

DOI.org/10.5281/zenodo.1119161

УДК 624.02; 624.07; 624.1; 626.04; 627.2; 627.4

Н.Я. Цимбельман, Т.И. Чернова, П.В. Мосина

ЦИМБЕЛЬМАН НИКИТА ЯКОВЛЕВИЧ – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой,
e-mail: tsimbelman.nya@dvfu.ru

ЧЕРНОВА ТАТЬЯНА ИГОРЕВНА – ассистентка кафедры, e-mail: chernova.ti@dvfu.ru

МОСИНА ПОЛИНА ВЛАДИМИРОВНА – студентка, e-mail: mosina_pv@students.dvfu.ru

Кафедра гидротехники, теории зданий и сооружений Инженерной школы

Дальневосточный федеральный университет

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

Сравнение методов моделирования давления обратной засыпки на сооружения из заполненных оболочек

Аннотация: Представлен сравнительный анализ двух расчетных методов моделирования обратной засыпки грунта оболочек большого диаметра с внутренним наполнителем, установленных на сжимаемом основании. Рассматриваемая конструкция представляет собой тонкую металлическую или железобетонную оболочку (как правило, цилиндрическую), полость которой заполнена грунтом крупной фракции. Оболочки с наполнителем применяются в гидротехническом, промышленном, гражданском и транспортном строительстве в различных климатических условиях при возведении причальных набережных, пирсов, молов, волноломов, подпорных стен, устоев мостов и в конструкциях других сооружений. В настоящее время рассматривается возможность их применения при реконструкции и расширении сооружений портов Арктического бассейна. При расчете заполненных оболочек в конструкциях причальных набережных, оградительных и подпорных сооружений возникает задача корректного моделирования давления грунта обратной засыпки. Наряду с технологической нагрузкой, боковая нагрузка от удерживаемого грунта является основной причиной формирования внецентренного нагружения заполненной оболочки. Предложенная в работе модель сооружения, выполненная с использованием программного комплекса Plaxis 3D, позволяет определить напряжения в теле оболочки, во внутреннем наполнителе и в толще основания, а также деформации конструкции. В качестве основного принят метод моделирования засыпки как упругопластической среды. Для описания картины происходящих в толще грунта процессов в качестве расчетной выбрана модель Кулона–Мора. Упрощенный вариант модели сооружения предполагает моделирование обратной засыпки как распределенной нагрузки по поверхности оболочки, величина которой определена по нормативным источникам. Сравнение результатов расчетов позволило оценить возможную погрешность при использовании упрощенных методов моделирования нагрузок.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, грунтовый наполнитель, моделирование обратной засыпки, распределенная нагрузка.

Введение

В практике строительства для удержания вертикальной планировки местности, организации насыпей, обеспечения устойчивости массивов грунта при устройстве причальных набережных, искусственных островов и для решения многих других задач используются протяженные

подпорные сооружения из заполненных оболочек. В большинстве случаев внутренняя поверхность такого сооружения удерживает от обрушения грунтовую массу. В результате при расчете устойчивости и прочности элементов конструкций возникает задача моделирования воздействия на сооружение грунта обратной засыпки.

Методы определения давления земляной массы на подпорные сооружения известны с XVIII века (теория Ш.О. Кулона) и развиты в XIX веке в работах Г. Ребхана, В. Панселе и других ученых. В дальнейшем теория адаптирована к расчету подпорных стен отечественными и зарубежными авторами (Н.К. Снитко, Г.К. Клейн, В.В. Соколовский, С.С. Голушкевич и др.). Разработанные ими методики применены к расчету давления грунта засыпки на оболочечные сооружения в ряде нормативных документов [5, 7]. В последние десятилетия благодаря появлению высокопроизводительных компьютеров значительное развитие получили модели сооружений, основанные на методе конечных элементов, в том числе и сооружений, взаимодействующих с грунтом (А.Б. Фадеев, О. Зенкевич, Т. Танака и др.). Процесс создания численных моделей сооружений представляет собой весьма трудоемкую задачу, а потому медленно внедряется в практику инженерных расчетов.

Цель настоящей статьи – определение влияния способа моделирования давления грунта обратной засыпки, принимаемого в расчетах оболочек большого диаметра с внутренним наполнителем, установленных на сжимаемом основании, на результаты расчета.

Для проведения сравнительных расчетов мы использовали метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Plaxis 3D [1]. Рассматриваемое сооружение состоит из оболочки и соединительных арок, заполненных грунтом (укладка внутреннего наполнителя производится одновременно с грунтом обратной засыпки пазух), и верхнего строения, моделируемого в виде горизонтального жесткого диска по верху оболочечных конструкций. В случае возведения гидротехнических объектов все сооружение, за исключением верхнего строения, находится в условиях полного обводнения, поэтому входные параметры, как правило, определяются с учетом взвешивающего действия воды.

В данной работе рассматривается цилиндрическая оболочка (параметры сооружения представлены на рис. 1 и в табл. 1 с соотношением основных габаритных размеров $D/H = 0,7$ (D – диаметр, H – высота) и $t/R < 0,003$ (t – толщина стенки оболочки, R – радиус). Соотношение диаметра к высоте находится в диапазоне $D/H = 0,7 \div 1,0$, что позволяет отнести рассматриваемую конструкцию к гравитационным сооружениям типа «оболочка большого диаметра (ОБД)» [4].

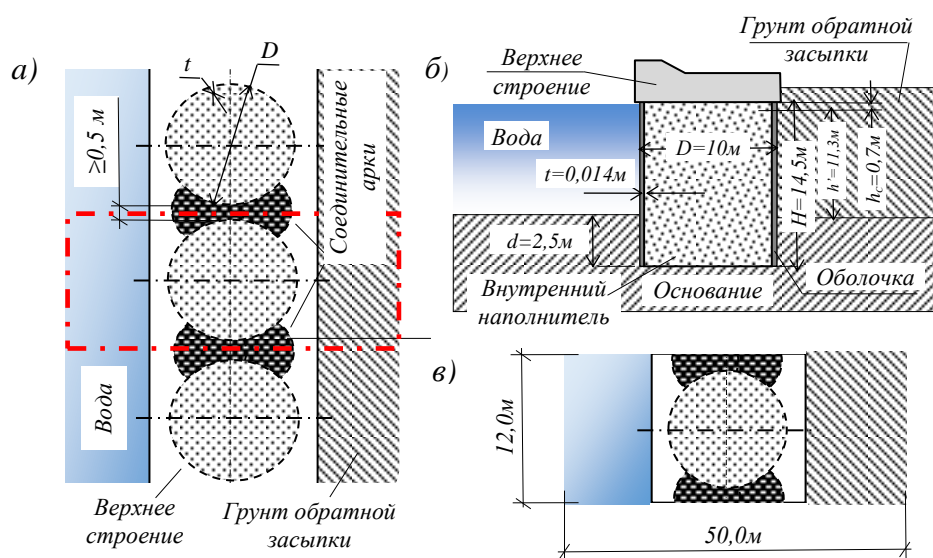


Рис. 1. Схема размещения оболочек с указанием основных размеров сооружения: а – схема плана сооружения, б – схема вертикального сечения оболочки, в – секция, выбранная для моделирования расчетной ситуации.

Расчетные параметры модели грунта наполнителя, основания и обратной засыпки взяты как усредненные значения физических, прочностных и деформационных характеристик грунтов для условий Арктики и северной части России по результатам известных многолетних наблюдений и из нормативных источников (табл. 2) [2].

Таблица 1

Параметры сооружения

Название	Оболочка	Верхнее строение
Удельный вес γ , кН/м ³	68,5	25,0
Модуль деформации E , кН/м ²	$2,1 \cdot 10^8$	$18 \cdot 10^6$
Коэффициент Пуассона ν	0,28	0,2
Диаметр D , м	10	10
Толщина t , м	0,014	0,5
Высота H , м	14,5	–

Таблица 2

Характеристики грунта

Название	Наполнитель	Засыпка	Основание
Удельный вес γ , кН/м ³	11	11	19
Модуль деформации E , кН/м ²	30000	30000	23000
Угол внутреннего трения ϕ , °	35	35	25
Удельное сцепление c , кН/м ²	2	2	35
Угол дилатансии ψ , °	0	0	2
Коэффициент Пуассона ν	0,25	0,25	0,25

Для моделирования работы грунта (наполнителя, обратной засыпки и основания) выбрана модель Кулона–Мора, описывающая поведение грунта как приближение первого порядка по отношению к реальному поведению среды. Модель характеризуется пятью основными входными параметрами (E – Модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, ϕ – угол внутреннего трения, c – сцепление, ψ – угол дилатансии), которые, как правило, известны инженерам-проектировщикам по результатам стандартных лабораторных испытаний, поэтому модель является общедоступной.

Для анализа выбраны две расчетные ситуации (далее *случай А* и *случай В*).

Случай А: грунт обратной засыпки моделируется как упругопластическая среда с определенными условиями на контакте среды с сооружением (система «грунтовой наполнитель–оболочка–основание»).

Случай В: грунт обратной засыпки моделируется как эквивалентная распределённая нагрузка g_H по поверхности оболочки (определена как активное давление грунта на подпорные сооружения с вертикальной стенкой: РТМ 31.3013-77 [5], СП 38.13330.2012 [7]). При этом в расчет не принимается вертикальная составляющая активного давления – как вносящая положительный эффект при расчете устойчивости сооружения.

Моделирование расчетных случаев в программном комплексе

Расчеты выполнены для сооружения с заданными исходными характеристиками (табл. 1, 2). Предложенная в работе модель сооружения составлена с использованием программного комплекса Plaxis 3D, она позволяет определить напряжения в теле оболочки, во внутреннем наполнителе и в толще основания, а также определить деформации конструкции (рис. 2). В модели внутренний наполнитель рассматривается как упругопластический цилиндр, а основание – как упругопластическое полупространство. Условия на контакте оболочки и внутреннего наполнителя формируются введением промежуточного слоя – интерфейса, описываемого параметрами трения, определенными в результате экспериментальных исследований [4].

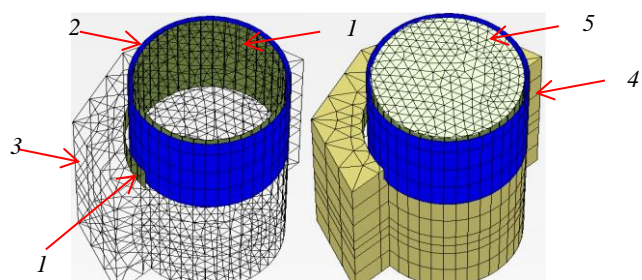


Рис. 2. Расположение условных слоев (интерфейсов) в численной модели:
 1 – интерфейс; 2 – элемент конструкции (оболочка); 3 – контур моделируемого грунта;
 4 – модель грунта снаружи оболочки; 5 – модель внутреннего наполнителя.

Конечно-элементная модель включает: 8 узловых клиновидных элементов, наделенных прочностными параметрами, описывающими состояние грунта; 8 узловых «четырёхугольных» плитных элементов, описывающих криволинейную поверхность оболочки; 16 узловых интерфейсных элементов, описывающих криволинейную поверхность взаимодействия оболочки с грунтом, 6 узловых призматических элементов, описывающих верхнее строение. Подробное описание модели, включающее этапы послойного построения сетки конечных элементов и ее оптимизации, правила преобразования входных данных и определение параметров взаимодействия оболочки и наполнителя, приведены в работах [2, 4, 8] и др.

Модель сооружения ограничена (в плане) в продольном и поперечном направлениях грунтом, на границах которого созданы условия недопущения горизонтальных перемещений и сохранена возможность перемещений по вертикали. Это условие предполагает, что напряжения и деформации у граничной области внутри рассматриваемого объема равны напряжениям и деформациям снаружи рассматриваемого расчетного объема.

Случай А

Схема размещения оболочек с указанием основных размеров сооружения приведена на рис. 1. Предложена последовательность формирования модели для двух *случаев А и В*, которая отличается методом моделирования действия грунта обратной засыпки. Описание этапов расчета и комментариев к ним отражены в табл. 3.

Случай А предполагает моделирование грунта обратной засыпки как упругопластической среды.

Общий вид модели для *случая А* представлен на рис. 3.

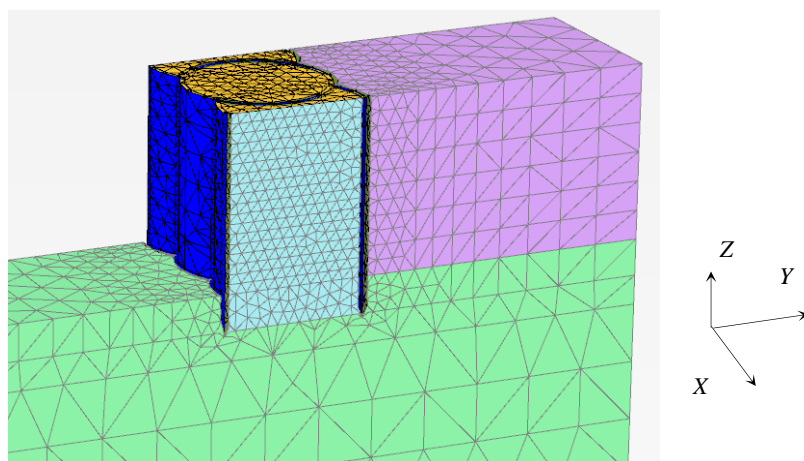


Рис. 3. Общий вид расчетной схемы для случая А в программном комплексе Plaxis 3D

Случай В

Равнодействующая определена известными методами, основанными на решении Кулона о замене поверхности скольжения плоскостью [3, 6]. В результате для заданных компонентов сооружения и грунта получена эпюра распределения бокового давления грунта σ_a и распределённая нагрузка по боковой поверхности оболочки. Полученная нагрузка приложена равномерно распределённой по площади напорной грани оболочки, при этом интенсивность нагрузки меняется по высоте от $-2,1 \text{ кН/м}^2$ у верхней отметки сооружения до $33,7 \text{ кН/м}^2$ на уровне кровли несущего слоя (рис. 4).

При нахождении эквивалентной горизонтальной нагрузки не учтено влияние процесса уплотнения (уплотнение грунта возможно при многократном циклическом приложении внецентренной нагрузки, характерной для описания воздействия льда, приливов/отливов волн и др.). В связи с этим нагрузка на оболочку ожидается несколько заниженной, что в некоторой степени компенсируется отсутствием учета трения грунта по наружной поверхности оболочки. Последовательность формирования расчетной модели предложена в табл. 3.

Таблица 3

Этапы расчета

<i>Initial phase</i> – расчет начальных напряжений, возникающих в грунте	
<i>Phase 1 – Phase 3</i> – установка оболочечной конструкции (в примере моделирование осуществлялось в три этапа слоями произвольной мощности до достижения отметки установки оболочки)	
<i>Phase 4</i> – расчет напряжений в грунте после установки оболочки и соединительных арок одновременно с укладкой слоя грунта ($d = 2,5 \text{ м}$) снаружи оболочки, в который предполагается заглубление сооружения. (Такой прием формирования модели предлагается авторами с целью обеспечить определение в программном комплексе Plaxis 3D точек контакта конечных элементов на границе сооружение–грунт, т.е. для описания взаимодействия двух сред)	
<i>Phase 5</i> – расчет напряжений в грунте от укладки первого слоя грунта (высотой $2,5 \text{ м}$) внутренней засыпки оболочки и соединительных арок	
<i>В зависимости от способа моделирования грунта обратной засыпки различают</i>	
<i>Случай А</i> (моделирование грунта как упругопластической среды)	<i>Случай В</i> (моделирование грунта как распределенной по поверхности оболочки нагрузки)
<i>Phase 6,1</i> – расчет, учитывающий укладку второго слоя грунта наполнителя внутренней засыпки оболочки и соединительных арок и первого слоя грунта обратной засыпки (высота слоев 2 м)	<i>Phase 6,2</i> – расчет, учитывающий укладку второго слоя грунта наполнителя внутренней засыпки оболочки (высота слоя 2 м).
<i>Phase 7,1 – Phase 11,1</i> – расчет, учитывающий последовательную укладку слоев грунта внутреннего наполнителя оболочки и соединительных арок одновременно с грунтом обратной засыпки каждые 2 м до достижения отметки верха сооружения ($H = 14,5 \text{ м}$)	<i>Phase 7,2 – Phase 11,2</i> – расчет, учитывающий последовательную укладку слоев грунта внутреннего наполнителя оболочки и соединительных арок каждые 2 м до достижения отметки верха сооружения ($H = 14,5 \text{ м}$)
<i>Phase 12</i> – расчет, учитывающий установку верхнего строения (железобетонной плиты). В настройках данного этапа выбрана опция <i>Reset displacements to zero</i> для создания условий отсутствия влияния перемещений, полученных на предыдущих фазах, на результаты расчета	
–	<i>Phase 13,2</i> – расчет, учитывающий приложение распределённой нагрузки по поверхности оболочки, интенсивностью от $-2,1$ до $33,7 \text{ кН/м}^2$

Общий вид модели для *случая В* представлен на рис. 4.

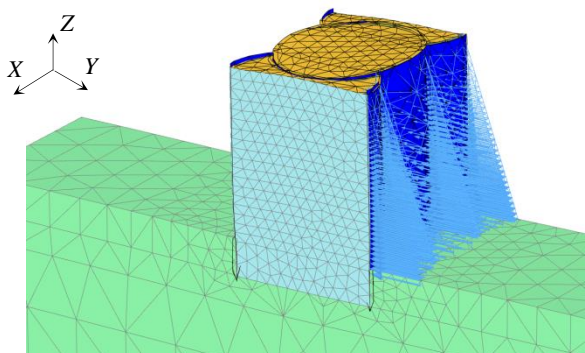


Рис. 4. Общий вид расчетной схемы для случая В в ПК Plaxis 3D.

Сравнительный анализ расчетов

Для анализа и сравнения результатов выбрана сжатая зона сооружения (зона контакта тонкой оболочки с основанием) (рис. 5), так как возникающие в этой области напряжения, как правило, при проектировании оказывают решающее влияние на принимаемые характеристики материала и параметры сечения оболочки, поскольку являются определяющими для оценки местной устойчивости конструкции. По результатам расчетов для двух разных случаев (А и В) сравнивались следующие параметры: u_y (перемещение оболочки в горизонтальном направлении, м), σ_N (нормальные напряжения у основания оболочки по оси z , кПа), τ_{max} (максимальные касательные напряжения в нижней части у основания оболочки, кПа).

На рис. 5 представлена иллюстрация деформированного интерфейса на границе «внутренний наполнитель–оболочка», принятого для последующего анализа.

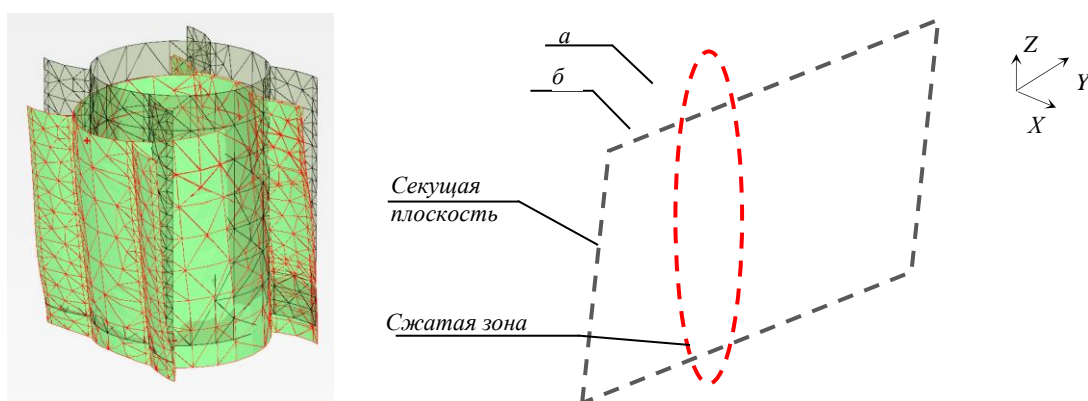


Рис. 5. Общий вид интерфейса на границе «наполнитель–оболочка» а – недеформированный интерфейс, б – деформированный интерфейс.

На рис. 6, а, б представлены схемы деформации сооружения для расчетных случаев А и В.

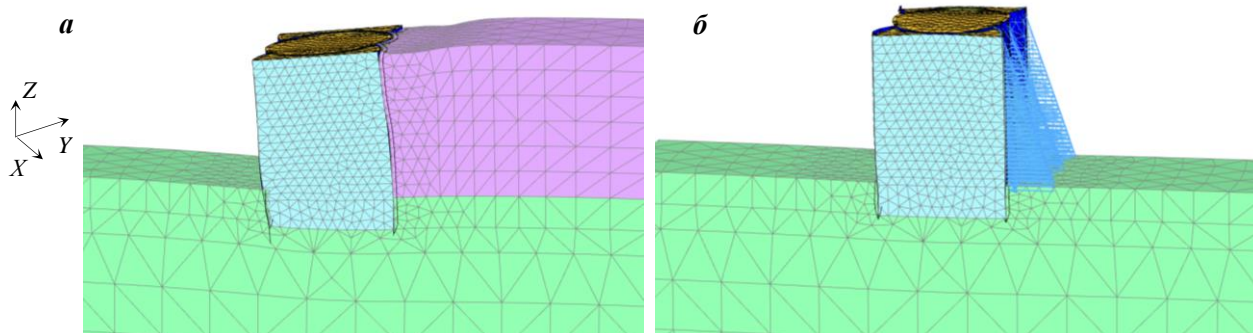


Рис. 6. Деформированная схема: а – для случая А, б – для случая В (приведены разные масштабы увеличения перемещений: а x 200 раз, б x 5 раз).

На рис. 7 изображены эпюры для указанных выше сравниваемых параметров, на которых обозначены максимальные значения усилий, возникающих в рассматриваемом сечении.

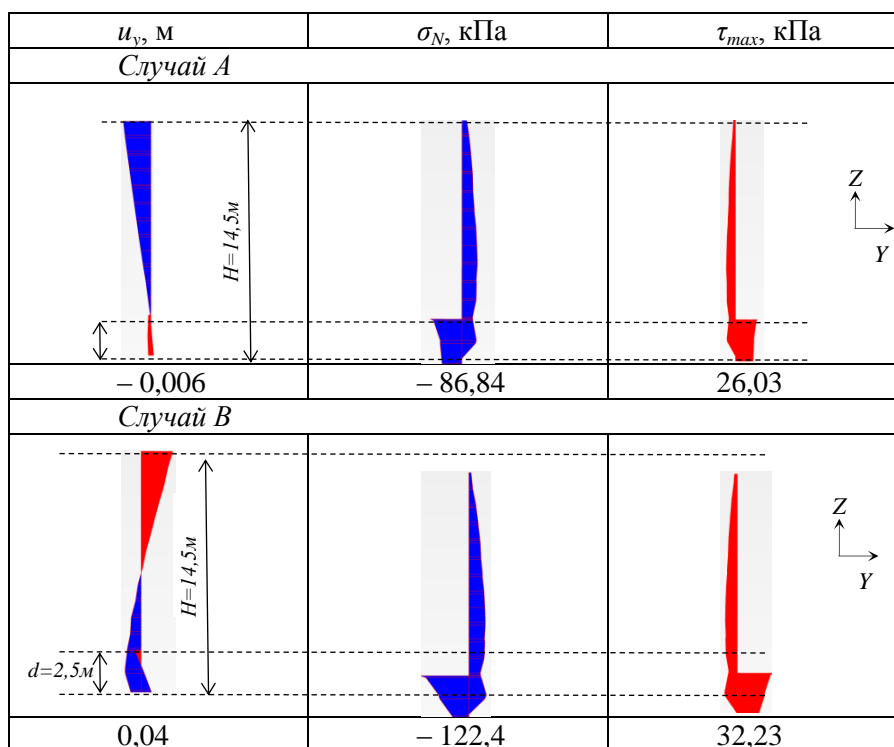


Рис. 7. Сравнимые параметры.

Обсуждение результатов расчетов

В результате сравнения двух типов расчетных моделей, отличающихся способом моделирования нагрузки, можно сделать следующие выводы.

1. Анализ перемещений оболочки показывает две различные схемы формирования предельного состояния для двух рассматриваемых случаев: в случае моделирования засыпки как распределенной нагрузки (*случай В*) преобладает сдвиг нижней части оболочки в сторону от засыпки и отклонение верхней части сооружения в сторону засыпки ввиду деформации задней. В случае моделирования грунта как упругопластической среды (*случай А*) происходит поворот оболочки в сторону от засыпки. Причина изменения схемы разрушения состоит в чрезмерной идеализации среды засыпки при замене ее распределенной нагрузкой.

2. Анализ картины распределения напряжений в теле оболочки показывает, что при моделировании давления грунта засыпки распределенной нагрузкой (*случай В*) искомые напряжения σ_N и τ_{max} получаются завышенными (расхождение до 30% для нормальных напряжений), что, вероятнее всего, связано с некорректным моделированием работы грунтовой среды (нет описания механизма изменения характеристик среды и условий на контакте сред при малейших деформациях, отсутствует описание взаимодействия грунтовой среды и наружной поверхности оболочки). При этом характер распределения напряжений оказывается схожим для обоих случаев.

Выводы

Моделирование засыпки как упругопластической среды (*случай А*) позволяет построить модель, наиболее достоверно отражающую работу сооружения в реальных условиях, с учетом взаимодействия грунтовой среды и наружной поверхности оболочки, а также влияния условий на контакте сред.

Случай В применим при проведении предварительных инженерных расчетов в условиях недостатка информации (данных инженерно-геологических исследований), необходимой для формирования более полных моделей, таких как модель упругопластической среды.

На основе полученных результатов рекомендуется использование расчетной модели, соответствующей случаю *A*, с целью более корректного описания работы грунтовой среды и условий взаимодействия грунта на границе с моделируемым сооружением. В то же время использование предлагаемой последовательности моделирования предъявляет более высокие требования к инженерно-геологическим изысканиям, которые должны содержать более полный набор расчетных параметров, используемых при математическом моделировании сооружений, основной составляющей которых является грунт.

Дальнейшие исследования в рассматриваемой области должны быть направлены на совершенствование расчетных моделей за счет более полного учета параметров сооружения и его основания. Предполагается использование модели упрочняющегося грунта (*HS model*), моделирование циклической нагрузки на сооружение от действия льда, учет наиболее полного комплекса нагрузок в различных сочетаниях, а также возможность учета влияния неравномерной сжимаемости глубоко залегающих слоев грунта на общую устойчивость сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бринкгрив Р.В. Руководство к программному комплексу PLAXIS 3D Foundation. Университет технологии & компания Plaxis. Нидерланды, 2013. 200 с.
2. Влияние ледовой нагрузки на шельфовые оболочечные сооружения, устанавливаемые на сжимаемом основании / Н.Я. Цимбельман, Т.И. Чернова, Ш. Гиз, К. Атанасиу // Труды конференции ISOPE. Сан-Франциско, 2017. С. 593–601.
3. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. М.: Высшая школа, 1985. 352 с.
4. Параметры поверхностного трения для математической модели тонких оболочек с наполнителем / А.Т. Беккер, Н.Я. Цимбельман, Т.И. Чернова, В.Д. Брусс, О. Бильгин // Труды конференции ISOPE. 2015. С. 1188–1196.
5. РТМ 31.3013-77. Руководство по расчету морских гидротехнических сооружений из оболочек большого диаметра. М.: ЦРИА «Морфлот», 1978. 84 с.
6. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. 4-е изд. М.: Наука, 1990. 270 с.
7. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов): актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82* (взамен СНиП II-57-75, СН 288-64). М.: Минрегион России, 2012. 111 с.
8. Устойчивость гравитационных сооружений из тонких оболочек с наполнителем на действие горизонтальных нагрузок / Н.Я. Цимбельман, А.И. Мамонтов, Т.И. Чернова, О. Бильгин // Материалы 15-й латиноамериканской конференции по механике грунтов и геотехнике. Буэнос Айрес, Аргентина, 2015. С. 1081–1088.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

DOI.org/10.5281/zenodo.1119161

Tsimbelman N., Chernova T., Mosina P.

NIKITA TSIMBELMAN, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head,
e-mail: tsimbelman.nya@dvfu.ru

TATIANA CHERNOVA, Research Assistant, e-mail: chernova.ti@dvfu.ru

POLINA MOSINA, Student, e-mail: mosina_pv@students.dvfu.ru

Offshore & Structural Engineering Department, School of Engineering

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

The comparison of simulation methods for backfill soil pressure on filled shell structures

Abstract: The article presents a comparative analysis of two computational methods modelling soil backing of large diameter shells with infill that are installed on the compressible base. The structure under consideration is a thin metal or reinforced concrete shell (usually cylindrical one) filled with soil of coarse fraction. Thin shells with infill are widely used in hydraulic, industrial, civil, and transport engineering. They are also used in various climatic conditions when constructing quays, piers, jetties, breakwaters, retaining walls, bridge foundations, and other facilities. At present, the possibility of their use in the reconstruction and development of structures of the Arctic ports is being considered. Of the two simulation methods of backfill soil as a part of numerical modelling of thin shell with infill, the principal one is that of modelling backfill soil as elasto-plastic medium. The Mohr-Coulomb model was chosen as the analytical one to describe the processes ongoing in the depth of soil. The simplified method of constructing assumes the simulation of backfill soil as a distributed load over the shell surface, whose value is determined by normative documents. The comparison of the calculation results has made it possible to estimate potential errors when using simplified methods of modelling loads.

Key words: shell with infill, numerical simulation, modeling methods, surface load.

REFERENCES

1. Brinkgreve R.V. Tutorial Manual PLAXIS 3D Foundation. Delft University of Technology & Plaxis bv. Netherland, 2013. 200 p.
2. Effect of Ice Load on Offshore Cellular Structures with Infill on Compressible Soil. N.Ya. Tsimbelman, T.I. Chernova, S. Giese, C. Athanasiu. Proceedings of the Twenty-seventh International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2017), San Francisco, USA, 2017, p. 593–601.
3. Ivanov P.L. Grounds and foundations of hydraulic structures. M., Higher Shool, 1985. 352 p.
4. Interface Friction Parameters for the Mathematical Modeling of Shell Structures with Infill. A.T. Bekker, N.Ya. Tsimbelman, T.I. Chernova, V.D. Bruss, O. Bilgin. Proceedings of the Twenty-fifth International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE-2015), Kona, Big Island, Hawaii, USA, 2015., p. 1188–1196.
5. RTM 31.3013-77. Guidance on the calculation of marine hydraulic structures of large diameter. M., Morflot, 1978, 84 p.
6. Sokolovsky V.V. Static of the granular medium. M., Nauka, 1990, 270 p.
7. SP 38.13330.2012. Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and ships) (updated version of SNiP 2.06.04-82 *). M., Ministry of Regional Development of Russia, 2012, 111 p.
8. Stability of Thin Shell with Infill Gravity Structures against Lateral Loads. N.Ya. Tsimbelman, A.I. Mamonov, T.I. Chernova, O. Bilgin. Proceedings of the 15th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Buenos Aires, Argentina, 2015, p. 1081–1088.