



УДК 622.27

doi: 10.55287/22275398\_2026\_58\_42

---

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕОДНОРОДНОЙ НАСЫПИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ С ПОДПОРНОЙ СТЕНКОЙ

**А. Е. Качаев**

Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», г. Коломна

---

### **Аннотация**

Современное гидротехническое строительство требует высокой надежности и безопасности сооружений в условиях сложных гидрогеологических особенностей, включая неоднородные грунты и сложные механические взаимодействия. В данной работе выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния гидротехнического объекта с подпорной стенкой на основании слоистых неоднородных грунтов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности прогнозирования поведения грунтовых масс и уменьшения рисков аварийных ситуаций для грунтовых сооружений на сложном рельефе, что подтверждается использованием современных методов конечных элементов и моделирования взаимодействия структуры грунтов основания сооружения с различными элементами самого сооружения. В ходе анализа установлено, что максимальные полные перемещения подпорной стенки на этапе строительства составляют 0,026 м (26 мм), что значительно ниже допустимых значений (100–150 мм по СП 22.13330.2016), необходимая устойчивость сооружения обеспечивается. Максимальное поровое давление в основании определено величиной  $-433,71 \text{ кН/м}^2$  на глубине 62,7 м, что свидетельствует о высокой несущей способности грунтов. В результате моделирования выявлены зоны концентрации напряжений у подошвы стенки с максимальным значением  $1027,66 \text{ кН/м}^2$ , что требует применения соответствующих конструктивных решений для повышения надежности сооружения. Практическая значимость работы заключается в повышении точности оценки напряженно-деформированного состояния самого сооружения в условиях неоднородных грунтов его основания, что позволяет снижать риски аварий, оптимизировать проектные решения и разработать рекомендации по эксплуатации и модернизации объектов подобного типа.

### **Ключевые слова**

*Грунт, эквивалентные напряжения, осадка, подпорная стенка, поровое давление, эквивалентная деформация, коэффициент надежности.*

### **Дата поступления в редакцию**

08.02.2026

### **Дата принятия к печати**

20.02.2026

---

### **Введение**

В современных условиях развитие гидротехнического строительства сталкивается с требованиями обеспечения максимальной надежности и безопасности сооружений, функционирующих в услови-

ях сложных гидрогеологических условий. Функциональные особенности объектов гидротехнического назначения зачастую связаны с геологией и рельефом местности, на которой они возводятся, а также с метеорологическими условиями и сейсмикой [1].

В частной практике проектирования гидротехнических сооружений существуют различные конструкции устройства подобного рода объектов. Особый интерес вызывает моделирование напряженно-деформированного состояния насыпных гидротехнических сооружений с подпорной стенкой [2, 3, 4], в частности при наличии неоднородных грунтов в возводимых насыпях. Такие условия характерны для широкого спектра объектов — от дамб и плотин до водохранилищ и каналов, где неоднородность грунта является естественной особенностью [5].

Актуальность этой темы определяется необходимостью прогнозирования поведения грунтовых масс под воздействием различных нагрузок, в условиях возникновения неустойчивых состояний и риска разрушения подобного рода сооружений [6]. Современные методы численного моделирования в инженерии грунтов используют концепцию механики несущих грунтов, методы конечных элементов, вычислительные алгоритмы нелинейной динамики и моделирование взаимодействия грунта с сооружением [7].

Особенно актуальным является учет внутренней неоднородности грунтовых массивов — слоистости, дисперсности свойств, объектов и различных физических характеристик, что существенно влияет на устойчивость, деформации и долговечность сооружений. В последние годы было сформировано ряд моделей, предназначенных для учета таких особенностей [8, 9, 10, 11].

Изучение поведения неоднородных грунтов связано также с развитием методов исследований, таких как лабораторное моделирование, полевые испытания и применение современных диагностических технологий, включая геофизические исследования и испытания на месте [12, 13]. Объединение таких данных с мощными численными моделями позволяет приближаться к реальным условиям, повышая точность проектных решений.

Несмотря на достигнутый прогресс, в области численного моделирования многослойных, неоднородных грунтовых масс все еще существуют критические нерешённые задачи. Помимо сложности учета внутренней структуры грунтов, значительным вызовом является адекватное моделирование нелинейных характеристик грунтов, таких как пересыхание, прочность, расплывчатость свойств внутри слоя, а также взаимодействия между слоями в условиях динамических нагрузок [14]. В рамках современных исследований особое внимание уделяется развитию универсальных и адаптивных моделей, способных учитывать множество физических процессов [15].

Практическая значимость новых подходов с использованием численного моделирования заключается в возможности повышения точности оценки устойчивости, деформаций и рисков разрушения объектов в условиях неоднородных грунтовых условий. Такие модели позволяют создавать более точные расчетные схемы, получать оптимальные проектные решения по укреплению и эксплуатации сооружений, а также разрабатывать рекомендации по реконструкции и модернизации уже существующих объектов [16].

### Цель исследования

Оценка напряженно-деформированного состояния сооружения для обеспечения его безопасной и надежной эксплуатации, которая включает в себя численное моделирование поведения различных грунтов во взаимодействии с железобетонной конструкцией подпорной стенки, выявление зон концентрации напряжений (особенно у основания стенки), определение осадок и анализ влияния неоднородности грунта на долговечность сооружения, а также рекомендации для его проектирования и эксплуатации.

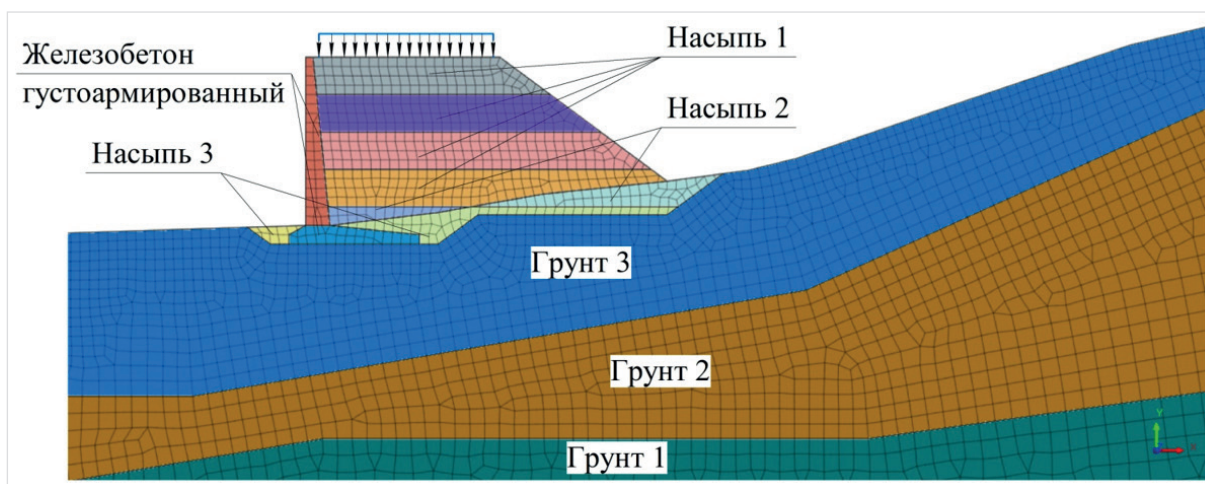
Основные задачи исследования: 1. Численный расчет эквивалентных напряжений и полных перемещений (осадок) грунтов и подпорной стенки под действием гидростатического давления, веса грунта, собственного веса конструкции и внешних нагрузок; 2. Изучение влияния жесткости и неоднородности грунтов на работу подпорной стенки, а также обратного влияния стенки на окружающий грунтовый массив и неоднородную насыпь; 3. Локализация зон повышенных напряжений (например, у пятки или в массиве грунта за стенкой) и деформаций, которые могут привести к трещинам, осадкам или потере устойчивости сооружения; 4. Оценка полных перемещений (осадок) основания сооружения, что критично для его долговечности и функциональности; 5. Выработка рекомендаций для его проектирования и безопасной эксплуатации.

Полученные в ходе исследования результаты обладают значительным потенциалом для применения в сферах проектирования, эксплуатации и аварийного мониторинга гидротехнических сооружений. Они ориентированы на достижение более высокого уровня безопасности, снижение вероятности катастрофических разрушений и стимулирование развития инновационных, устойчивых и рациональных конструктивных подходов к формированию насыпных сооружений гидротехнического назначения.

### Методы исследования

Объектом настоящего исследования является гидротехническое сооружение, характеризующееся насыпным откосом и густоармированной железобетонной подпирающей его стенкой, расположенной на местных грунтах. В рамках моделирования прочности грунтового основания и возводимых насыпей гидротехнического сооружения применялась модель Мора-Кулона [17, 18]. Для моделирования свойств густоармированного железобетона использовалась упругая модель Elastic [19]. Расчетная модель исследуемого объекта в конечных элементах представлена на *рис. 1*.

В ранее проведенных исследованиях — в работе [4] (*табл. 1*) — представлены исходные данные по инженерно-геологическим изысканиям для Насыпи 1, 2, 3. На насыпь действует вертикальная погонная нагрузка равная 20 кН/м, а в самой модели учитывается собственный вес всех элементов, рассматриваемого объекта.



*Рис. 1.* Расчетная модель исследуемого объекта в конечных элементах

Также в работе [4] (*табл. 2*) приведены данные для местных грунтов основания и подпорной стенки. Вертикальная подпорная стенка с горизонтальной железобетонной густоармированной по-

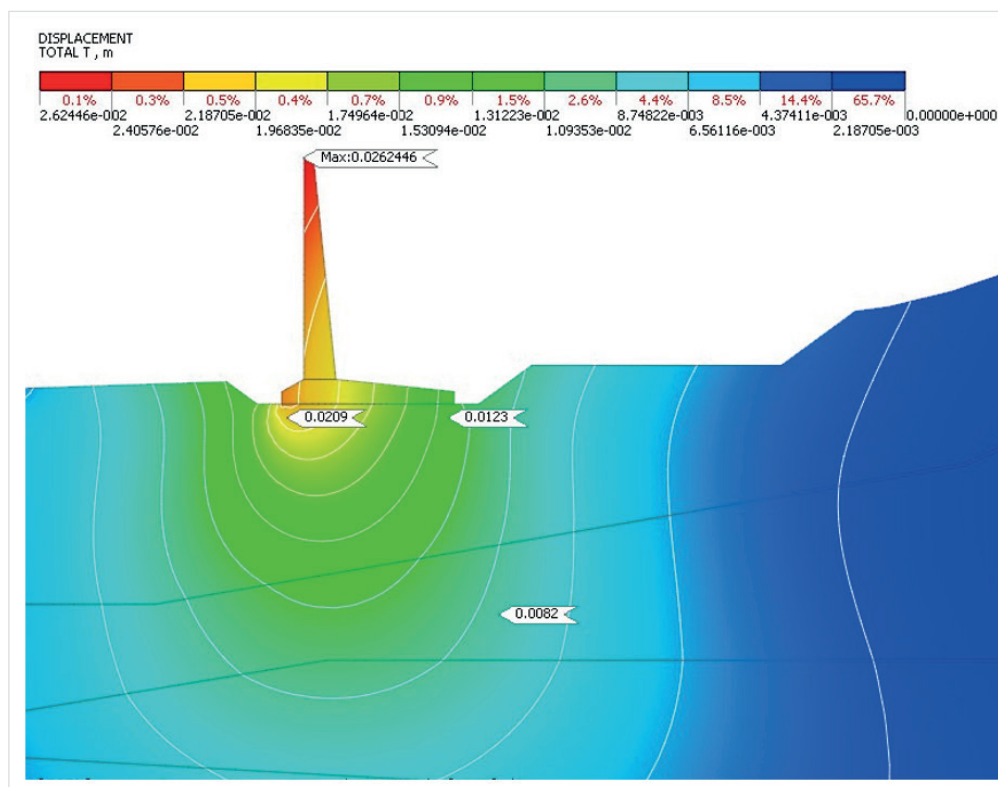
душкой представляет собой монолитное железобетонное изделие, опирающееся на слой Насыпи 3 (как показано на *рис. 1*).

По приведенным в работе [4] исходным данным в соответствии с целью настоящего научного исследования было выполнено численное моделирование напряженно-деформированного состояния неоднородной насыпи гидротехнического сооружения с подпорной стенкой в верифицированном в нашей стране программном комплексе GTS NX 2022 R1 в плоской постановке. При этом для данного объекта устойчивость вертикальной подпорной стенки из густоармированного железобетона на опрокидывание и скольжение по подошве обеспечена согласно результатам работы [4]. Настоящее исследование является продолжением работы [4]. Задача решалась численным моделированием с применением метода конечных элементов (МКЭ) [20] в программном комплексе GTS NX 2022 R1 в плоской постановке.

### Основная часть

Во время исследования оригинальной конструкции гидротехнического сооружения особое внимание уделялось определению и анализу параметров напряженно-деформированного состояния как самих грунтов и насыпей, так и железобетонной подпорной стенки.

На *рис. 2* показаны изополя полных перемещений подпорной стенки и грунтов под ней без влияния насыпей. Этот этап численного моделирования соответствует периоду строительства, на котором на подготовленный и утрамбованный «Грунт 3» устанавливают монолитную подпорную стенку. При этом видно, что распределения полных перемещений по различным слоям грунтов основания сооружения указывает на неравномерную осадку подпорной стенки. На *рис. 2* максимальное полное перемещение выявлено в верхней части подпорной стенки и составляет 0,026 м (26 мм).

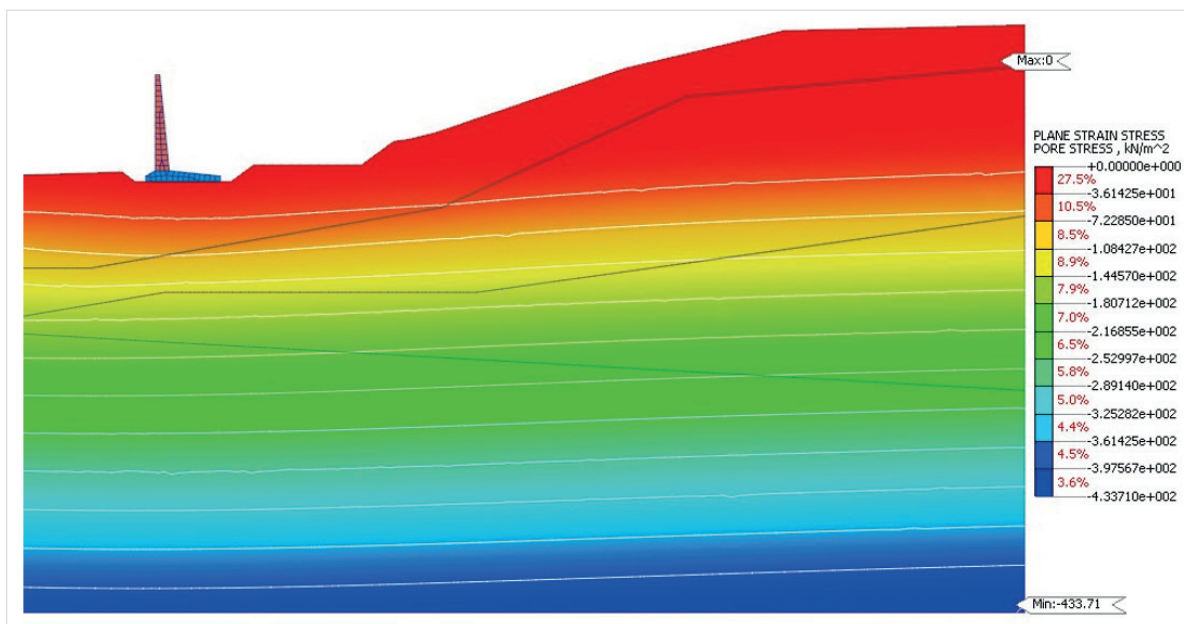


*Рис. 2.* Изополя полных перемещений подпорной стенки и грунтов под ней на этапе ее устройства

При этом видно, что распределения полных перемещений по различным слоям грунтов основания сооружения указывает на неравномерную осадку подпорной стенки. На **рис. 2** максимальное полное перемещение выявлено в верхней части подпорной стенки и составляет 0,026 м (26 мм).

Также на **рис. 2** можно наблюдать характер неравномерности осадки подпорной стенки. Для массивных железобетонных подпорных стен на естественном основании расчетные предельные осадки обычно составляют 10–15 см (100–150 мм)<sup>1</sup>. Осадка в 26 мм значительно ниже предельных 100–150 мм, установленных в СП 22.13330.2016, и при отсутствии крена или трещин на этапе строительства считается безопасной. Полученную информацию по полным перемещениям подпорной стенки и осадки грунтов основания в настоящем исследовании будем анализировать на этапе устройства Насыпей 1 и 2 и во взаимодействии с подпорной стенкой.

**Рис. 3** показывает, как выглядят изополя порового давления в грунтах, относящихся к естественному основанию сооружения. Здесь представлены параметры порового давления без учета атмосферных осадков — грунты с естественной влагой, имеющейся в основании проектируемого гидротехнического сооружения.



**Рис. 3.** Изополя порового давления в грунтах основания сооружения на этапе устройства подпорной стенки

Показана стадия строительства сооружения с установленной подпорной стенкой. Максимальное поровое давление (сжатия) величиной в  $-433,71 \text{ кН/м}^2$  зафиксировано на глубине 62,7 м от подошвы подпорной стенки. В верхних грунтах основания сооружения фиксируются минимальные значения порового давления, что косвенно свидетельствует о высокой несущей способности Грунта 2 и 3.

Изополя эквивалентных напряжений (по Мизесу) в грунтах основания на стадии строительства подпорной стенки (без устройства насыпи 1, 2 и 3) показаны на **рис. 4**.

<sup>1</sup> СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*: свод правил: утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. № 970/пр: введен в действие с 17 июня 2017 г. — Москва: Стандартинформ, 2017. — 226 с.

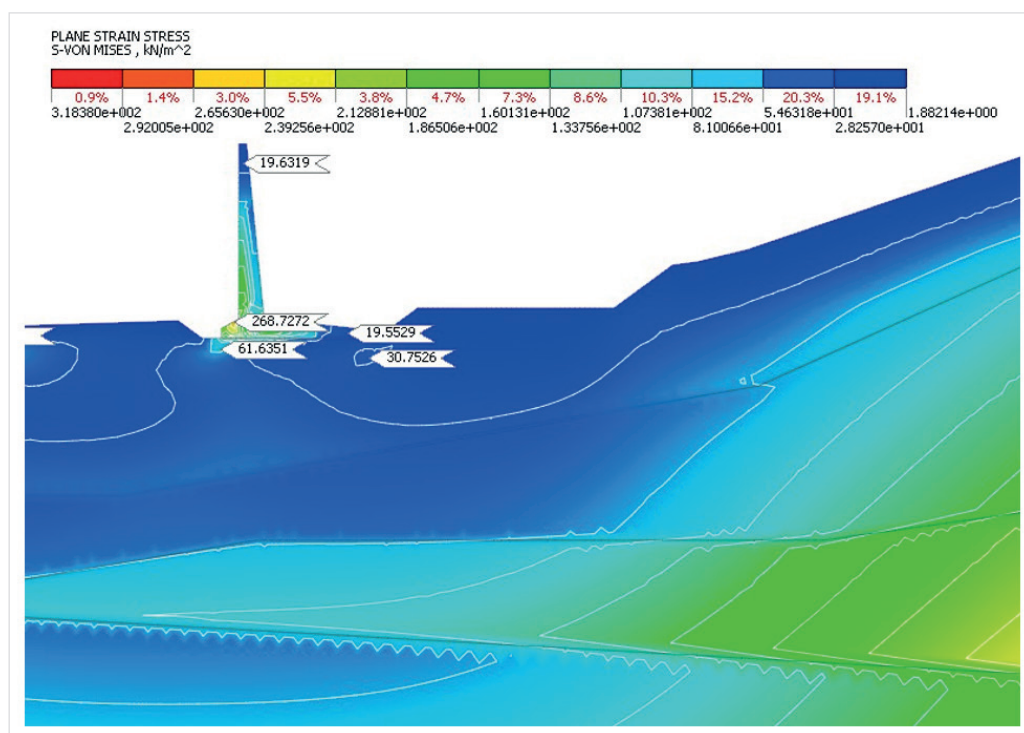


Рис. 4. Изополя эквивалентных напряжений (по Мизесу) в подпорной стенке и грунтах основания (без устройства насыпи 1 и 2) на стадии устройства подпорной стенки

Здесь видно, что массив Грунта 1 под возвышенностью рельефа более нагружен. Это свидетельствует о меньшей несущей способности Грунта 1 по сравнению с подстилающим его грунтом.

На поверхности рельефа фиксируются минимальные значения эквивалентных напряжений, которые в настоящем исследовании необходимо будет проверить на прочность (через коэффициент запаса прочности). Именно показатель прочности грунтов в основании будет влиять на их несущую способность для возводимого гидротехнического сооружения. Также видны места повышенных эквивалентных напряжений по границам подошвы подпорной стенки.

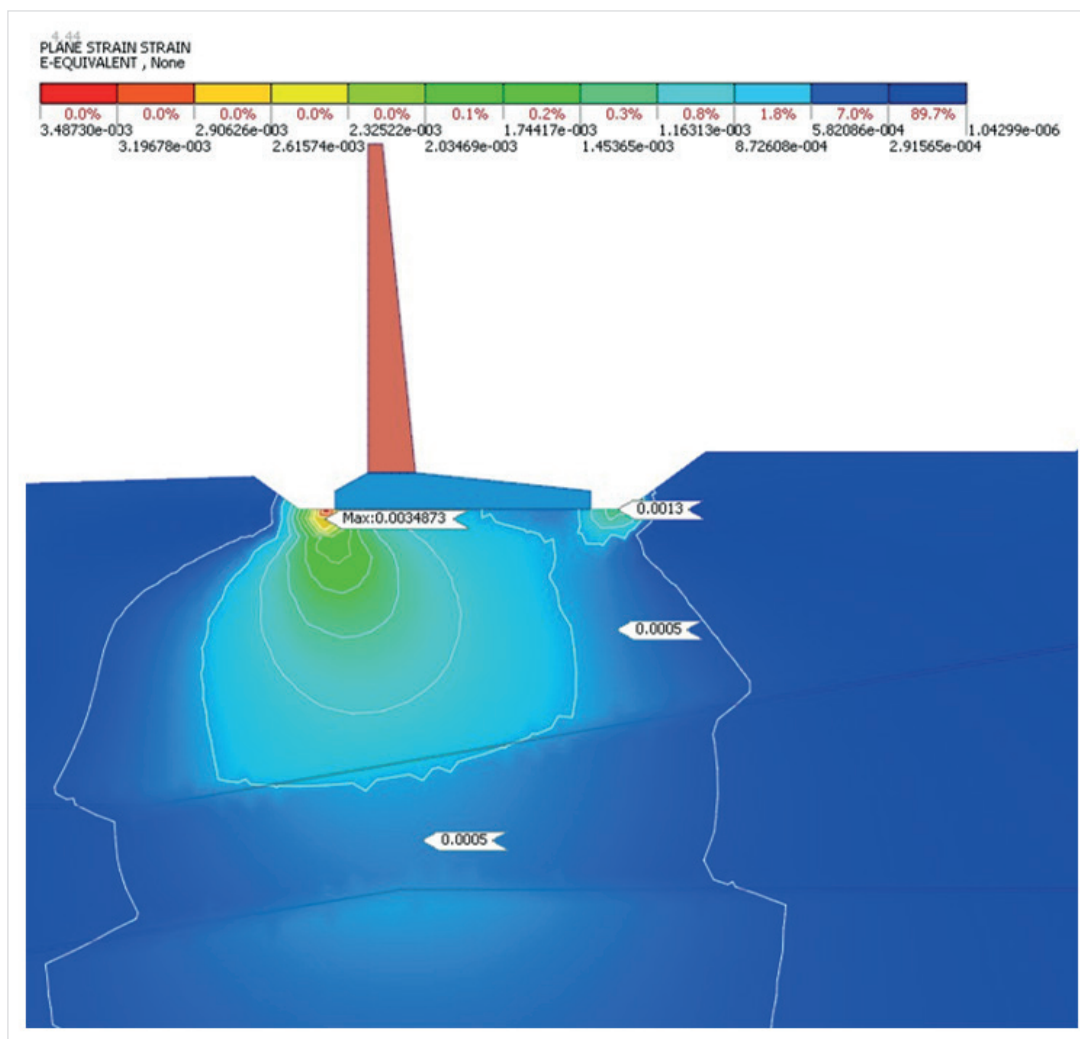
В исследовании [4] эти места влияют на величину коэффициента устойчивости всего сооружения, поэтому их также необходимо проверить по критерию коэффициента запаса прочности. Так в левом углу подошвы подпорной стенки эквивалентные напряжения Грунта 3 равны  $61,63 \text{ кН/м}^2$  ( $61,63 \text{ кПа}$ ), а в правом углу —  $30,75 \text{ кН/м}^2$  ( $30,75 \text{ кПа}$ ).

Максимальные эквивалентные напряжения (по Мизесу) от изгиба вертикальной части подпорной стенки составляют  $268,73 \text{ кН/м}^2$  ( $268,73 \text{ кПа}$ ) и находятся в конечном элементе на наклонной поверхности подошвы подпорной стенки. Минимальные эквивалентные напряжения (по Мизесу) находятся в правой части подошвы подпорной стенки и равны  $19,55 \text{ кН/м}^2$  ( $19,55 \text{ кПа}$ ).

В соответствии в зависимости величины эквивалентных деформаций от эквивалентных напряжений рассмотрим изополя эквивалентной деформации подстилающих грунтов основания (Грунты 1, 2, 3) сооружения.

Изополя на рис. 5 устанавливают распределение деформаций в массивах Грунтов 1, 2 и 3 от веса подпорной стенки. Здесь также наблюдаем наличие небольших деформаций от веса подпорной стенки: максимальные деформации развиваются по краям подошвы подпорной стенки (по аналогии с эквивалентными напряжениями, рис. 4). Малые величины деформаций в Грунтах 1, 2 и 3 свидетель-

ствуют о высокой несущей способности рассматриваемых грунтов основания для возводимого сооружения. За счет их несущей способности обеспечивается устойчивость сооружения, определенная по результатам работы [4].



**Рис. 5.** Изополя эквивалентной деформации подстилающих грунтов основания на этапе устройства подпорной стенки

На **рис. 6** представлены результаты численного расчета коэффициента надежности по грунтам основания на этапе устройства подпорной стенки. Величина коэффициентов прочности Грунта 3 по краям подошвы подпорной стенки слева составляет — 1,9475, справа — 3,6292. В соответствии с СП 22.13330.2016 величина коэффициента надежности по грунту (с учетом его устойчивости и прочности) для сооружения повышенного класса КС-3<sup>2</sup> равна 1,2. Следовательно, Грунт 3 обеспечивает необходимую несущую способность для устройства подпорной стены оригинальной конструкции.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние и осадку грунтов и насыпей на конечном этапе строительства исследуемого объекта.

<sup>2</sup> ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. — Москва: Стандартинформ, 2019. — 19 с.

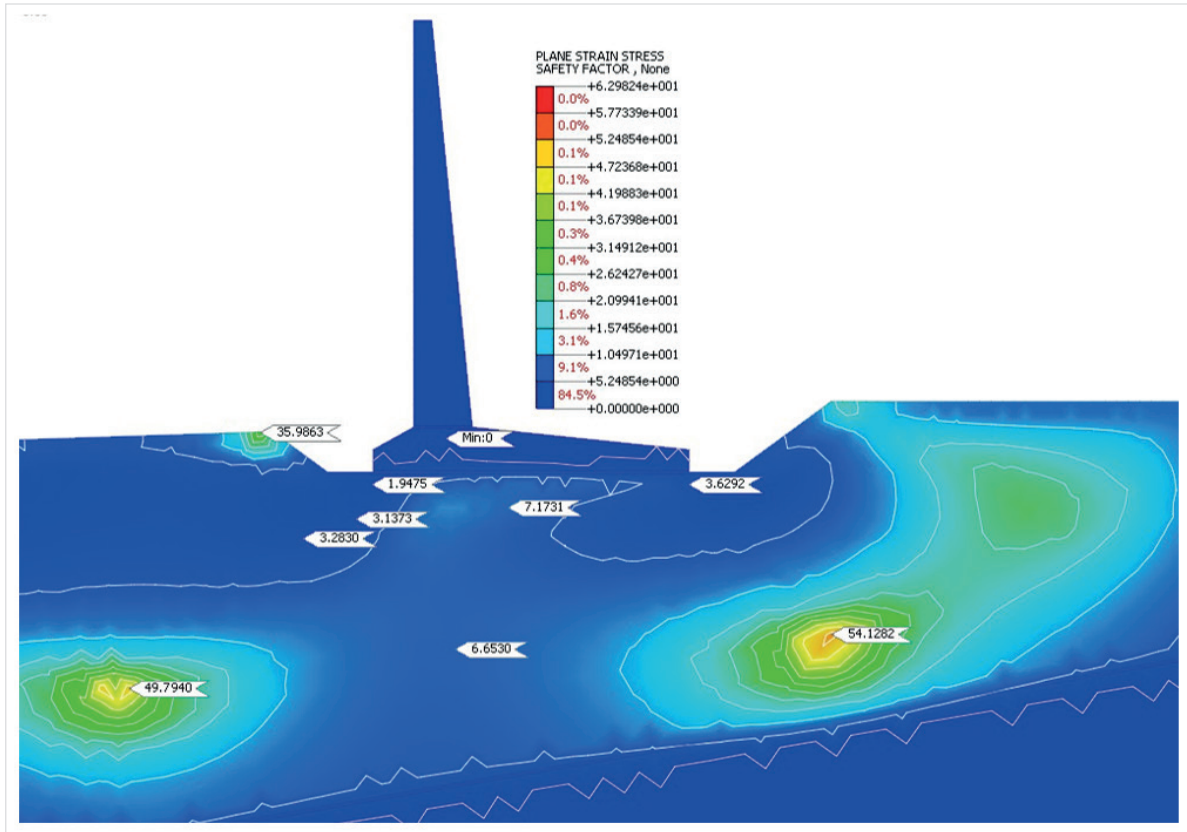


Рис. 6. Изополя коэффициентов надежности по несущим грунтам основания исследуемого сооружения на этапе устройства подпорной стенки

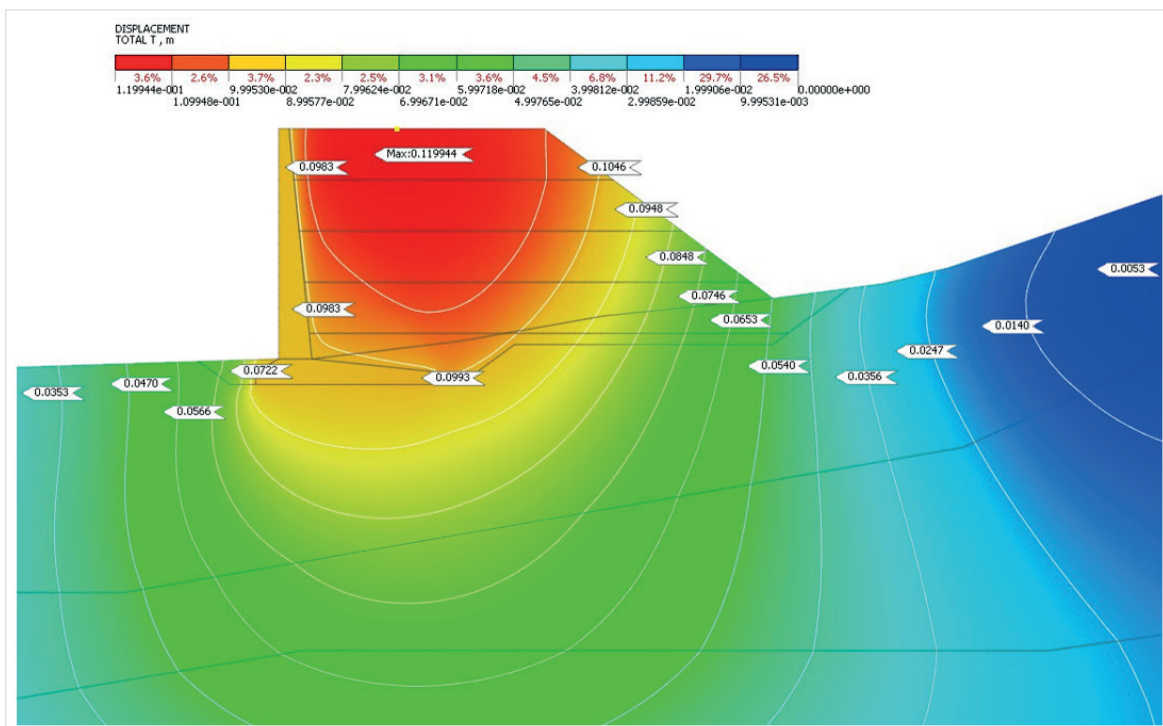
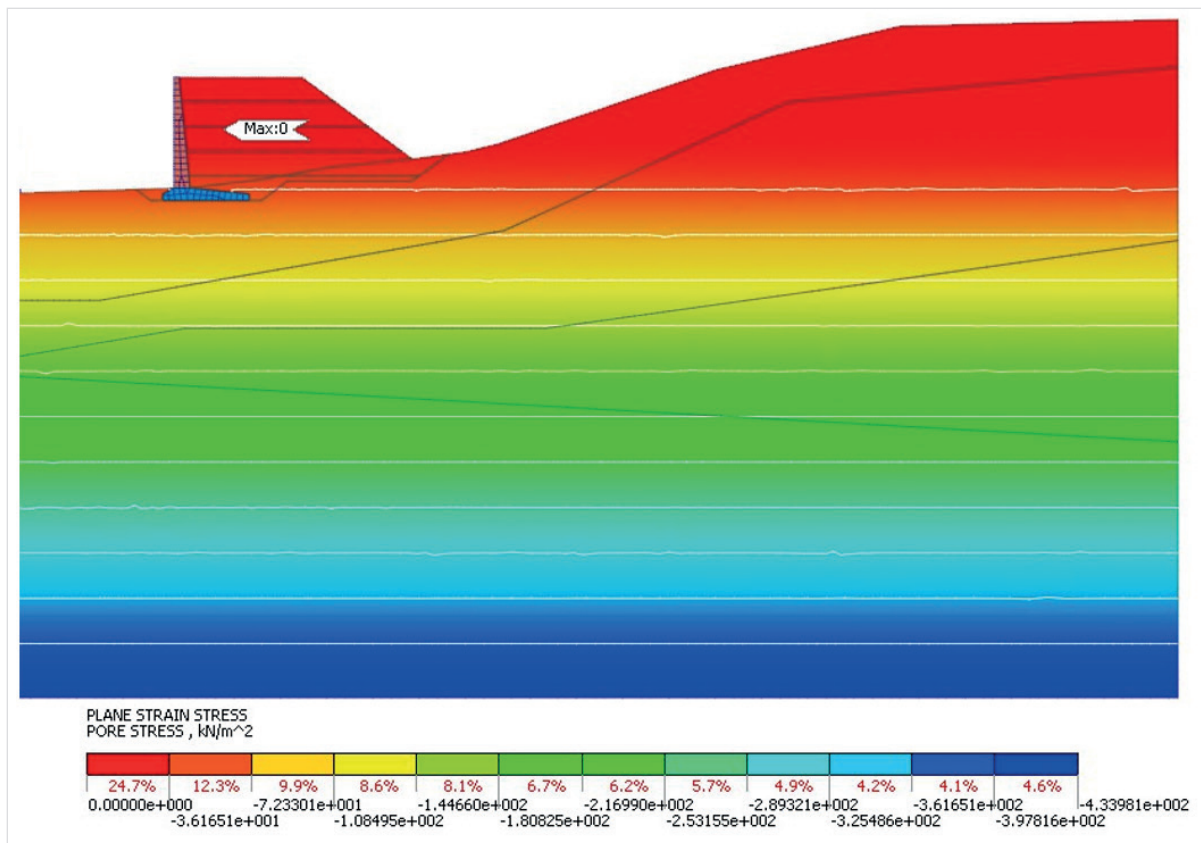


Рис. 7. Изополя полных перемещений грунтов основания и сооружения на конечной стадии его строительства

На *рис. 7* показаны изополя полных перемещений (осадок) всех элементов исследуемого объекта. Центральная часть Насыпи 1 и 2 имеет максимальную осадку равную 0,119 м (119 мм). Вертикальная часть конструкция подпорной стенки имеет максимальное полное перемещение равное 0,0983 м (98,3 мм), подошва подпорной стенки максимально смещается от нулевого положения на величину 0,0993 м (99,3 мм). При полученных результатах осадок в соответствии с СП 22.13330.2016 обеспечивается нормальная эксплуатация подобного рода сооружений. Полученные результаты полных перемещений необходимо учитывать при проектировании такого рода сооружений, чтобы размеры конечного сооружения в полной мере могли соответствовать проектным величинам.

Изополя порового давления в грунтах и насыпях сооружения на конечной стадии его строительства показаны на *рис. 8*.

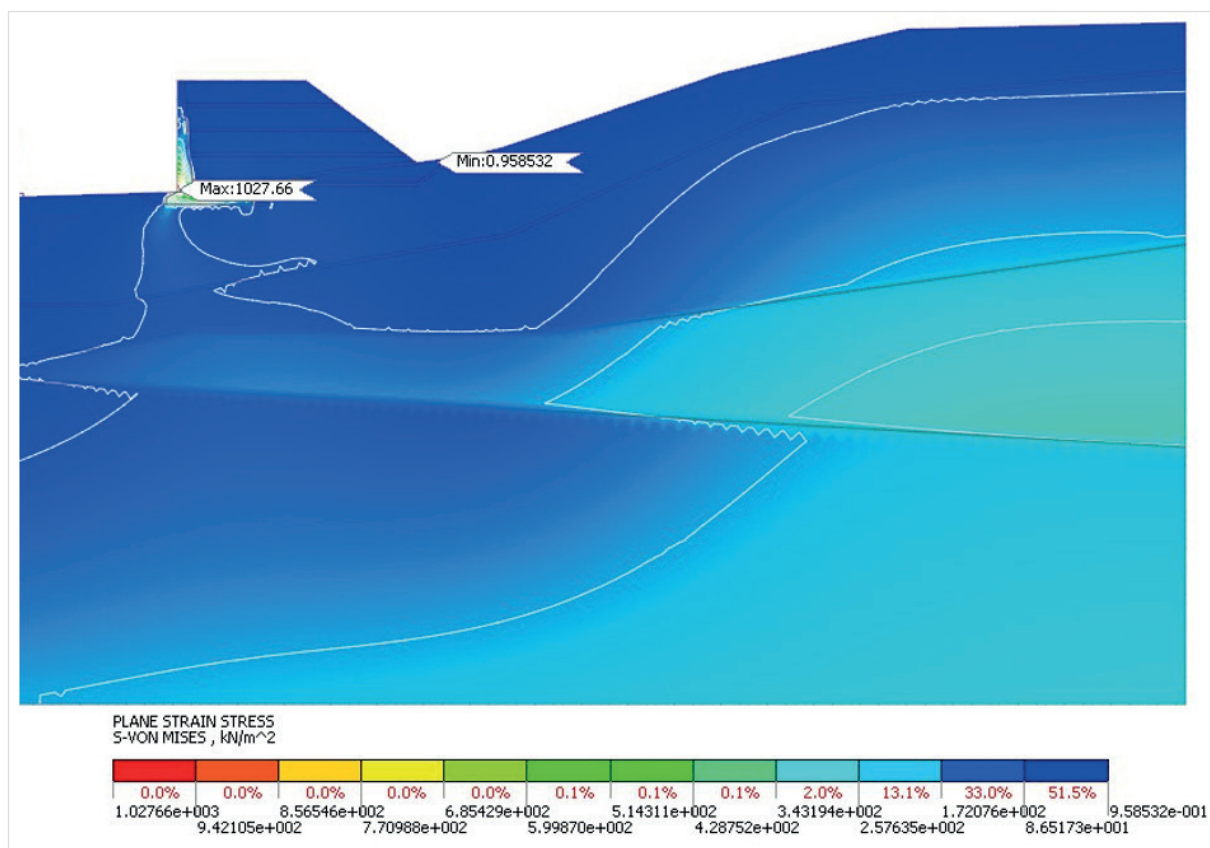


*Рис. 8.* Изополя порового давления в грунтах и насыпях сооружения на конечной стадии его строительства

Изополя порового давления в грунтах и насыпях сооружения на конечной стадии его строительства выглядят более выровненными по горизонтали, нежели те, что показаны на *рис. 3*, что свидетельствует о равномерности распределения порового давления в конструкции самого сооружения и примыкающих к нему грунтов основания (в частности Грунта 3). Остальная картина распределения порового давления по рассматриваему массиву близка по значениям к той, что показана на *рис. 3*.

При оценке напряженно-деформированного состояния подпорной стенки важно знать величину максимальных эквивалентных напряжений в ней после устройства Насыпей 1 и 2. Так на изополях эквивалентных напряжений в грунтах и насыпях сооружения и подпорной стенке от давления на нее Насыпей 1 и 2 (*рис. 9*) определено максимальное эквивалентное напряжение величиной в 1027,66 кН/м<sup>2</sup>

(1027,66 кПа) в том же конечном элементе, что и на *рис. 4*, где его значение в 3,8 раза меньше и составляет 268,73 кН/м<sup>2</sup> (268,73 кПа).



*Рис. 9.* Изополя эквивалентных напряжений в грунтах и насыпях сооружения и подпорной стенке от давления Насыпи 1 и 2

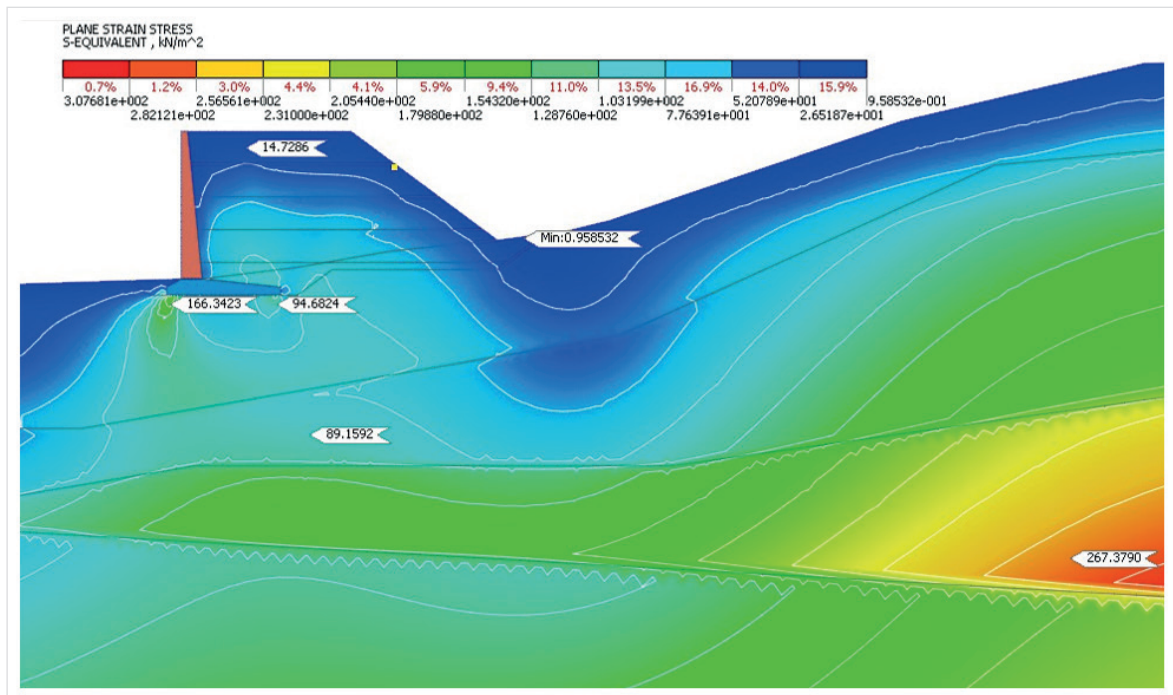
Благодаря таким результатам численного моделирования подбор типа бетона и способ его армирования может быть выбран исходя из условий устойчивости к сдвигу и опрокидыванию, необходимой несущей способности грунта под основанием, а также прочности самой конструкции при учете уровня грунтовых вод и сейсмической обстановки.

Напряжение в 1027,66 кН/м<sup>2</sup> эквивалентно примерно 1,03 МПа (или 10,47 кгс/см<sup>2</sup>). Поскольку это крайне низкое значение для конструкционного бетона, технически его выдержит даже самый слабый состав: с нагрузкой справится любой бетон, начиная с минимального В3,5 (марка М50). Конструкция подпорной стенки «густо армирована» по конструктивным соображениям, для качественной заливки между стержнями необходимо использовать мелкозернистый бетон (БСМ) или смеси с высокой подвижностью (П4–П5)<sup>3</sup>.

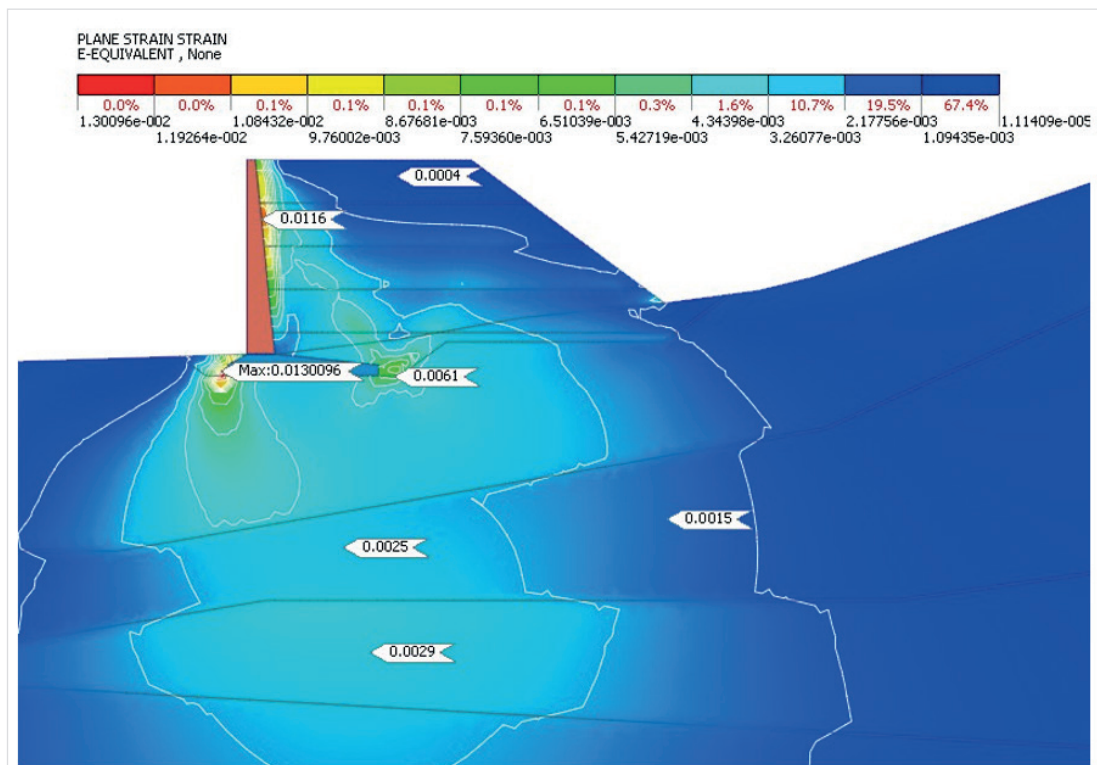
Наиболее важным для нас в данном исследовании это оценка напряженно-деформированного состояния грунтов после возведения всей конструкции гидротехнического сооружения. На *рис. 10* показаны изополя эквивалентных напряжений в грунтах и насыпях сооружения на конечном этапе его строительства. Здесь значения эквивалентных напряжений под подошвой подпорной стенки при возведенных

<sup>3</sup> ГОСТ 7473–2010. Смеси бетонные. Технические условия. — Введ. 2012–01–01. — Москва: Стандартинформ, 2011. — 23 с.

Насыпях 1, 2 и 3 слева увеличилось в 2,7 раза по сравнению со значением на *рис. 4* и составляет 166,34 кН/м<sup>2</sup> (166,34 кПа), а справа увеличилось в 3,07 раза и составляет 94,68 кН/м<sup>2</sup> (94,68 кПа).



*Рис. 10.* Изополя эквивалентных напряжений в грунтах и насыпях сооружения на конечном этапе его строительства



*Рис. 11.* Изополя эквивалентных деформаций в грунтах и насыпях сооружения от обратного давления на них подпорной стенки

Абсолютно подобную ситуацию мы можем наблюдать и на изополях эквивалентных деформаций в грунтах и насыпях сооружения от обратного давления на них подпорной стенки, которая показана на **рис. 11**. Здесь также величины эквивалентных деформаций в углах слева и справа под подошвой подпорной стенки отличаются в 2,7 и 3 раза, соответственно. Однако деформации в контактной зоне Насыпей 1, 2 и 3 с вертикальной частью подпорной стенки достаточно большие (максимум — 0,0116) и сравнимы с деформациями под левой частью подошвы подпорной стенки, что свидетельствует об уплотнении в этом месте грунтов в результате их трения по бетонной поверхности и слабой адгезии с ней. Что, в свою очередь, и приводит к значительным осадкам центральной части насыпи, показанным на **рис. 7**.

В процессе проектирования сооружений подобного типа важно получать информацию и напряженно-деформированном состоянии всех структур, из которых оно состоит. последовательный анализ такого напряженно-деформированного состояния позволит принимать верные проектные решения и минимизировать риски аварийных ситуаций.

### Результаты

Численное моделирование объекта исследования показало, что в ходе анализа состояния грунтовых массивов выявлена высокая несущая способность грунтов основания и насыпей сооружения. Коэффициенты надежности грунтов, особенно в области слоя Грунта 3, значительно превышают нормативные значения (рекомендуемые  $> 1,2$ ), что свидетельствует о достаточной прочностной характеристике основания для возведения рассматриваемой конструкции сооружения. Это также говорит о том, что природные грунты и искусственная насыпь исследуемого объекта, при условии соблюдения правил уплотнения и подготовительных работ, способны обеспечить безопасность, долговечность и устойчивость всего сооружения в процессе его эксплуатации.

Оценка результатов моделирования на различных этапах строительства объекта показала, что максимальная осадка подпорной стенки составляет около 26 мм на этапе ее устройства на Грунт 3. Полученная величина осадки значительно ниже предельно допустимых значений (100–150 мм), установленных нормативами, что подтверждает её допустимость и безопасность при эксплуатации. Важным аспектом является равномерность распределения осадок по всей конструкции, что предотвращает возможное появление трещин, крена или деформаций, которые могли бы снизить эксплуатационные характеристики. Полученные результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния сооружения указывают на то, что конструкция способна адекватно воспринимать весовые нагрузки без критических деформаций.

Распределение напряжений по грунтам и подпорной стенке выявило критические зоны, где напряжения достигают максимальных значений — это обычно область подошвы и углы подпорной стены. Максимальные значения по Мизесу —  $1027,66 \text{ кН/м}^2$  ( $1027,66 \text{ кПа}$ ) — требуют особого внимания для оценки долговечности. В этих зонах необходимо предусмотреть усиленные армированные элементы или методы разгрузки для предотвращения опасных трещин, разрушений и потери устойчивости. Анализ также показал, что внутренние грунты, особенно Грунт 1, нагружены тяжелее, что связано с рельефом и его геологическими особенностями.

Распределение порового давления в грунтах (от  $-433,71 \text{ кПа}$  до минимальных значений сверху) свидетельствует о гармоничном гидравлическом режиме в основании. При этом максимальные зоны порового давления расположены на глубине около 62,7 м, что важно для оценки долговечности и возможных процессов уплотнения или фильтрации грунтовых вод. Поровое давление находится в допустимых пре-

делах: можно говорить о стабильности гидродинамических условий, если будут соблюдаться технологические режимы эксплуатации и гидроизоляции сооружения.

Моделирование в работе [4] и в настоящем исследовании подтвердило устойчивость сооружения, так как коэффициенты надежности грунтов превышают нормативные требования. Это говорит о том, что риск опрокидывания, скольжения или разрушения в ходе строительства и эксплуатации минимален при соблюдении всех требований проекта. В зоне опрокидывания выявлены напряжения, которые требуют дополнительного контроля. Дополнительные меры, такие как укрепление подошвы или установка анкеров, могут повысить запас прочности грунтов и их несущую способность.

Учет внутренней неоднородности грунтовых слоёв показал, что слабые группы (например, слой Грунта 1) требуют особого внимания, так как они нагружены больше и могут стать «точками отказа» при сильных нагрузках или сейсмических воздействиях.

### **Заключение**

По результатам моделирования подтверждается, что:

- Конструкция обладает достаточным запасом прочности и устойчивости;
- Распределения напряжений и деформаций внутри допуска нормативных значений;
- Зоны концентрации напряжений требуют внимания и возможного усиления для повышения надежности при эксплуатации;
- Осадки и внутренние давления находятся в допустимых пределах, что исключает риск предельных деформаций и растрескиваний элементов сооружения;
- Внутренние слои грунтов отличаются по прочностным характеристикам, что важно учитывать при эксплуатации.

Рекомендации для проектирования и эксплуатации сооружения:

1. Усиление конструкций у зон максимумов напряжений, особенно в углах подошвы подпорной стенки;
2. Внедрение системы мониторинга — контроль осадок, деформаций и гидродинамических параметров (с использованием технологий информационного моделирования и дистанционного зондирования объекта исследования);
3. В случае увеличения нагрузок на сооружение и основание — проведение дополнительных расчетов и укрепление слабых участков;
4. Регулярное обследование состояния грунтовых массивов и гидроизоляции во время эксплуатации (с использованием технологий информационного моделирования и дистанционного зондирования объекта исследования);
5. В будущем выполнить динамическое моделирование для оценки воздействия сейсмических нагрузок на сооружение.

### **Библиографический список**

1. Zhang L., Jiang X., Qiu F. Stability analysis of unsaturated soil slopes with cracks under rainfall infiltration conditions // Computers and Geotechnics. 2024. Vol. 165. Pp. 105907. — DOI: 10.1016/j.compgeo.2023.105907.

2. Feng G., Luo Q., Lyu P., Connolly D. P., Wang, T. An Analysis of Dynamics of Retaining Wall Supported Embankments: Towards More Sustainable Railway Designs. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Pp. 7984. — DOI: 10.3390/su15107984.

3. Рубин О. Д., Лисичкин С. Е., Пащенко Ф. А. Разработка методики расчета напряженного состояния в горизонтальных сечениях гидротехнических подпорных стен уголкового типа // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. — 2019. — Т. 15. — № 5. — С. 339–344. — DOI: 10.22363/1815-5235-2019-15-5-339-344.

4. Качаев А. Е., Сорока В. В., Хитров Я. И. Анализ результатов численного моделирования устойчивости откоса гидротехнического сооружения с подпорной стенкой SRM и SAM методами // *Системные технологии*. — 2025. — № 3 (56). — С. 20–31. — DOI: 10.48612/dnitii/2025\_56\_20-31.

5. Пряхина Г. В., Боронина А. С., Попов С. В., Распутина В. А., Войнаровский А. Е. Физическое моделирование разрушения грунтовой дамбы водохранилища в процессе переполнения водоема // *Известия Русского географического общества*. — 2019. — Т. 151, № 2. — С. 51–63. — DOI 10.31857/S0869-6071151251-63.

6. Мгалобелов Ю. Б., Дейнеко А. В. Расчетное обоснование безопасности современных гидротехнических сооружений и особенности учета воздействий от технологического оборудования при землетрясении // *Гидротехническое строительство*. — 2010. — № 7. — С. 46–50.

7. Качаев А. Е., Турапин С. С. Методика численного моделирования устойчивости грунтовой плотины при экстренной сработке водохранилища // *Экология и строительство*. — 2024. — № 4. — С. 4–13. — DOI: 10.35688/2413-8452-2024-04-001.

8. Shah A. Stratified ground modeling in geotechnical engineering: review and applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020. Vol. 138. Pp. 106261.

9. Rotaru A., Bejan F., Almohamad D. Sustainable Slope Stability Analysis: A Critical Study on Methods. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Pp. 8847. — DOI: 10.3390/su14148847.

10. Dostanova, S., Kalpenova, Z., Shayakhmetov, S., Kasymova, G., Tokpanova, K. Nonlinear models of the soil base for slab calculations. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2024. Vol. 5. Pp. 41–54. — DOI: 10.21303/2461-4262.2024.003484/.

11. Брыксин В. В. Особенности деформирования модели гибкой подпорной стенки и грунта засыпки. Эксперимент в лабораторных условиях. *Вестник НИЦ «Строительство»*. — 2024. — №41 (2). — С. 103–117. — DOI: 10.37538/2224-9494-2024-2(41)-103-117.

12. Kaiser P., & Kleinfelder, S. Site investigation techniques for understanding ground heterogeneity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2017. Vol. 143(1), P. 05016003.

13. Болдырев Г. Г., Барваишов В. А., Идрисов И. Х., Хрянина О. В. / *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. — 2017. — Т. 8. — № 3, С. 22–33.

14. Тер-Мартirosян З. Г., Тер-Мартirosян А. З., Хью Хынг Дам. Взаимодействие барреты с многослойным окружающим и подстилающим грунтами с учетом их упругих и упруго-вязкопластических свойств // *Вестник МГСУ*. — 2022. — Т. 17. — Вып. 9. — С. 1135–1144. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.9.1135-1144.

15. Султанов Т. З., Ходжаев Д. А., Мирсаидов М. М. Оценка динамического поведения неоднородных систем с учетом нелинейно-вязкоупругих свойств грунта // *Инженерно-строительный журнал*. — 2014. — № 1 (45). — С. 80–89. — DOI: 10.5862/MCE.45.9.

16. Качаев А. Е., Турапин С. С. Обоснование необходимости разработки комплексных расчетных моделей грунтовых плотин мелиоративных систем // Наука и мир. — 2024. — № 3. — С. 1–5. — DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-1-5.

17. Кудашева М. И., Калошина С. В. Сравнение модели Мора-Кулона и модели упрочняющегося грунта в программном комплексе Plaxis // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. — 2017. — Т. 2. — С. 87–95.

18. Качаев А. Е., Турапин С. С., Гарголина К. В. О корреляционной зависимости между моделями Хука-Брауна и Мора-Кулона для грунтов насыпных плотин // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2025. — № 51. — С. 101–104. — DOI: 10.26160/2474-5901-2025-51-101-104.

19. Немировский Ю. В. Проблемы и методы расчета и проектирования конструкций из армированного бетона // Известия Алтайского государственного университета. — 2014. — № 1-1 (81). — С. 90–95. — DOI: 10.14258/izvasu(2014)1.1-20.

20. Белостоцкий А. М., Акимов П. А., Кайтуков Т. Б., Афанасьева И. Н., Вершинин В. В., Усманов А. Р., Щербина С. В. О традиционных и современных методах численного моделирования связанных систем «сооружение – жидкость» // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики: Сборник трудов №17. — Москва, 2014. — С. 159–183.

21. Качаев А. Е., Турапин С. С. Особенности реконструкции земляных плотин мелиоративных систем // Наука и мир. — 2024. — № 3. — С. 6–10. — DOI: 10.26526/2307-9401-2024-3-6-10.

---

## NUMERICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A HETEROGENEOUS EMBANKMENT OF A HYDRAULIC STRUCTURE WITH A RETAINING WALL

A. E. Kachaev

All-Russian Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply «Raduga», Kolomna

---

### Abstract

Modern hydraulic engineering requires high reliability and safety of structures in challenging hydrogeological conditions, including heterogeneous soils and complex mechanical interactions. This study presents a numerical simulation of the stress-strain state of a hydraulic structure with a retaining wall based on layered heterogeneous soils. The relevance of the study stems from the need to improve the accuracy of predicting the behavior of soil masses and reduce the risk of accidents for soil structures on complex terrain, which is confirmed by the use of modern finite element methods and modeling of the interaction between the structure of the foundation soils of the structure and various elements of the structure itself. The analysis revealed that the maximum total displacement of the retaining wall during the construction phase is 0.026 m (26 mm), which is significantly lower than the permissible values (100–150 mm according to SP 22.13330.2016), ensuring the required stability of the structure. The maximum

### The Keywords

*Soil, equivalent stresses, settlement, retaining wall, pore pressure, equivalent deformation, safety factor.*

### Date of receipt in edition

08.02.2026

### Date of acceptance for printing

20.02.2026

pore pressure in the foundation was determined to be  $-433.71 \text{ kN/m}^2$  at a depth of 62.7 m, indicating the high bearing capacity of the soils. Modeling revealed stress concentration zones at the wall base with a maximum value of  $1027.66 \text{ kN/m}^2$ , requiring the application of appropriate design solutions to improve the structure's reliability. The practical significance of this study lies in improving the accuracy of stress-strain state assessments for the structure itself in the presence of heterogeneous foundation soils, thereby reducing the risk of accidents, optimizing design solutions, and developing recommendations for the operation and modernization of similar facilities.

**Ссылка для цитирования:**

А. Е. Качаев. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния неоднородной насыпи гидротехнического сооружения с подпорной стенкой. — Системные технологии. — 2026. — № 1 (58). — С. 42–57.

