотрена методика определения несущей способности грунтового основания с учетом наличия в массиве грунта мерзлого слоя. Обоснована необходимость создания новой методики, связанная с отсутствием аналитических решений указанной задачи. Описана последовательность краевых задач для выполнения численного интегрирования. Получено статическое решение задачи теории предельного равновесия методом характеристик. Данное решение может быть применено для оценки несущей способности грунтовых оснований при проектировании нового строительства или при оценке изменения несущей способности основания под сооружением в период эксплуатации при промораживании-оттаивании грунтов подстилающего слоя. Результаты разработанного автором метода могут применяться в качестве верификационных для иных методов.

Ключевые слова: предельное равновесие, несущая способность, подстилающий слой, мерзлый грунт, условия предельного равновесия.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-745-1-31-36

Актуальность оценки изменения несущей способности грунтовых оснований при проектировании зданий и сооружений в криолитозоне, развитие методов расчетов и геотехнического прогноза с учетом изменений ряда определяющих факторов при эксплуатации сооружений определяются тем фактом, что область распространения многолетней мерзлоты в России составляет около 65 % ее территории [1–3]. В этой связи необходимо заметить, что устойчивое развитие этой части нашей страны возможно только при наличии соответствующей транспортной системы, неотъемлемой частью которой являются подземные сооружения, основания и фундаменты.

Кроме того, активное освоение подземного пространства при строительстве зданий и сооружений различного назначения в северных регионах России требует усовершенствования имеющихся и внедрения новых научно-технических решений, гарантирующих, в первую очередь, безопасность, а также экономическую эффективность объектов строительства согласно Градостроительному кодексу РФ № 190-ФЗ и Федеральному закону № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

В северных регионах Российской Федерации основания сооружений (существующих или перспективных) располагаются на вечномерзлых грунтах. Отметим, что развитие подземного строительства в районах распространения вечномерзлых грунтов (криолитозоне) сдерживается в значительной мере недостаточной изученностью процессов, протекающих в технической системе «подземное сооружение – массив мерзлого/оттаивающего грунта», сложностью обеспечения надежности геотехнического прогноза изменения

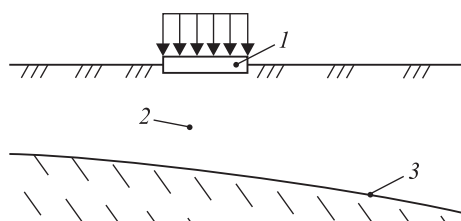


Рис. 1. Элементы системы «фундамент – основание – мерзлый грунт»
1 – фундамент сооружения; 2 – основание сооружения; 3 – мерзлый грунт

напряженно-деформированного состояния таких оснований. Необходимо заметить, что и эксплуатация зданий и сооружений в районах распространения вечномёрзлых грунтов в будущем может столкнуться с проблемой деградации вечной мерзлоты и, как следствие, существенным ухудшением работы грунтового массива в основании сооружений. В связи с этим разработка проектной документации для строительства сооружений в криолитозоне требует целого комплекса научно-исследовательских мероприятий. Развитие современных аналитических и численных методов расчета, а также геотехнического прогноза с учетом изменений ряда определяющих факторов при эксплуатации сооружений позволяет решить эти задачи.

Рассчитывая несущую способность грунтовых оснований при наличии в массиве мерзлого слоя грунта, можно столкнуться со сложной технической системой, представленной на рис. 1 [4, 5].

Так как данная задача имеет прикладной характер, метод и итоговый результат решения должны удовлетворять требованиям нормативных документов. В частности, СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» регламентирует определение несущей способности оснований методами теории предельного равновесия грунтов (ТПРГ). В ТПРГ предлагается решение рассматриваемой задачи, выполненное на базе решений М.В. Малышева, А.С. Строганова, Ю.И. Соловьева, К.В. Королева [6–9]. В этом решении рассматривается основание фундамента, причем на небольшой глубине в основании расположено подземное сооружение, по контуру которого имеет место трение грунта по конструкции. В случае если в основании на небольшой глубине вместо подземного сооружения залегает слой мерзлого грунта, то в целом алгоритм решения задачи схожий. Но есть существенное различие – это отсутствие трения на границе с мерзлым грунтом или по крайней мере трение здесь минимально.

В практике проектирования предельная нагрузка на основание определяется чаще всего методом конечных элементов (МКЭ) [10]. Нормы проектирования, а именно СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений», не исключают такой подход, однако ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» и СП 248.1325800.2016 «Сооружения подземные. Правила проектирования» рекомендуют выполнять дополнительные расчеты с использованием альтернативных расчетных методик и независимо разработанных САЕ-программ.

Как известно, одна из основных задач ТПРГ – определение несущей способности оснований, в том числе с учетом наличия жесткого подстилающего слоя, который в данном случае представлен оттаивающим грунтом.

Метод характеристик ТПРГ позволяет рассчитать предельную нагрузку на основание для описанного выше случая. В данном решении реализовано построение полей предельных напряжений по схеме Хилла (гладкий штамп).

Решение поставленной задачи сведено к определению последовательности краевых задач, в рамках которой выполняется численное интегрирование канонической системы ТПРГ (для условий плоской деформации в координатах xOz):

$$\begin{aligned} dx &= dz \operatorname{tg}(\alpha \pm \mu), \quad \mu = \pi/4 - \varphi/2, \\ d\sigma \pm 2\sigma \operatorname{tg}\varphi d\alpha &= \gamma(dz \mp dx \operatorname{tg}\varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\sigma = (\sigma_x + \sigma_z)/2 + c \operatorname{ctg}\varphi$ – среднее приведенное напряжение;
 α – угол между направлением σ_1 и осью Oz , направленной вертикально вниз;
 φ – угол внутреннего трения;
 c – удельное сцепление;
 γ – удельный вес грунта.

Верхние знаки в уравнениях (1) соответствуют линиям скольжения (характеристикам) первого семейства, нижние – второго.

На рис. 2 показана расчетная схема, отражающая компоновку краевых задач, номера которых обозначены римскими цифрами. При этом рассматривается односторонний выпор, который имеет место при наличии наклонной границы подстилающего слоя. Ход решения в областях ADB , ABC , AOC , OKL достаточно хорошо изучен, его можно найти в литературе.

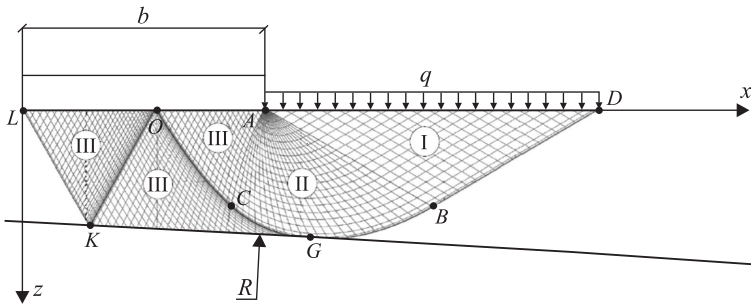


Рис. 2. Области предельного равновесия в задаче о предельном давлении гладкого штампа с учетом криволинейного подстилающего слоя (мерзлого грунта)

Построение же решения III краевой задачи в области $OCGK$ требует дополнительных пояснений.

Для вычисления неизвестных параметров x , z , α , σ в точках на контуре подстилающего слоя вечномерзлого грунта необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} x - x_2 &= (z - z_2) \operatorname{tg}[(\alpha + \alpha_2)/1 - \mu], \\ \sigma - \sigma_2 - (\sigma + \sigma_2) \operatorname{tg}\varphi(\alpha - \alpha_2) &= \gamma[z - z_2 + (x - x_2) \operatorname{tg}\varphi], \\ (x - e)^2 + (z - h)^2 &= R^2, \\ \alpha &= 0 \dots \left[\operatorname{arctg}\left(\frac{dx}{dz}\right) + \mu \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Первые два уравнения представляют собой конечно-разностную аппроксимацию канонических уравнений вдоль характеристики 2-го семейства; третье равенство – уравнение контура мерзлого грунта (здесь контур описы-

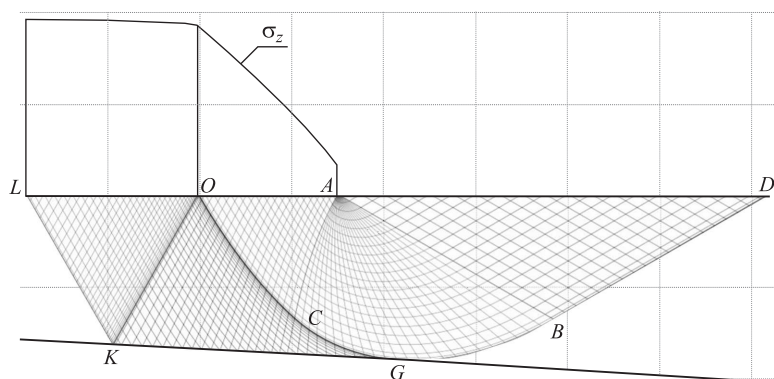


Рис. 3. Пример сетки линий скольжения в основании гладкого штампа с учетом подстилающего слоя мерзлого грунта и эпюры предельного давления по его подошве

вается окружностью радиуса R , с центром на глубине h , смещенным по оси X по характеристике e); четвертое уравнение – граничное условие для α , моделирующее различные значения трения по границе мерзлого грунта; $x_2, z_2, \alpha_2, \sigma_2$ – значения параметров канонических уравнений в ближайшей к контуру точке конечно-разностной сетки характеристик.

На рис. 3 приведен пример сетки линий скольжения для следующих исходных данных: $\gamma = 20$ кН/м, $b = 1$ м, $\varphi = 30^\circ$, $c = 1$ кПа, $q = 5$ кПа, $R = 100$ м, $h = 101$ м, $e = 5$ м.

Из анализа эпюры предельного давления прослеживается влияние слоя мерзлого грунта на несущую способность основания и фактически прекращение роста значений эпюры предельного давления. Это можно связать с низким трением грунта по поверхности мерзлого грунта.

Результаты проведенной работы могут быть использованы при проектировании сооружений в случае наличия в подстилающем слое вечномерзлого грунта, а также при эксплуатации сооружений в условиях деградации вечной мерзлоты, сопровождающейся резким снижением прочностных характеристик оттаивающего грунта.

Решения на базе ТПРГ обладают большей достоверностью, нежели решения методом конечных элементов, в части описания предельной работы грунтов, поэтому результаты полученных здесь решений могут быть использованы как дополнительный источник верификации конечно-элементных расчетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вялов С.С. Прочность и ползучесть мерзлых грунтов и расчеты льдогрунтовых ограждений. М.: Изд-во АН СССР, 1962.
2. Карлов В.Д. Основания и фундаменты в районах распространения вечномерзлых грунтов. М.: АСВ, 1997. 176 с.
3. Невзоров А.Л. Фундаменты на сезоннопромерзающих грунтах. М.: АСВ, 2000. 152 с.
4. Карян Г.Г., Полянкин Г.Н., Яковлев К.Н. Оценка изменения несущей способности грунтовых оснований при проектировании зданий и сооружений в криолитозоне // Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика: МНТК (Новосибирск, 19–20 октября 2017 г.): тез. докл. Новосибирск: СГУПС, 2017. С. 63.

5. *Карян Г.Г., Полянкин Г.Н., Королев К.В., Яковлев К.Н.* Совершенствование методов расчета несущей способности грунтовых оснований с учетом наличия в массиве подземных сооружений или мерзлого слоя грунта // Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений (Екатеринбург, 10–11 апреля 2019 г.): тр. конф. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2019. С. 216–222.
6. *Мальшев М.В.* Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1994. 228 с.
7. *Строганов А.С.* Прочность оснований сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1983. № 23–27.
8. *Соловьев Ю.И.* Жестко- и упругопластический анализ устойчивости и напряженно-деформированного состояния грунтов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1989. 42 с.
9. *Королев К.В.* Плоская задача теории предельного равновесия грунтов. Новосибирск: СГУПС, 2010. 251 с.
10. *Шашкин К.Г., Шашкин В.А., Дунаева М.В.* Решение задач предельного равновесия с использованием метода конечных элементов // Развитие городов и геотехническое строительство. 2011. № 1. С. 1–15.

Яковлев Кирилл Николаевич, асп.; E-mail: jakovleff.k@yandex.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Полянкин Геннадий Николаевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: polyankin@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Королев Константин Валерьевич, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: korolev_kv@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 14.12.2020

Yakovlev Kirill Nikolayevich, Post-graduate Student; E-mail: jakovleff.k@yandex.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Polyankin Gennadiy Nikolayevich, PhD, Ass. Professor; E-mail: polyankin@mail.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Korolev Konstantin Valer'yevich, DSc, Professor; E-mail: korolev_kv@mail.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

METHOD FOR CALCULATION OF GROUND BASES BEARING CAPACITY CONSIDERING THE UNDERLYING LAYER OF FROZEN GROUND

The paper deals with the problem of the smooth stamp limit pressure taking into account the curvilinear underlying layer (frozen ground). The necessity of creating a new methodology, associated with the lack of ready-made analytical solutions to the above problem, is substantiated. The sequence of boundary value problems for numerical integration is described. We obtained a static solution of the limit equilibrium theory problem at the intersection of the slip lines with the underlying layer. The obtained solution can be used to estimate the soil bases bearing capacity in the process of designing new construction or to estimate the change in the foundation bearing capacity under the structure during maintenance while freezing or thawing of the underlying layer. The results of the method developed by the author can be used as verification for other methods.

Key words: limit equilibrium theory of soils, bearing capacity, subsoil, permafrost, limit equilibrium conditions.

REFERENCES

1. *Vyalov S.S.* Prochnost' i polzuchest' merzlykh gruntov i raschety l'do-gruntovykh ograzhdeniy [Strength and creep of frozen ground and calculations of ice-soil barriers]. Moscow, 1962. (in Russian)
2. *Karlov V.D.* Osnovaniya i fundamenty v rayonakh rasprostraneniya vечно-merzlykh gruntov [Foundations in areas of permafrost soils]. Moscow, 1997. 176 p. (in Russian)
3. *Nevzorov A.L.* Fundamenty na sezonopromerzayushchikh gruntakh [Foundations on seasonally frozen soils]. Moscow, 2000. 152 p. (in Russian)
4. *Karyan G.G., Polyankin G.N., Yakovlev K.N.* Otsenka izmeneniya nesushchey sposobnosti gruntovykh osnovaniy pri proyektirovaniy zdanii i sooruzheniy v kriolitozone [Assessment of changes in the bearing capacity of ground bases in the design of buildings and structures in the cryolitic zone]. Innovatsionnyye faktory razvitiya transporta [Innovative factors of transport development]. Novosibirsk, STU, 2017. 63 p. (in Russian)
5. *Karyan G.G., Polyankin G.N., Korolev K.V., Yakovlev K.N.* Sovershenstvovaniye metodov rascheta nesushchey sposobnosti gruntovykh osnovaniy s uchetom nalichiya v massive podzemnykh sooruzheniy ili merzlogo sloya grunta [Improvement of methods for calculating the bearing capacity of soil bases, taking into account the presence of underground structures or frozen layer of soil]. Proyektirovaniye, stroitel'stvo i ekspluatatsiya kompleksov podzemnykh sooruzheniy [Design, construction and operation of complexes of underground structures]. Yekaterinburg, 2019. Pp. 216–222. (in Russian)
6. *Malyshv M.V.* Prochnost' gruntov i ustoychivost' osnovaniy sooruzheniy [Durability soils and stability of the bases of constructions]. Moscow, Stroyizdat, 1994. 228 p. (in Russian)
7. *Stroganov A.S.* Prochnost' osnovaniy sooruzheniy [Structures bases strength]. Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov [Foundations and Soil Mechanics]. 1983. No. 23–27. (in Russian)
8. *Solov'ev Yu.I.* Zhestko- i uprugoplasticheskiy analiz ustoychivosti i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntov: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk [Rigid and elastic-plastic analysis of stability and stress-strain state of soils: author. diss. ... DSc]. Moscow, 1989. 42 p. (in Russian)
9. *Korolev K.V.* Ploskaya zadacha teorii predel'nogo ravnovesiya gruntov [Flat problem of the limit equilibrium theory of soils]. Novosibirsk, STU, 2010. 251 p. (in Russian)
10. *Shashkin K.G., Shashkin V.A., Dunaeva M.V.* Resheniye zadach predel'nogo ravnovesiya s ispol'zovaniyem metoda konechnykh elementov [Solution of finite equilibrium problems using the finite element method]. Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo [Urban development and geotechnical construction]. 2011. No. 1. Pp. 1–15. (in Russian)