



ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ГРАНИЧНИХ СТАНІВ ОСНОВ І ФУНДАМЕНТІВ

О.О. Петраков, Н.О. Петракова, Н.Г. Лобачева

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

вул. Державіна 2, м. Макіївка, Україна, 86123.

e-mail: niiskdon@rambler.ru

Отримана 12 березня 2009; прийнята 21 березня 2009.

Анотація. Розглядаються методи аналізу граничних станів основ, фундаментів і ґрунтових масивів, які засновані на розв'язанні змішаної задачі теорії пружності і пластичності. Проаналізовано проблеми чисельної реалізації алгоритмів таких методів. Наводяться відомості про особливості чисельної реалізації методів аналізу граничних станів безітераційним кроковим методом з урахуванням схеми руйнування конструкції в обчислювальному комплексі «Нелінійний Поліфем». Відзначається істотний вплив коефіцієнта Пуассона на результати розв'язання пружно-пластичної задачі. Чисельна реалізація методів ілюструється прикладами розрахунку пристінного зсуву і фундаментів ЛЕП на вплив навантаження, що висмикує. Дано рекомендації з розробки алгоритмів, заснованих на розв'язанні пружно-пластичної задачі, із застосуванням коефіцієнтів релаксації, що забезпечують груповий перехід кінцевих елементів у граничні стани і дозволяють уникнути машинного зациклення.

Ключові слова: нелінійний аналіз основи і фундаментів, змішана задача теорії пружності і пластичності.

ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРЕДЕЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ

А.А. Петраков, Н.А. Петракова, Н.Г. Лобачева

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

ул. Державина 2, г. Макеевка, Украина, 86123.

e-mail: niiskdon@rambler.ru

Получена 12 марта 2009; принята 21 марта 2009.

Аннотация. Рассматриваются методы анализа предельных состояний оснований, фундаментов и ґрунтовых массивов, основанные на решении смешанной задачи теории упругости и пластичности. Проанализированы проблемы численной реализации алгоритмов таких методов. Приводятся сведения об особенностях численной реализации методов анализа предельных состояний безитерационным шаговым методом с учетом схемы разрушения конструкции в вычислительном комплексе «Нелинейный Полифем». Отмечается существенное влияние коэффициента Пуассона на результаты решения упруго-пластической задачи. Численная реализация методов иллюстрируется примерами расчета пристенного оползня и фундаментов ЛЭП на воздействие выдергивающей нагрузки. Даны рекомендации по разработке алгоритмов, основанных на решении упруго-пластической задачи, с применением коэффициентов релаксации, обеспечивающих групповой переход конечных элементов в предельные состояния и позволяющих избежать машинного зацикливания.

Ключевые слова: нелинейный анализ основания и фундаментов, смешанная задача теории упругости и пластичности.

PRACTICAL METHODS OF THE LIMITED CONDITIONS ANALYSIS OF THE FOUNDATIONS AND THE BASES

A. A. Petrakov, N.A. Petrakova, N. G. Lobacheva
 Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture
 Derzhavin str. 2, Makeyevka, Ukraine, 86123.
 e-mail: niiskdon@rambler.ru

Received 12 March 2009; accepted 21 March 2009.

Abstract. Methods of limiting conditions analysis of the bases, the foundations and the ground masses, based on the the mixed problem solution of the theory of elasticity and plasticity are considered. Problems of numerical realization of algorithms of such methods have been analyzed. The information about features of numerical methods realization of the limited conditions analysis by the step-by-step method considering the structure destruction scheme in the computer complex «Nonlinear Polyfem». The essential Poisson's coefficient influence on the solution of the elastic and plastic problem. The methods numerical realization is illustrated by examples of calculation of the wall landfall and foundations, the LPT Recommendations of the algorithms elaboration based on the solution of an elastic-plastic problem, with application of the relaxation factor providing the group transition of final elements in limited conditions and allowing to avoid of the machine cycling.

Key words: nonlinear analysis bases and foundation, mixed problem of the theory of elasticity and plasticity.

Формулировка проблемы и анализ последних исследований публикаций

Методы нелинейного анализа грунтовых оснований и фундаментов, предназначенные для численной реализации, находят все большее применение в проектной практике. Точные методы основываются на гипотезах теории пластического течения [4, 5] или гипотезах деформационной теории пластичности [1]. Сдерживающим фактором применения точных методов является необходимость проведения дополнительных исследований грунтов и строительных материалов с целью получения ненормированных характеристик их прочности и деформативности. По этой причине широкое применение находят приближенные методы, при реализации которых используются стандартные характеристики прочности и деформативности материалов конструкций и грунтов оснований [2, 3]. В основе приближенных методов лежит, как правило, решение смешанной задачи теории упругости и пластичности. Несмотря на относительную простоту физических гипотез, лежащих в основе приближенных методов, их численная реализация связана с определенными проблемами, которые обсуждаются ниже на примере эксплуатации ВК «Нелиней-

ный полифем» в институте Донецкий ПромстройНИИпроект.

Цель

получение условий для корректного решения смешанной задачи теории упругости и пластичности безитерационным шаговым методом.

Основной материал

Архитектура ВК «Нелинейный полифем». ВК состоит из ядра «Полифем» и двух оболочек «Нелинейный полифем» и «Графическое окно». Ядро «Полифем» создано в 1992 г. институтами Ленинградский Промстройпроект и Донецкий ПромстройНИИпроект на базе программного комплекса «Прокруст» для машин класса ЕС (руководитель проекта Е.М. Дашевский). Оболочка «Нелинейный полифем» написана в 1998 г. на языке «Turbo Pascal». Оболочка «Графическое окно» разработана в 2002 г. в среде «Visual Basic 6.0». Ядро реализует решение линейных задач строительной механики методом конечных элементов. Основным недостатком ядра «Полифем» является отсутствие графического интерфейса для ввода данных. Этот недостаток в определенной мере компенсируется

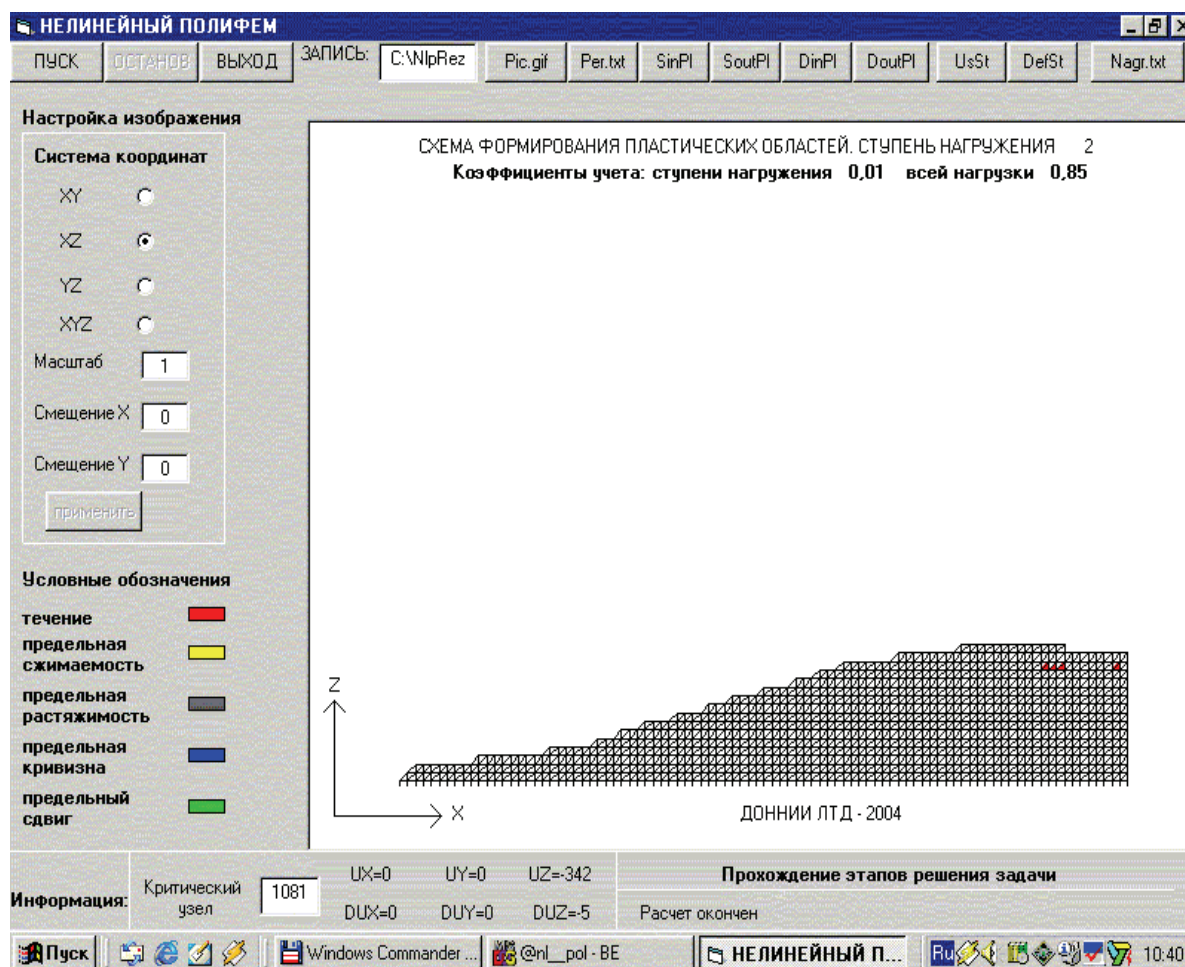


Рис. 1. Графическое окно в состоянии “останов”.

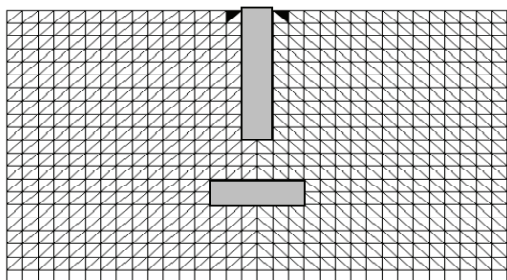
наличием мощного табличного редактора, являющегося по сути специализированной базой данных. Оболочка “Нелинейный полифем” реализует решение смешанной задачи теории упругости и пластичности. Оболочка “Графическое окно” представляет собой графический интерфейс для вывода основных результатов в процессе решения упруго-пластической задачи. Графическое окно (рис. 1) выполняет функцию динамической заставки экрана и перерисовывается после каждого шага решения упруго-пластической задачи с корректировкой схемы разрушения рассчитываемой конструкции. При этом пользователь получает возможность отслеживать последовательность развития областей предельного равновесия и сам процесс разрушения конструкции в режиме мультипликации.

Кроме этого на экран выводятся основные контролируемые параметры решаемой задачи,

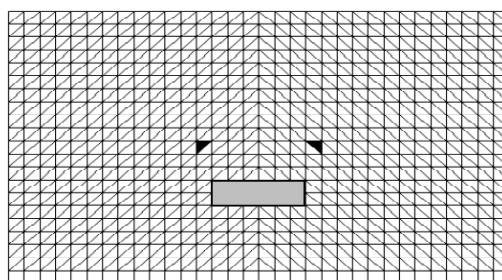
такие как коэффициенты учета степени нагружения и всей нагрузки, абсолютные перемещения и приращения перемещений критического узла, а также сведения о прохождении этапов решения задачи.

Физические предпосылки и схема решения упруго-пластической задачи. Предельная поверхность нагружения описывается уравнением прочности Кулона-Мора. Задача решается безитерационным шаговым методом. На каждом шаге нагружение считается простым. Величина шага нагружения вычисляется автоматически из условия достижения предельного равновесия в наиболее нагруженном конечном элементе. При этом предварительно для всех конечных элементов вычисляются координаты точек пересечения траекторий нагружения конечных элементов на рассматриваемом шаге с предельной поверхностью нагружения. По координатам указанных точек

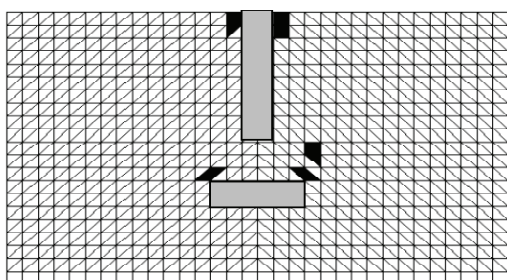
а) Уровень нагружения 0,46



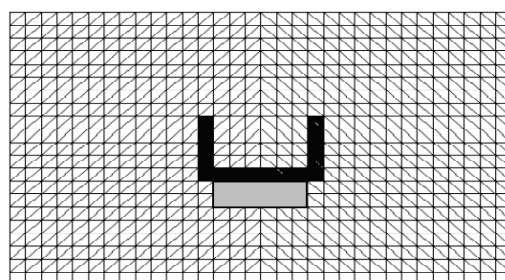
б) Уровень нагружения 0,54



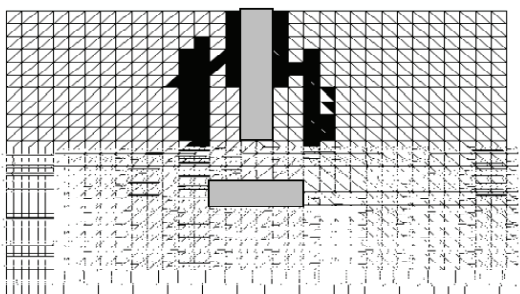
Уровень нагружения 0,78



Уровень нагружения 0,83



Уровень нагружения 1,0



Уровень нагружения 1,0

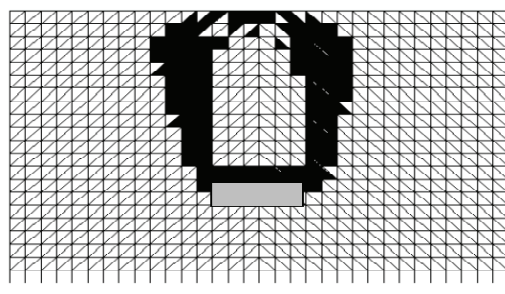


Рис. 2. Формы разрушения основания фундаментов при действии выдергивающей нагрузки: а – таврового фундамента; б – фундамента – анкера.

вычисляются коэффициенты приближения напряженного состояния в конечных элементах к предельному. В конечном элементе, перешедшем в процессе нагружения в предельное состояние, задается значение модуля деформации, равное машинному нулю. Анализируются направления нагружения в конечных элементах, перешедших в предельное состояние. Если в каком-либо из указанных конечных элементов обнаруживается разгрузка, в нем восстанавливается первоначальное значение модуля деформации. Программа позволяет корректировать на каждом шаге нагружения в интерактивном режиме вектор нагрузок и жесткостные характеристики конечных элементов. В принципе

возможна корректировка и прочностных характеристик конечных элементов, однако этой возможностью следует пользоваться крайне осторожно (корректировать можно прочностные характеристики конечных элементов, не перешедших в предельное состояние, или после их разгрузки). Корректировка исходных данных задачи в процессе ее решения позволяет анализировать произвольные сложные нагружения, учитывать работу конструкции в процессе ее возведения или усиления, учитывать трансформацию конструктивной системы в процессе ее нагружения (образование горных выработок в массиве, демонтаж конструктивных элементов и т. п.).

Программа позволяет рассчитывать плоско-пространственные пластинчатые и стержневые системы. Для грунтовых массивов видом напряженно-деформированного состояния является плоская деформация. Имеются специальные типы стержневых элементов, которые позволяют учитывать одностороннюю связь фундаментов с основанием, предельное сопротивление сдвигу в зависимости от осевого напряжения в сопряженном стержне. Такие элементы позволяют рассчитывать фундаменты на вертикальные нагрузки с учетом касательных напряжений по подошве. Нагружение может задаваться в виде силовых факторов или вынужденных перемещений. Последнее актуально при расчете фундаментных конструкций сооружений, предназначенных для эксплуатации на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах.

Проблемы численной реализации алгоритмов. В процессе эксплуатации ВК “Нелинейный полифем” в институте Донецкий ПромстройНИИпроект и в Донбасской государственной академии строительства и архитектуры выявлены определенные проблемы численной реализации алгоритмов и внесены корректировки в программную документацию. Ниже анализируются основные из этих проблем.

Влияние схемы разрушения конструкции на корректность получаемых результатов

На примере анализа устойчивости грунтовых массивов можно выделить две характерные схемы разрушения. По первой схеме грунтовый массив разрушается в результате формирования криволинейных поверхностей скольжения. Эта схема разрушения характерна для оползней вращения. По второй схеме разрушение происходит по горизонтальным или наклонным плоскостям скольжения, например, в случае активизации пристенного оползня. Проблема заключается в том, что при решении упруго-пластической задачи используется только одна деформационная характеристика материала – модуль деформации грунта. В этом случае при наступлении предельного сдвига конечный элемент полностью теряет свою отпорность. В рамках теории пластич-

ности независимо анализируется сдвиговое и объемное деформирование. При этом используются минимум две деформационные характеристики материала – модуль сдвига и модуль объемной деформации. В результате этого при наступлении предельного сдвига конечный элемент может обладать отпорностью при наличии стесненного объемного деформирования. По указанным выше причинам анализ предельного состояния оползней вращения в рамках упруго-пластической задачи дает вполне приемлемые для практики результаты. Напротив, расчеты, связанные с оценкой предельного состояния пристенных оползней, могут приводить к провальным явлениям под частью массива, что свидетельствует о некорректности таких расчетов.

Влияние коэффициента Пуассона на результаты расчетов

Численными исследованиями установлено существенное влияние коэффициента Пуассона на результаты решения упруго-пластической задачи. От величины последнего зависит траектория нагружения в конечном элементе и его прочность. В качестве теста было принято аналитическое решение Пузыревского для нахождения начального критического давления при полосовой нагрузке на грунтовый массив в условиях плоской деформации. Установлено, что адекватность численного решения упруго-пластической задачи с тестовой задачей наблюдается при значении коэффициента Пуассона грунта, соответствующего практической несжимаемости грунта. Для глин это значение составляет 0,42 – 0,45.

Проблема сходимости итерационных процессов. Несмотря на то, что задача решается безитерационным шаговым методом, при решении ряда задач наблюдалось заикливание итерационных процессов даже при простом нагружении по внешним нагружающим параметрам. Здесь выявлены две наиболее вероятные причины этого явления. Первая причина заключается в потере точности вычислений параметров траекторий нагружения в конечных элементах, напряженное состояние в которых может оказаться достаточно близким. Для вывода задачи из заикливания

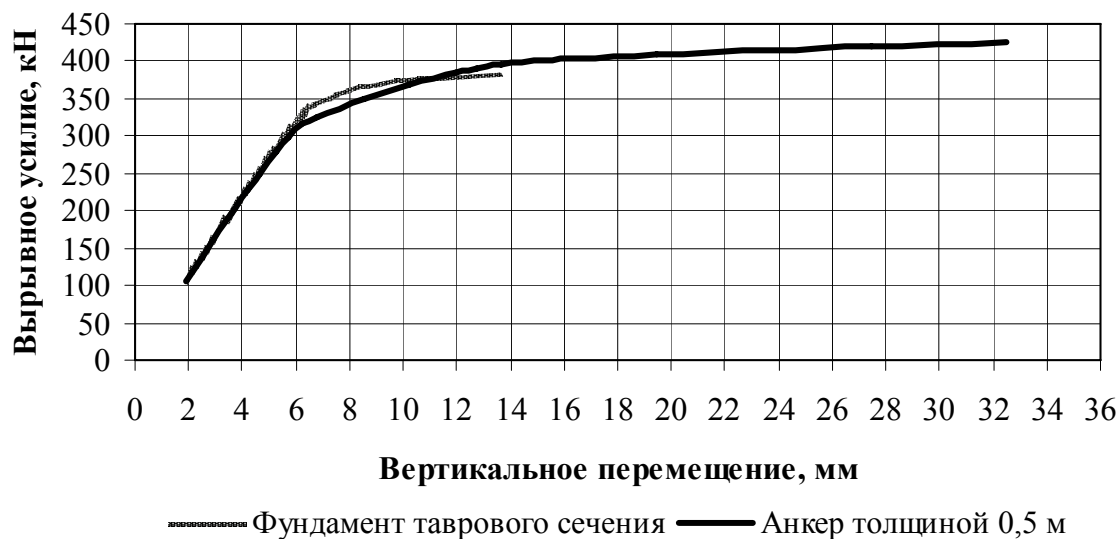


Рис. 3. Графики вертикальных перемещений фундаментов при действии выдергивающей нагрузки.

здесь следует применять коэффициенты релаксации, большие единицы. Применение коэффициентов релаксации равносильно переводу в предельное состояние группы конечных элементов с достаточно близким уровнем напряженного состояния. Рекомендуется назначать коэффициенты релаксации в пределах 1,01 – 1,05. Вторая причина связана с закливанием при определении направления нагружения в конечном элементе. Это особенно проявляется при простом нагружении по внешним параметрам, поскольку здесь изменение направления нагружения в конечном элементе вызвано перераспределением напряжений в рассчитываемой системе. Сам факт закливания свидетельствует о несущественном перераспределении напряжений в конечных элементах, в результате чего происходит потеря точности вычислений, связанных с определением направления нагружений. Для выхода из закливания рекомендуется использовать блокировку вычислений, связанных с определением направления нагружения в конечных элементах, находящихся в неустойчивой области перераспределения напряжений.

Примеры численной реализации алгоритмов

В качестве примеров численной реализации алгоритмов приводятся результаты расчетов фундаментов ЛЭП на воздействие выдергивающих нагрузок, выполненных аспирантами

Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Акцент сделан на анализ воздействия на фундаменты выдергивающих нагрузок, которые для рассматриваемого типа сооружений являются определяющими. Такие фундаменты могут корректно анализироваться в рамках упруго-пластической задачи, так как их основание разрушается по плоскостям скольжения, близким по ориентации к вертикальным.

Ниже приводятся сопоставительные результаты расчета двух типов фундаментов: традиционного фундамента таврового сечения и фундамента – анкера. Глубина заложения фундаментов 3 м, ширина подошвы 1,5 м, толщина фундаментной плиты 0,5 м, толщина стены таврового фундамента 0,5 м. Грунтовые условия: модуль деформации 25 МПа; коэффициент Пуассона 0,42; коэффициент пористости 0,55; удельное сцепление 34 кПа; угол внутреннего трения 23 градуса. Расчетная схема основания принята в виде ансамбля треугольных конечных элементов толщиной 1 м, работающих в условиях плоской деформации. Геометрическая форма конечного элемента принята из условия однородности в нем напряженно-деформированного состояния. В этом случае условие прочности можно отнести непосредственно к каждому конечному элементу (а не к какой-то точке этого элемента).

На рис. 2 представлена последовательность формирования зон предельного равновесия в основании таврового фундамента и фундамента – анкера. Характерно, что первые зоны предельного равновесия развиваются на обрезе фундамента в крайних его точках. При этом основание фундамента – анкера начинает разрушаться позже, чем таврового фундамента. В предельном состоянии формы разрушения основания обеих фундаментов подобны. При этом слой грунта над фундаментом – анкером представляет собой жесткое ядро, подобное телу таврового фундамента.

Поскольку в процессе решения упруго-пластической задачи выполняется расчет конструкций по деформированной схеме, имеется возможность сопоставить вертикальные перемещения исследуемых типов фундаментов при действии выдергивающей нагрузки (рис. 3). Можно считать, что жесткость и несущая способность обеих типов фундаментов при действии выдергивающей нагрузки примерно одинаковы. Несущая способность фундаментов реализуется при вертикальном перемещении 14 мм. Фундамент – анкер имеет более продолжительный график пластического течения до величины вертикального перемещения 32 мм. Таким образом, с учетом материалоемкости фундаментов, при действии выдергивающих нагрузок предпочтительнее следует отдавать фундаментам – анкерам.

Выводы

Методы анализа предельных состояний оснований и фундаментов, основанные на решении смешанной задачи теории упругости и пластичности, во многих случаях позволяют получать результаты, удовлетворяющие практику проектирования и строительства зданий и сооружений. При разработке алгоритмов, основанных на решении упруго-пластической задачи, рекомендуется учитывать следующее:

- конечно-элементную расчетную схему следует составлять из элементов, напряженно-деформированное состояние которых является однородным. Это позволяет соотносить условия прочности непосредственно к конкретным конечным элементам, а не к точкам в их области, корректный выбор которых является отдельной проблемой;

- не следует пытаться рассчитывать системы, для которых условием получения корректного решения является необходимость независимого анализа сдвигового и объемного деформирования;
- величина коэффициента Пуассона существенно влияет на параметры траекторий нагружения в конечных элементах и на их прочность. Рекомендуется принимать значения коэффициентов Пуассона, соответствующие практической несжимаемости материала;
- применение безитерационного шагового метода для решения упруго-пластических задач может в отдельных случаях сопровождаться машинным закливанием. Для устранения машинного закливания рекомендуется применять коэффициенты релаксации процессов, обеспечивающие групповой переход конечных элементов в предельные состояния. В алгоритмах, в которых учитывается направление нагружения в конечных элементах, может потребоваться в определенных случаях блокировка вычислений, связанных с определением направления нагружения;
- с целью повышения достоверности и надежности анализа предельных состояний оснований, фундаментов и грунтовых массивов рекомендуется более широко применять в проектной практике точные методы, основанные на гипотезах теории пластичности упрочняющихся материалов. Для этого необходимо разработать национальный стандарт по нормированию хотя бы двух деформационных характеристик грунта – модуля сдвига и модуля объемной деформации;
- при создании вычислительных комплексов (ВК), связанных с решением нелинейных задач шаговым методом, рекомендуется разрабатывать графический интерфейс для вывода результатов расчета в форме динамического графического окна, позволяющего наблюдать за процессом разрушения конструкций и оснований в мультипликационном режиме. Это сделает более наглядным процесс проектирования, а также сможет способствовать повышению эффективности учебного процесса.

Литература

1. Петраков А.А. Исследование предельных состояний сооружений на деформируемом основании. – Современные проблемы строительства. – Донецк: Донецкий ПромстройНИИпроект, ООО “Лебедь”, 1997, С. 16-21.
2. Петраков А.А. Практические методы решения упругопластических задач при сложном нагружении бетонных конструкций. – Современные проблемы строительства. – Донецк: Донецкий ПромстройНИИпроект, ООО “Лебедь”, 1999, С. 65-69.
3. Першина С.В., Слободяник А.В. PLAXIS – программный пакет для расчета деформаций и устойчивости геотехнических сооружений методом конечных элементов. – Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), вип. 12. – Полтава: ПолтНТУ, 2003. – С. 158-163.
4. Широков В.Н. Теория пластического течения и деформации грунтов при сложном нагружении. – Основания, фундаменты и механика грунтов, 1976, № 3, С. 33-36.
5. Ивлев Д.Д., Быковец Г.И. Теория упрочняющегося пластического тела. – М.: Наука, 1971. – 231 с.

Петраков Александр Александрович – доктор технічних наук, професор кафедри «Основи, фундаменти та підземні споруди» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Академік будівництва України. Наукові інтереси: нелінійна механіка ґрунтів, взаємодія системи основа-фундамент-будівля., будівництво в складних інженерно-геологічних умовах.

Петракова Наталя Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Основи, фундаменти та підземні споруди» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: взаємодія системи основа-фундамент-будівля., будівництво в складних інженерно-геологічних умовах.

Лобачева Наталя Геннадіївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Основи, фундаменти та підземні споруди» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: взаємодія системи основа-фундамент-будівля., будівництво в складних інженерно-геологічних умовах.

Петраков Александр Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Академик Академии строительства Украины. Научные интересы: нелинейная механика грунтов, взаимодействие системы основания-фундаменты-надземное строение, строительство в сложных инженерно-геологических условиях.

Петракова Наталья Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: взаимодействие системы основания-фундаменты-надземное строение, строительство в сложных инженерно-геологических условиях.

Лобачева Наталья Геннадиевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: взаимодействие системы основания-фундаменты-надземное строение, строительство в сложных инженерно-геологических условиях.

Petrakov Aleksandr Aleksandrovich – doctor of technical sciences, professor of department of «of Bases, foundations and underground structures» chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. The Academician of Academy of Building of Ukraine. Scientific interests: nonlinear mechanics of grounds, interfacation of the bases foundations-overground structure, building in difficult engineering and geologic conditions.

Petrakova Natalya Aleksandrivna – the candidate of technical sciences, assistant professor of the «Bases, foundations and underground structures» chair Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: interaction of bases-foundations overground structur building in the difficult engineering and geologic conditions.

Lobacheva Natalya Gennadiivna – the candidate of technical sciences, assistant professor of the «Bases, foundations and underground buildings» chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: interaction of bases-foundations overground structur building in the difficult engineering and geologic conditions.