

# ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ABAQUS К РАСЧЕТУ ЛИНЕЙНЫХ СООРУЖЕНИЙ В РАЙОНАХ С СУРОВЫМИ КЛИМАТИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

ВЛАСОВ А.Н.<sup>1,2</sup>, д. т. н., ВОЛКОВ-БОГОРОДСКИЙ Д.Б.<sup>1</sup>, к. ф.-м. н., МНУШКИН М.Г.<sup>2</sup>, к., т. н.

<sup>1</sup>Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Институт геоэкологии РАН, Москва, Россия

Настоящая работа посвящена описанию использования программного комплекса [Abaqus](#) при разработке модели взаимодействия объектов трубопровода с окружающей средой при сложных геологических условиях с целью моделирования и прогноза экзогенных геологических процессов, корректной оценки их воздействий на объекты трубопровода, апробации расчетных методик. Возможность достаточно эффективного моделирования задач геомеханики с учётом их особенностей рассматривалась ранее [1].

Для трубопровода рассматривались условия его прокладки на территориях с суровым резкоконтинентальным климатом, через районы с многолетнемёрзлыми грунтами и сопутствующими криогенными и экзогенными процессами и проявлениями, в том числе через участки с распространением просадочных грунтов, многолетнемёрзлых грунтов, с опасностью развития карста и/или термокарста.

Неблагоприятное влияние природных условий усиливается в связи с техногенным вмешательством в естественное состояние территории: уничтожением древесной и другой растительности, изменением баланса грунтовых масс при планировочных работах, изменением условий для поверхностного и подземного стока вод, растеплением основания при прокачке энергоносителя и пр. Эти особенности не имеют адекватного отражения в существующих нормативных документах. Они дают только самые общие и неполные рекомендации по их учёту. Корректное математическое описание физических процессов в сложных структурно-неоднородных средах представляет собой отдельную задачу [2, 3].

Недостаточный учёт указанных особенностей неоднократно приводил как к относительно мелким повреждениям (оголение трубопровода, сдирание изоляции), так и крупным аварийным ситуациям, требовавшим для ликвидации последствий больших материальных затрат.

Работающий трубопровод является источником температурного воздействия на среду, при котором могут снизиться механические параметры не только мёрзлых грунтов, но и некоторых талых глинистых, в частности, вследствие изменения их влажности.

Напряжения в стенке трубы являются одним из основных факторов, определяющих прочность и безопасность трубопровода. На участке заглубленного трубопровода имеют место следующие нагрузки и воздействия, определяющие напряжения в стенке трубы:

- собственный вес трубопровода (трубы, изоляции, футеровки, продукта);
- внутреннее давление в трубе;
- упругий изгиб (искривление трубопровода) в вертикальном и горизонтальном направлениях;
- давление грунта;
- действие воды;
- нагрузки от пригрузов и анкеров;
- действие закрепляющих элементов в горизонтальном и вертикальном направлениях;
- температурное воздействие.

Напряжения и деформации, вызываемые некоторыми из перечисленных нагрузок и воздействий (собственный вес, внутреннее давление и т.п.) возможно вычислить заранее с достаточной для практики точностью. Напряжения и деформации от воздействия других факторов (действие грунтовых опор, анкеров, закрепляющих элементов) возможно определить только в процессе решения задачи определения напряжённо-деформированного состояния (НДС) локального участка трубопровода. Их влияние учитывается в соответствующих начальных и граничных условиях. Действие третьих факторов (температурные воздействие, связанные с промерзанием/оттаиванием в мёрзлых грунтах, курумы, карстовые явления, оползни и пр.) может учитываться только приближенно.

Исходя из вышесказанного, в работе рассматривались следующие задачи: оценка просадок грунта; моделирование карста, термокарста; моделирование взаимного влияния объектов инфраструктуры трубопровода; оценка устойчивости склонов.

## 1. Определение просадок грунта при оттаивании сильнольдистых мёрзлых пород

Стабилизированные осадки слоя оттаивающего грунта ( $h$ ) при давлении  $p$  (в случае одномерной задачи) определяются следующим образом [4]:

$$s_{\text{осм}} = \bar{A}h + s_{\text{пл}}, \quad s_{\text{пл}} = \bar{a}p,$$

$\bar{A}$  – коэффициент оттаивания;  $\bar{a}$  – коэффициент относительного уплотнения мёрзлого грунта при оттаивании,  $h$  – ширина слоя оттаивающего грунта,  $p$  – давление в слое оттаивающего грунта.

В реальных расчётах величина  $h$  бралась из температурного численного прогноза, а второе слагаемое формулы – из решения геомеханической задачи в полной конечно-элементной постановке с учётом нелинейной модели грунта [5] и всех элементов воздействия на трубопровод. Задача решалась в условиях плоской деформации (рис. 1, 2). Следует обратить внимание на образующийся при учёте осадок по этой методике характерный провал (канавку) вблизи объекта трубопровода, обусловленный геометрией протаивающей зоны и представляющий собой потенциально опасную зону для развития неблагоприятных криогенных процессов.

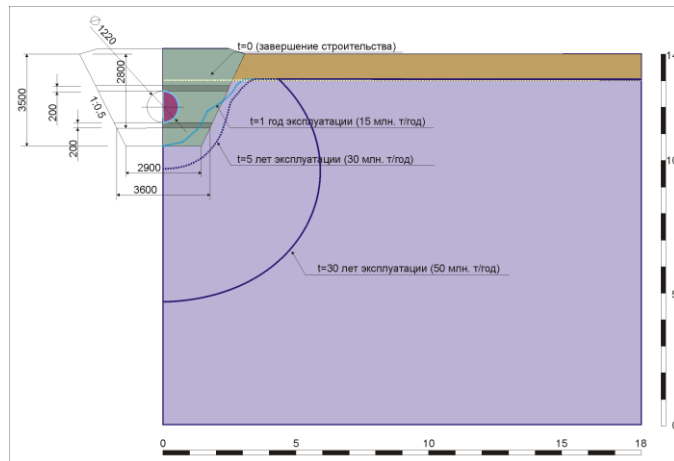


Рис. 1. Схема расчётной области. Основание: суглинок + торф.

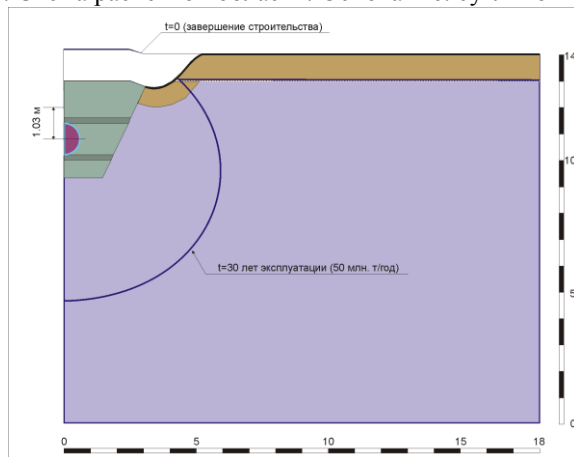


Рис. 2. Результирующая картинка (осадка+просадка).

## 2. Моделирование карста, термокарста

Карст представляет собой совокупность природных геологических и инженерно-геологических процессов, в результате которых в земной коре происходит образование полостей, изменение структуры и состояния горных пород и связанные с ними деформации земной поверхности (провалы, оседания, коррозионные воронки и т.д.), а также создаётся особый режим подземных вод и гидрографической сети.

Термокарстом – процесс вытаивания подземных льдов, сопровождающийся просадками земли, появлением отрицательных форм рельефа и накоплением таберальных (термокарстовых) отложений. В области многолетнемерзлых пород даже небольшие нарушения естественных условий приводят к проявлению термокарста. Воздействие этого процесса на инженерные сооружения часто носит катастрофический характер и требует специальных мероприятий для его предотвращения.

Модели геотехнической системы взаимодействия объектов трубопровода с окружающей средой схематично показаны на рис. 3. Размеры расчётной области: 100×100 м; габариты выемки, имитирующей карст: 16.6×16.6 м.

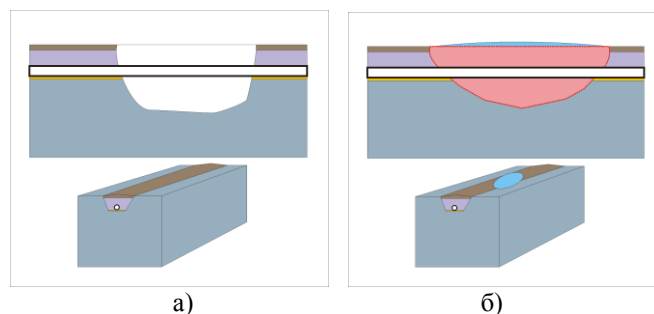


Рис. 3. Условные схемы задач для моделирования:  
а) карстовых явлений; б) локального растепления.

Результаты расчёта трубопровода при карстовых явлениях представлены на рис. 4, 5. Предел прочности трубопровода определялся из условия Мизеса:  $T = \sigma_s / \sqrt{3}$ , где  $T = \sqrt{I_2 D_\sigma}$  – интенсивность касательных напряжений,  $\sigma_s$  – предел текучести.

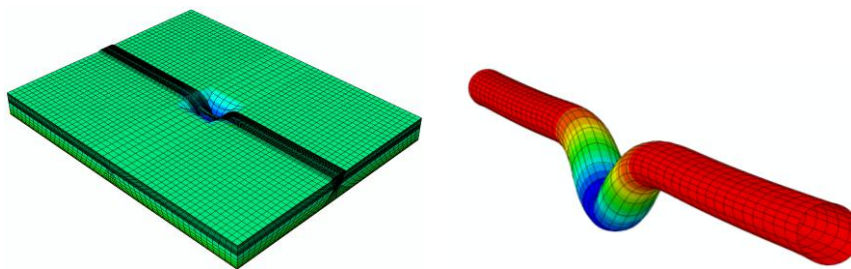


Рис. 4. Деформированная конечно-элементная сетка: вся расчётная область; трубопровод (прогиб  $V_{\max}=1.68$  см).

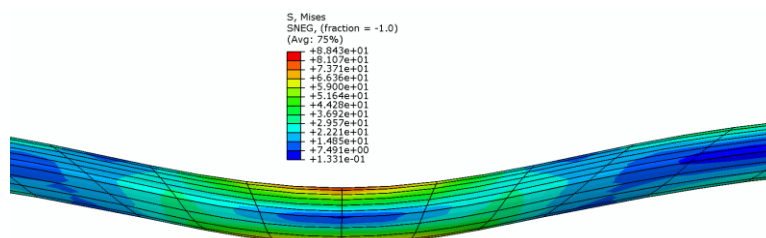


Рис. 5. Поле интенсивности касательных напряжений  $T$ , [МПа] в трубопроводе ( $T^{\max} = 88.43$  [МПа]).

Результаты расчёта трубопровода при локальном растеплении ММП представлены на рис. 6, 7.

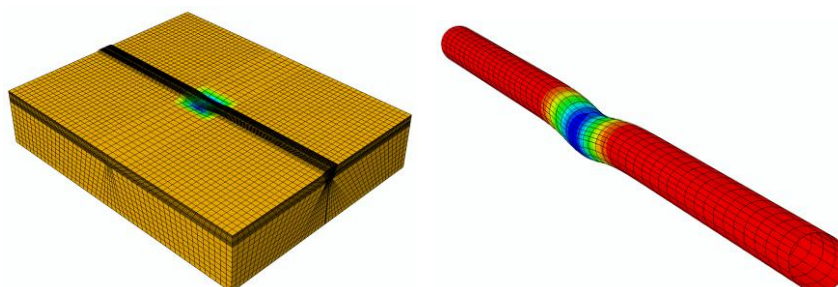


Рис. 6. Деформированная конечно-элементная сетка: вся расчётная область; трубопровод (прогиб  $V_{\max}=0.26$  см).

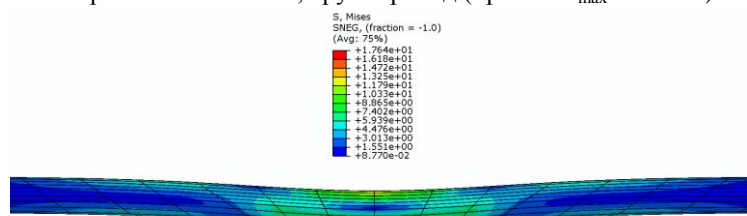


Рис. 7. Поле интенсивности касательных напряжений  $T$ , [МПа] в трубопроводе ( $T^{\max} = 17.64$ , [МПа]).

### 3. Моделирование взаимного влияния объектов инфраструктуры трубопровода

Основной целью расчёта объектов инфраструктуры трубопровода (рис. 8) являлась оценка изменения напряжённо-деформированного состояния вмещающего грунтового массива при локальном изменении его температурного режима. В процессе длительной эксплуатации объекта происходит постепенное растепление мёрзлой зоны грунта и соответствующее изменение (ослабление) его физико-механических свойств, что приводит к дополнительным осадкам объектов инфраструктуры.

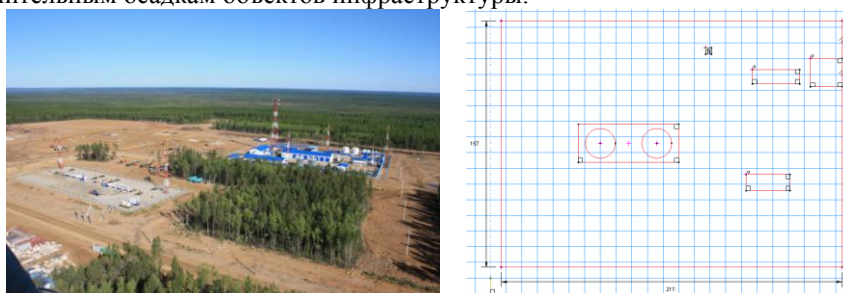


Рис. 8. Общий вид объектов инфраструктуры и расчётная схема.

Результаты расчётов объектов инфраструктуры представлены на рис. 9.

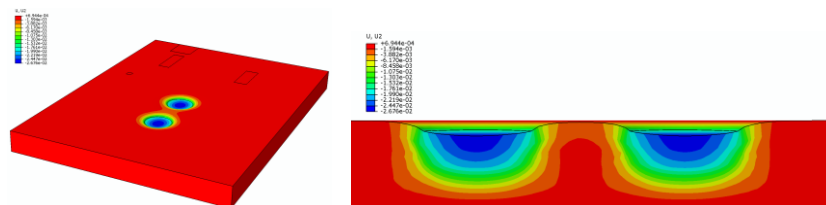


Рис. 9. Осадки [м] на период эксплуатации (резервуары заполнены, частичное растепление основания).

#### 4. Оценка устойчивости склонов

Моделирование устойчивости склонов (рис. 10) проводилось с использованием внешнего приложения – разрабатываемой авторами программы UWay, что было связано с необходимостью провести анализ с учётом всех инженерных методик оценки устойчивости склонов. Анализируемая область включала в себя однородный массив грунтов основания. В мёрзлом состоянии склон высотой 100 м устойчив (естественное состояние до прокладки трубопровода). Варьируемый параметр – угол откоса склона ( $\alpha=10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$ ). Общие размеры расчётной области  $850 \times 225$  м.

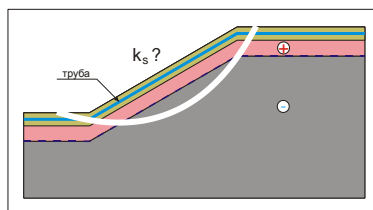


Рис. 10. Условная схема задачи.

В ходе эксплуатации трубопровода грунты вокруг него переходят из мёрзлого состояния в талое. При этом их механические характеристики существенно понижаются. В этом случае необходимо провести серию расчётов по определению глубины оттаивания склона, при которой он может потерять устойчивость.

Сама труба и вмещающая траншея в расчётах не учитывались («в запас»), в силу их малости по сравнению с объёмом склона. Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Коэффициенты запаса устойчивости склонов Таблица 1

Угол	Метод	Коэффициент запаса
$\alpha=10^\circ$	К.Терцаги	1.674
$\alpha=15^\circ$	К.Терцаги	1.123
	Н.Н.Маслова-Берера	1.036
	Р.Р.Чугаева	1.192
	Г.Крея-В.А.Флорина	1.168
	Г.М.Шахунянца	1.078
$\alpha=20^\circ$	К.Терцаги	0.846
$\alpha=25^\circ$	К.Терцаги	0.671

#### 5. Заключение

В результате выполненных исследований разработан методический аппарат для оценки воздействий экзогенных геологических процессов на объекты трубопровода. Разработана система математических моделей и средств их численной реализации для расчёта и прогнозирования НДС грунтов, вмещающих основные типы объектов трубопровода. При моделировании НДС грунтового массива переменный температурный режим в основании используется как внешний параметр, определяемый из решения температурной задачи. Разработаны упрощенные схемы основных геомеханических задач, моделирующих потерю устойчивости склонов, просадки при оттаивании льдонасыщенных грунтов, термокарст. Проведены предварительные расчеты для этих схем, подтверждающие работоспособность и эффективность разработанных алгоритмов и имеющегося программного обеспечения (Abaqus, UWay).

#### Л и т е р а т у р а

1. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Мнушкин М.Г., Тропкин С.Н. Некоторые особенности геотехнического моделирования с помощью SIMULIA ABAQUS. // Труды международной научно-практической конференции “Инженерные системы - 2010”, Москва, 6-9 апреля 2010. М.: Изд-во РУДН, 2010. С. 78-88.
2. Власов А.Н. Саваторова В.Л., Талонов А.В. Описание физических процессов в структурно неоднородных средах. М.: Изд-во РУДН, 2009. 258 с.
3. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. М.: Наука, 1984. 352 с.
4. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Гостройиздат, 1963. 636с.
5. Друккер Д., Прагер В. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование//Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир, 1975. С.166-177.