



INTERNATIONAL  
ASSOCIATION OF  
FOUNDATION  
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ



**CityExpo**

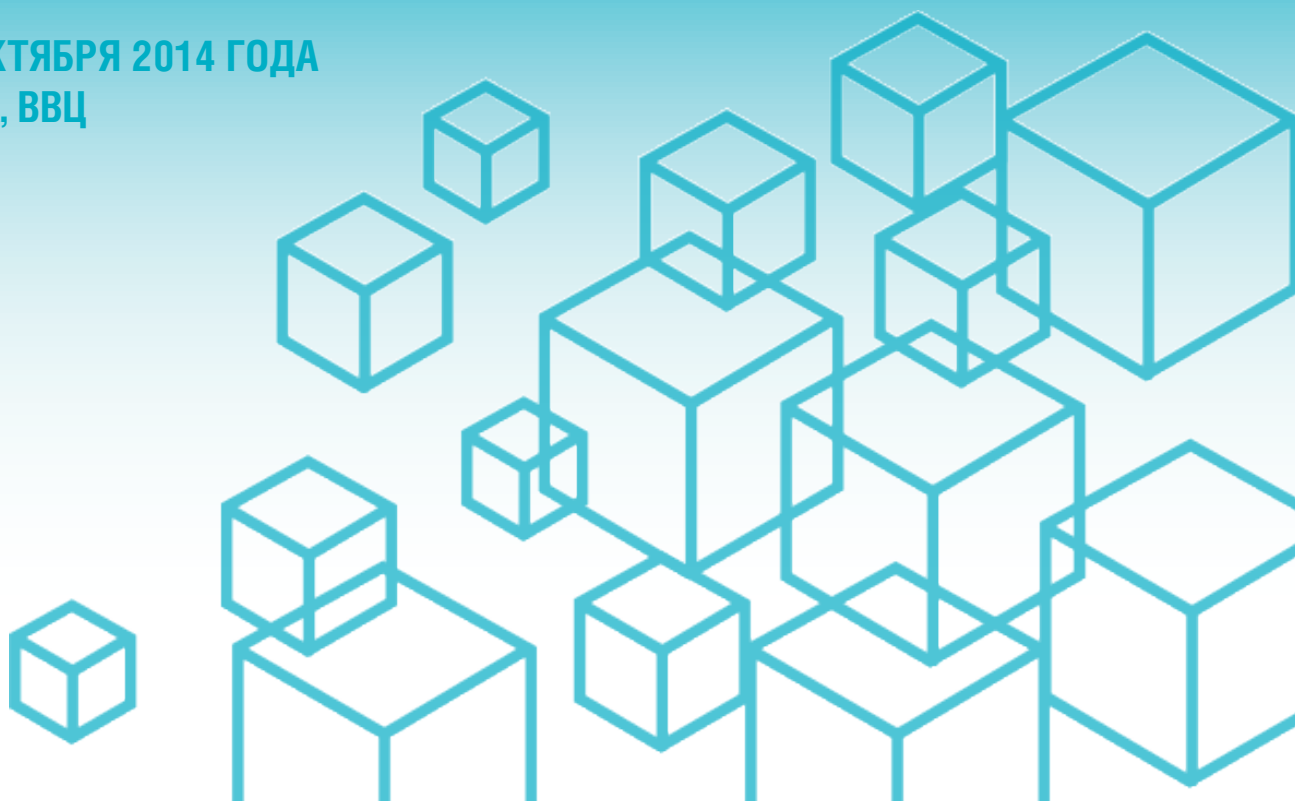
INTERNATIONAL ASSOCIATION OF FOUNDATION CONTRACTORS (IAFC)  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

127566, Москва, Северный бульвар, 7  
тел./факс: +7 (495) 66-55-014  
e-mail: [info@fc-union.com](mailto:info@fc-union.com), [www.fc-union.com](http://www.fc-union.com)

**СБОРНИК ДОКЛАДОВ**  
международной научно-технической конференции

**«ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА  
ФУНДАМЕНТОВ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ»**

16-17 ОКТЯБРЯ 2014 ГОДА  
МОСКВА, ВВЦ



## СОДЕРЖАНИЕ

- **Комплексные исследования свойств мерзлых грунтов при изысканиях крупных инфраструктурных проектов**  
(ОАО «Фундаментпроект», Москва) **стр. 4**
- **Опыт работы Управления государственного строительного и жилищного надзора Республики Саха (Якутия) по проведению мониторинга температур вечномерзлых грунтов.**  
(Управление государственного строительного и жилищного надзора Республики Саха (Якутия)) **стр. 9**
- **Инженерная защита площадок обустройства от опасных мерзлотных процессов на вечномерзлых грунтах**  
(ОАО «Фундаментпроект», Москва) **стр. 13**
- **Анализ тенденции в развитии инновационных технологий, конструкций и материалов используемых при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов в криолитозоне**  
(ООО Научно-производственная фирма «Дорцентр», Тюмень) **стр. 20**
- **Особенности проектирования и строительства оснований и фундаментов на намывных грунтах в пределах криолитозоны (на примере строительства промышленно-гражданских сооружений г. Якутска)**  
(ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения РАН, Якутск) **стр. 28**
- **Самоохлаждающие опорные системы на вечной мерзлоте**  
(ОАО Научно-исследовательский институт транспортного строительства (ЦНИИС), Москва) **стр. 33**
- **Замораживание грунтов оснований зданий и сооружений системами круглогодичного действия**  
(ОАО «Фундаментпроект», Москва) **стр. 37**

- **Иновационные методы борьбы с морозным пучением**  
(ЗАО «ОЗСК», Озерск) **стр. 45**
- **Заполярная линия электропередачи ВЛ 220 кВ: состояние, аварии, ремонты и реконструкция**  
(Филиал ОАО «ЦИУС ЕЭС»-ЦИУС Северо-Запада, Санкт-Петербург) **стр. 49**
- **Особенности применения свай ТИТАН в вечномерзлых грунтах**  
(Ischebeck GmbH, Германия) **стр. 54**
- **Инженерно-геокриологический мониторинг применения термостабилизационных мероприятий (на примере участка «ледовый комплекс» ж/д АЯМ**  
ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения РАН, Якутск **стр. 58**
- **Погружение труб большого диаметра в вечномерзлых грунтах в порту Саббета**  
(ГК «ВиброТехСтрой», Санкт-Петербург) **стр. 64**
- **Система температурного мониторинга вечномерзлых грунтов с передачей данных по радиоканалу**  
(ОАО НПП «Эталон», Омск) **стр. 67**
- **Иновации в математическом моделировании тепловых режимов вечномерзлых грунтов.**  
(ООО «Симмэйкерс», Москва) **стр. 75**
- **Прогнозирование растепления вечномерзлых грунтов в программе Frost 3D Universal**  
(ООО «Симмэйкерс», Москва) **стр. 80**
- **Проектирование опор трубопроводов обвязок добывающих скважин**  
(ОАО «Фундаментпроект», Москва) **стр. 85**
- **Применение ячеистого бетона при строительстве фундаментов мелкого заложения на вечной мерзлоте**  
(ОАО «УСК МОСТ», Москва) **стр. 89**

**АВТОРСКИЕ ПРАВА НА ИНФОРМАЦИЮ И МАТЕРИАЛЫ:**

Все материалы в данном Сборнике докладов предназначены для участников международной научно-технической конференции «Российские и зарубежные технологии проектирования и строительства фундаментов опор мостовых сооружений», проводимой 16-17 октября 2014г. International Association of Foundation Contractors (Международной Ассоциацией Фундаментостроителей) и не могут воспроизводиться в какой-либо форме и какими-либо средствами без письменного разрешения соответствующего обладателя авторских прав за исключением случаев, когда такое воспроизведение разрешено законом для личного использования.

Воспроизведение и распространение сборника докладов без согласия Международной Ассоциации Фундаментостроителей преследуется в соответствии с Федеральным законодательством РФ. При цитировании, перепечатке и копировании материалов Сборника докладов обязательно указывать сайт и название компании организатора конференции – Международная Ассоциация Фундаментостроителей (ООО «МАФ»), [www.fc-union.com](http://www.fc-union.com).

Авторы опубликованной рекламы, статей и докладов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и отсутствие данных, не подлежащих открытой публикации.

© ООО «МАФ» 2014. Все права защищены.

ООО «Симмэйкерс», Москва

## ИННОВАЦИИ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

Автор:

Гишкелюк И. А., директор по науке, кандидат технических наук

Проектирование фундаментов, трубопроводов, скважин и других сооружений на вечномёрзлых грунтах включает расчет теплового режима грунтов и обоснование мероприятий, обеспечивающих соблюдение теплового режима в процессе строительства и эксплуатации. Для решения этой задачи необходимо использовать программное обеспечение для математического моделирования тепловых процессов в грунтах с учетом фазовых превращений «лед-вода». Для математического описания теплового режима грунтов предложено используется **нелинейное уравнение теплопроводности вида:**

$$\left( C(T) + \rho_b L \frac{\partial w_w(T)}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\lambda(T) \nabla T) + C_w \mathbf{u} \nabla T = 0, (1)$$

где  $T$  – температура;  $C(T)$  – зависимость объемной теплоемкости грунта от температуры;  $w_w(T)$  – зависимость количества незамерзшей влаги в грунте от температуры;  $\rho_b$  – плотность грунта;  $L$  – удельная теплота фазового перехода;  $t$  – время;  $\lambda(T)$  – зависимость теплопроводности грунта от температуры;  $C_w$  – объемная теплоемкость воды;  $\mathbf{u}$  – вектор скорости фильтрации грунтовых вод.

В данном уравнении учтен конвективный перенос тепла в грунте, поскольку при значительных скоростях фильтрации влаги в грунте тепловой поток за счет конвекции соизмерим с тепловым потоком за счет кондукции. В качестве зависимости теплоемкости  $C(T)$ , теплопроводности  $\lambda(T)$  и количества незамерзшей воды  $w_w(T)$  в уравнении (1) можно использовать любую таблично заданную функцию. С другой стороны в предложенную модель заложена возможность вычисления зависимости теплоемкости, теплопроводности и количества незамерзшей воды от температуры в соответствии с выражениями из СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах».

Для учета теплового взаимодействия грунта с инженерным сооружением и атмосферой к уравнению теплопроводности (1) **формулируется граничное условие вида:**

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda \nabla T) + \alpha_b (T_b - T) + \alpha_c (T_c - T) + q = 0$$

где  $\alpha_b$  – коэффициент теплообмена между грунтом и атмосферой;  $T_b$  – температура воздуха;  $\alpha_c$  – коэффициент теплообмена между грунтом и инженерным сооружением;  $T_c$  – температура инженерного сооружения;  $q$  – тепловой поток на границе области моделирования.

Здесь следует отметить, что значение коэффициентов теплообмена пользователям программного обеспечения для теплотехнических расчетов часто не известно. В связи с этим

в предлагаемой математической модели имеется возможность вычисления коэффициентов теплообмена между инженерным сооружением и грунтом с использованием следующих уравнений:

- для сооружений с плоской конструкцией теплоизоляции между грунтом и сооружением (фундаменты, основания резервуаров и др.):

$$\alpha_c = \frac{1}{\left( \frac{1}{\alpha_{liq}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right)}$$

, где  $\alpha_{liq}$  – коэффициент теплопередачи от газа или жидкости, при наличии (например, нефти в резервуаре), к слою теплоизоляции;  $\delta_i$  – толщина  $i$ -го слоя изоляции;  $\lambda_i$  – теплопроводность  $i$ -го слоя изоляции.

- для сооружений с трубчатой конструкцией теплоизоляции между грунтом и сооружением (трубопроводы, скважины и др.):

$$\alpha_c = \frac{1}{d_{n+1} \left( \frac{1}{\alpha_{liq} d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} \right)}$$

, где  $\alpha_{liq}$  – коэффициент теплопередачи от газа или жидкости (например, нефти в трубопроводе или скважине) к стенке трубы;  $\lambda_i$  – теплопроводность материала  $i$ -ой стенки;  $d_{i+1}$  и  $d_{n+1}$  – наружный диаметр трубы;  $d_i$  и  $d_1$  – внутренний диаметр трубы, равный  $d_i = d_{i+1} - \delta_i$ ;  $\delta_i$  – толщина  $i$ -й стенки.

Для вычисления коэффициента теплообмена между грунтом и атмосферой в зависимости от скорости ветра возможно использовать уравнение:

$$\alpha_v = \begin{cases} 6.16 + 4.19 v & 0 < v < 5 \\ 7.56 v^{0.78} & 5 < v < 30 \end{cases}$$

, где  $v$  – скорость ветра.

Нелинейное уравнение теплопроводности (1) допускает аналитическое решение только в частном одномерном случае. Рассмотрение же трехмерного случая требует использования численных методов. В настоящее время для численного решения нелинейного уравнения теплопроводности (1) известно много методов. Основным требованием, предъявляемым к численным методам, является осуществление решения уравнения теплопроводности с требуемой точностью за приемлемое время. При этом задача усложняется тем что, при модели-



ровании теплового взаимодействия сооружения с вечномёрзлым грунтом с требуемой точностью часто требуется дискретизация рассматриваемой области в несколько миллионов ячеек расчетной сетки. Такое количество ячеек в расчетной сетке объясняется следующим:

- большой размер расчетной области требует большого количества ячеек для её дискретизации;
- увеличение размера ячейки также ограничено, так как ее максимальный размер зависит от геометрических размеров элементов, находящихся в расчетной области, – толщины теплоизоляционных материалов, геометрических размеров элементов сооружений (диаметр трубопроводов, скважин и др.), границы различных грунтов и др.;
- необходимо выполнять учащенную дискретизацию области, где грунт переходит из талого состояния в мерзлое, т.к. увеличение размера ячеек расчетной сетки на границе фазового перехода приводит к резкому увеличению погрешности численного решения.

В свою очередь решение нелинейного уравнения теплопроводности на расчетных сетках, состоящих из нескольких миллионов узлов, требует очень больших вычислительных ресурсов, в том числе большое количество процессорного времени и большой объем оперативной памяти. Именно по этой причине такие широко известные программные комплексы, такие как ANSYS, ABAQUS и COMSOL, не в состоянии решать подобные задачи. В этих программах для численного решения нелинейного уравнения теплопроводности используется неявная формулировка метода конечных элементов. Преимущество неявной численной схемы заключается в возможности использования значительно большего шага по времени из-за безусловной устойчивости схемы, что позволяет сократить время расчета. Однако при решении задач промерзания и растепления грунта имеет место резкое изменение свойств материалов в результате фазовых превращений. В связи с этим для неявной схемы нельзя применять большие шаги по времени из-за проблемы сходимости. При этом данная численная схема требует решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) на каждом временном шаге и на каждой итерации по нелинейности. Решение СЛАУ – это наиболее сложная вычислительная задача во всем процессе расчета, которая обладает слабой степенью параллелизации и требует больших вычислительных ресурсов. Использование чисто явной схемы (как, например, это сделано в программе «TermoStab 67-87») связано с проблемой устойчивости этой численной схемы. Для устойчивости явной схемы необходимо использовать небольшой шаг по времени, что не позволяет за приемлемое время осуществить прогноз температурного режима грунтов на несколько лет. Таким образом, получается, что использование существующих методов моделирования тепловых процессов либо вообще не позволяет найти решение нелинейного уравнения теплопроводности на расчетных сетках, состоящих из нескольких миллионов узлов, либо требует для нахождения решения осуществления вычислений в течение нескольких дней.

В связи с этим математическое моделирование тепловых режимов вечномёрзлых грунтов потребовало разработки инновационных методов решения нелинейного уравнения теплопроводности. Разработанный численный метод базируется на совместном использовании неявной и явной аппроксимации производной по времени в уравнении теплопроводности. Суть метода заключается в следующем. Моделируемая область разбивается на несколько подобластей. Для каждой подобласти вычисляется шаг по времени, обеспечивающий устойчивость явной схемы и оценивается ее вычислительная сложность. Также оценивается сходимость

и вычислительная сложность неявной схемы. В результате для численного решения нелинейного уравнения теплопроводности в данной подобласти используется схема (явная или неявная), обладающая меньшей вычислительной сложностью. Выбор между двумя схемами для каждой из подобластей позволяет использовать вычислительные преимущества обеих схем. В одних подобластях, в которых отсутствуют фазовые превращения, предпочтительней использование неявной схемы, а в других (в которых имеют место фазовые превращения) – явной схемы.

Еще больше сократить время расчета при сохранении точности численного решения нелинейного уравнения теплопроводности позволило распараллеливание разработанной численной схемы, обладающей большой степенью параллелизации, под графические процессоры. При распараллеливании разработанного нами численного метода под графические процессоры происходит существенное сокращение времени решения тепловой задачи – более чем в 10 раз (рисунок 1). Для сравнения – в современных программах для моделирования ABAQUS и ANSYS перенос вычислений с 8-ми ядерного центрального процессора (CPU) на 442 ядра графического процессора (GPU) показывает небольшое сокращение времени расчета – максимум в 2.4 раза (рисунок 1). Это обусловлено меньшей степенью параллелизации используемых в этих программах численных методов, в сравнении с предлагаемым нами инновационным методом.

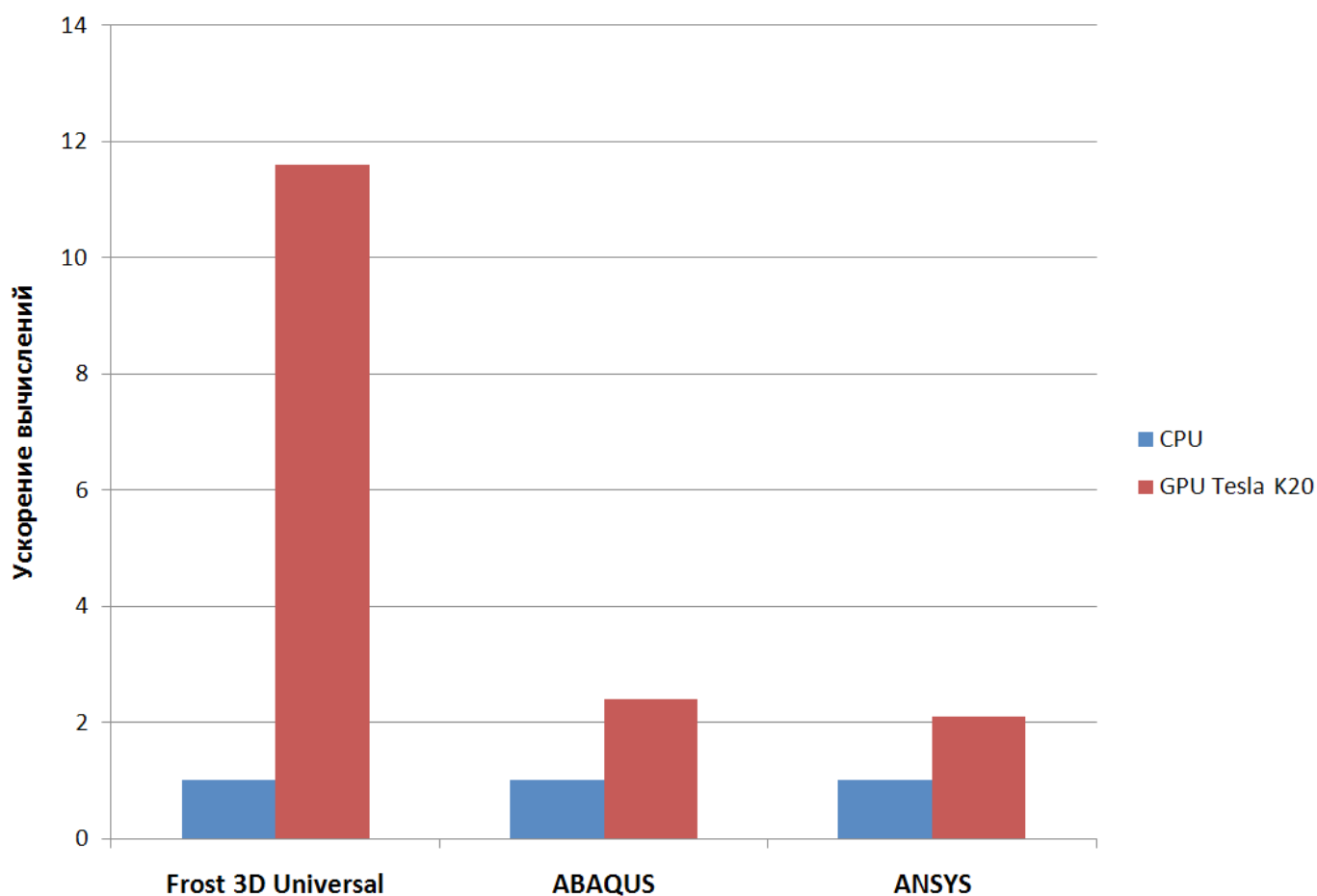


Рисунок 1. Ускорение расчета при моделировании тепловых процессов за счет параллелизации вычислений под графические ускорители

На практике разработанный инновационный метод математического моделирования тепловых режимов вечномёрзлых грунтов позволяет осуществлять многолетний прогноз теплового режима грунтов в процессе строительства и эксплуатации сооружений для участков, имеющих большие пространственные масштабы. Такие задачи возможно решать в программном комплексе «Frost 3D Universal», в котором внедрен предлагаемый инновационный метод.

На рисунке 3 представлены результаты моделирования теплового режима грунтов под сооружениями и трубопроводами нефтеперекачивающей станции (рисунк 2). Размер моделируемой области – 500х400 метров, прогноз осуществлялся на 5 лет. Время выполнения данного расчета с использованием разработанного инновационного метода составило менее 3-х часов.

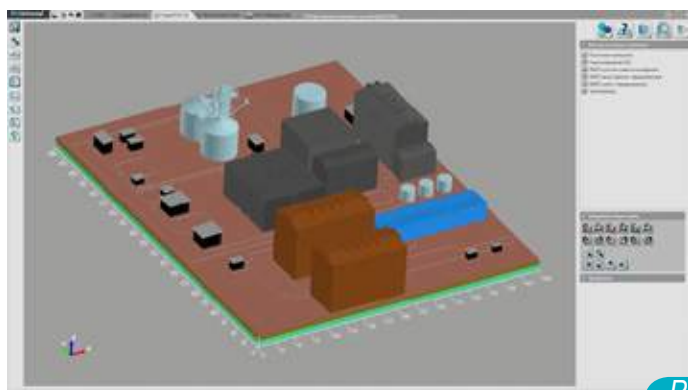


Рисунок 2. Расположение объектов нефтеперекачивающей станции

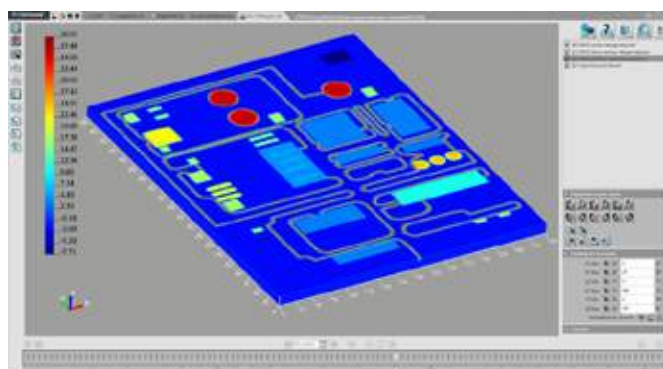
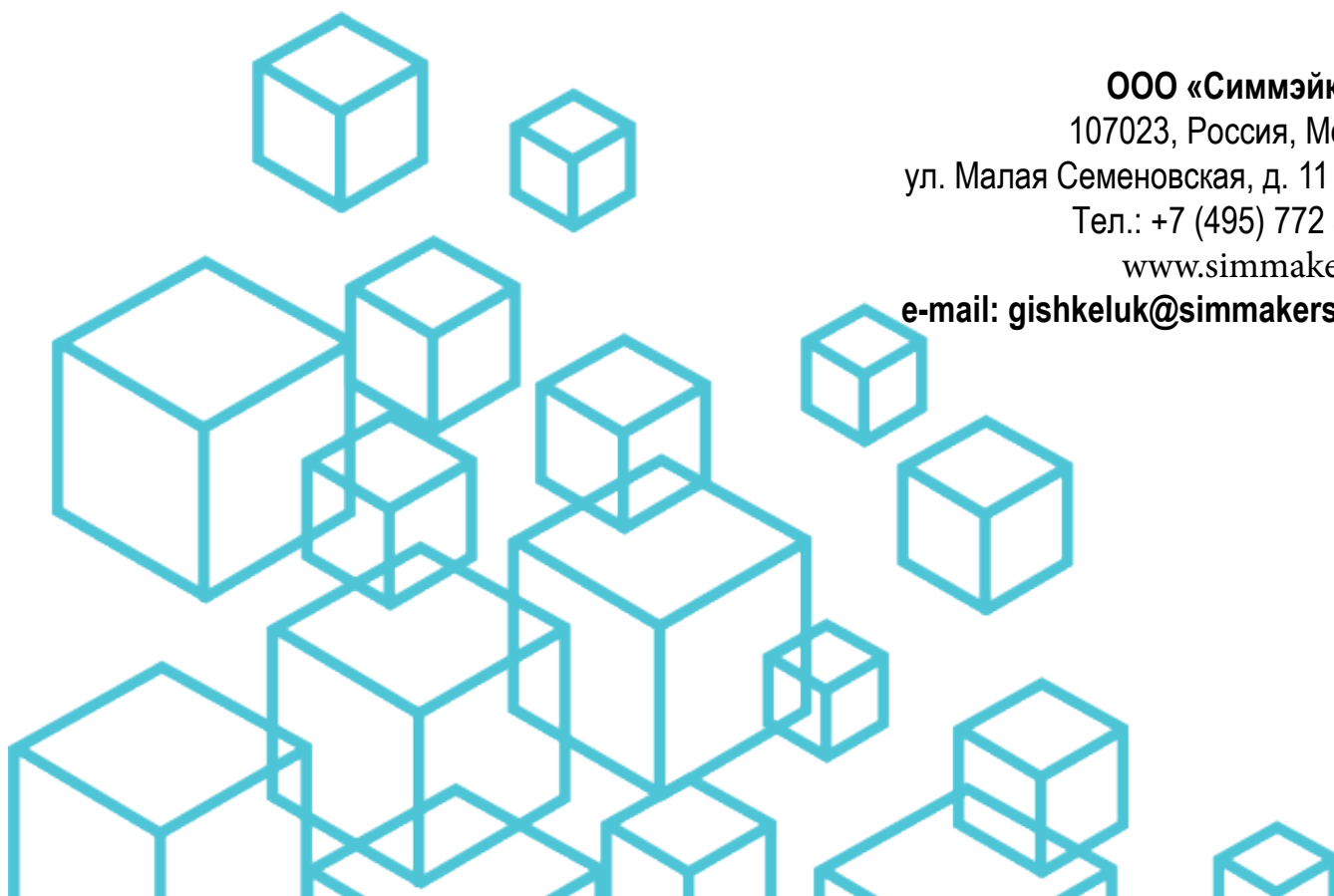


Рисунок 3. Распределение температуры в грунте под инженерными сооружениями нефтеперекачивающей станции (резервуарами, зданиями, трубопроводами и др.)



**ООО «Симмэйкерс»**  
107023, Россия, Москва  
ул. Малая Семеновская, д. 11 стр.5  
Тел.: +7 (495) 772 54 07  
www.simmakers.ru  
e-mail: gishkeluk@simmakers.com