



УДК 624.131:624.137

© Н. И. Горшков, М. А. Краснов, 2010

СПОСОБ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ «ШТАМП-ОСНОВАНИЕ» НА ОСНОВЕ МКЭ

Горшков Н. И. – канд. техн. наук, доц. кафедры «Мосты, основания и фундаменты», e-mail: Fem_Soft@mail.ru; *Краснов М. А.* – спец. кафедры «Мосты, основания и фундаменты» (ТОГУ)

Целью работы является математическое моделирование взаимодействия элементов системы «штамп-основание», разработка новых способов оценки несущей способности основания и устойчивости этой системы на основе МКЭ.

The purpose of the work is the mathematical modeling of the interaction of the «plate- base» system elements. Novel methods for the estimation of the bearing capacity and stability of the system on the basis of the finite element method have been developed.

Ключевые слова: метод конечного элемента (МКЭ), грунт, основание, несущая способность, устойчивость, поверхность скольжения (ПС).

Введение

В инженерных методах оценки устойчивости грунтовых массивов и оснований используются следующие основные допущения (плоская задача):

- оползающий или сдвигаемый грунтовый массив (призма оползания) отделяется от неподвижного массива поверхностью скольжения;
- в точках поверхности скольжения соблюдаются условия предельного состояния, основанные на том или ином условии прочности;
- для условий равновесия на поверхности скольжения используются уравнения статики.

Для практических расчетов призма оползания разбивается на вертикальные отсеки. Линия поверхности скольжения задается в виде прямой, круглоцилиндрической или произвольной форм.

Основное отличие инженерных методов друг от друга заключается в принятых упрощениях – в учете сил, действующих на отсек, числе решаемых уравнений равновесия и возможности расчета по некруглоцилиндрической поверхности скольжения.

В качестве величины, по которой проводится оценка устойчивости, введено понятие расчетного значения коэффициента запаса устойчивости k_{st} как меры использования возможного предельного сопротивления грунтов на искомой поверхности скольжения.

Стандартное условие оценки устойчивости для линии ПС записывается в виде следующего неравенства:

$$k_{st} \geq [k_{st}], \quad (1)$$

где $[k_{st}]$ – нормативное или требуемое значение коэффициента запаса устойчивости.

Если линия поверхности скольжения не является фиксированной, то наиболее опасная линия находится в серии расчетов по минимальному значению коэффициента $k_{st \min}$.

Кроме того, в оценке устойчивости используются решения теории предельного равновесия, развитые проф. В. В. Соколовским [1]. В допущениях этой теории принимается, что весь массив грунта находится в предельном состоянии и везде имеется система линий поверхностей скольжения. Местоположение наиболее опасной линии определяется при решении самой задачи, а её форма уже определена на стадии постановки задачи.

Приложение метода конечных элементов к решению задач геомеханики сразу предполагало его использование в оценке устойчивости грунтовых сооружений и природных склонов.

Результаты расчета в виде вычисленных в узлах или конечных элементах (КЭ) компонент тензора напряжений σ_{ij} давали возможность использовать эти величины в оценке устойчивости.

В первых исследованиях устойчивости грунтовых массивов на основе МКЭ k_{st} вычислялся как частное от деления предельных касательных напряжений τ_u на расчетные τ [2, 3, 4 и др.]. Его численное значение определялось суммированием значений напряжений по всем КЭ, расположенным на искомой линии поверхности скольжения любой формы ($k_{st} = \sum \tau_u / \sum \tau$). Этот способ вычисления можно назвать как метод «предельных напряжений».

Результат оценки устойчивости, полученный на основе расчетов МКЭ, зависит от класса решаемой задачи (упругости, пластичности и т. п.) и особенностей численного решения (типа КЭ, сетки разбивки, граничных условий и др.).

В общем случае на настоящее время оценка устойчивости производится по некоторым условиям для конкретной линии поверхности скольжения, а значения k_{st} зависят от формы и длины ПС, «тяжести» принятых допущений.

Особенности и результаты решения задачи

Для сравнительной оценки методов расчета устойчивости можно использовать результаты «точного» решения задач теории пластичности, например, задачу о действии гибкого штампа на однородную невесомую полуплоскость (задача Л. Прандтля).



Эту задачу часто используют исследователи для сравнительной оценки несущей способности основания по МКЭ. Результаты одной из первых работ в этом направлении были опубликованы в статье [5]; для сравнительной оценки нового метода оценки устойчивости эту задачу использовали авторы статьи [6].

В статье [5] использовалась расчетная область (высота 3,6 м, ширина 7,2 м), моделирующая однородное, изотропное и невесомое основание с учетом симметрии относительно его центральной оси. Половина ширины гибкого штампа равна 1,44 м. Глинистый грунт основания, деформирующийся в соответствии с законом ассоциированного пластического течения и условием прочности Кулона-Мора, характеризовался значениями параметров: $E = 21,0$ МПа; $\nu = 0,3$; $c = 0,07$ МПа, $\varphi = 20^\circ$.

Значения предельных давлений p_u , вычисленных для этой расчетной схемы, по решениям Л. Прандтля и К. Терцаги, равны 1,00 и 1,22 МПа соответственно; на основе решения задачи теории пластического течения МКЭ 1,06 МПа [5]. После достижения давления $p_u = 1,06$ МПа фиксировалось расхождение решения, а на графике зависимости «нагрузка – вертикальное смещение основания» (« $p-u$ ») наблюдался резкий «провал».

Здесь необходимо отметить, что результаты численного решения (вид графика « $p-u$ ») зависят от того, как в нем учитывается выход материала в предельное состояние в зонах растяжения. В рассматриваемой статье [5], как и во многих других, показываются возникновение и развитие зон предельного состояния или «пластичности» при траекториях нагружения, не выделяющих зоны растяжения.

Авторы настоящей статьи использовали модифицированные алгоритмы, приведенные в монографии проф. А. Б. Фадеева [7], где специфическим образом учитывается выход материала в предельное состояние в зонах растяжения.

Целью исследования является сравнительная оценка результатов расчета устойчивости на основе МКЭ с использованием формул инженерных методов. В качестве расчетной схемы системы «гибкий штамп – основание» использовалась схема из статьи [5] без учета симметрии, с размерами 28,8 x 14,4 м и шириной штампа $b = 2,88$ м (размер треугольных КЭ 0,144 x 0,144 м).

Принятые размеры расчетной области исключают касание зон «пластичности» границ расчетной области при нагружении основания предельным давлением и практически не влияют на результаты решения.

В численном решении задачи теории пластического течения на основе ассоциированного закона и условия текучести Кулона-Мора использовался один из вариантов метода начальных напряжений. Решение линейных уравнений производилось методом квадратного корня.

Расчет выполнялся по разработанной и сертифицированной авторами статьи программе GenIDE32 [8].

Схема решения задачи выглядит следующим образом:



1. Определение расчетом начального напряженного состояния основания, если оно весомое.

2. Приложение ступенями распределенной нагрузки через гибкий или жесткий штамп на поверхность основания.

После каждого этапа приложения нагрузки, за пределами линейной части графика « p - u », выполняется оценка устойчивости модели системы «штамп – основание» по стандартному условию как для круглоцилиндрических поверхностей скольжения (КЦПС), так и для поверхностей произвольных форм, если это необходимо.

Результаты серии расчетов для этой расчетной схемы представлены в таблице. В ней указываются значения предельных давлений (МПа), если достигнуто условие $k_{st} \approx [k_{st}] = 1,00 (\pm 0,02)$ или значения давлений последней стадии нагружения с k_{st} , значение которого при последующем нагружении не меняется, так как наблюдается пластическое течение грунта.

Там же, для сравнения представлены результаты серии расчетов для весомого основания при действии на него гибкого и жесткого, невесомого с прилипанием штампа (отношение модулей деформации материала штампа и грунта основания $E_{um}/E_{cp} = 10^6$).

Многие исследователи, например проф. З. Г. Тер-Мартirosян [9], характеризуя особенности методов оценки устойчивости на основе теории предельного состояния, придерживаются мнения: «... трудно предположить, что во всех точках рассматриваемого массива одновременно возникает состояние предельного равновесия».

Результаты численного исследования устойчивости грунтовых откосов на основе теории пластического течения, которые выполнили авторы статьи [10], привели их к выводу, что «инженерные методы, использующие концепцию поиска «фиксированной поверхности обрушения» с минимальным коэффициентом запаса, следует признать обоснованными».

При моделировании устройства элементов системы «сооружение – геосреда», в рамках решения задачи теории пластичности МКЭ можно увидеть возникновение и развитие зон предельного состояния или «пластичности» и на этой основе выполнить оценку основного допущения для того или иного инженерного варианта оценки устойчивости.

Представляет интерес и сравнительная оценка результатов вычисления k_{st} по формулам инженерных методов и по формуле $k_{st} = \sum \tau_u / \sum \tau$.

В программе GenIDE32 реализованы алгоритмы, позволяющие выполнять оценку устойчивости по нескольким наиболее используемым в практике расчетов вариантам вычисления k_{st} [11].

Для невесомого основания (гибкий штамп) конечный участок линии КЦПС, выходящий на поверхность основания, при достижении условия $k_{st} \approx [k_{st}] = 1,00$, находился вне зон «пластичности» для всех вариантов оценки, представленных в таблице: от половины длины дуги (вариант Н. Н. Маслова) до четверти (вариант Г. Крея).



Для весомого основания (гибкий и жесткий штампы) то же наблюдалось для первых трех вариантов оценки, а для последних трех (Г. Крей, А. Бишоп, «предельных напряжений») линия КЦПС проходила внутри зон «пластичности», т. е. для них подтверждается основное допущение инженерных методов.

Линии поверхности скольжения начинались в пределах гибкого штампа на некотором расстоянии от его левого края (невесомое основание): от 0,2 b (вариант Г. Крея) до 0,33 b (вариант Н. Н. Маслова); для весомого основания от 0,2 b (вариант «предельных напряжений») до 0,33 b (вариант А. Бишоп). Для жесткого штампа линия начиналась от его левого края для всех вариантов оценки устойчивости.

При действии гибкого штампа на весомое основание резкий перегиб на графике зависимости « $p-u_y$ » происходил при давлении $p = 1,26$ МПа, для жесткого наблюдается плавное изменение кривизны графика без видимых резких перегибов (рис. 1).

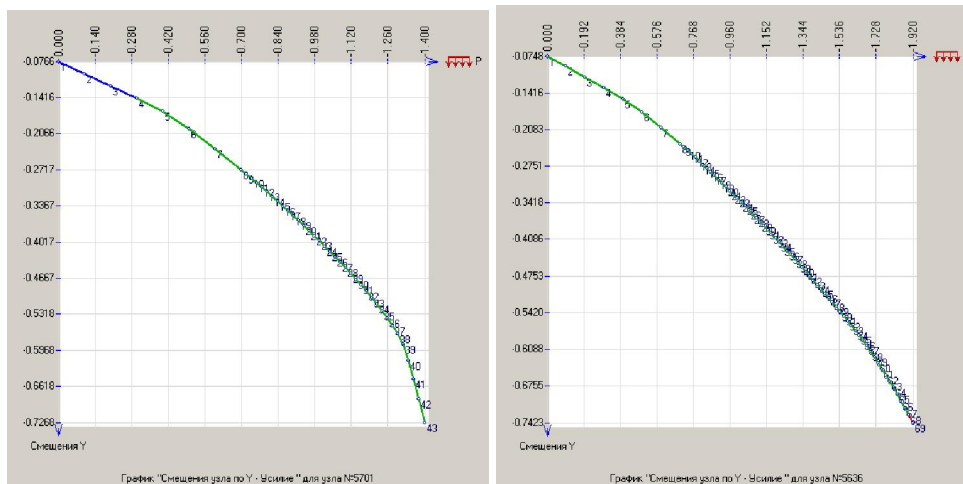


Рис. 1. Графики зависимости « $p-u_y$ » при действии на грунтовое основание гибкого (слева) и жесткого (справа) штампов

При давлении $p = 1,26$ МПа произошло образование зон «пластичности» у поверхности основания (место выхода линий скольжения с $k_{st min}$) и их смыкание с зонами «пластичности», образовавшимися ранее под гибким штампом; для жесткого штампа смыкание зон «пластичности» наблюдалось при давлении $p = 1,58$ МПа без резкого изгиба графика.

Как видно из данных таблицы, условие устойчивости нарушается при больших давлениях, чем давления, при которых произошел выход зон «пластичности» на поверхность основания.

Также была решена задача Л. Прандтля для невесомого основания, в которой на каждом шаге нагружения выполнялась оценка устойчивости системы. Оценка производилась по заранее заданной в узлах сетки разбивки некруглоцилиндрической линии поверхности скольжения (прямая, логарифми-

ческая спираль и прямая) с использованием трех вариантов оценки (Н. Н. Маслов, Г. М. Шахунянц и $k_{st} = \sum \tau_u / \sum \tau$).

Вариант расчетов	К. Терцаги	Н. Н. Маслов	Г. М. Шахунянц	Г. Крей	А. Бишоп	$\sum \tau_u / \sum \tau$
1 (p/k_{st})	0,94/1,00	0,44/1,00	0,80/0,99	1,08/1,00	1,08/1,00	1,54/1,18
2 (p/k_{st})	1,12/0,99	0,74/1,00	1,04/0,99	1,32/1,02	1,32/1,02	1,32/1,04
3 (p/k_{st})	1,40/1,00	0,92/0,99	1,32/0,99	1,74/1,02	1,74/1,02	1,74/1,09

Примечание: 1 – гибкий штамп (удельный вес грунта основания $\gamma_{zp} = 0,00$ МН/м³), 2 – гибкий штамп ($\gamma_{zp} = 0,02$ МН/м³), 3 – жесткий штамп ($\gamma_{zp} = 0,02$ МН/м³).

Ширина зоны выпора на свободной поверхности по схеме Л. Прандтля равна $L_g = 7,28$ м. Значения предельных давлений для двух первых вариантов оценки на момент потери устойчивости системы равны соответственно: $p_u = 0,60$ МПа и $p_u = 0,84$ МПа. Для последнего варианта оценки условие потери устойчивости не достигалось до давления 2,00 МПа.

Для этого решения (для всех трех вариантов оценки устойчивости) только первая короткая прямая и логарифмическая спираль линии поверхности скольжения находились в зонах «пластичности».

Необходимо также отметить, что только для весомого основания в процессе его нагружения гибким штампом постепенно четко вырисовывается потенциальная поверхность скольжения при выводе на экран уровней или изолиний значений компонент тензора относительных деформаций и его инвариантов (первого и второго): ε_{xx} , ε_{yy} , ε_1 , ε_3 , ε , ε_i . Параметры линии поверхности скольжения, такие как, ширина зоны выпора $L_g = 5,76$ м, наиболее близки к параметрам линии, вычисленным для аналогичной задачи по решению проф. В. Г. Березанцева [12]: $L_g = 5,19$ м (невесомое основание). Угол наклона линии скольжения на выходе ее к поверхности основания равен $\alpha \approx 35^\circ$, по модели проф. В. Г. Березанцева $\alpha = 45^\circ$ (рис. 2).

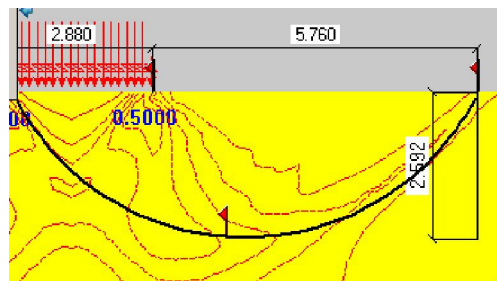


Рис. 2. Изолинии значений компоненты тензора относительной деформации ε_3 при предельном давлении гибкого штампа $p_u = 1,32$ МПа ($k_{st}[Cray] = 1,02$) на весомое основание



Для весомого основания при нагружении его жестким штампом потенциальная поверхность скольжения слабо вырисовывается при выводе на экран уровней значений параметра вида деформированного состояния (Надаи-Лоде): $\varepsilon_v = (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$. Поверхность скольжения проходит по широким зонам, где преобладают значения $\varepsilon_v = 0$ (чистый сдвиг).

Выводы и предложения

Основные выводы по результатам этого исследования для принятых параметров и модели грунта:

– Для невесомого основания, нагруженного гибким штампом, основное допущение теории предельного равновесия (задача Л. Прандтля) не выполняется для всех рассмотренных вариантов оценки устойчивости.

– Для весомого основания, нагруженного гибким или жестким штампом, основное допущение выполняется только для вариантов оценки устойчивости Г. Крея, А. Бишопа и «предельных напряжений» и не выполняется для вариантов К. Терцаги, Н. Н. Маслова и Г. М. Шахунянца.

– Значения предельных давлений p_u для невесомого основания (задача Л. Прандтля), полученные при условии $k_{st} \approx [k_{st}] = 1,00 (\pm 0,02)$, по варианту К. Терцаги, можно считать нижним пределом, по вариантам Г. Крея и А. Бишопа – верхним; варианты Г. М. Шахунянца и особенно Н. Н. Маслова дают заниженные значения p_u .

К этому можно добавить уже известное, например, вариант К. Терцаги дает заниженные значения k_{st} при пологих откосах $m > 2,5$, а в вариантах Г. Крея и А. Бишопа в уравнениях статики учитываются больше сил, действующих на вертикальный отсек, по сравнению с другими вариантами.

Таким образом, для одного решения можно получить несколько значений предельных давлений p_u .

Ниже на основе результатов решения МКЭ этой задачи предлагается новый вариант оценки устойчивости системы «штамп – весомое основание». На основе этой оценки можно также определять предельное давление на грунт основания.

В реальных природных массивах грунтов поверхностью скольжения является нижняя поверхность трещины, после образования которой и происходит относительное смещение по ней призмы оползания, в геологии такое смещение называют разрывным. Здесь под призмой оползания понимается призма выпора. В сечении, вдоль центральной оси призмы выпора, трещина имеет два выхода на поверхность, ограничивающей массив грунтов.

Как известно [13], образование и движение трещины в различных материалах определяется концентрацией и концентраторами напряжений.

В горных породах образование и движение трещин ещё зависит от локализации относительных деформаций или их производных величин [14].

Последним местом концентрации величин является место выхода трещины на поверхность в основании призмы оползания или выпора.

Для этой задачи в первый момент нагружения основания нагрузкой концентрация рассматриваемых величин наблюдается под краями штампа, далее по поверхности ядра уплотнения.

Очевидно, что в месте выхода трещины на поверхность должны наблюдаться некоторые предвестниковые эффекты – скачки значений величин, определяющих её развитие [14]. Это последнее место является «плотиной», сдерживающей выход накопившейся энергии разрушения.

Место выхода предполагаемой, но не моделируемой по законам механики разрушения трещины, легко определяется при анализе развития зон «пластичности» и уровней значений выводимых величин (рис. 3). Для этой задачи выход зон «пластичности», как уже указывалось, происходил при $p = 1,26$ МПа (гибкий штамп) и $p = 1,58$ МПа (жесткий штамп).

С помощью мониторинговых узлов и КЭ можно проследить за изменением значений вычисляемых величин на любом участке расчетной схемы, в том числе в месте выхода трещины на поверхность.

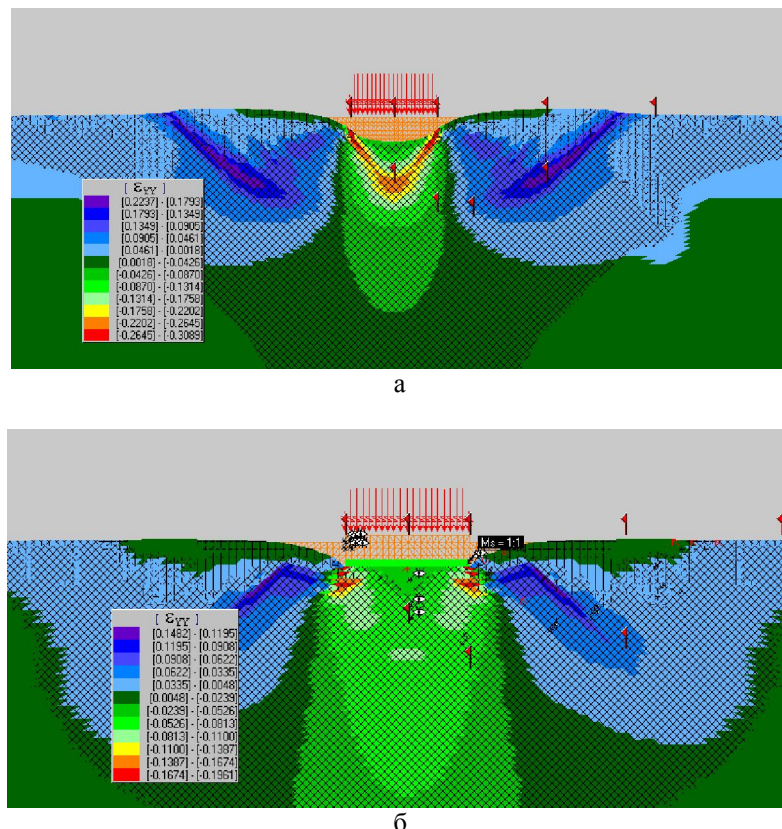


Рис. 3. Уровни значений вертикальной компоненты тензора относительной деформации ε_{yy} при предельном давлении на штамп p_u (деформированная сетка разбивки М 1:1 от начального НДС): а – весомое основание гибкого штампа; б – то же жесткого



Как правило, предельное давление p_u на грунт основания определяют по изломам графика «нагрузка – осадка основания» для узла, расположенного на поверхности и центральной оси штампа, но не всегда это удается (см. рис. 1). Есть и другие варианты его определения, например, по началу подъема поверхности основания в зоне выпора и т. п.

Если рассматривать графики зависимости «величина – номер этапа нагружения», то практически все вычисляемые величины на последних этапах нагружения испытывают резкие изменения своих значений в месте выхода трещины на поверхность, иногда бухтообразно [14], иногда пикообразно (рис.4).

На графиках на последних этапах нагружения четко наблюдаются изгибы при выходе зон «пластичности» на поверхность основания (гибкий штамп – этап № 32, $p = 1,26$ МПа; жесткий – № 52, $p = 1,58$ МПа). После изгибов наблюдаются пиковые изменения величин, очевидно происходящие при нарушении прочности грунта и выходе трещины на поверхность (гибкий штамп – этап № 38, $p = 1,30$ МПа; жесткий – № 58, $p = 1,70$ МПа).

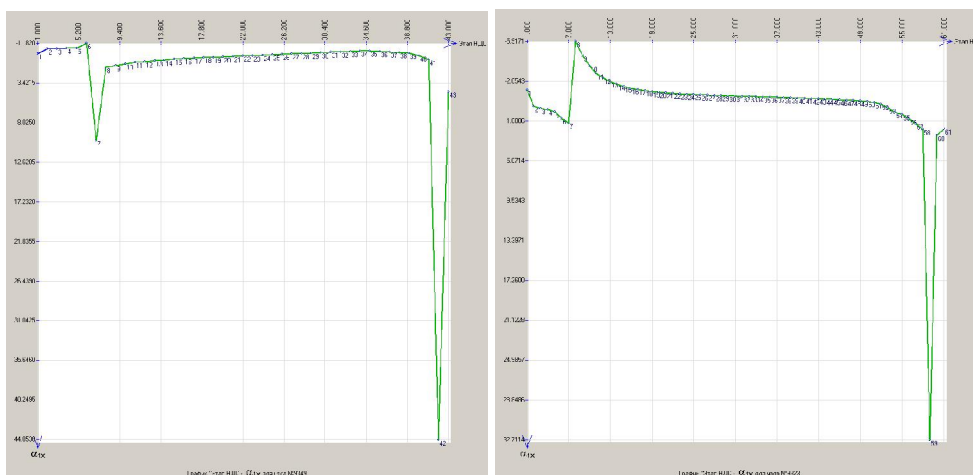


Рис. 4. Графики зависимости « a – n » для места выхода ПС на поверхность основания при действии гибкого (слева) и жесткого (справа) штампов ($2\alpha = \arctg(2\tau_{xy}/(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}))$) и n – этапы нагружения)

Потеря устойчивости системы (вариант оценки Г. Крея и А. Бишопа) происходит на этапе № 39 (гибкий штамп) и № 60 (жесткий), см. значения давлений в таблице.

Изменения величин в начальные этапы нагружения уже определяют место выхода ПС на поверхность основания. Очевидно, это связано с приспособлением системы к монотонному нагружению. На начальных этапах нагружения наблюдаются изменения в траекториях нагружения в пространстве шарового инварианта σ и девиатора σ_i тензора напряжений σ_{ij} .

Таким образом, по резким изменениям в значениях величин на послед-

них этапах нагружения весомого основания штампом, фиксируемым в местах выхода линии поверхности скольжения на поверхность основания, можно определить момент потери устойчивости системы и величину предельного давления p_u , характеризующего несущую способность грунта основания. В таком численном решении задачи отсутствует необходимость определения или задания формы поверхности скольжения и вычисления на ней значения k_{st} .

Этот же способ, очевидно, можно использовать и при оценке устойчивости таких грунтовых сооружений, как выемки, насыпи и т. п., например, аэродромы [15]. В этом случае необходимо выполнять последовательное моделирование их устройства.

Библиографические ссылки

1. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М., 1960.
2. Ухов С. Б. Скальные основания гидротехнических сооружений. М., 1975.
3. Маслов Н. Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними): учеб. пособие для вузов. М., 1977.
4. Хуан Я. Х. Устойчивость земляных откосов / пер. с англ. В. С. Забавина; под ред. В. Г. Мельника. М., 1988.
5. Zienkiewicz O. C., Humpheson C., Lewis R. W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics // Geotechnique. 1975. № 4.
6. Метод переменной степени мобилизации сопротивления грунта сдвигу для расчета прочности грунтовых массивов / В. Г. Федоровский, С. В. Курилло // ОФМГ. 1998. № 4–5.
7. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М., 1987.
8. Программа GenIDE32 для решения прикладных задач геомеханики / Горшков Н. И., Краснов М. А. СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р ГОССТАНДАРТ РОССИИ. СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ № РОСС RU.СП15.Н00262, 21.09.2009.
9. Тер-Мартirosян З. Г. Прогноз механических процессов в многофазных грунтах. М., 1986.
10. Устойчивость грунтовых откосов / Ю. К. Зарецкий, В. Н. Ломбардо, М. Е. Грошев, Д. Н. Олимпиев // ОФМГ. 1980. № 1.
11. Методика и опыт оценки устойчивости модели системы «автомобильная дорога - геосреда» на основе метода конечных элементов (МКЭ) / Н. И. Горшков, М. А. Краснов // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: региональный ежегодный сборник научных трудов / под ред. А. Е. Казаринова. Хабаровск, 2001.
12. Березанцев В. Г. Расчет оснований сооружений. Л., 1970.
13. Финкель В. М. Портрет трещины. М., 1981.
14. Соболев Г. А., Пономарев А. В. Физика землетрясений и их предвестники / отв. ред. В. Н. Страхов. М., 2003.
15. Горшков Н. И. Анализ и оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов покрытия аэродрома для обоснования его реконструкции // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2007. № 1(4).