

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №3, Том 12 / 2020, No 3, Vol 12 <https://esj.today/issue-3-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/77SAVN320.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Саинов М.П. Авторская вычислительная программа для исследований напряжённо-деформированного состояния грунтовых плотин // Вестник Евразийской науки, 2020 №3, <https://esj.today/PDF/77SAVN320.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Sainov M.P. (2020). Authorial computer program for study of stress-strain state of embankment dams. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 3(12). Available at: <https://esj.today/PDF/77SAVN320.pdf> (in Russian)

**УДК 626.01; 624.13; 627.8**

**Саинов Михаил Петрович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
Москва, Россия

Доцент кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства»

Кандидат технических наук, доцент

E-mail: [mp\\_sainov@mail.ru](mailto:mp_sainov@mail.ru)

РИНЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=427608](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608)

## **Авторская вычислительная программа для исследований напряжённо-деформированного состояния грунтовых плотин**

**Аннотация.** Введение. На рынке прикладного программного обеспечения есть множество вычислительных программных комплексов, которые предоставляют широкие возможности по решению задач о напряжённо-деформированном состоянии (НДС) различных сооружений. Тем не менее, задачи о НДС грунтовых плотин имеют ряд особенностей, которые делают целесообразным создание и применение авторских вычислительных программ.

**Материалы и методы.** На основе анализа нормативных документов и практики гидротехнического строительства были выделены основные и особые требования к расчётам НДС грунтовых плотин. Затем были проанализированы возможности сертифицированных промышленных программных комплексов, а также рассмотрены использованные в них методы и методики расчётов НДС.

**Результаты.** Анализ показал, что на данный момент не создано универсальной и полностью теоретически обоснованной модели, которая бы описывала все нелинейные эффекты, характерные для деформирования грунтов. Существует потребность в совершенствовании и создании новых моделей, поэтому для их реализации требуется разработка авторских вычислительных программ. Для моделирования нелинейности грунтов и особенностей формирования НДС грунтовых плотин автором предложен ряд нестандартных алгоритмов моделирования. Модели, методики и алгоритмы реализованы в вычислительной программе NDS\_N, созданной автором.

**Выводы.** У стандартных, промышленных программных комплексов много преимуществ, однако их использование не всегда удовлетворяет потребностям исследований НДС грунтовых плотин. Они либо ограничены в реализации специфических нелинейных эффектов формирования НДС грунтовых плотин и их моделей, либо не позволяют получать нужную для анализа информацию.

**Ключевые слова:** напряжённно-деформированное состояние; грунтовая плотина; вычислительная программа; нелинейность; модель грунта

### Введение

В настоящее время в инженерной практике используется множество вычислительных программных комплексов (далее – ПК), которые предоставляют широкие возможности по решению самых разнообразных задач, в т. ч. задач о напряжённно-деформированном состоянии (НДС) конструкций и сооружений. Эти ПК можно условно разделить на универсальные, позволяющие решать задачи разных отраслей знаний, и специализированные, которые предназначены для решения задач какой-либо одной области научных знаний и учитывающих их специфику. Наиболее известными являются универсальные программные комплексы ANSYS и ABAQUS, разработанные крупными корпорациями в сфере информационных технологий.

Однако расчёты НДС грунтовых массивов и сооружений имеют свои особенности, учёт которых требует специальных подходов. В геотехнике применяют такие специализированные комплексы как PLAXIS, Z-SOIL, GEODYNA, GEO-FEM и другие.

Тем не менее, расчёты НДС грунтовых плотин имеют ряд особенностей. В соответствии со строительными нормами (СП 39.13330.2012<sup>1</sup>) расчёты НДС грунтовых плотин высокой ответственности должны выполняться как на стадии проектирования, так и для анализа поведения плотины при проведении натурных исследований. Они имеют своей целью не только определение осадок и смещений плотины, но и проверку трещиностойкости водопорных элементов, прочности негрунтовых противодиффузионных устройств, подбор материалов плотины. Кроме того, напряжённно-деформированное состояние тела плотины из грунтовых материалов и её основания требуется учитывать в расчётах устойчивости откосов.

СП 39.13330.2012 устанавливает требования не только к задачам, но и к методике выполнения НДС грунтовых плотин. Указывается, что для расчётов плотин, расположенных в узких створах, целесообразно использовать трёхмерные модели. Установлено, что в расчётах, как правило, необходимо применять нелинейные модели грунтов, а также обязательно необходимо учитывать поэтапность возведения плотины, скорость заполнения водохранилища. Дополнительно, в некоторых случаях, при расчётах НДС плотины необходимо учитывать изменение её температурного режима, изменение свойств грунтов при фазовых переходах и замачивании, а также явление порового давления в грунте. Кроме того, опыт выполнения исследований показывает, что необходимо учитывать не только нелинейность деформирования грунтов, но и возможность проявления нелинейных эффектов на контактах между элементами конструкции, таких как проскальзывание и отрыв.

Перечисленные высокие требования осложняют использование при исследованиях НДС грунтовых плотин тех программных комплексов, которые разработаны фирмами в сфере информационных технологий (далее – стандартные ПК). Несмотря на то, что возможности современных стандартных ПК – очень широкие, они всё же ограничены. В случае, если исследования НДС направлены на изучение поведения уже построенного сооружения в реальных условиях, возникает необходимость в совершенствовании применяемых моделей и учёте особых эффектов формирования НДС плотины.

Как правило, стандартные ПК имеют закрытый программный код – использованный в них алгоритм расчёта не может быть дополнен или изменён. Они позволяют использовать

---

<sup>1</sup> СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84\*. – Москва. ФАУ «ФЦС», 2012. – 86 с.

только стандартные модели, заранее заложенные в программу. Только некоторые программные комплексы дают возможность реализовывать при расчётах пользовательские модели. По этой причине в Китае получил распространение программный комплекс ABAQUS. Программный комплекс PLAXIS позволяет пользователю с помощью программного кода задавать связь между приращениями деформаций и приращениями напряжений. Тем не менее, алгоритм расчёта стандартных ПК остаётся не вполне ясным и закрытым от изменений. Методика расчёта, использованная в программе, не может быть изменена, затруднён контроль хода выполнения расчётов и оценка точности получаемых результатов.

По этим причинам существует потребность в разработке авторских вычислительных программ, т. е. программ, разработанных исследователями самостоятельно. Можно привести несколько примеров создания специализированных (авторских) вычислительных программ. В частности, командой А.М. Белостоцкого создан программный комплекс STUDYO, используемый для решения широкого круга задач [1]. Для реализации модели грунта Ю.К. Зарецкого в московском Гидропроекте была создана вычислительная программа «Земля» [2], которая применяется для расчётов грунтовых плотин.

Разработка и применение авторских вычислительных программ обладает тем преимуществом, что позволяет использовать и верифицировать новые модели и расчётные методики.

В данной статье описывается опыт разработки и применения автором вычислительной программы NDS\_N, составленной специально для расчётов НДС грунтовых плотин. Эта статья дополняет информацию о программе, изложенную ранее в [3], с учётом усовершенствования программы. Проведён сравнительный анализ преимуществ и недостатков авторской вычислительной программы по сравнению со стандартными.

### Материалы и методы

На основе анализа требований, предъявляемых нормативным документом и научной практикой к расчётам НДС грунтовых плотин, были выделены основные и дополнительные требования к вычислительным программам. Затем был проведён анализ возможностей стандартных ПК. Все ПК основаны на использовании при моделировании НДС метод конечных элементов. При анализе использовались описания программных комплексов ANSYS<sup>2</sup>, ABAQUS<sup>3</sup>, PLAXIS<sup>4</sup>, имеющиеся в открытом доступе. Анализ возможностей PLAXIS уделялось особое внимание, т. к. эта специализированная программа предназначена для работы грунтовых массивов.

Возможности стандартных программ сравнивались с теми, которые даёт вычислительная программа NDS\_N, составленная автором (далее – АВП, авторская вычислительная программа). Данная программа составлена на языке программирования Pascal. В статье в общих чертах описан алгоритм разработанной вычислительной программы.

Был обоснован выбор моделей и методик выполнения расчётов, использованных в вычислительной программе. Для моделирования грунтов была использована модель, предложенная проф. Рассказовым Л.Н. [4] и скорректированная автором.

### Результаты

---

<sup>2</sup> ANSYS. Theorie Reference. Release 5.6. Edited by P. Koenke. Ansys Inc.

<sup>3</sup> ABAQUS 6.11. Theory Manual.

<sup>4</sup> PLAXIS CONNECT Edition V20. Пособие по моделям материалов. 238 с.

Все требования, предъявляемые нормативным документом СП 39.13330.2012 и практикой проектирования, к расчётному обоснованию грунтовых плотин можно условно разделить на:

- основные обязательные, без обеспечения которых нельзя быть уверенным в правильности, адекватности результатов численного моделирования;
- основные второстепенные – это требования по учёту нелинейных эффектов деформирования грунтовой среды, учёт которых повышает качество результатов численного моделирования;
- особые, специфические – это требования, учёт которых требуется только в особых случаях.

Рассмотрим возможности стандартных и авторской вычислительных программ по удовлетворению указанных требований.

### **1. Обеспечение обязательных требований к вычислительной программе**

К основным обязательным требованиям, которым должна удовлетворять вычислительная программа, можно отнести следующие необходимые возможности:

- возможность моделирования изменений конструкции сооружения в процессе его возведения и эксплуатации;
- возможность изменения нагрузок на сооружение на разных этапах;
- возможность моделирования особого поведения контактов между элементами конструкции как зон ослабления;
- возможность выполнения расчётов НДС в пространственной постановке.

Все указанные возможности с успехом реализованы в стандартных вычислительных программных комплексах. В любой авторской программе они также должны быть обеспечены.

#### **1.1 Создание конечно-элементных моделей**

Широкие возможности стандартные ПК предоставляют в создании конечно-элементных моделей, как плоских, так и пространственных. Многие из них имеют широкую конечно-элементную базу, включающую разные типы элементов. Для моделирования особенностей поведения контактов между конструкциями сооружения используют контактные конечные элементы.

Стандартные программы позволяют автоматически генерировать как плоские, так и пространственные конечно-элементные модели. При генерации модели сооружения PLAXIS предоставляет возможность автоматической генерации контактных конечных элементов на контакте жёстких конструкций и грунтового массива.

Тем не менее, у стандартных ПК имеются и недостатки. В частности, для удобства автоматической генерации моделей сооружения часто применяются конечные элементы простой формы. Например, в программе PLAXIS при создании плоских моделей используются треугольные конечные элементы, а при создании пространственных – клиновидные элементы. Получаемая из таких конечных элементов модель сооружения получается нерегулярной, с элементами неправильной формы.

Использованный в PLAXIS подход генерации конечно-элементных моделей осложняет решение задач о НДС тех специфических конструкций грунтовых плотин, которые вмещают в себя жёсткие тонкостенные устройства. Опыт показывает, что из-за сложного характера деформаций этих жёстких конструкций возникает проблема обеспечения необходимой точности результатов расчётов НДС. Автором было показано, что для моделирования жёстких негрунтовых конструкций необходимо применять конечные элементы повышенной точности, с квадратичной и кубической аппроксимацией перемещений внутри элемента [5]. В PLAXIS для моделирования деформаций и напряжений в грунте используются квадратичные конечные элементы (плоские 6-узловые треугольные и объёмные 15-узловые клиновидные). Однако иногда этого недостаточно, требуется более высокая степень аппроксимации. Использование в PLAXIS элементов простой формы неудобно при моделировании тонкостенных конструкций.

По этим причинам при создании вычислительной программы автором был использован несколько другой подход. Во-первых, для моделирования сплошной среды были использованы четырёхугольные плоские и призматические объёмные конечные элементы. Они более удобны для моделирования тонкостенных конструкций. Указанные элементы могут быть превращены в более простые путём объединения узлов.

Во-вторых, в АВП предусмотрена возможность использования конечных элементов разного порядка: с квазилинейной, квадратичной и кубической аппроксимацией. Кроме того, автором был создан способ создания конечных элементов с неоднородной функцией распределения перемещений по объёму элемента [6]. Он основан на использовании внеузловых степеней свободы конечного элемента.

Конечно-элементная база АВП ограничена конечными элементами сплошной среды, контактными, мембранными и стержневыми конечными элементами. Однако этого вполне достаточно для решения задач о НДС грунтовых плотин. С помощью элементов сплошной среды можно моделировать любые объёмные конструкции, с помощью контактных – швы и трещины, а с помощью мембранных и стержневых – особо тонкие плёночные мембраны и арматуру.

Автоматической генерации конечно-элементных моделей в авторской программе не предусмотрено, сетки создаются вручную или полуавтоматически. Используются вспомогательные программы, упрощающие генерацию моделей, особенно пространственных. Это позволяет создавать максимально удобные для анализа, регулярные конечно-элементные модели.

Ещё одной особенностью АВП является то, что результирующая информация о НДС сооружения (перемещения, напряжения, деформации, параметры состояния) выдаются в числовом виде не усреднённой по конечному элементу, а для каждой из его расчётных точек. Расчётными точками являются точки интегрирования по Гауссу. Такой подход позволяет контролировать гладкость распределения результирующих функций и даёт больше информации для анализа. По значениям напряжения в точках интегрирования можно отдельно вычислить внутренние усилия (силы, изгибающие моменты) в тонкостенных конструкциях, что очень важно для анализа условий их работы.

Благодаря наличию информации в точках интегрирования конечных элементов, удаётся передать информацию о распределении напряжений в сооружения для последующих расчётов устойчивости откосов. Для расчёта устойчивости откосов методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения автором создана отдельная вычислительная программа.

## 1.2 Моделирование изменений конструкции и нагружения сооружения

Важным обязательным требованием к расчёту грунтовых плотин является воспроизведение поэтапности (последовательности) возведения и нагружения сооружения, т. к. вносит существенные изменения в НДС сооружения. При моделировании грунтовых плотин с негрунтовыми конструкциями важной является возможность создания и демонтажа отдельных элементов конструкций, технологического процесса их создания. Некоторые такие конструкции (например, «стены в грунте») устраиваются уже после возведения плотины.

Стандартные ПК обеспечивают все указанные выше возможности путем активирования и деактивирования кластеров (групп) элементов. Возможна и замена материала в отдельных элементах конструкции. Аналогичные возможности есть и в отношении действующих нагрузок. Например, PLAXIS предоставляет возможности активирования и деактивирования приложения нагрузок к сооружению, позволяет учитывать различные типы нагрузок (точечные, линейные и объёмно распределённые нагрузки) с учетом их изменения на каждом этапе строительства.

Такие же возможности предусмотрены и в АВП. Предусмотрена возможность очень подробного, послойного возведения плотины. При расчётах НДС как правило рассматривается несколько десятков расчётных этапов (моментов времени). Этот процесс максимально автоматизирован. Силы от собственного веса сооружения подсчитываются автоматически, с учётом взвешивающего действия воды. Заранее задаётся информация о расчётных этапах:

- перечень групп элементов, входящих в профиль плотины;
- распределение материалов в конструкции сооружения;
- информация о напорных гранях сооружения, на которые действует давление верхнего и нижнего бьефа;
- информация о водонасыщении материалов.

Особые нагрузки (фильтрационные, сейсмические и иные) могут быть введены извне для каждой из степеней свободы конечно-элементной модели. Для их расчёта служат специальные вспомогательные программы. Для определения фильтрационных сил используется распределение уровней фильтрационных вод, для определения сейсмических сил по линейно спектральной методике – формы собственных колебаний сооружения.

Для фильтрационных и динамических расчётов автором созданы специальные вычислительные программы. Благодаря тому, что эти программы используют ту же конечно-элементную модель, что и при расчётах НДС, вычисление внешних сил не представляет особых сложностей. Это расширяет возможности для исследований НДС грунтовых плотин.

## 1.3 О моделировании поведения контактов

Как и в стандартных ПК, в АВП для моделирования нелинейных эффектов контактного взаимодействия конструкций сооружения используются контактные конечные элементы (плоские и пространственные). В них напряжения выражаются не через деформации, а через разницу перемещений между «берегами» контакта. Деформируемость контакта характеризуется нормальной и касательной жёсткостью, их отличие от деформируемости сплошной среды позволяет моделировать ослабления. Значения жёсткости принимаются неизменными при сохранении прочности контакта.

Главным предназначением контактных конечных элементов является возможность моделирования нелинейных эффектов контактного взаимодействия: возможности отрыва и

проскальзывания. Отрыв реализуется при потере прочности контакта на растяжение, а проскальзывание – при потере сдвиговой прочности. В АВП для определения сопротивления сдвигу используется условие прочности Кулона, прочность выражается через удельное сцепление и угол внутреннего трения. Учитывается взаимовлияние нелинейных эффектов – раскрывшийся контакт не обладает сопротивлением сдвигу, а контакт, повторно сомкнутый после потери прочности на растяжение, не обладает сцеплением.

Таким образом, в выполнении обязательных требований АВП не уступает стандартным ПК за исключением автоматизированной подготовки исходных данных. Однако АВП предоставляет некоторые дополнительные возможности по сравнению со стандартными ПК.

Но АВП безусловно не может «тягаться» со стандартными ПК в возможностях программной реализации численных методов. Рассмотрим этот вопрос.

## 2. О реализации в авторской вычислительной программе методике расчёта

В АВП использован традиционный способ решения задач НДС методом конечных элементов (МКЭ), который основан на решении системы линейных алгебраических уравнений, выражающих равенство энергии деформирования конструкции и работы внешних сил для всех степеней свободы. Система уравнений МКЭ имеет вид:

$$[K]\{\Delta U\} = \{\Delta F\}.$$

Здесь  $[K]$  – матрица жёсткости системы степеней свободы;

$\{\Delta F\}$  – вектор-столбец сил, отнесённых к степеням свободы системы;

$\{\Delta U\}$  – вектор-столбец перемещений степеней свободы системы.

Учитывая, что расчёт НДС последовательно выполняется для нескольких расчётных этапов, система уравнений формируется и решается несколько раз. Размер системы определяется количеством степеней свободы сооружения на расчётном этапе. Количество степеней свободы определяется количеством узлов и заданной степенью аппроксимации перемещений конечных элементов.

При составлении  $[K]$  и  $\{\Delta F\}$  используется численное интегрирование величин по объёму, площади, длине. Для этого применяется используется метод Гауссовых точек. Количество точек интегрирования определяется в зависимости от максимальной степени аппроксимации перемещений внутри элемента.

Матрица жёсткости конечного элемента формируется из его матриц формы и упругости. Матрица жёсткости всей системы степеней свободы формируется и хранится в виде линейного массива, содержащего полуленту ненулевых значений жёсткостей.

Далее осуществляется разложение матрицы жёсткости на единичную треугольную и диагональную. Решение системы уравнений МКЭ осуществляется наиболее простым численным методом, методом Гаусса. Точность вычислений обеспечивается за счёт использования чисел двойной точности. Полученные значения перемещений (приращений перемещений) используются для вычисления деформаций конечных элементов и напряжений в них.

В АВП предусмотрена возможность выполнения расчётов методов суперэлементов (подконструкций) [7]. Этот метод применяют для больших конечно-элементных моделей, состоящих из нескольких отдельных конструкций, объединённых в единое целое. Применение метода суперэлементов позволяет преодолевать вычислительные трудности, связанные с

решением задач с большим количеством степеней свободы и размером матрицы жёсткости. В методе суперэлементов сначала формируются матрицы жёсткости подконструкций, которые затем конденсируются в глобальную матрицу жёсткости, соответствующую общим степеням свободы. Аналогично поступают и с вектором внешних сил. Затем решаются системы линейных алгебраических уравнений – сначала глобальная, потом – для каждой из подконструкций.

Однако метод суперэлементов крайне редко применяется автором для расчётов НДС грунтовых плотин. Опыт показал, что метод суперэлементов применим к решению только тех задач, в которых нелинейные эффекты применяются только на границах между составными частями модели сооружения [7]. В случае, если нелинейный характер деформирования присущ для материала какой-либо их составных частей, применение метода суперэлементов может привести к существенным погрешностям в решении или даже к ошибочным результатам.

Для моделирования нелинейных эффектов в АВП реализован специальный алгоритм, который будет рассмотрен ниже.

### 3. Методика решения задачи НДС с учётом нелинейных эффектов

Учёт нелинейности поведения среды (деформирования грунтов и контактов между элементами конструкции) является важной особенностью решения задач о НДС грунтовых плотин. Основную сложность для моделирования представляет нелинейность деформирования грунтов, т. к. она включает целый ряд нелинейных эффектов: пластичность, ползучесть, дилатансия и др. Деформируемость грунтов существенно зависит от вида нагружения (активное нагружение и разгрузка), изменяется в процессе нагружения, а наступление предельного состояния возможно при растяжении, сжатии и сдвиге.

Наличие большого количества нелинейных эффектов деформирования грунта создают неопределённость, множественность результатов решения. Возможно взаимовлияние нескольких нелинейных эффектов. Поэтому для задач о НДС грунтовых сооружений характерна проблема бифуркации (раздвоения) решения. Рассмотрим подробнее эту проблему, а также способы, применяемые для её решения.

Поведение грунтов при нагружении столь разнообразно, что на данный момент не создано единой, универсальной теории, описывающей их деформирование и прочность. В инженерной практике применяется множество разных моделей грунтов: Мора, упрочняющегося грунта (Hardening Soil), гиперболическая модель, Cam Clay и другие. Применяемые модели основаны на разных физических принципах. Выделяют два типа моделей: модели теории пластического течения и модели теории нелинейной упругости. В стандартных ПК используются модели разных типов, но, конечно, не все. Специализированные ПК (например, PLAXIS) предоставляют больше возможностей по использованию моделей грунтов, чем универсальные ПК.

#### 3.1 Моделирование двух ветвей нагружения

Проблему множественности решения задачи о НДС создаёт наличие двух ветвей нагружения грунта. При разгрузке грунт ведёт себя упруго, а при активном нагружении – упруго-пластически.

В связи с этим наибольшее распространение получили модели, основанные на теории пластического течения. Эта теория не только позволяет учесть наличие у грунта двух ветвей нагружения, но и однозначно определить направление развития пластических деформаций.



Основным постулатом теории является то, что независимо от направления приращений напряжений вектор пластических деформаций направлен перпендикулярно к некоторой поверхности текучести (пластичности), являющейся границей между областями упругого и упруго-пластического деформирования.

На теории пластического течения основаны модели с критериями пластичности Кулона-Мора, Друкера-Прагера, Hardening Soil, Cam Clay.

Проблемой применения теории пластичности является неопределённость положения поверхности текучести (пластичности). Лабораторные эксперименты, описанные в учебном пособии А.Л. Гольдина и Л.Н. Рассказова<sup>5</sup>, а также мысленные эксперименты не подтверждают основной постулат теории пластического течения.

Это обосновывает возможность построения модели деформирования грунтов в виде математических формул, связывающих приращения напряжений  $\{\Delta\sigma\}$  и приращениями деформаций  $\{\Delta\epsilon\}$  для каждой из ветвей. За основу может быть взята форма закона Гука. Такие модели принято называть моделями теории нелинейной упругости. Такой способ использован для построения гиперболической модели Дункана-Чанга (1970 г.) [8], которая получила широкое распространение зарубежом при расчётном обосновании грунтовых плотин.

Этот способ также использовал Л.Н.Рассказов (МИСИ-МГСУ) при построении своей математической модели грунта [4]. Им была предложена следующая форма записи математической зависимости между  $\{\Delta\sigma\}$  и  $\{\Delta\epsilon\}$  для активного нагружения.

$$d\sigma_{mn} = \delta_{mn} E_0^\delta (de + de_d) + 2G^\delta d\epsilon_{mn}.$$

Здесь  $d\sigma_{mn}$  – приращение компоненты тензора напряжений;

$\delta_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{при } m = n \\ 0 & \text{при } m \neq n \end{cases}$  – символ Кронекера;

$de$  – приращение объёмной деформации;

$de_d$  – приращение объёмной деформации от дилатансии;

$E_0^\delta$  – модуль объёмной деформаций для приращений деформаций;

$G^\delta$  – модуль сдвига для приращений деформаций;

$d\epsilon_{mn}$  – приращение компоненты девиатора деформаций.

Введение в формулу величину  $de_d$  позволяет эффект дилатансии – возникновения объёмных деформаций при сдвиге. Данная форма записи позволяет описать практически любой характер деформирования, поэтому он был использован и автором.

Однако применение данного способа требует наличия критерия, разграничивающего ветви нагружения. Для этого автором был использован подход, основанный на использовании поверхностей пластичности как в теории пластического течения. Однако в этом случае поверхность пластичности используется только для разграничения траекторий нагружения, но не для определения направления вектора пластических деформаций.

Автором был предложен способ расчёта две стадии [9]. На первой стадии расчёт осуществляется для ветви разгрузки, для условий упругого деформирования. Это позволяет

<sup>5</sup> Гольдин А.Л., Рассказов Л.Н. Проектирование грунтовых плотин / Учебное пособие – М.: Изд-во АСВ, 2001. – 384 с.

определить направление развития напряжений и деформаций и выявить реальный характер нагружения. Если деформирование осуществляется в рамках упругой области, то расчёт на этом завершается. Если же вектор напряжений пересекает границу упругой области, то это означает развитие пластических деформаций и активное нагружение. В этом случае необходимо выполнить вторую стадию расчёта, для условий упруго-пластического деформирования. Но прежде необходимо выделить ту часть, напряжений и деформаций, которые сформировались на стадии упругого деформирования.

Подробнее разработанный алгоритм описан в [9]. Форма границы упругой области принята упрощённой, как в модели Кулона-Мора. Тем не менее, разработанный способ обеспечивает возможность описания случая непростой траектории нагружения, когда активное нагружение наступает после разгрузки.

### 3.2 Моделирование эффектов упрочнения и разупрочнения грунта

Эффекты «упрочнения» и «разупрочнения» выражаются в изменении деформируемости грунта в процессе нагружения. Упрочнение заключается в снижении деформируемости за счёт увеличения бокового обжатия. Эффект «разупрочнения» выражается в повышении деформируемости грунта при восприятии сдвиговых сил по мере приближения к предельному состоянию. Нелинейность деформирования характеризуется изменением значений модуля деформации  $E$  грунта и коэффициента Пуассона  $\nu$  (относительной поперечной деформации). Упрочнение преимущественно характеризуется ростом  $E$ , а «разупрочнение» – в увеличении  $\nu$ .

Наличие эффектов «упрочнения» и «разупрочнения» занимает очень важное значение при моделировании НДС грунтовых сооружений, т. к. позволяет более точно прогнозировать их деформации. В частности, учёт эффекта упрочнения лежит в основе модели Hardening Soil [10].

Как правило, снижение деформируемости грунта описывают в виде степенной зависимости модуля деформации от напряжения обжатия. Общепринятым и наиболее обоснованным является использование в качестве напряжения обжатия минимально сжимающего напряжения. По этой причине автором было внесено соответствующее изменение в модель проф. Рассказова Л.Н., лежащую в основе АВП. До этого в модели в качестве напряжения обжатия использовалось среднее напряжение.

Эффекту «разупрочнения» уделяется меньшее внимание. Часто, например в модели Hardening Soil, модуль деформации  $E$  принимается постоянным на всём пути нагружения. Однако при расчётах НДС грунтовых плотин учёт этого эффекта является важным, т. к. в теле грунтовых плотин могут развиваться большие по объёму зоны предельного состояния. Поэтому в практике проектирования плотин получили применение модели, учитывающие это, в частности, гиперболическая модель Дункана-Чанга [8]. Для оценки приближения прочностного состояния к предельному в ней используют условие прочности Кулона-Мора.

В АВП была использована модель, предложенная проф. Рассказовым Л.Н., в которой оценка прочностного состояния выполняется по энергиям деформирования. Если учитывать зависимость предельной энергии формоизменения от напряжения бокового обжатия, то можно добиться эквивалентности моделей Рассказова Л.Н. и Дункана-Чанга.

Изменение параметров модели деформируемости грунта в процессе нагружения создаёт ряд вычислительных проблем, связанных с необходимостью корректировки параметров модели в процессе расчёта. Это проблемы обеспечения точности и однозначности решения.

Проблема точности возникает из-за того, что решение нелинейной задачи не может быть получено точными аналитическими методами, а необходимо пользоваться приближёнными,

численными методами. Часто решение нелинейных задач осуществляют итерационным путём, постепенно приближая значения параметров модели деформируемости к реальным. Однако в этом случае результат решения может зависеть от последовательности расчёта. Опыт показал, что при этом возникает проблема сходимости итерационного процесса и проблема однозначности решения. Итерации могут не сходиться даже в случае, если изменяется только один из параметров модели ( $E$ ) [3], а при изменении двух параметров (например,  $E$ ,  $\nu$ ) вероятность расходимости итерационного процесса очень вероятна.

Поэтому в АВП для воспроизведения нелинейности плавного, монотонного характера был использован способ ступенчатого нагружения. Количество ступеней задаёт сам пользователь. Чем больше количество степеней, тем точнее получаемый результат. Но главное, что способ ступенчатого нагружения обеспечивает однозначность получаемых результатов.

Тем не менее, итерационный процесс является необходимым для учёта иных нелинейных эффектов.

### 3.3 Моделирование дилатансии

Явление дилатансии заключается в появлении дополнительной объёмной деформации при деформациях сдвига. Она может быть как отрицательной (контракция – дополнительное уплотнение), так и положительной (расширение). Единого способа описания дилатансии нет. В гиперболической модели явление дилатансии не учитывается. В разных моделях используются разные формулы для описания явления дилатансии.

В моделях, основанных на теории пластичности, учёт дилатансии осуществляется путём корректировки вектора пластических деформаций по отношению к положению поверхности текучести, эта разница выражается углом дилатансии. При этом предусматриваются различные условные меры по ограничению величины дилатансии для различных видов напряжённого состояния.

В моделях теории нелинейной упругости величину объёмной деформации от дилатансии выражают через интенсивность сдвиговых деформаций. Такой же подход использован и в использованной модели Рассказова Л.Н. Автором был усовершенствован способ определения деформации от дилатансии, однако он также выражает её через интенсивность деформаций сдвига [11].

Наличие перекрёстной связи между девiatorом и шаровым тензором деформаций представляет сложность для учёта при использовании традиционного метода конечного элемента. Сложность заключается в том, что связь между напряжениями и деформациями не может быть выражена в матричной форме. В этом случае учёт дилатансии может быть осуществлён только в рамках итерационного процесса.

### 3.4 Моделирование хрупкого разрушения материала

Возможность моделирования потери прочности грунта или контакта на растяжение реализуется во всех стандартных ПК и АВП. При потере прочности на растяжение происходит хрупкое разрушение, характеризующееся резким, скачкообразным изменением НДС. Усилия, которые ранее воспринимались разрушенными элементами, передаются на другие части конструкции. Для воспроизведения этого процесса требуется итерационный процесс.

В АВП итерационный процесс организован методом переменного вектора сил. Его методика описана в [6]. Матрица жёсткости в ходе итерационного процесса остаётся неизменной.

Однако известно, что при численной реализации итерационного процесса могут возникать сложности с обеспечением его сходимости (в т. ч. «зацикливание»). Каким образом решаются эти проблемы в стандартных ПК, неизвестно. Автору пришлось решать эту проблему самостоятельно.

Было выявлено, что итерационный процесс может не сходиться в следующих случаях:

1. Если характер прикладываемых к какой-либо из области системы сил не соответствует возможностям материала по их восприятию.
2. Если расчётная жёсткость какого-либо из элементов системы кардинально не соответствует той, которую он приобретает в ходе расчёта.
3. Если направление изменений НДС в ходе итерационного процесса меняют своё направление.

Первый случай реализуется тогда, когда к области, находящейся в предельном состоянии, прикладываются внутренние сдвиговые силы, которые не могут быть переданы на соседние области. Такие силы могут возникнуть в результате рассмотрения стадии упругого деформирования грунта. В данном случае не может быть достигнуто равновесие внешних сил и внутренних усилий в данной области, и не может быть найдено решение задачи.

Второй случай наблюдается тогда, когда в ходе итерационного процесса среда, ранее находившаяся в предельном состоянии, восстанавливает свою способность воспринимать нагрузки. Например, если матрица жёсткости элемента была рассчитана из условия, что коэффициент Пуассона равен 0,5, а в текущем НДС его коэффициент Пуассона снижается, то решение задачи найдено быть не может.

Как видим, для рассмотренных примеров опасность *не найти решение* задачи характерна для случая выхода среды из предельного состояния. Эта опасность вызвана несоответствием исходных данных итерационного расчёта текущему состоянию конструкции. Обеспечить нахождение решения можно только одним способом – не допускать проявления описанных выше эффектов. В частности, расчётное значение коэффициента Пуассона нельзя принимать равным 0,5. В PLAXIS принимается аналогичное ограничение.

Можно сформулировать рекомендацию, что расчётные параметры жёсткости (деформируемости) среды должны назначаться только для условий её прочного состояния вне зависимости от того состояния среды до и после восприятия нагрузок.

Однако расходимость итерационного может возникать *не только в случае выхода среды из предельного состояния, но и вследствие проявления эффекта упрочнения*. Если расчётная деформируемость, использованная при составлении матрицы жёсткости, меньше, чем реальная, то итерационный процесс может расходиться. Чтобы не допустить этого необходимо либо завышать изначальную жёсткость среды (особенно сдвиговую), либо ограничивать ход приближения итерационного процесса к результату. Это описано автором в [3].

Необходимо соблюдать правило, что ход итерационного процесса должен быть последовательно направлен в одну сторону, в сторону нарастания перемещений и ослабления сооружения. Из этого правила следует, что изменения прочностного состояния материала (контакта) в ходе итерационного процесса должны быть необратимыми во избежание «зацикливания». Это входит в противоречие с проблемой обеспечения точности решения. Поэтому в алгоритме программы решения о необратимых изменениях состояния среды должны осуществляться если только условие потери прочности выполняется с запасом.

Алгоритм АВП сформирован с использованием данных правил. Пользователю предоставлена возможность ограничивать скорость приближения итерационного процесса к

результату путём введения коэффициента, понижающего приращения перемещений на итерации.

### 3.4 Реализация нелинейных эффектов в алгоритме вычислительной программы

Для реализации описанной методики моделирования нелинейных эффектов вычислительная программа должна иметь сложную структуру, состоящую из нескольких циклов. АВП включает четыре вложенных друг в друга циклов:

Цикл первого уровня – это цикл по расчётным моментам времени, этапам формирования сооружения и приложения к нему нагрузок.

Цикл второго уровня – цикл по ветвям нагружения (сначала разгрузка, затем – активное нагружение).

Цикл третьего уровня – цикл по ступеням (долям) приложения нагрузок в рамках стадии активного нагружения.

Цикл четвёртого уровня – цикл итераций по учёту процесса хрупкого разрушения.

Блок-схема расположения циклов показана на рис. 1. Данная блок-схема не учитывает, что расчёт НДС в вычислительной программе может осуществляться методом суперэлементов (подконструкций).

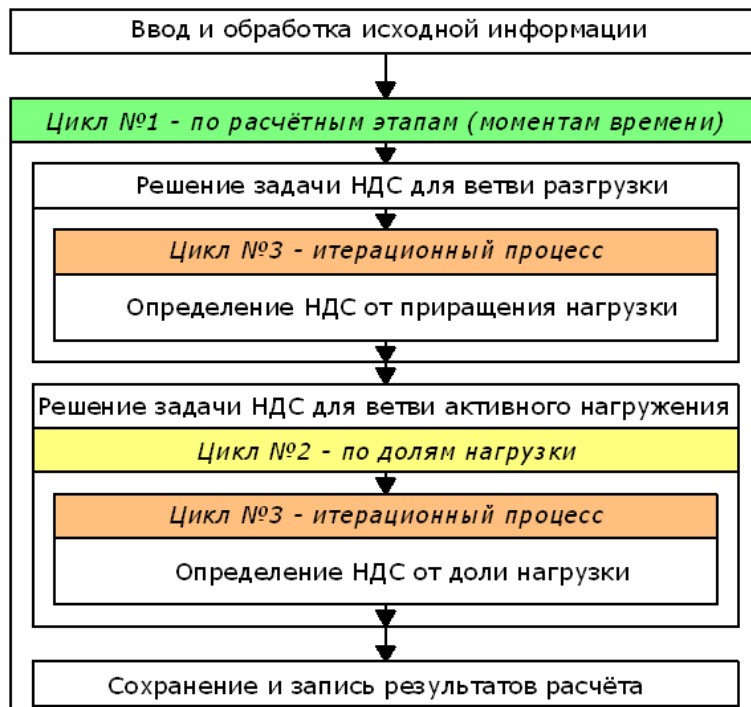


Рисунок 1. Общая последовательность и циклы алгоритма для решения задачи о НДС

Особенностью структуры программы является то, что цикл четвёртого уровня должен быть включён как в состав третьего цикла по ступеням нагрузок активного нагружения, так и в состав второго цикла в рамках ветви разгрузки. На рис. 2 показана последовательность действия при реализации стадии разгрузки или ступени активного нагружения.

Блок-схема цикла 4-ого уровня (цикла итераций) показана на рис. 3.

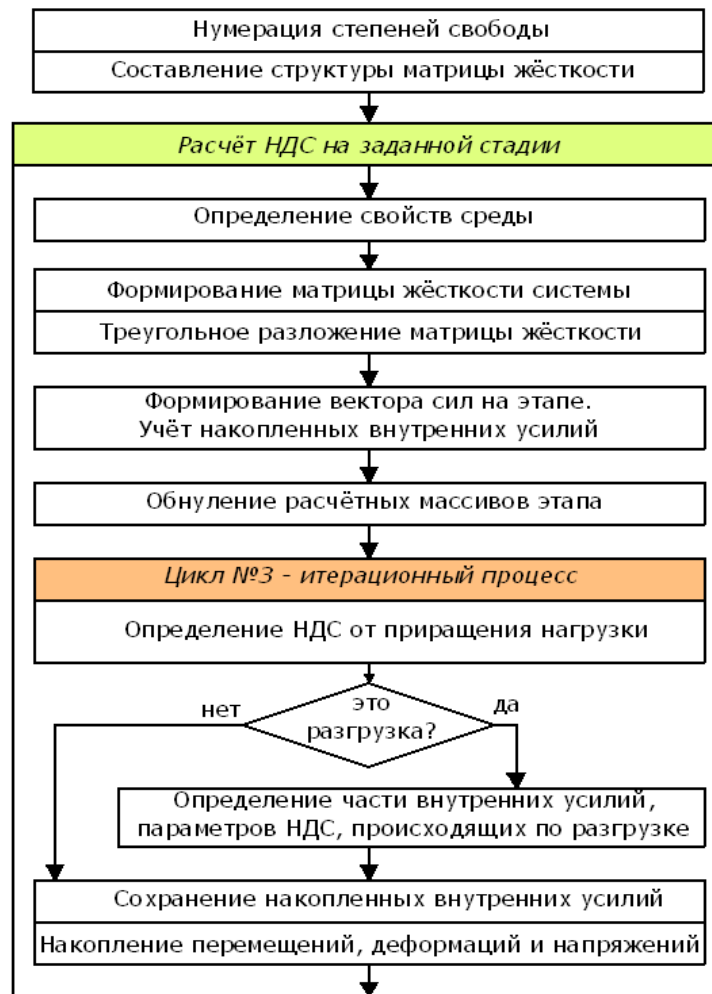


Рисунок 2. Последовательность расчётов при определении НДС для ступени (или ветви) нагрузки

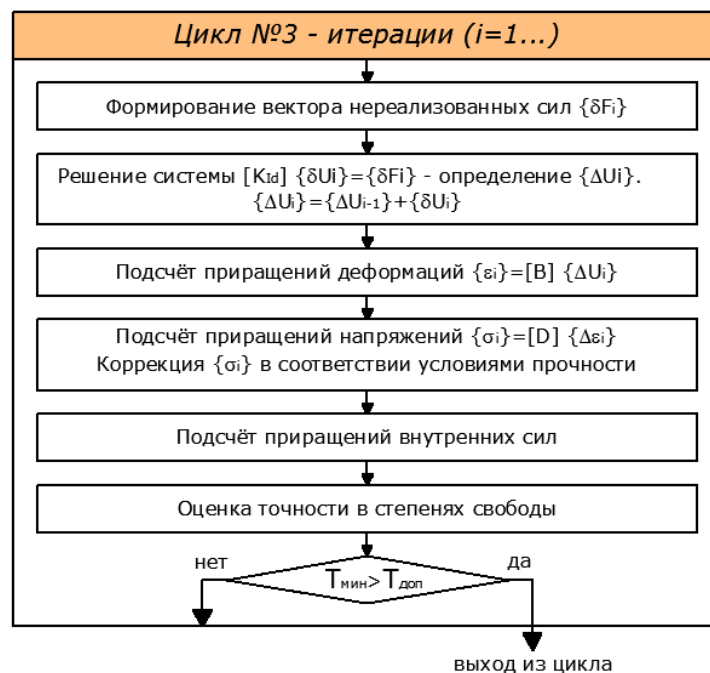


Рисунок 3. Блок-схема итерационного процесса поиска решения задачи НДС

#### 4. Моделирование особых эффектов формирования НДС грунтовых плотин

К особым эффектам, в учёте которых можно возникнуть надобность, могут быть отнесены явления ползучести, порового давления и наличия просадок. Особенность этих эффектов состоит в том, что описывающие их закономерности и способы учёта, не являются универсальными. Стандартные ПК предоставляют довольно ограниченные возможности по их учёту.

При использовании АВП учёт специфических факторов осуществляется только при необходимости. Как правило, применяются способы моделирования, удобные для использования в конкретной, частной задаче. Блоки (модули) авторской программы, позволяющие учитывать указанные явления, находятся в стадии опытного использования, они совершенствуются и уточняются.

##### 4.1 Моделирование ползучести

При исследованиях НДС грунтовых плотин чаще всего пренебрегают теми изменениями, которые вносит процесс развития деформаций ползучести. Это объясняется низкой достоверностью таких прогнозов. Во-первых, для учёта ползучести необходимо иметь результаты экспериментальных исследований поведения грунтов в течение длительного времени. Во-вторых, для описания этого поведения необходима надёжная реологическая модель, которая могла бы воспроизвести возможность различий в характере нарастания деформаций ползучести (затухающий, стабильный, прогрессирующий). В-третьих, траектории нагружения грунта в теле плотины могут быть довольно сложными для возможности описания поведения грунта с учётом ползучести.

По указанной причине явление ползучести учитывают в основном только при исследованиях поведения реальных плотин, для которых имеются данные натурных измерений. Это даёт возможность подбирать наиболее подходящие модели ползучести и их параметры, обеспечивая достоверность прогнозных расчётов НДС.

Из всех возможных теорий ползучести (теории старения (течения), наследственной ползучести и теория упрочнения) при расчётах НДС грунтовых сооружений получила распространение теория наследственной ползучести. В этой теории считается, что деформации от ползучести определяются не только прошедшим промежутком времени, но и напряжённым состоянием в начальный момент времени. Соответственно, особенности напряжённого состояния на каждой из ступеней нагружения сооружения наследуются при развитии деформаций ползучести. Чаще всего используют экспоненциальное ядро ползучести, т. е. экспоненциальную зависимость нарастания деформаций по времени [12; 13], однако имеются случаи применения степенной зависимости [14].

Однако выполнение расчётов НДС с учётом ползучести с помощью стандартных ПК ограничено. Например, реологическая модель, использованная в PLAXIS, предоставляет возможность учитывать влияние ползучести только на объёмные деформации, она имеет только один параметр. Китайские исследователи при расчётах с учётом ползучести создают пользовательские модули в рамках программы ABAQUS.

Автором было проведено исследование влияния эффекта ползучести каменной наброски на НДС одной реальной плотины, в котором имитировались её поведение по данным натурных измерений. Для адекватного отражения поведения плотины в реологической модели потребовалось введение четырёх параметров.

Таким образом, на данный момент проведение полноценных исследований НДС грунтовых плотин с учётом ползучести ограничено из-за несовершенства реологических

моделей. Усовершенствование формы записи математической модели может потребовать изменения подходов к алгоритму моделирования данного процесса.

Традиционно применяется способ, который основан на интегрировании по времени скорости деформаций. Этот способ применяется во всех рассмотренных стандартных ПК. Он удобен, если модель грунта выражена не через конечные величины деформаций, а через скорости их нарастания. В этом случае деформации плотины на рассматриваемый момент времени являются суммой деформаций, вычисленных для этого момента от каждой из ступеней нагружения. Однако численная реализация данного способа является не удобной, т. к. для каждой из ступеней нагружения требуется выполнение расчётов НДС для всех последующих моментов времени.

Поэтому автором был предложен другой способа расчёта, основанный на в преобразовании прогнозируемых деформаций ползучести во временные внутренние усилия, которые в последующем «исчезают» при достижении своего срока. Он описан в [9].

#### 4.2 Моделирование просадок грунтов

Просадки грунтов являются следствием нарушения его структуры под влиянием каких-либо факторов. Просадки могут возникать при замачивании грунта, при его переходе из мёрзлого в талое состояние. Кроме того, просадки могут быть следствием суффозии. В качестве примеров могут быть приведены просадки тела плотины Aguamilpa, плотин Колымской [15] и Курейской ГЭС [16; 17]. Просадки каменной наброски плотины Aguamilpa принято с её замачиванием в период обильных дождей. Как видим, просадки могут иметь разную физическую природу.

Автором была предложена методика моделирования процесса развития просадок. В качестве теоретической гипотезы было принято, что потеря части структурных связей влечёт за собой два характерных эффекта: во-первых, это невозможность воспринимать часть внутренних усилий, а, во-вторых, повышение деформируемости грунта. «Исчезновение» части внутренних усилий нарушает баланс равновесия внешних нагрузок и внутренних усилий и вызывает появление просадок.

Минимально необходимыми параметрами такой модели являются доля потерянных внутренних усилий и процент повышения деформируемости грунта, однако в реальности таких может потребоваться больше. Методика была применена при моделировании плотины Курейской ГЭС.

Указанная методика моделирования процесса развития просадок может быть реализована с использованием стандартных ПК, однако это является затруднительным. Специальный инструмента учёта просадок отсутствует. Применение авторской вычислительной программы устраняет эти трудности.

#### 4.3 Моделирование порового давления

Явление порового давления может оказывать большое значение для формирования НДС и обеспечения надёжности грунтовых плотин, в теле которых использованы глинистые грунты. При деформациях уплотнения глинистого грунта давление в поровой жидкости может быть сопоставимо с напряжениями в скелете грунта, что может привести нарушению сплошности грунта и нарушению герметичности плотины. В практике гидротехнического строительства зафиксирован ряд случаев образования сквозных фильтрационных ходов в ядрах каменно-земляных плотин [16–19].



По этой причине при расчётном обосновании конструкций земляных и каменно-земляных плотин важно иметь возможность оценивать величину порового давления. Однако решение этой задачи в стандартных ПК затруднено. Универсальные ПК не предоставляют такой возможности, а PLAXIS позволяет при расчётах НДС генерировать поровое давление на основе заданного уровня грунтовых вод или расчета фильтрации. Избыточное поровое давление учитывается только в динамических задачах.

В АВП задача об оценке величины порового давления может быть решена следующим образом. Во-первых, отдельный модуль АВП позволяет по результатам расчёта НДС определить максимальную величину порового давления из условия отсутствия возможности оттока воды. Такой случай имеет место на начальном интервале времени после возведения плотины.

Во-вторых, возможен является расчёт НДС с учётом рассмотрения грунта как состоящего из твёрдой и жидкой фаз. Такой способ расчёта является более правильным и позволяет определить действительные величины порового давления. В этом случае характеристики деформируемости грунта определяются как сумма соответствующих характеристик каждой из двух фаз. Характеристики деформируемости, соответствующие жидкой фазе, могут быть определены из рассмотрения уравнения метода компрессионной кривой.

Возможность учёта в АВП порового давления позволяет проводить оценку трещиностойкости водоупорных элементов из глинистых грунтов.

#### **4.4 Учёт температурных воздействий**

Учёт температурных воздействий может потребоваться при исследованиях НДС жёстких негрунтовых конструкций в составе грунтовых плотин (например, железобетонных экранов). Расчёты показывают, что влияние температурного воздействия на их прочность может быть очень существенным и приводить к потере прочности материала жёсткой конструкции на растяжение.

Не все стандартные ПК позволяют учитывать влияние температурных воздействий на формирование НДС. В частности, универсальный ПК ANSYS позволяет это сделать, а PLAXIS – нет.

АВП позволяет вводить информацию о дополнительных внутренних усилиях в точках интегрирования конечных элементов. По ним рассчитываются дополнительные силы в степенях свободы конечно-элементной модели. Далее путём решения системы уравнений метода конечных элементов определялись дополнительные перемещения степеней свободы. По ним вычислялись изменения деформаций и напряжений в элементах конструкции.

### **5. Сравнение стандартных программных комплексов и авторской вычислительной программы**

Обобщающий анализ показывает, что и у стандартных ПК и АВП есть свои преимущества и недостатки. С точки зрения возможностей по решению задач НДС грунтовых плотин АВП не уступает стандартным ПК, её недостатки состоят в ином.

Среди преимуществ стандартных ПК по сравнению с АВП можно выделить следующие:

- они сертифицированы и многократно апробированы;

- используемые в них алгоритмы численных методов хорошо отлажены и эффективны;
- обладают интерфейсом, позволяют в графической форме анализировать исходные данные и результаты расчётов;
- позволяют автоматически генерировать конечно-элементные модели сооружений;
- позволяют создавать и использовать большие, подробные конечно-элементные модели;
- позволяют использовать несколько моделей грунтов, учитывать разные факторы и эффекты.

Однако высокая степень автоматизации расчётов исключает пользователя из многих процессов: не позволяет ему редактировать конечно-элементные модели и использовать оригинальные методики обработки результатов, представлять их в ином виде. Самое главное, что пользователь стандартных ПК органичен в возможностях калибровать и корректировать расчётные модели, использовать новые методики учёта разных факторов и эффектов.

В этом смысле авторская вычислительная программа NDS\_N предоставляет пользователю бóльшие возможности для исследований и анализа. В ней использованы оригинальные модели и методики. АВП далека от совершенства, но позволяет адаптировать её к нуждам решения самых разнообразных и сложных задач.

### Выводы

1. Расчёты НДС грунтовых плотин представляют довольно сложную область расчётов, даже с учётом возможностей современных численных методов. Это объясняется широким спектром особенностей этих расчётов. Поэтому при выполнении исследований НДС грунтовых плотин пользователю иногда необходим не только удобный и многофункциональный инструмент расчётов, но и инструмент, который можно адаптировать под особенности решаемой задачи. На данный момент даже на фоне широких возможностей стандартных программных комплексов разработка авторских вычислительных программ для расчётов НДС грунтовых плотин не потеряла свою актуальность.

2. В вычислительной программе, созданной автором, учтены все основные факторы, определяющие условия формирования НДС грунтовых плотин, и требования нормативных документов. Авторская вычислительная программа обладает несколькими преимуществами с точки зрения возможностей к решению задач НДС. В частности, её применение позволяет учесть несколько специфических эффектов формирования НДС грунтовых плотин. Благодаря применению конечных элементов высокого порядка созданная вычислительная программа позволяет решать задачи о НДС грунтовых сооружений с тонкими жёсткими негрунтовыми конструкциями.

3. В вычислительной программе реализован подход, который позволяет добиваться решения проблемы неопределённости решения задачи о НДС грунтового сооружения в условиях проявления у грунта множественных нелинейных эффектов. Он основан на разграничении влияния каждого из нелинейных эффектов и последовательном поиске решения.

4. В процессе составления вычислительной программы автором решён ряд проблем численной реализации методики расчётов НДС, связанных с обеспечением точности и сходимости итерационных процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Потапенко А.Л., Вершинин В.В., Щербина С.В. Методы динамического синтеза подконструкций. реализация для анализа систем "Основание – строительные конструкции – оборудование – трубопроводы" АЭС // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2013. Т.9. №4. С. 15–22.
2. Орехов В.В. Комплекс вычислительных программ "ЗЕМЛЯ-89" В сборнике: Исследования и разработки по компьютерному проектированию фундаментов и оснований. Межвузовский сборник. Новочеркасск, 1990. С. 14–20.
3. Саинов М.П. Вычислительная программа по расчету напряжённно-деформированного состояния грунтовых плотин: опыт создания, методики и алгоритмы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Т.9. №4. С. 208–225.
4. Рассказов Л.Н., Джха Дж. Деформируемость и прочность грунта при расчете высоких грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1987. №7. С. 31–36.
5. Саинов М.П., Толстиков В.В., Фомичев А.А. Обоснование необходимости использования конечных элементов высокого порядка при численном моделировании работы жёстких тонкостенных конструкций в грунтовых плотинах // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 285. С.15–19.
6. Саинов М.П. Способ создания конечных элементов высокого порядка // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Volume 9. Issue 3. С. 152–156.
7. Саинов М.П. Возможность применения метода подконструкций к решению нелинейных задач напряжённно-деформированного состояния плотин // Вестник МГСУ. 2010. № 4–2. С. 339–345.
8. Duncan, J.M., and Chang, C.Y. Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1970. ASCE. No 96. SM5. pp. 1629–1653.
9. Саинов М.П. Методика моделирования нелинейного деформирования грунтов плотины // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. №2(75). С. 20–36.
10. Schanz T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. The Hardening Soil Model: Formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Balkema. Rotterdam. 1999. pp. 281–290.
11. Саинов М.П. Деформируемость горной массы в теле каменно-набросных плотин // Строительство: наука и образование. 2019. Т.9. Вып.3. Ст.5. URL: <http://www.nso-journal.ru/public/journals/1/issues/2019/03/2305-5502.2019.3.5.pdf> (дата обращения 12.11.2019).
12. Zhou, M.-Z., Zhang B., Jie Y. Numerical simulation of soft longitudinal joints in concrete-faced rockfill dam. Soils and Foundations. 2016. No.56(3). Pp. 379–390.

13. Zhang, B., Wang, J.G., and Shi, R. Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer // Computers and Geotechnics. 2004. No.31. Pp .559–573
14. Zhou, W., Hua, J., Chang, X., Zhou, C. Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam // Computers and Geotechnics. 2011. No.38. pp. 269–280.
15. Рассказов Л.Н., Анискин Н.А., Саинов М.П. Анализ состояния грунтовой плотины колымской ГЭС // Вестник МГСУ. 2009. №2. С. 111–118.
16. Малышев Л.И., Рассказов Л.Н., Солдатов П.В. Состояние плотины Курейской ГЭС и технические решения по её ремонту // Гидротехническое строительство. 1999. №1. С. 31–36.
17. Малышев Л.И., Шишов И.Н., Кудрин К.П., Бардюгов В.Г. Технические решения и результаты работ по сооружению противофильтрационной стены в грунте в ядре и основании Курейской ГЭС // Гидротехническое строительство, 2001. №3. С. 31–36.
18. Vaughan P.P., Kluth D.J. et al. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair. 10th ICOLD Congress. 1970. Q.36. R.5. pp. 73–93.
19. Haeri, S.M., Faghihi, D. Predicting Hydraulic Fracturing in Hyttejuvet Dam. (2008). International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 40. <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/6icchge/session02/40>.

**Sainov Mikhail Petrovich**

Moscow state university of civil engineering (national research university), Moscow, Russia

E-mail: [mp\\_sainov@mail.ru](mailto:mp_sainov@mail.ru)

РИИЦ: [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=427608](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608)

## **Authorial computer program for study of stress-strain state of embankment dams**

**Abstract.** Introduction. At the market of applied software there is a variety of software applications which provide wide possibilities in solving tasks on stress-strain state (SSS) of different structures. Nevertheless, the tasks related to SSS of embankment dams have a number of specific features which make it feasible to develop and use authorial computer programs.

Materials and methods. Main and special requirements for SSS analysis of embankment dams were distinguished based on analysis of standard documents and hydraulic engineering practice. Then analysis was made of certified industrial software applications as well as consideration was made of the used methods and methodologies in SSS analysis.

Results. The analysis showed that by present there is no universal and full theoretically substantiated model which could describe all non-linear effects peculiar for deformation of soils. There is a need in refinement and development of new models, therefore, their realization requires elaboration of authorial computer programs. For modeling non-linearity of soils and specific features of embankment dam SSS formation the author proposed a number of non-standard modeling algorithms. The models, methodologies and algorithms are realized in computer program NDS\_N, developed by the author.

Conclusions. Standard, industrial software applications have many advantages; however, their use does not always satisfy the needs of embankment dam SSS analyses. They are either restricted in realization of specific non-linear effects in SSS formation of embankment dams and their models or fail to provide the information required for analysis.

**Keywords:** stress-strain state; embankment dam; computer program; non-linearity; soil mode