

УДК 624.139.2/3

КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- МАССОПЕРЕНОСА В МНОГОМЕРЗЛОТНЫХ ГРУНТАХ

Предложены технические решения оснований и фундаментов зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах, запроектированных с использованием программного комплекса моделирования процессов тепло-влагопереноса в грунтах методом тепловых и гидравлических сопротивлений.

ДУГИНОВ ЛЕОНИД АЛЕКСАНДРОВИЧ

Главный специалист отдела термостабилизации, инженерной защиты и мониторинга ОАО "Фундаментпроект" (Москва, Россия).
Основные направления научной деятельности - основания и фундаменты на мерзлых грунтах, теплотехнические расчеты.
Автор 12 опубликованных работ, в том числе двух монографий и 39 патентов.

КУТВИЦКАЯ НАТАЛЬЯ БОРИСОВНА

Кандидат технических наук, главный инженер отдела термостабилизации, инженерной защиты и мониторинга ОАО "Фундаментпроект", член академии "Северный форум", почетный строитель РФ (Москва, Россия).
Основные направления научной деятельности - строительство оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах, инженерная защита территорий от развития опасных мерзлотно-геологических процессов, геотехнический мониторинг.
Автор более 100 опубликованных работ и 18 патентов.

МАГОМЕДГАДЖИЕВА МУМИНАТ АБДУЛЛАЕВНА

Кандидат геолого-минералогических наук, главный специалист отдела термостабилизации, инженерной защиты и мониторинга ОАО "Фундаментпроект" (Москва, Россия).
Основные направления научной деятельности - строительство оснований и фундаментов на многолетнемерзлых грунтах, геотехнический мониторинг.
Автор 28 опубликованных работ.

МЕЛЬНИКОВА ЕВГЕНИЯ АНАТОЛЬЕВНА

Руководитель группы отдела термостабилизации, инженерной защиты и мониторинга ОАО "Фундаментпроект" (Москва, Россия).
Основные направления научной деятельности - основания и фундаменты на мерзлых грунтах, теплотехнические расчеты.
Автор четырех опубликованных работ.

РОЗОВСКИЙ МИХАИЛ ХАЙМОВИЧ

Главный специалист отдела термостабилизации, инженерной защиты и мониторинга ОАО "Фундаментпроект" (Москва, Россия).
Основные направления научной деятельности - основания и фундаменты на мерзлых грунтах, теплотехнические расчеты.
Автор 14 опубликованных работ и двух патентов.

Проектирование сложных сооружений, уникальных как по параметрам (значительные размеры в плане, высокие нагрузки, заглубленные, тепловыделяющие), так и условиям эксплуатации (неблагоприятные природно-климатические, инженерно-геокриологические и гидрогеологические условия северных регионов), требуют комплексного подхода. В таких условиях необходимо учитывать не только тепловое взаимодействие сооружения с окружающим мерзлым грунтовым массивом, но и сопутствующие процессы: излучение и движение воздуха в вентилируемых подпольях сооружений; фазовые переходы "лед-вода" и "вода-пар" для факельных установок; фильтрация в талых слоях грунтов в основаниях застраиваемых площадок и сооружений или грунтовых плотинах (дамбах).

В существующих программах математического моделирования прогноза динамики температурного режима грунтов ("Прогноз", "Тепло", "Тундра", "Термостаб", "Фрост" и т.д.) в основном учитывается только тепловая составляющая.

Авторами разработан программный комплекс "ТГ-Норд" [1], позволяющий проводить комплексный расчет, моделировать реальные физические процессы, протекающие в грунтах, в том числе, испарение и фильтрацию, и на любом этапе расчета вводить источники и стоки тепла различной конфигурации и природы. Целесообразность применения комплекса обусловлена его широкими возможностями, в числе которых моделирование процессов тепло- и массопереноса в единой системе. Методика математического моделирования, основанная на моделях тепловых и гидравлических сопротивлений, приведена в работе [2].

Расчетная модель позволяет учитывать наличие в основании сооружений как "активных" конструктивных элементов (трубопроводов,



Рис. 2. Температурное поле грунтов плотины (начало расчета)



Рис. 3. Температурное поле грунтов плотины после 10 лет эксплуатации при расчете без учета фильтрационного потока

ваемом участке (левый борт плотины) до глубины 8 м сложено щебенистым грунтом с суглинистым заполнителем, ниже залегают сланцы от трещиноватых до сильнотрещиноватых. Прогнозные расчеты за период эксплуатации плотины, выполненные с учетом и без учета гидравлической составляющей теплового взаимодействия водохранилища и грунтов тела плотины при среднегодовой температуре воды в водохранилище $+4,0^{\circ}\text{C}$, показали, что развитие фильтрационного потока по сильнотрещиноватым сланцам подошвы плотины способствует повышению температур мерзлых грунтов в ядре и переходу слагающих тело суглинков в текучее состояние. При этом наблюдается выход напорных фильтрационных вод в нижнем бьефе, который, как показала многолетняя эксплуатация, сопровождается вымыванием грунта, слагающего водоупорные слои гребня плотины. Результаты этих расчетов представлены на рис. 2 и 3. Направления фильтрационного потока в нижнем бьефе свидетельствует о наступлении аварийного состояния плотины, при котором возможна полная потеря ее устойчивости. Эксплуатационные качества плотины при этом будут утрачены. Результаты прогнозных расчетов подтвердились – в 2012 г. произошел прорыв на прогнозируемом участке (рис. 4).



Рис. 4. Температурное поле грунтов плотины после 10 лет эксплуатации при расчете с учетом фильтрационного потока

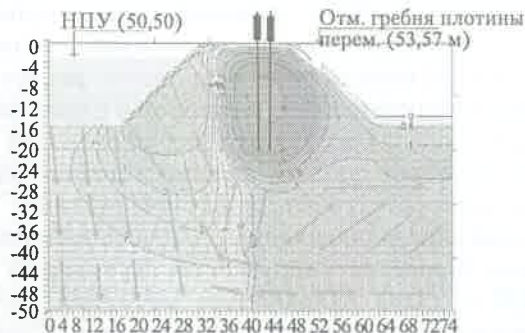


Рис. 5. Температурное поле грунтов плотины после 10 лет эксплуатации с учетом фильтрации при применении льдогрунтовой противофильтрационной завесы

В данном случае оптимальным техническим решением было бы создание льдогрунтовой противофильтрационной завесы с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств, позволяющих исключить фильтрацию из водохранилища не только через тело плотины, но и под ее основанием.

Результат прогнозного теплогидравлического расчета режима эксплуатации плотины с льдогрунтовой противофильтрационной мерзлотной завесой высотой 15 м приведен на рис. 5, из которого следует, что при эксплуатации плотины толщина мерзлого слоя грунта сохраняется со средней эквивалентной температурой не выше $минус 2^{\circ}\text{C}$ и толщиной завесы 6 м.

Взаимодействие зданий и сооружений с мерзлыми грунтами основания, которые необходимо сохранить в мерзлом состоянии на весь период эксплуатации с помощью вентилируемого подполья, определяется температурой и скоростью движения наружного воздуха в подполье в зимний период.

Методика расчета температурного режима вентилируемого подполья, изложенная в [3], не предусматривает учета потерь напора (скорости) и температуры воздуха в пространстве подполья от местных сопротивлений: ростверков; конденсаторов термостабилизаторов; на входах и выходах наружного воздуха в подполье.

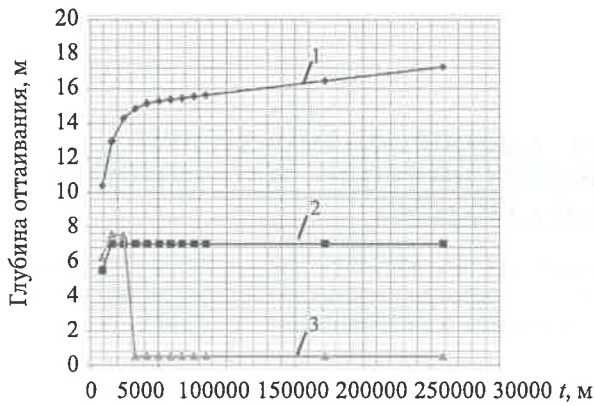


Рис. 1. Зависимость глубин оттаивания грунтов в основании факельной установки без учета и с учетом процесса парообразования и применения теплозащитного экрана:

1 - без учета парообразования; 2 - с учетом; 3 - при применении пеностекла

нагревательных или охлаждающих устройств, в том числе, термостабилизаторов и нагревательных кабелей, утепляющих фильтрационных потоков, источников теплового излучения), так и "пассивных", не вносящих в основание дополнительных тепловых потоков (фундаменты, сваи, теплоизолирующие прослойки и др.). Эти элементы, а также поверхности и границы расчетных областей могут иметь произвольную конфигурацию и различные условия теплообмена. В качестве граничных условий может задаваться реальный рельеф местности и конфигурация подземных частей сооружений, а также параметры источников и стоков тепла и другие особенности оснований. В расчетах также учитывается весь комплекс климатических условий (динамика температуры, направлений и скорости наружного воздуха, снегоотложений, дождевых осадков).

Эффективность и необходимость использования при проектировании оснований расчетного комплекса показаны на ряде нижеприведенных примеров технических решений.

Взаимодействие системы "факельная установка – грунты основания" в существующих программах теплотехнических расчетов производится только с учетом изменения влажности грунта при фазовом переходе "лед-вода". Однако при температуре на поверхности грунта свыше 100°C обязателен учет фазовых переходов "вода-пар". Программный комплекс "ТГ-Норд" позволяет учитывать переходы "лед-вода-пар", а также высоту факельной установки, размер пламени и температуру горения, интенсивность излучения, температуру, скорость и направление ветра.

Для оценки процессов парообразования в оттаивающих грунтах выполнено сопоставле-

ние результатов прогнозных теплотехнических расчетов по взаимодействию системы "факельная установка – грунты основания", проведенных с учетом интенсивности излучения при горении факела и процессов испарения в грунтах и без их учета.

При моделировании рассмотрена факельная установка с режимом работы: 1-й год непрерывно, затем 10 сут ежегодно в течение всего периода эксплуатации (30 лет). В режиме горения температура на поверхности у основания факельного ствола составляет 200°C . Геологический разрез в основании факельной установки, принятый в расчете, представлен многолетнемерзлыми грунтами сливающегося типа, в том числе переслаиванием песков и суглинков. Температура грунтов на глубине годовых нулевых амплитуд задана равной минус $1,4^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1 приведены графики динамики и глубины оттаивания грунтов вблизи факельной установки с большим расходом газа на сжигание и, следовательно, высокой температурой на поверхности грунта, из которого следует, что без учета испарения глубина чаши оттаивания грунта на 10 м больше, чем с учетом парообразования.

Таким образом, при высоких температурах на поверхности грунтов процессы парообразования существенно влияют на глубину оттаивания и распределение температуры в массиве грунта. При разработке технических решений, связанных с обеспечением устойчивости сооружений, в частности, оснований и фундаментов факельной установки и окружающих ее сооружений, расчеты должны выполняться с учетом процессов излучения от факела и парообразования в грунтах.

Для рассмотренного примера в качестве мероприятия по обеспечению устойчивости факельной установки достаточно предусмотреть теплозащитный экран из жаростойких материалов, например, из пеностекла толщиной 0,5 м (см. рис. 1).

При прогнозных расчетах температурного режима многолетнемерзлых грунтов основания грунтовой плотины необходимо совместное решение тепловой и гидродинамической задач с учетом влияния фильтрационного напорного потока.

В качестве примера рассмотрена плотина на ручье Певек, которая эксплуатируется с 1969 г. Ширина долины на участке размещения плотины 500...550 м, ширина плотины по гребню 14...21 м, максимальный напор 22,5 м. Поперечный профиль долины ассиметричен – левый склон круче правого, крутизна склонов не превышает 10° . Основание плотины на рассматри-

Параметры	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Температура наружного воздуха, °С	-21,8	-21,4	-20,3	-13,0	-5,5	1,2	6,6	6,7	3,2	-4,0	-13,1	-18,4
Температура в подполье, °С	-9,5	-10,7	-10,9	-9,7	-5,5	-0,9	4,1	5,5	3,0	-1,6	-6,5	-8,4
Коэффициент теплообмена вне здания, Вт/(м ² ×°С)	13,9	16,3	15,8	15,8	15,7	14,8	14,3	14,5	15,2	11,3	16,7	16,3
Коэффициент теплообмена в подполье, Вт/(м ² ×°С)	2,3	2,3	2,3	2,3	11,8	14,8	14,3	14,5	15,2	11,3	12,5	2,3

Существенное влияние также оказывают: ориентация здания по сторонам света и роза ветров района строительства (по месяцам); соседние здания (высоты, дистанции), а также тепловыделения от сезоннодействующих охлаждающих устройств, установленных в пространстве подполья. Кроме того, при расчете по методике [3] невозможно выполнить расчет для зданий значительных размеров в плане шириной больше 24 м. К тому же, рассчитать возможно только средне-зимние и летние значения температур в стационарном режиме.

Для аэродинамического расчета вентилируемого подполья сооружений Кутвицкой Н.Б. (1998 г.) была разработана методика расчета режима вентилирования подполья. Соответствие установившегося температурного и скоростного режима подполья, рассчитанное по предлагаемой методике, подтверждено натурными наблюдениями, например, за зданием крытого рынка размерами 100×100 м² в Салехарде, которое эксплуатируется с 2001 г.

На основе методики аэродинамического расчета авторами разработана расчетная программа "Аэровент", которая позволяет учесть все факторы, перечисленные выше.

Для оценки влияния учета аэродинамических факторов в полном объеме при расчете теплового взаимодействия системы "здание-вентилируемое подполье-грунты основания" по программе "Аэровент" рассчитано вентилируемое подполье под зданием спортивно-оздоровительного комплекса, расположенного на площадке обустройства Бованенковского месторождения, состоящего из трех зданий, примыкающих друг к другу (п-образная форма). Здания запроектированы с вентилируемым подпольем, закрытым цокольным ограждением из гофрированного профлиста для поступления наружного воздуха, в верхней части цоколя имеется щель. В подполье расположены конденсаторы термостабилизаторов и оголовки свай, расположенных с шагом 3×3 м. По данным мерзлотных инженерно-геологических изысканий площадка строительства сложена многолетнемерзлыми грунтами сливающегося типа, среднегодовая температура T на глубине

10 м составляет -2,6...-3,6°С. По результатам аэродинамического расчета, представленным в таблице, видно, что температура и коэффициенты теплообмена в подполье существенно отличаются от этих же характеристик на прилегающей территории.

Прогнозные аэродинамические и теплотехнические расчеты показали необходимость проведения мероприятий по термостабилизации грунтов основания, чего не требовалось по прогнозному теплотехническому расчету.

Выводы

При проектировании оснований и фундаментов в сложных мерзлотно-грунтовых условиях недостаточно рассматривать только тепловое взаимодействие зданий и сооружений с многолетнемерзлыми грунтами. Обязательным является учет таких факторов как фильтрация в надмерзлотных талых грунтах, излучение нагретых элементов конструкций, аэродинамический режим в вентилируемом подполье, процессы парообразования в грунтах (при температурах более 10°С). С этой целью необходимо выполнять комплексные расчеты теплового взаимодействия зданий и сооружений с многолетнемерзлыми грунтами. Такой подход позволяет более точно оценить взаимодействие инженерного сооружения с вмещающими грунтами и выбрать оптимальные технические решения по обеспечению его устойчивости, надежности и экологической безопасности эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутвицкая Н.Б., Дугинов Л.А., Розовский М.Х., Рязанов А.В. Свидетельство о регистрации государственной программы для ЭВМ №2012612877. "Моделирование процессов тепло-влажностного переноса в грунтах методом тепловых и гидравлических сопротивлений с учетом взаимодействия с процессами вентиляции и прогрева подполья надземных сооружений (программный комплекс ТГ-НОРД)", 2012.
2. Кутвицкая Н.Б., Дугинов Л.А., Розовский М.Х. и др. Моделирование процессов тепло-влажностного переноса в грунтах методом тепловых и гидравлических сопротивлений: Материалы четвертой конф. геокриологов России. - 2011. - Т. 2. - С. 261-267.
3. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечноммерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88.