



➤ GeomechanCS – НОВИНКА В ЛИНЕЙКЕ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ АО "СИСОФТ РАЗРАБОТКА"

Текущее состояние и перспективы развития. Примеры решения геотехнических задач

Программный комплекс GeomechanCS предназначен для решения геотехнических задач, прежде всего – задач сложного взаимодействия массива грунта с фундаментами и конструкциями зданий и сооружений в промышленно-гражданском, дорожном, гидротехническом строительстве, горном деле, нефтегазовой отрасли и др. GeomechanCS рассчитывает в трехмерной постановке напряжения и деформации в сооружениях и грунте, определяет осадку, устойчивость, несущую способность грунтовых массивов. Предмет виртуальных исследований, на которые ориентирован программный комплекс, – стационарные и нестационарные деформационные, фильтрационные и тепловые процессы в грунтах, совместное статическое и динамическое поведение грунта и сооружений.

Уместно упомянуть о технологии получения исходных данных, которые используются при решении геотехнических задач, и особенностях процессов, происходящих в грунтовых основаниях. Прежде чем приступить к проектированию зданий и сооружений, необходимо иметь информацию о геологических, гидрогеологических, климатических условиях района строительства и свойствах грунтов строительной площадки. Для этого проводят инженерно-геологические изыскания. Они включают выполнение следующих работ: бурение скважин и разработку шурфов, обязательный отбор образцов с целью выяснения геологического строения и особенностей напластования, лабораторные исследования для установления физико-механических свойств грунтов. Под действием передаваемых сооружением вертикальных или наклонных сил

в массиве основания возникают нормальные и касательные напряжения, приводящие к деформации грунтов. Кроме того, грунт испытывает напряжения от собственного веса, деформации от которого завершаются, как правило, в процессе образования и диагенеза грунтов. Напряжения, возникающие от усилий, передаваемых сооружением, приводят к дополнительной деформации грунтов. Наиболее часто имеют место деформации уплотнения грунтов под действием нормальных напряжений, реже – деформации сдвигов грунтов, вызываемые касательными напряжениями. Воздействие нормальных напряжений на сплошные тела рассматривают в механике деформируемых тел (сопротивление материалов, теория упругости). Поскольку грунты относятся к дисперсным телам, кроме закономерностей деформируемости сплошных тел приходится

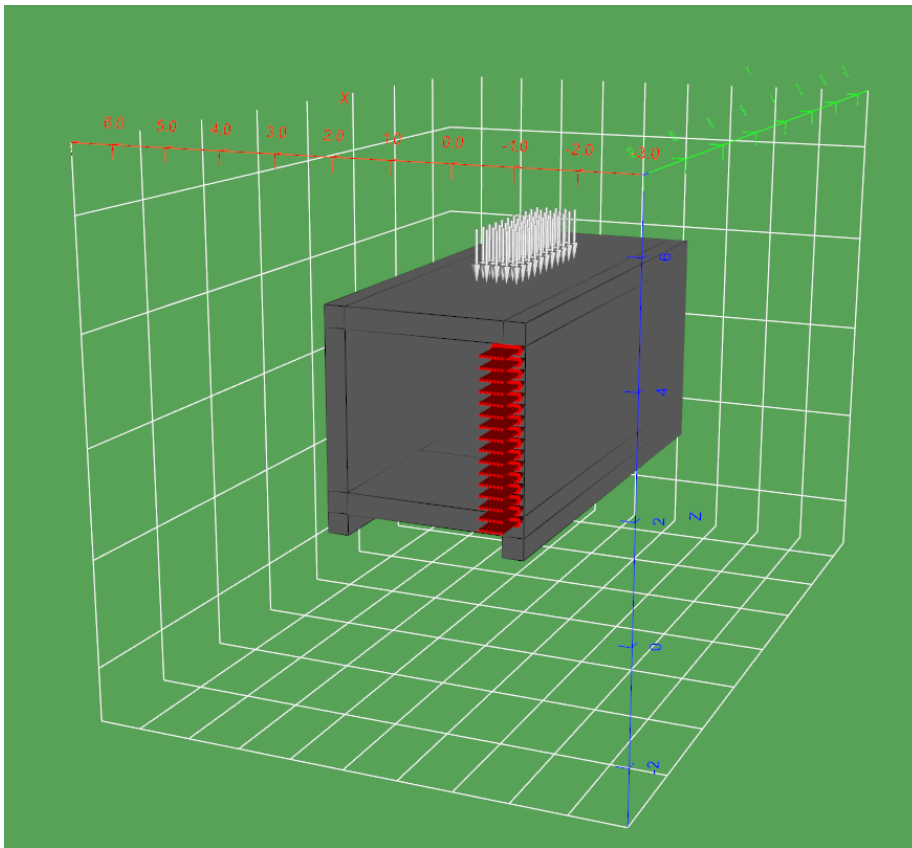


Рис. 1. Пример модели, собранной в препроцессоре

учитывать изменение объема пор при сжатии, то есть рассматривать дополнительно закон уплотнения (закон компрессии). Кроме того, в грунтах, как и в сплошных телах, при действии нормальных напряжений наблюдается боковое расширение, но по более сложной закономерности.

Деформируемость сплошных тел под действием касательных напряжений характеризуется модулем сдвига при упругих деформациях, границей текучести при пластических деформациях и коэффициентом вязкости, обуславливающим вязкое течение. В грунтах обычно интересуются их сопротивлением сдвигу при предельно напряженном состоянии. Это сопротивление зависит от угла внутреннего трения и удельного сцепления грунтов, определяемых в соответствии с законом сопротивления грунтов сдвигу.

Как деформируемость грунтов во времени, так и их сопротивление сдвигу зависят от долей напряжений, передаваемых на скелет грунта и на воду, находящуюся в порах. Поровая вода под действием возникающего в ней давления постепенно отжимается и передает его на скелет грунта, поэтому деформируемость грун-

тов и их сопротивление сдвигу зависят от фильтрационных способностей грунта. Кроме того, фильтрация воды в грунтах интересует строителей в отношении определения притока воды в котлованы и расчета водопонижающих установок. Все это обуславливает необходимость изучения закона фильтрации поровой воды.

Итак, к основным закономерностям относятся закон уплотнения, определяющий сжимаемость, **закон сопротивления сдвигу**, характеризующий сопротивляемость грунтов сдвигу, и **закон фильтрации**, описывающий водопроницаемость. **Все перечисленные закономерности рассматриваются и реализуются в программном комплексе GeomechaniCS.**

На сегодняшний день программный комплекс GeomechaniCS состоит из трех независимых модулей, объединенных в одной оболочке:

QUASISTATIC – модуль расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) пространственных зданий и сооружений совместно с грунтовым массивом в 3D-постановке при воздействии произвольных статических, квазистатических и динамических нагрузок с уче-

том упруго-вязко-пластического поведения материалов и фактора времени; **FILTRATION** – модуль расчета НДС пространственных зданий и сооружений в грунтовых средах с учетом фильтрационных параметров пластов при воздействии произвольных статических, квазистатических и динамических нагрузок с учетом упруго-вязко-пластического поведения материалов и фактора времени в 3D-постановке;

THERMOELAST – модуль расчета НДС и температурных параметров пространственных зданий и сооружений совместно с грунтовым массивом с учетом фазовых переходов замораживания-оттаивания, нагрева, а также действия произвольных статических, квазистатических и динамических нагрузок и упруго-вязко-пластического поведения материалов в 3D-постановке.

Первая версия программного комплекса GeomechaniCS представляет собой упрощенный вариант, обеспечивающий ему самодостаточность. Генерация трехмерной конечно-элементной сетки (гексаэдральной) производится в полуавтоматическом режиме. При этом имеются ограничения, связанные с конечно-элементным представлением зданий и сооружений нестандартных геометрических форм, а также грунтовых массивов сложного строения.

В последующих версиях эти ограничения будут сняты. Как в большинстве программ, специализирующихся на решении геотехнических задач, трехмерные области произвольной геометрии будут разбиваться в автоматическом режиме на тетраэдральную сетку.

Программный комплекс GeomechaniCS состоит из **трех процессоров, препроцессора и постпроцессора**. Процессором является отдельный исполняемый файл, выполняющий функции расчетного модуля (модули перечислены выше). Объектом вычислений является расчетная модель, подготавливаемая в препроцессоре. Результатами расчета являются файлы, содержащие вычисленные интенсивности напряжений и деформаций, компоненты тензоров деформаций, напряжений, вектора перемещений, температуры и порового давления.

Препроцессор предназначен для создания расчетной модели (рис. 1), запуска ее на расчет в процессоре, отображения хода расчета и запуска постпроцессора для работы с результатами расчета.

Постпроцессор позволяет представлять результаты расчета в виде, достаточном для последующего анализа и выводов по

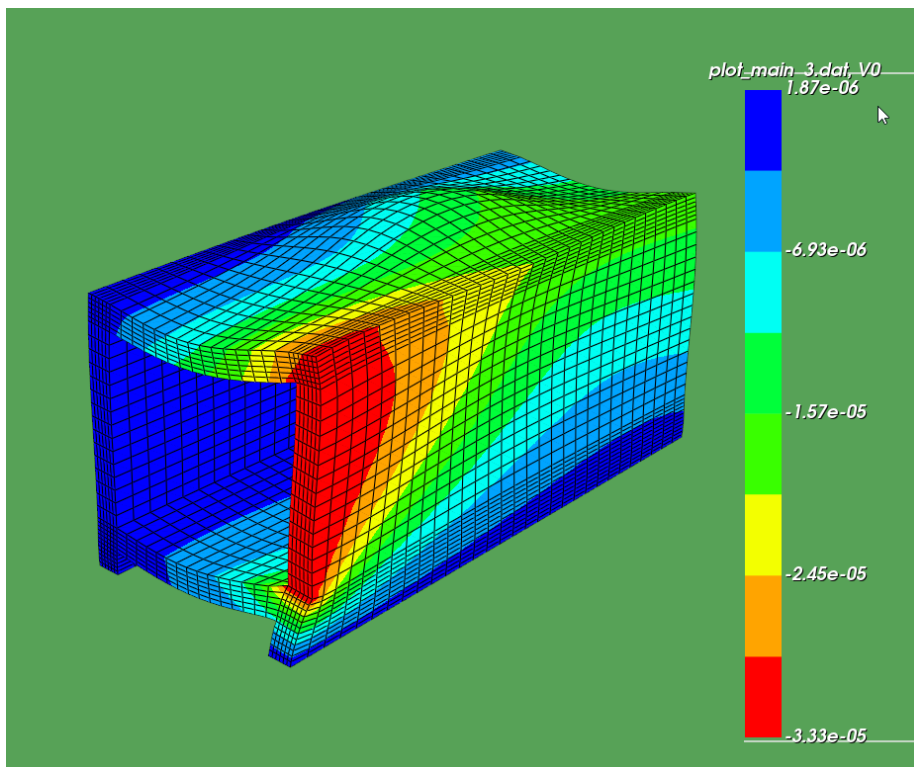


Рис. 2. Цветовое отображение на деформированной конструкции одной из компонент перемещений

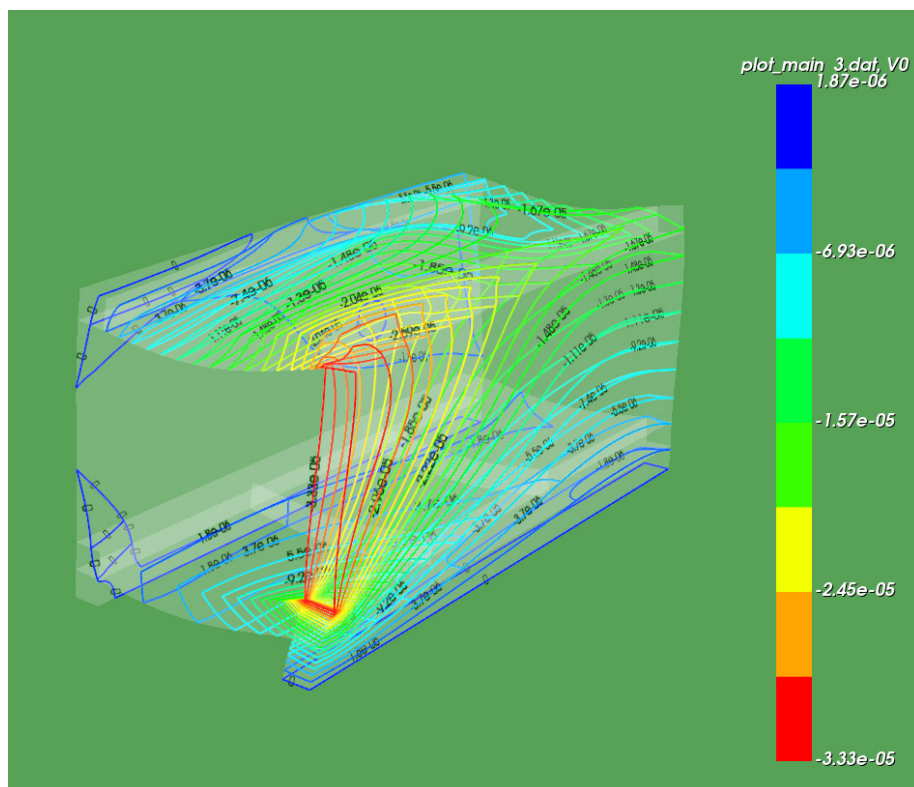


Рис. 3. Отображение поля перемещения в виде изолиний

итогах расчета (графики, трехмерные поля с цветовой индикацией рассчитанных параметров, изоповерхности, изолинии, двумерные поля в заданных сечениях и др.) – рис. 2 и 3.

Строгость подхода при решении задач геотехники определяется реализованными в программе моделями материалов (грунтов и сооружений).

В текущей версии программы задачи решаются в линейно-упругой постановке, что соответствует стандартным подходам, которым предписано следовать соответствующими СНиПами и ГОСТами. Но в последнее время наметилась тенденция использования сложных моделей, позволяющих более точно рассчитывать несущую способность грунта на текущий момент и перспективу, что обеспечивает возможность в конечном итоге снизить экономические издержки при возведении зданий и сооружений.

Авторами программного комплекса реализованы сложные реологические модели грунтов в виде программных кодов, которые будут добавляться в комплекс по мере насыщения возможностей пользовательского интерфейса пре- и пост-процессора.

Ниже представлены результаты решений ряда практических задач, выполненных на основе реализованных моделей и подходов.

Важной задачей в строительной практике является восстановление планово-высотного положения зданий, сооружений, опор мостов, тоннелей, метрополитенов и других объектов транспортной инфраструктуры. Часто для этих целей используется технология компенсационного нагнетания инъекционных смесей в грунтовые массивы. Выбор параметров этого процесса является нетривиальной задачей.

На помощь приходит численное моделирование, позволяющее в процессе многовариантных расчетов выбрать оптимальную последовательность действий и разработать регламент производства работ. В результате моделирования определяются напряженно-деформированное состояние грунтового массива и строительных объектов, а также объемы, давление, очередность мест инъектирования и продолжительность компенсационного нагнетания специальных растворов для восстановления планового положения объектов.

При расчете рассматриваются два различных подхода в части последователь-

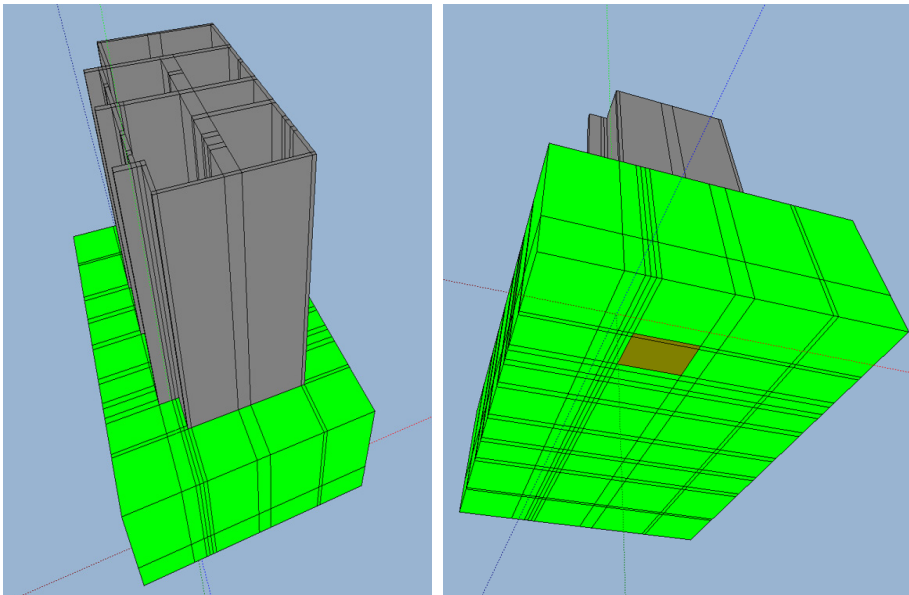


Рис. 4. Общий вид и вид снизу на расчетную область с визуализацией областей нагнетания (на рисунке вида снизу показан объем № 75)

ности нагнетания и распределении инъекционных объемов.

1. Расчет по теории связанной фильтрации и пластичности, в котором предусматривается управляемое изменение порядка и количества нагнетаемого состава в область, моделирующую инжектор, и оценка плано-высотного положения здания.
2. Расчет по теории пластичности, в котором предусматривается управляемое изменение порядка и количества нагнетаемого состава и его эмпирического пересчета в объемную деформацию для оценки плано-высотного положения здания.

Приведем два практических примера использования виртуального моделирования для решения задачи восстановления плано-высотного положения сооружений методом компенсационного нагнетания инъекционных смесей в грунтовые массивы.

**Пример 1.
Подъем и возврат здания
в проектное положение методом
компенсационного нагнетания
(г. Дубна, ул. Понтекорво, д. 19)**

На рис. 4 показана расчетная область, включающая высокоэтажное здание и прилегающий грунтовый массив, разбитая на первичные объемы. Конечная элементная сетка строится автоматически, исходя из характеристик каждого объема и условий сопряжения с другими объемами.

Инженерно-геологическое строение грунта на обследованном участке представлено водонасыщенным серо-коричневым песком средней крупности и средней плотности. Рядом с объектом протекает река. Для удобства формирования модели и проведения расчетов грунтовый массив разбивается на зоны (рис. 5).

Сначала проводился так называемый "обратный инжиниринг", цель которого состояла в уточнении характеристик грунтового массива. Варьируя в определенных диапазонах параметры грунта, необходимо было добиться соответствия результатов численного анализа замеренным перемещениям в пределах здания. Выполненные расчеты воспроизводили фактическую последовательность строительства с целью учета предшествующих изменений напряженно-деформированного состояния здания и грунтового массива на всех стадиях строительных работ. Это очень важно с точки зрения обеспечения правильной технологии

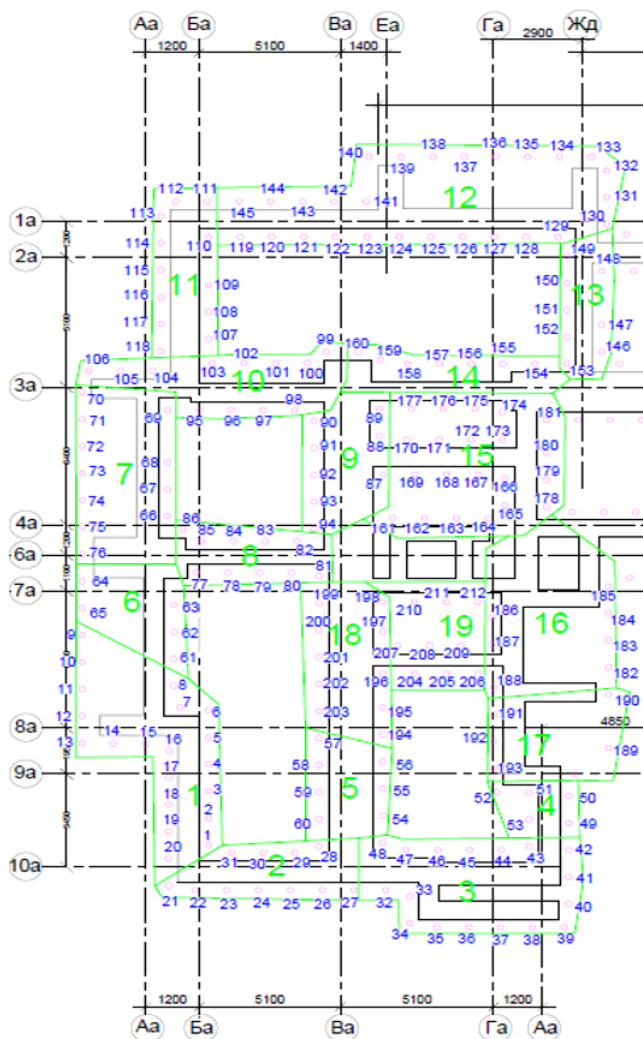


Рис. 5. Схема разбиения грунтового массива на зоны

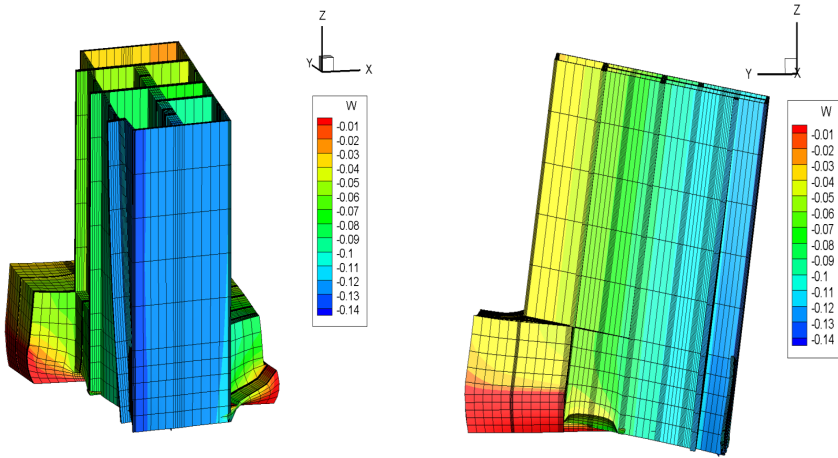


Рис. 6. Исходное деформированное состояние здания и грунтового массива. Для визуализации часть объемов грунтового массива удалена. Цветовая индикация вертикальных смещений (по оси Z), м

при восстановлении проектного положения сооружения.

После серии расчетов эта цель была достигнута.

На рис. 6 показано исходное деформированное состояние грунтового массива и конструктивных элементов здания; на рис. 7 – нормальные напряжения в элементах конструкций и грунтового массива: S_{11} по оси X, S_{22} по оси Y, S_{33} по оси Z; на рис. 8 – картина состояния грунтового массива под подошвой свайного основания.

Для создания оптимальной технологии компенсационного нагнетания, состоящей в определении последовательности и объемов нагнетания, была выполнена серия расчетов.

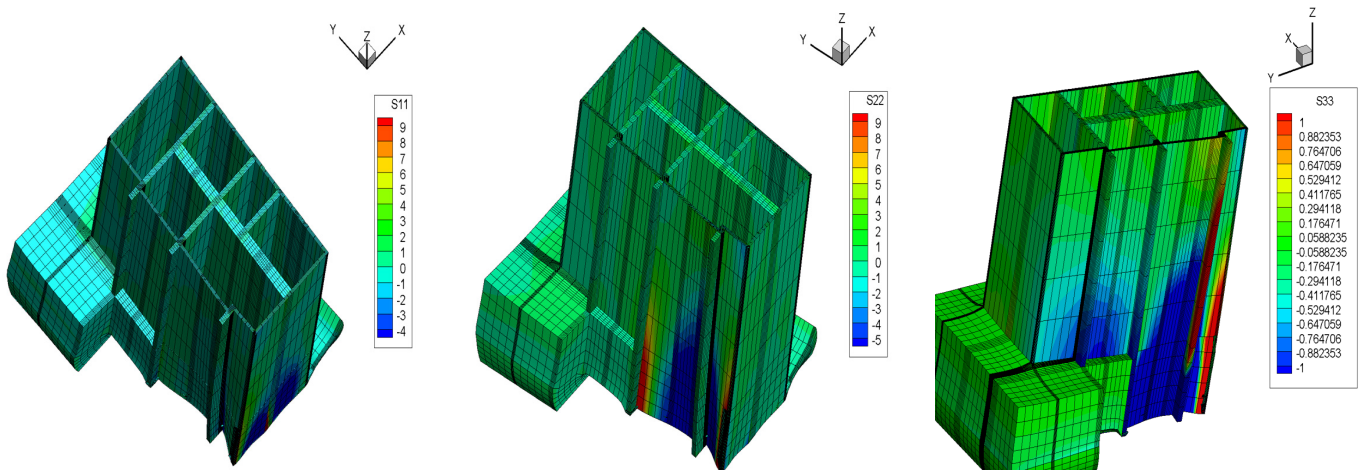


Рис. 7. Напряжения (в МПа) в элементах конструкций здания и грунтового массива: S_{11} по оси X, S_{22} по оси Y, S_{33} по оси Z. Для визуализации часть объемов грунтового массива удалена

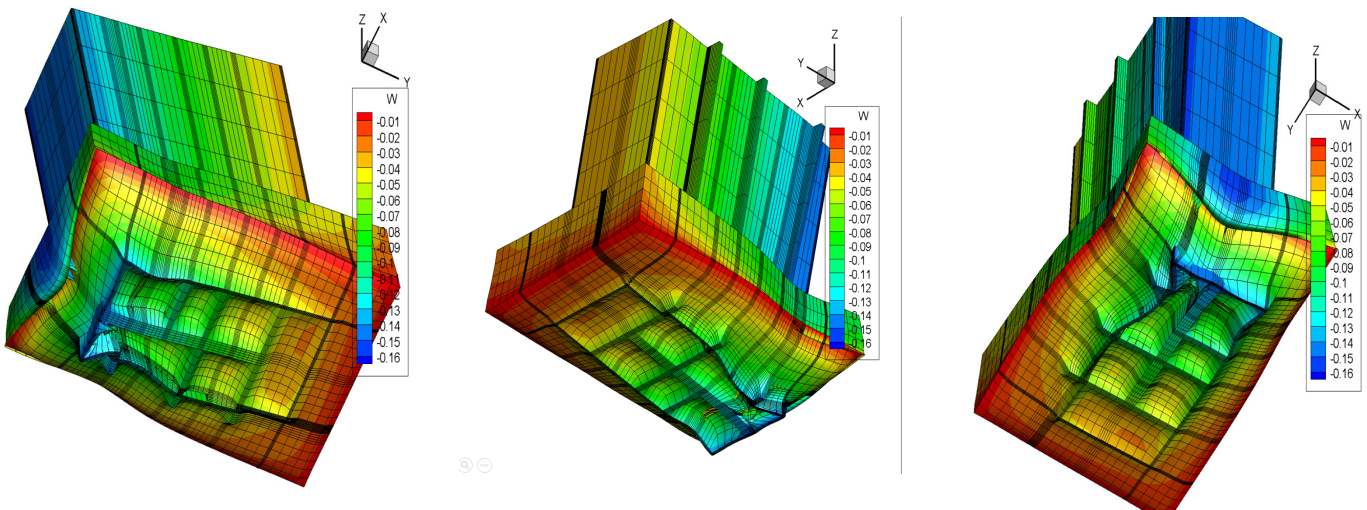


Рис. 8. Форма деформирования грунтового массива под подошвой свайного поля. Для визуализации часть объемов удалена

Таблица 1

№ захватки	№ пакера	Уровень 1 (-14 м)				Уровень 2 (-13,7 м)			
		V на ед., м ³	Очередность	Подъем, мм	VОбщ., м ³	V на ед., м ³	Очередность	Подъем, мм	VОбщ., м ³
1	1-5 и 16-20	1,425	2	4,0	2,85	1,425	1	9,0	5,7
	6-15	1,425	1			1,425	2		
2	21-31	1,28	4	1,0	1,28	1,28	3	3,0	2,56
3	32-39	0,64	7	3,0	1,28	0,64	7	5,0	2,56
	4048	0,64	6			0,64	6		
4	49-53	0,64	8	1,0	0,64	0,64	8	2,0	1,28
5	54-60	1,93	5	3,0	1,93	1,93	4	5,0	3,86
6	61-65	0,42	3	2,0	0,42	0,42	5	4,0	0,84
7	66-76	0,71	13	0,0	0,71	0,71	17	0,0	1,42
8	77-86	0,92	14	2,0	0,92	0,92	11	3,0	1,84
9	87-94	1,02	15	0,0	1,02	1,02	16	0,0	2,04
10	95-106	0,61	18	0,0	0,61	0,61	18	0,0	1,22
11	107-118	0,56	20	0,0	0,56	0,56	90	0,0	1,12
12	119-124 139-145	0,61	22	0,0	1,22	0,61	21	0,0	2,44
	125-138	0,61	23			0,61	22		
13	146-153	0,59	21	0,0	0,56	0,59	23	0,0	1,15
14	154-160	0,61	19	0,0	0,61	0,61	19	0,0	1,22
15	161-169	0,67	16	0,0	1,37	0,67	14	0,0	2,74
	170-181	0,7	17			0,7	15		
16	182-188	0,36	12	0,0	0,36	0,36	13	0,0	0,72
17	189-193	0,4	9	1,0	0,4	0,4	9	3,0	0,8
18	194-203	1,93	10	3,0	1,93	1,93	10	4,0	3,86
19	204-212	0,39	11	1,0	0,39	0,39	12	2,0	0,78

По результатам многовариантных расчетов сформирована таблица 1 с номерами захваток, уровней инъецирования, подачи смеси в определенные точки путем нумерации пакеров, очередности и объема закачки для дальнейшего составления технологического регламента и проекта производства работ по восстановлению плано-высотного положения и безопасного подъема здания.

В начальный период работ определен порядок по нагнетанию одновременно на разных участках при давлении от 1–2 до 4,7 МПа по всем инжекторам до наступления "отказа". В дальнейшем давление нагнетания составляет 5–7 МПа. Нормальные вертикальные (максимальные) напряжения в массиве

грунта у инжекторов не превышают 0,4 МПа (4 кг/см²).

Интенсивность нагнетания на разных участках изменяется от 0,08 до 1,0 м³ в сутки. Расчетное время нагнетания – 110 суток, причем скважины подключаются к работе по расчетной схеме. Подъем здания на разных участках достигает 1,5 мм в сутки.

Характер распределения напряжений здания для одного из шагов восстановления представлен на рис. 9, а общий вид сооружения до и после подъема – на рис. 10.

Краткие выводы

Решение задач по защите существующих зданий и сооружений от возможного развития сверхнормативных деформаций,

устранению существующих сверхнормативных деформаций путем подъема и возврата зданий, сооружений, опор мостов, тоннелей, метрополитенов и других объектов транспортной инфраструктуры в проектное положение методом компенсационного нагнетания включает следующие этапы:

- численное моделирование поведения грунтового массива, существующих или строящихся объектов;
- проведение серий многовариантных расчетов для определения исходного и последующих значений НДС здания и грунтового массива, их перемещений и деформаций в процессе работ по методу компенсационного нагнетания инъекционных смесей;



- на основании полученных расчетов разрабатываются технологический регламент и проект производства работ по определению последовательности, точек подачи, объемов, давления инъекционных смесей на минеральной основе для защиты или возврата в плано-высотное положение зданий, сооружений, опор мостов, тоннелей, метрополитенов и других объектов транспортной инфраструктуры;
- привлечение подготовленных кадров, специальной техники и оборудования для выполнения строительного-монтажных работ.

Пример 2. Защита объектов метрополитена от осадочных деформаций методом компенсационного нагнетания

Увеличение объемов и масштабов освоения подземного пространства, включая строительство объектов метрополитена в крупных городах, сопровождается значительным влиянием на окружающую городскую застройку, что требует разработки и реализации комплекса специальных мероприятий, обеспечивающих защиту зданий и сооружений от сверхнормативных деформаций. При этом в зону влияния строительства вовлекаются многочисленные надземные и подземные соору-

жения, включая действующие объекты метрополитена, а также жилую застройку и надземные транспортные сооружения.

В данном случае здание многофункционального комплекса (МФК) возводится рядом с действующими сооружениями метрополитена (м. "Чкаловская") и представляет собой стилобат в 3–4 этажа торговой части с внутренним крытым атриумом, на котором располагаются 17 этажей апартаментов в виде двух башен (рис. 11).

При этом четырехэтажный стилобат торговой части возводится над вестибюлем станции метро "Чкаловская" с эскалаторными наклонными тоннелями.

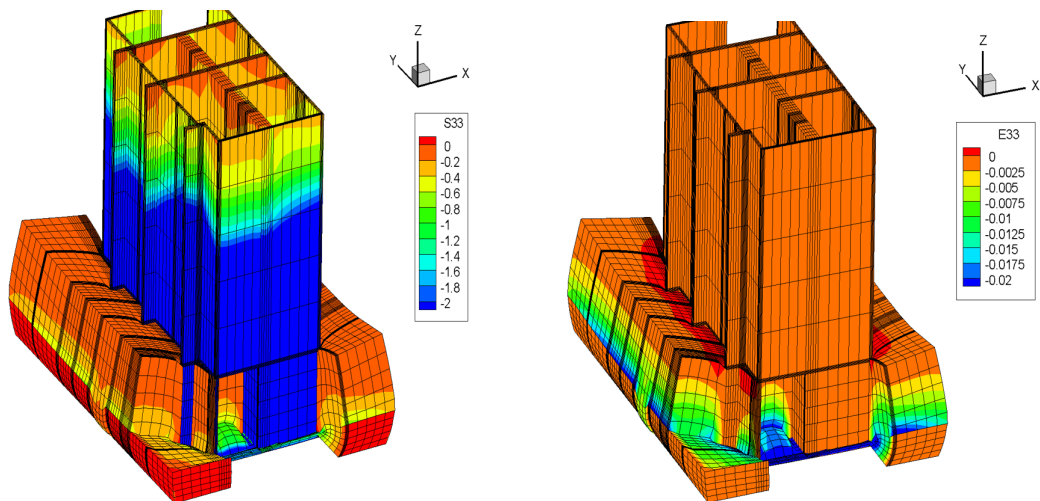


Рис. 9. Цветовая индикация распределения вертикальных нормальных напряжений S_{33} , МПа и вертикальных деформаций E_{33}

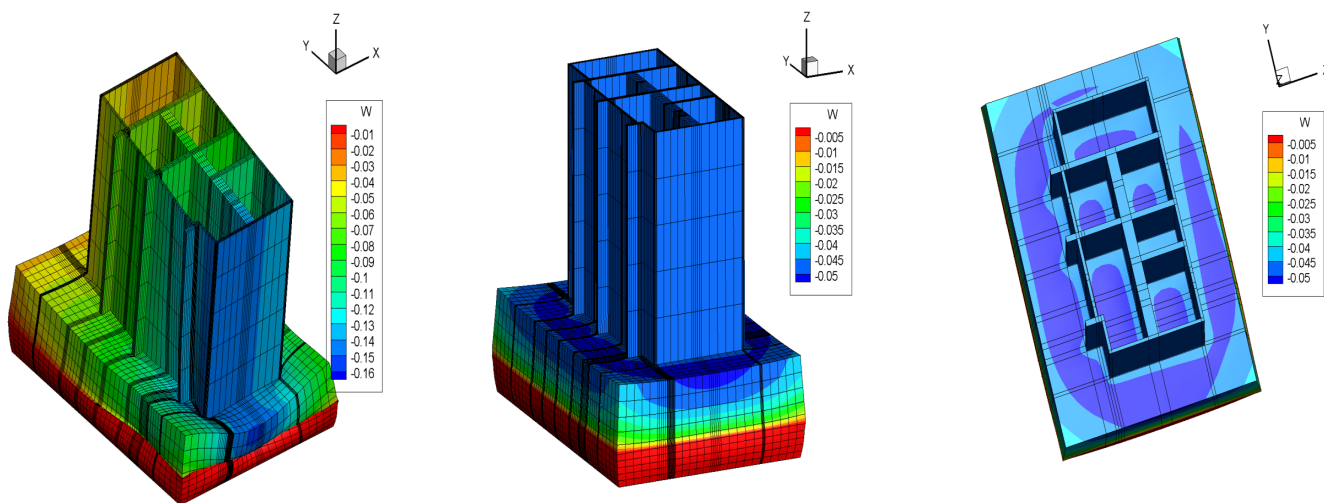


Рис. 10. Общий вид сооружения до и после подъема. Цветовая индикация вертикальных перемещений W , м

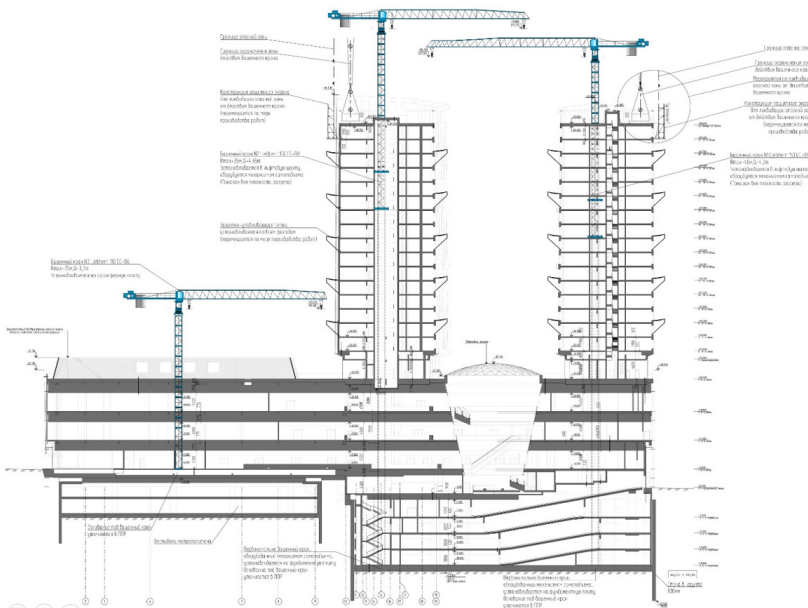


Рис. 11. Схема строительства МФК

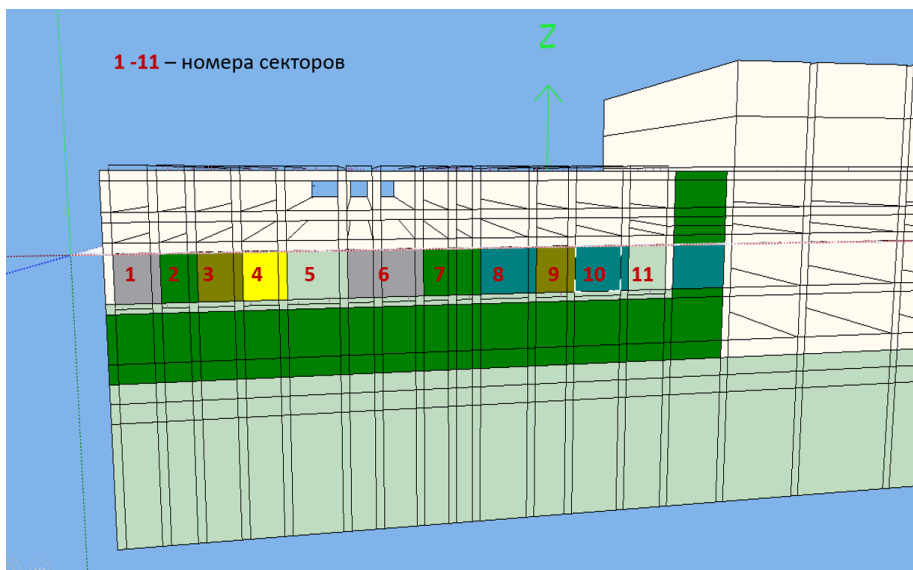


Рис. 12. Схема разделения грунтового массива на сектора

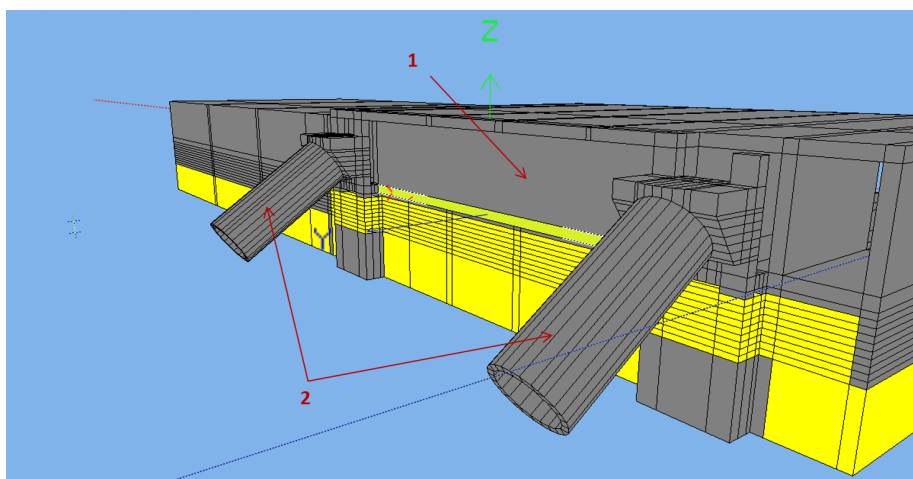


Рис. 13. Общий вид расчетной модели: 1 – здание вестибюля; 2 – эскалаторные наклонные ходы

Инженерно-технические сооружения станции "Чкаловская" (блоки технических помещений, понизительная подстанция) имеют конструкторскую форму кругового очертания из чугунных тубингов наружным диаметром 8,5 м. Внутренние конструкции – сборные железобетонные элементы. Подземный вестибюль имеет сложную конфигурацию в плане и представляет собой двух-трехуровневую сборно-монокрипную железобетонную конструкцию, где в верхнем уровне располагаются распределительный (кассовый) зал с турникетами для прохода пассажиров и служебные помещения, в нижних уровнях – машинные залы эскалаторов со вспомогательными помещениями и вентиляционный коллектор.

В результате оценки влияния строящегося МФК на существующие объекты метрополитена установлено, что максимально расчетная величина их осадочных деформаций достигает 140 мм при осадочных деформациях эскалаторных ходов 90 мм.

В соответствии с требованиями эксплуатирующей организации ГУП "Московский метрополитен" для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с возможным появлением перепадов на стыках зон эскалаторов при увеличении нагрузки на станцию "Чкаловская", должны быть исключены вертикальные осадочные смещения фундаментной плиты, на которой расположены приводные группы эскалаторов.

Реализация управляемого подъема в соответствии с последовательностью, определенной численным экспериментом, возможна только при компенсационном нагнетании без гидроразрывов, при котором закачанный объем занимает компактную область, и его влияние в этом случае прогнозируемо. Для реализации такого типа компенсационного нагнетания необходимо применение специальных растворов и техники.

Инженерно-геологическое строение грунта на обследуемом участке до глубины 70,0 м составляют отложения четвертичной, юрской и каменноугольной систем. На основании литологического состава и физико-механических свойств грунтов выделено 11 секторов вдоль стиловатой части и 7 секторов поперек (рис. 12).

План примыкания эскалаторов к зонам компенсационного нагнетания и разделение грунтового массива на сектора представлены на рис. 13.

Поведение грунтов основания описывается нелинейной моделью упрочняюще-



гося грунта типа Рыкова-Григоряна. Выбор данной модели обусловлен ее полной обеспеченностью константами для всех типов грунтов при действии статических и динамических нагрузок с условиями пластичности типа Мизеса-Шлейхера.

Главным преимуществом этой модели при расчетах компенсационного нагнетания является возможность учета изменения модуля деформации при изменении меньшего главного нормального напряжения, что важно, так как при нагнетании происходит обжатие грунта и, соответственно, увеличение модуля деформации.

Фактические данные грунтового массива для численного расчета взяты из отчета по инженерно-геологическим изысканиям.

Решается связанная задача движения жидкости по порам грунта и происходящим одновременно деформациям грунта. Методика предполагает численный метод решения уравнений с заданными граничными условиями, начальными давлением и перемещением. Дискретизация задачи по пространственным переменным осуществляется методом конечных элементов.

Для решения получаемой на каждом шаге по времени системы линейных уравнений используются стандартные прямые процедуры типа метода Гаусса или Холецкого, либо итерационные методы. В математической модели создается НДС, соответствующее начальному состоянию плано-высотного положения вестибюля и будущей высотной части.

Затем с помощью многовариантного численного расчета, анализа полученных результатов (с учетом места приложения нагрузки, ее величины и давления на каждом этапе строительства) определяются порядок, объем смесей, необходимое давление нагнетания инжецируемого раствора в каждую зону, не допускающее смещения вестибюля метро и обеспечивающее на период всего строительства его неизменное пространственно-высотное положение.

Последовательность строительства наземной части высотных объектов осуществляется в три этапа.

В результате расчетов получены результаты в виде рекомендуемых давлений по секторам и этапам, которые впоследствии легли в основу технологического регламента и проекта производства работ. Распределение вертикальных перемещений после реализации первого и третьего этапов строительства с учетом результата работ по компенсационному нагнетанию приведены, соответственно, на рис. 14.

Численное моделирование развития НДС грунта на разных стадиях компенсационного нагнетания дало возможность установить порядок выполнения инжекционных работ, обеспечивающих удержание на одной отметке стыка эскалаторов и вестибюля при надстройке над ним надземной части МФК, что является основанием для разработки технологического регламента при производстве инжекционных работ по технологии компенсационного нагнетания. Это обеспечивает эксплуатационную надежность объектов метрополитена при стро-

ительстве МФК в крайне стесненных условиях плотной городской застройки. В итоге проделанной работы создана расчетная модель сооружения совместно с грунтовым основанием, соответствующая реальной геометрии расчетной области и с заданными физико-механическими характеристиками материалов конструкций и грунтового массива.

Таким образом, использование виртуального моделирования для решения практических задач геотехники является существенным подспорьем при принятии ответственных решений, позволяющим избежать ошибок и, соответственно, уменьшить материальные и финансовые издержки.

*Сергей Коваль, д.т.н., профессор,
главный научный сотрудник ИМАШ РАН
им. А.А. Благодарова*

*Федор Киселев, к.ф.-м.н.,
доцент механико-математического
факультета МГУ им. М.В. Ломоносова*

*Анатолий Маляренко,
генеральный директор
ООО НПФ "СКАД СОФТ"*

*Дмитрий Жуковский,
главный специалист отдела
АО "ЗИ ПИСС"*

*Сергей Девятков,
руководитель проекта,
отдел САПР и инженерного анализа
АО «СИСОФТ РАЗРАБОТКА»*

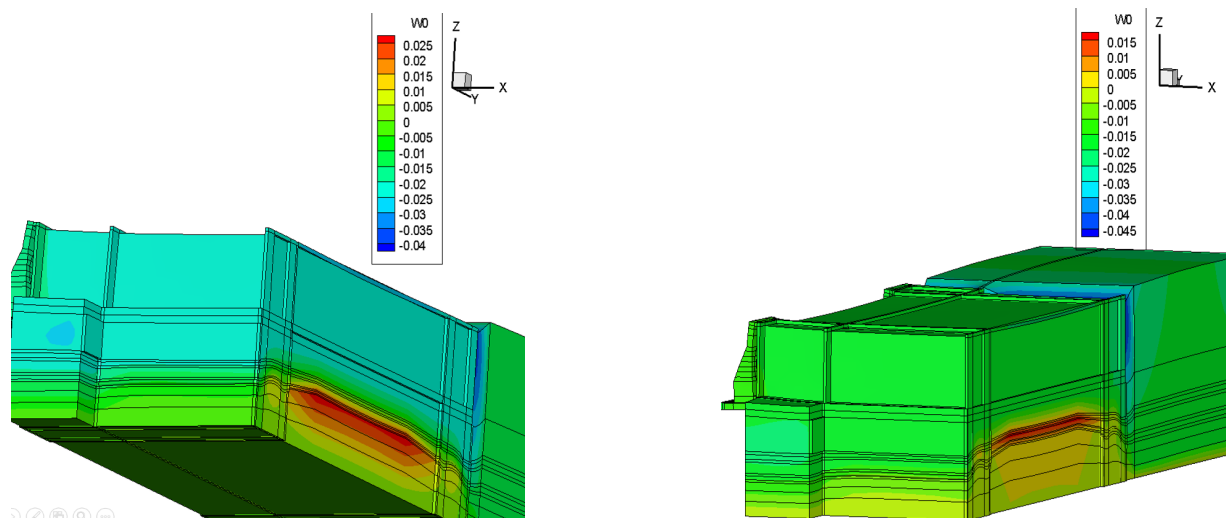


Рис. 14. Распределение вертикальных перемещений W , м после реализации первого и третьего этапов строительства