

УДК 697.133

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И ГРУНТА ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ Г. ЯКУТСКА

Анисимов Максим Васильевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Охрана труда и окружающей среды» Томского государственного архитектурно-строительного университета, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2. E-mail: teploproekt@list.ru

Рекунов Виталий Сергеевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплогасоснабжение» Томского государственного архитектурно-строительного университета, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2. E-mail: Rekunovvs@mail.ru

Мирошниченко Илья Сергеевич,

студент кафедры «Охрана труда и окружающей среды» Томского государственного архитектурно-строительного университета, Россия, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2. E-mail: teploproekt@list.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью обеспечения эффективной тепловой защиты инженерных коммуникаций при их подземной прокладке в зоне вечномерзлых грунтов.

Цель работы: прогнозирование с использованием разработанного программного комплекса температурных полей в ограждающих конструкциях проектируемых зданий, грунте под зданием и вблизи его в климатических условиях г. Якутска; разработка рекомендаций по эффективному утеплению инженерных сетей, прокладываемых подземно.

Методы исследования. Предложена физико-математическая модель теплового состояния проветриваемого техподполья зданий с учетом воздухообмена и конструктивных особенностей строительства в условиях вечномерзлых грунтов; численное решение поставленной задачи с использованием разработанного программного комплекса; проведение натурных исследований.

Результаты. Разработана расчетная схема прогнозирования температурных полей в ограждающих конструкциях проектируемых зданий, в грунте под зданием и вблизи его в климатических условиях г. Якутска. Проведено численное моделирование изменения температурных полей основных ограждающих конструкций зданий и грунте в течение года. Сравнительный анализ полученных результатов с эмпирическими показал их удовлетворительную согласованность. Осуществлен подбор эффективной толщины утепляющего слоя инженерных коммуникаций в условиях их подземной прокладки в зоне вечномерзлых грунтов. В результате проделанной работы была рассмотрена двумерная нестационарная симметричная задача теплопроводности в полуграничном массиве с совокупностью граничных условий. Предложена физико-математическая модель теплообмена техподполья здания с учетом влияния воздухообмена и снегового покрова снаружи здания. Проведена серия натурных экспериментов в климатических условиях г. Якутска по определению типов грунта, находящихся в зоне строительства. Результаты численного моделирования показали, что теплота, поступающая через перекрытие над техподпольем и через стены, практически не влияет на температурное поле грунтов как под зданием, так и на расстоянии от него. В соответствии с проведенными исследованиями, температуры в массиве грунтов за пределами зоны строительства принимаются равными их естественным значениям. Сравнение результатов численного решения с решением, полученным из других теплотехнических компьютерных программ (например, Тепрег-3D), показало их удовлетворительную согласованность. Тем не менее, программа Тепрег-3D не учитывает воздухообмен в техподполье, который играет существенную роль при формировании температурных полей в ограждающих конструкциях и грунте.

Ключевые слова:

Воздухообмен, вечномерзлые грунты, ограждающие конструкции, температурные поля, проветриваемое техподполье.

Анализ проблемы

Прогнозирование температурных полей в грунтах и строительных конструкциях, примыкающих к ним, – является сложной теплотехнической задачей. Это объясняется неоднородностью типов грунтов, их теплотехническими свойствами, а также наличием «фазовых переходов» при их промерзании. Особого внимания заслуживают вечномерзлые грунты, в которых в течение года наблюдаются сложные комплексные тепловые процессы «замерзания–оттаивания», формирование поверхностного слоя грунта, имеющего положительную температуру в теплый период года, талого грунта,

имеющего относительные постоянные температуры в течение года, и слоя грунта, находящегося в вечномерзлом состоянии.

Зачастую при проектировании и строительстве зданий необходимо определять температурное поле грунтов вблизи здания, где имеется его тепловое влияние. Эта задача становится особо актуальной в случае проектирования утепления подземного ввода сети водопровода в здание и выпуска канализации при сложном рельефе местности в зоне застройки, когда перепады отметок поверхности грунта сильно колеблются. Знание температурного поля в зоне теплового влияния здания, а также вне его по-

зволило бы сделать правильный прогноз по остыванию воды в трубах (в том числе с учетом экстремально низких температур зимой) и рекомендовать необходимые меры по утеплению трубопроводов.

Прокладка инженерных коммуникаций в таких климатических условиях, как например в г. Якутске (Республики Саха) требует особого инженерного подхода. В соответствии с [1], температура воздуха наиболее холодной пятидневки для г. Якутска составляет минус 52 °С (минимально наблюдаемая температура воздуха минус 64 °С).

Подземная прокладка инженерных коммуникаций в условиях особо низких температур должна выполняться с учетом того, что не только температура вечномерзлых грунтов может влиять на температуру сред, проходящих через трубопроводы, и может вызвать их перемерзание, но и инженерные коммуникации могут вызвать повышение температуры таких грунтов. Последствия изменения естественной температуры вечномерзлых грунтов могут быть непредсказуемы. Переход из плотного мерзлого состояния в талое таких грунтов может повлечь за собой потерю несущих свойств свай фундаментов зданий, что может привести к невозможности эксплуатации строящегося здания.

Несмотря на то, что прокладку теплосетей, сетей горячего и холодного водоснабжения в климатических условиях г. Якутска принято выполнять надземно на несущих опорах с их последующим утеплением, трубопроводы канализации, как правило, монтируют в подземном исполнении. Такое решение обусловлено санитарно-эпидемиологическими требованиями, а также требованиями эстетики. Бытовые стоки в системах канализации зданий имеют температуру не ниже 18–25 °С и потенциально могут воздействовать на естественные температурные поля прилегающих грунтов. Во избежание теплового влияния, трубопроводы канализации прокладываются выше отметки вечномерзлых грунтов и подлежат утеплению, чтобы обеспечить им защиту от промерзания. Определение эффективной толщины утепляющего слоя таких инженерных систем, с учетом нестационарного теплопереноса в грунтах, позволило бы не только решить сложную теплотехническую задачу, но и обеспечить ресурсосбережение при строительстве капитальных зданий и сооружений в климатических условиях г. Якутска Республики Саха.

Анализ особенностей прокладки инженерных систем в климатических условиях г. Якутска

Для разработки мероприятий по определению эффективной толщины утепляющего слоя для системы канализации здания в г. Якутске было выбрано каркасное общественное здание.

Холодное техподполье является закрытым и используется для прокладки некоторых инженерных коммуникаций, включая канализационные трубы. Магистральные трубопроводы канализации в здании прокладываются в техподполье

под потолком с закреплением их подвесами. Трубопроводы оборачиваются «греющим» кабелем и дополнительно утепляются. В месте выпуска канализации из здания трубопроводы заглубляются в грунт на необходимую отметку и до канализационной насосной станции прокладываются подземно.

На месте строительной площадки был проведен анализ мерзлотно-грунтовых условий. В результате анализа было выявлено, что в геологическом отношении участок сложен четвертичными аллювиальными отложениями, представленными супесями, суглинками, песками пылеватыми и мелкими. С поверхности отложения перекрыты почвенно-растительным слоем мощностью до 0,2 м.

Мерзлотные условия площадки строительства характеризуются сплошным распространением многолетнемерзлых грунтов со сливающимся слоем сезонного оттаивания. В период производства буровых работ (ноябрь–декабрь 2012 г.) мерзлые грунты вскрыты до глубины 0,9 м, ниже грунты в талом состоянии до глубины 3,3 м, ниже до исследованной глубины 10,0–15,0 м находились в мерзлом состоянии. Криогенная текстура мерзлых супесей, суглинков, песков массивная.

Температурный режим грунтов основания характеризуется распространением высоких значений отрицательных температур, составляющих на глубине 10,0 м от –0,63 до –1,62 °С. При этом высокие значения температур в диапазоне от –0,63 до –0,87 °С установлены в скважинах, пройденных вблизи озера, что, видимо, объясняется влиянием подозерного непромерзающего талика, граница которого в виде «языка» в глубине распространяется к северу от уреза воды озера. Само озеро до сравнительно недавнего времени (<100 лет) являлось частью старичного озера, проточного в период паводковых вод. По данным лабораторных исследований засоленность грунтов участка имеет не повсеместный характер распространения.

Для сохранения грунтов в мерзлом состоянии и соблюдения их расчетного теплового режима в проекте было рекомендовано устройство круглогодично проветриваемого подполья, высота и вентиляционный режим которого определяются теплотехническим расчетом.

Анализ грунтов в зоне застройки проводился бурением скважин с последующим замером температуры на различных глубинах и исследованием типов грунтов.

В таблице представлена сводная ведомость температурных замеров грунтов в зоне застройки.

Как показало обследование грунтов, наилучшей глубиной для прокладки инженерных коммуникаций является глубина от ≈0,6–0,8 до ≈2,2 м от уровня почвенно-растительного слоя. Выше данной глубины грунт в период отрицательных температур существенно промерзает, а глубже указанных отметок начинается уже слой вечномерзлых пород.

Таблица. Сводная ведомость температурных замеров грунтов в зоне застройки**Table.** Summary list of ground temperature measurements in development zone

№ скважин Well	Дата замеров Sampling date	Глубина, м/Depth, m									
		1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
1	27.11.12	-0,39	-0,26	-0,35	-0,72	-0,67	-0,57	-0,74	-0,83	-0,72	-0,63
2		-0,35	-0,25	-0,76	-1,29	-1,33	-1,39	-1,52	-1,73	-1,61	-1,51
3		-0,42	-0,37	-0,61	-0,83	-1,00	-1,09	-1,17	-1,10	-1,14	-1,16
4	14.11.12	-0,41	-0,27	-0,57	-0,83	-0,70	-0,69	-0,77	-0,96	-0,82	-0,87
5	29.11.12	-0,30	-0,63	-0,98	-1,42	-1,33	-1,37	-1,40	-1,71	-1,61	-1,62
6		-0,30	-0,26	-0,55	-1,56	-0,63	-1,02	-1,00	-1,06	-1,15	-1,30
7	20.12.12	-0,41	-0,24	-0,67	-1,10	-1,05	-1,12	-1,20	-1,46	-1,35	-1,17
8		-0,36	-0,25	-0,58	-0,66	-0,81	-0,88	-0,96	-1,02	-1,24	-1,31
9	17.12.12	-0,68	-0,23	-0,81	-1,37	-1,55	-1,71	-1,92	-2,16	-2,11	-2,21
10		-0,21	-0,23	-0,62	-0,78	-0,98	-1,16	-1,27	-1,35	-1,46	-1,72
11		-0,76	-0,92	-1,40	-1,61	-1,72	-1,94	-1,85	-1,88	-2,00	-2,06
12	21.12.12	-0,76	-0,22	-0,65	-1,24	-1,26	-1,28	-1,47	-1,68	-1,66	-1,53
13		-0,26	-0,25	-0,56	-0,68	-0,81	-1,00	-1,09	-1,23	-1,49	-1,64
14		-0,35	-0,42	-1,38	-1,59	-1,71	-1,92	-1,83	-1,91	-2,08	-1,96

Обзор существующих методов расчета теплопереноса в грунтах

При проведении обзора теории расчета теплопереноса в грунтах следует отметить вклад таких авторов, как А.В. Богословский, А.Г. Гиндоян, А.А. Сандер, Л.А. Иооритис, Г.В. Порхаев и др. Особо хочется отметить работы такого ученого, как Г.В. Порхаев, который в своей работе [2] исследовал тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномёрзлыми грунтами. Как показали исследования Г.В. Порхаева, на застраиваемой территории температура грунта несколько отличается от температуры грунта, свободной от инженерных сооружений. Этот процесс возникает в результате теплопередачи от источников тепловыделений к грунту в подвальных или заглубленных помещениях.

Передача тепла из помещения через грунт является сложным процессом, сопровождаемым фазовым переходом влаги, наличием областей с талыми и мерзлыми грунтами. Под зданием, в грунте, формируется трехмерное температурное поле. Вблизи наружных стен поверхность пола имеет более низкую температуру, что приводит к увеличению теплопотерь.

Из современных авторов стоит отметить работы таких специалистов, как Д.А. Крылов [3–5], П.И. Дячек [6], Ю.С. Мельникова и др. [7]. Методы расчета тепловых полей в грунтах математическим моделированием также рассмотрены в работах А.А. Синицина [8] и Н.И. Сидняева [9]. Заслуживают внимания работы иностранных специалистов в данной области: Lunardini J. Virgil [10], E.K. Ebenezer [11], Ming Zhu, Radoslaw L. Michalowski [12] и др. [13]. Также немалый вклад в развитие строительной теплофизики внесли Aziz Belmiloudi [14], Theodore Louis [15], Donatello Annaratone [16] и др. [17, 18].

В этих работах основное внимание уделено исследованию теплопотерь при стационарном и квазистационарном режимах теплопередачи в зависи-

мости от перепада температур между наружным и внутренним воздухом, коэффициента теплопроводности массива грунта, конструктивной схемы сопряжения здания с грунтом оснований.

Изменение температурных полей в многослойных ограждающих конструкциях с учетом различия коэффициентов теплопроводности грунта и материала фундаментов было исследовано В.С. Лукьяновым и А.А. Сандером. При этом было установлено, что это различие незначительно и при инженерных расчетах им можно пренебречь.

Предлагаемые методы расчетов, как правило, ориентированы на вычисление температурных полей в грунтах, расположенных в основании зданий, т. е. в подвальных помещениях, и требуют большого количества вычислений как в стационарном, так и в нестационарном режиме теплопереноса. Но в случае, когда здание не имеет подвальных этажей и располагается на несущих сваях (с проветриваемым техподпольем), влияние воздухообмена на температурный режим прилегающих грунтов здания приобретает особую значимость. Это может в некоторых случаях затруднить их использование.

Кроме того, на сегодняшний день широкое распространение получили различные коммерческие программные комплексы, которые позволяют решать разнообразные тепловые задачи. Например, такой программный комплекс, как Tempreg-3D [19], который позволяет проводить расчеты температурных полей в ограждающих конструкциях, граничащих с грунтом.

В итоге можно сделать вывод, что имеющиеся на сегодняшний день методики теплового расчета теплопереноса через техподполья зданий либо недостаточно «гибки» и не позволяют учитывать изменение некоторых параметров, в связи с изменениями конструктива здания, либо разработаны для решения «узких» задач. При этом попытка «привязать» их к отличающимся условиям может повлечь за собой возникновение ошибок при расчете.

Математическое моделирование теплового состояния техподполья здания с учетом его воздухообмена

В общем случае задача расчета теплотерь через многослойные ограждающие конструкции и грунт подвального помещения (в частности техподполья) является трехмерной. Однако, как правило, длина зданий различного назначения (в частности общественные здания) существенно превосходит их ширину, поэтому при разработке математической модели теплообмена подвального помещения в нестационарном режиме рассматривается двумерная нестационарная симметричная задача теплопроводности в полуограниченном массиве с совокупностью граничных условий. При этом внутренняя зона подвального помещения L отделена от внешней участком стен толщиной δ , м (рис. 1).

Схемы физической и математической модели с указанными граничными условиями (ГУ) показаны на рис. 1.

Для построения математической модели теплообмена подвального помещения в нестационарном режиме предлагается физическая модель, в которую входят различные среды (воздух, грунт, снег) и материалы (материал наружной стены, перекрытия, утеплителя) [20]. Каждая среда или материал, имеющий отличные от других теплофизические свойства, выделен в самостоятельный материальный слой: 1 – внутренний воздух, 2 – слой утеплителя, 3 – наружная стена, 4 – внешний слой покрытия стены, 5 – грунт снаружи подвального помещения, 6 – снежный покров, 7 – воздух, снаружи подвального помещения, 8 – грунт внутри подвального помещения, 9 – переменный слой снега над отмосткой. Слой 9 был введен для того, чтобы имелась возможность рассчитать тепловые потери подвальным помещением с учетом того, что снежный покров над отмосткой в период отрицательных температур в ряде случаев убирается, по условиям эксплуатации зданий. В этом случае на границах существующих материальных слоев принимаются соответствующие граничные условия, отвечающие физическим процессам теплопереноса, протекающим на соответствующих плоскостях.

Стоит отметить, что такая постановка задачи позволяет модели обеспечить достаточную «гибкость» при расчетах, т. к. она предоставляет возможность выполнять необходимые вычисления не только для подвальных помещений, но и для техподполий (таких, как показано на рис. 1). При этом достаточно принять, что слой «5» (рис. 1) имеет такие же теплофизические свойства, как и слой 6, т. е. прилегание грунта к наружной стене отсутствует.

Математическая постановка задачи

Теплоперенос в многослойных ограждающих конструкциях подвального помещения и в твердых средах, таких как грунт и снег, в общем случае описывается трехмерными нелинейными нестационарными уравнениями теплопроводности в декартовой системе координат (1)

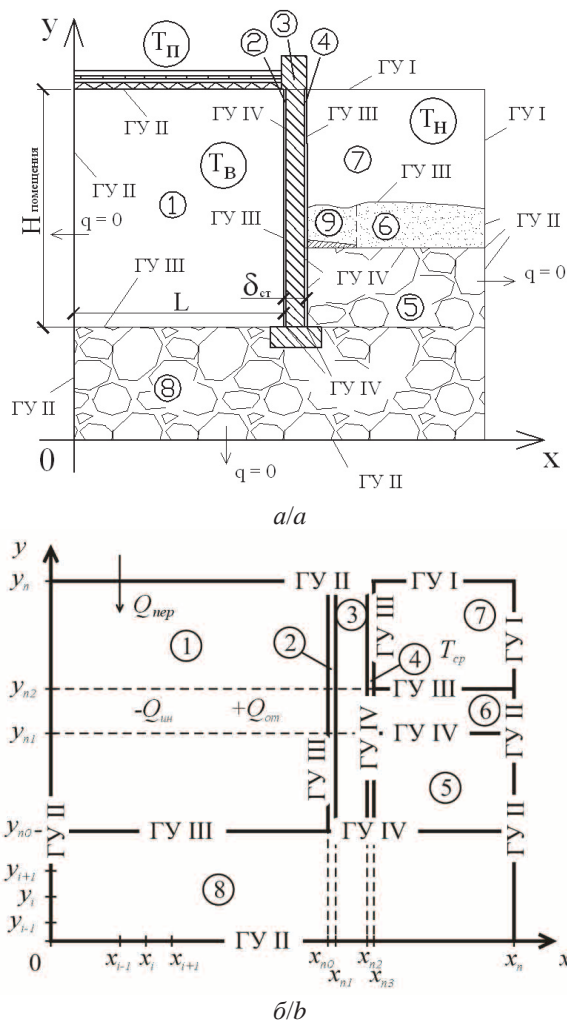


Рис. 1. Расчетная схема математической модели: а) физическая модель подвального помещения; б) математическая модель подвального помещения. 1 – воздух внутри подвального помещения; 2 – утеплитель; 3 – наружная стена (железобетон); 4 – наружный слой гидроизоляции; 5, 8 – грунт; 6 – снежный покров; 7 – воздух снаружи подвального помещения; ГУ I, ГУ II, ГУ III, ГУ IV – граничные условия

Fig. 1. Structural model of mathematical model: а) physical model of underground accommodation; б) mathematical model underground accommodation. 1 is the air inside the underground accommodation; 2 is the insulation; 3 is the outside wall (ferroconcrete); 4 is the outer layer of waterproofing; 5, 8 is the soil; 6 is the snow cover; 7 is the air outside the underground accommodation; ГУ I, ГУ II, ГУ III, ГУ IV are the boundary conditions

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(x, y, z), \quad (1)$$

где $T=T(\bar{x}, \tau)$ – температура; C, ρ – теплоемкость и плотность; λ – коэффициент теплопроводности; $Q(x, y, z)$ – мощность внутренних тепловых источников; \bar{x} – вектор, характеризующий положение точки в пространстве; τ – время.

При построении математической модели были сделаны следующие допущения:

- теплофизические свойства материалов (ρ, C_p, λ) ограждающих конструкций, снега и воздуха приняты постоянными;
- теплофизические свойства грунта в слое 5 и 8 приняты постоянными, основываясь на результатах проведенных исследований, представленных в [2].
- теплота ($Q_{от}$) от инженерных коммуникаций, теплота, идущая на нагрев инфильтруемого холодного воздуха через подвальные продухи ($Q_{ин}$), и теплопоступления через перекрытие первого этажа ($Q_{пер}$) считаются равномерно распределенными по объему подвального помещения;
- температура воздуха внутри помещения 1-го этажа считается равной нормируемой [21];
- в начальный момент времени $\tau=0$ температура во всех слоях математической модели равна температуре слоя 7 (наружный воздух);
- коэффициент теплоотдачи на границе «снежный покров – наружный воздух» рассчитывается в соответствии с рекомендациями [22] для климатических условий г. Якутска.

Уравнение (1) с надлежащими начальными и граничными условиями представляет задачу о распределении температуры в каждой точке рассматриваемой области для любого момента времени. При этом предполагается, что начальное распределение температуры в материале, температурный режим на его границах и мощность внутренних источников тепловыделения известны, задача симметрична относительно оси x , а в направлении нормальном плоскости x – y является полубесконечной, т. к. на этих границах тепловые потоки ничтожны и ими пренебрегают [23], что позволяет ограничиться решением задачи в двумерной постановке (рис. 1).

С учетом сделанных допущений уравнение (1) примет вид

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q, \quad (2)$$

где C_p – удельная изобарная теплоемкость; ρ – плотность материала; λ – теплопроводность материала; T – температура материала; τ – время; Q – внутренние источники тепловыделений (данная составляющая учитывается только для слоя 1, рис. 1); x, y – координаты по горизонтали и вертикали.

Распределение тепловых потоков на поверхностях различных материальных слоев, представленных на рис. 1, находится из решения уравнения (2) с совокупностью граничных условий.

Граничные условия (3) для слоя 1 (воздух внутри техподполья):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } x = 0; y_{n0} \leq y \leq y_n; q = 0; \\ \text{при } x = x_{n0}; y_{n0} \leq y \leq y_n; \alpha_{B1}(T_B - T_{x_{n0}}) = -\lambda \frac{\partial T_2}{\partial x}; \\ \text{при } x_0 \leq x \leq x_{n0}; y = y_n; q = f(\tau, T_B); \\ \text{при } x_0 \leq x \leq x_{n0}; y = y_{n0}; \\ \alpha_{B2}(T_B - T_{y_0}) = -\lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y}, \lambda_8 = \text{const}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где α_{B1}, α_{B2} – коэффициент теплоотдачи вблизи цокольной стены и в пригрунтовой зоне соответственно, Вт/(м²·°C); λ_8 – коэффициент теплопроводности грунта внутри техподполья, Вт/(м²·°C).

Граничные условия (4) для слоя 2 (слой теплоизоляции):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } x = x_{n0}; y_{n0} \leq y \leq y_n; \alpha_{B1}(T_B - T_{x_{n0}}) = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}; \\ \text{при } x = x_{n1}; y_{n0} \leq y \leq y_n; T_2 = T_3; \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}; \\ \text{при } x_{n0} \leq x \leq x_{n1}; y = y_n; q = f(\tau, T_A); \\ \text{при } x_{n0} \leq x \leq x_{n1}; y = y_{n0}; T_2 = T_8; \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = \lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y}; \end{array} \right. \quad (4)$$

Граничные условия (5) для слоя 3 (ограждающая конструкция техподполья):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } x = x_{n1}; y_{n0} \leq y \leq y_n; T_2 = T_3; \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}; \\ \text{при } x_{n1} \leq x \leq x_{n2}; y = y_{n0}; T_3 = T_8; \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} = -\lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y}; \\ \text{при } x_{n1} \leq x \leq x_{n2}; y = y_n; q = f(\tau, T_B); \\ \text{при } x = x_{n2}; y_{n0} \leq y \leq y_n; T_3 = T_4; \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – коэффициенты теплопроводности утеплителя, бетонной стены и штукатурки соответственно, Вт/(м²·°C).

Граничные условия (6) для слоя 4 (отделочный слой):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } x = x_{n3}; y_{n0} \leq y \leq y_{n2}; \alpha_{H2}(T_H - T_{x_{n3}}) = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}; \\ \text{при } x = x_{n3}; y_{n1} \leq y \leq y_{n2}; T_4 = T_6; \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial x}; \\ \text{при } x = x_{n3}; y_{n0} \leq y \leq y_{n1}; T_4 = T_5; \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x}; \\ \text{при } x = x_{n2}; y_{n0} \leq y \leq y_n; T_3 = T_4; \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}; \\ \text{при } x_{n2} \leq x \leq x_{n3}; y = y_n; q = f(\tau, T_A); \\ \text{при } x_{n2} \leq x \leq x_{n3}; y = y_{n0}; T_4 = T_8; \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = \lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y}, \end{array} \right. \quad (6)$$

где $\lambda_5, \lambda_6, \lambda_8$ – коэффициенты теплопроводности грунта снаружи техподполья, снега и грунта внутри техподполья соответственно, Вт/(м²·°C), α_{H2} – коэффициент теплоотдачи на границе «наружная поверхность цокольной стены – наружный воздух», Вт/(м²·°C).

Граничные условия (7) для слоя 5 (грунт снаружи подвального помещения):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } x = x_{n3}; y_{n0} \leq y \leq y_{n1}; T_4 = T_5; \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}; \\ \text{при } x_{n3} \leq x \leq x_n; y = y_{n1}; T_5 = T_6; \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} = \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial y}; \\ \text{при } x = x_n; y_{n0} \leq y \leq y_{n1}; q = 0; \\ \text{при } x_{n3} \leq x \leq x_n; y = y_{n0}; T_5 = T_8; \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} = \lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y}, \end{array} \right. \quad (7)$$

где λ_5 – коэффициент теплопроводности грунта снаружи техподполья, Вт/(м²·°С).

По мнению ряда авторов [24, 25] на некотором удалении от здания тепловое влияние здания ослабевает и становится малоощутимым. На этих границах теплообмен практически равен нулю. На некоторых границах слоев 5, 6 и 8 принимаются граничные условия второго рода (ГУ II), подразумевающие отсутствие стока тепла.

Граничные условия (8) для слоя 6 (снежный покров):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } x_{n3} \leq x \leq x_n; y = y_{n2}; \\ \alpha_{H1}(T_{y_{n2}} - T_H) = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial y}, \alpha_{H1} = f(v, \tau); T_H = f(\tau); \\ \text{при } x = x_n; y_{n1} \leq y \leq y_{n2}; q = -\lambda \frac{\partial T_6}{\partial x} = 0; \\ \text{при } x_{n3} \leq x \leq x_n; y = y_{n1}; T_5 = T_6; \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial y} = \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y}; \\ \text{при } x = x_{n3}; y_{n1} \leq y \leq y_{n2}; T_4 = T_6; \lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}, \end{array} \right. \quad (8)$$

где α_{H1} – коэффициент теплоотдачи на границе «снежный покров – наружный воздух», определяемый по (14), Вт/(м²·°С).

Граничные условия (9) для слоя 7 (воздух снаружи подвального помещения):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } x = x_n; y_{n2} \leq y \leq y_n; q = 0; \\ \text{при } x_{n3} \leq x \leq x_n; y = y_n; q = 0; \\ \text{при } x = x_{n3}; y_{n2} \leq y \leq y_n; \alpha_{H2}(T_H - T_{x_{n3}}) = -\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}; \\ \text{при } x_{n3} \leq x \leq x_n; y = y_{n2}; \alpha_{H1}(T_H - T_{y_{n2}}) = -\lambda_6 \frac{\partial T_6}{\partial y}; \\ \alpha_{H1} = f(v, \tau); T_H = f(\tau). \end{array} \right. \quad (9)$$

Граничные условия (10) для слоя 8 (грунт внутри техподполья):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{При } x_0 \leq x \leq x_{n0}; y = y_{n0}; \alpha_{B2} \cdot (T_B - T_{y_{n0}}) = -\lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y}; \\ \text{при } x_{n0} \leq x \leq x_{n1}; y = y_{n0}; T_2 = T_8; \lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}; \\ \text{при } x_{n1} \leq x \leq x_{n2}; y = y_{n0}; T_3 = T_8; \lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}; \\ \text{при } x_{n2} \leq x \leq x_{n3}; y = y_{n0}; T_4 = T_8; \lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y}; \\ \text{при } x_{n3} \leq x \leq x_n; y = y_{n0}; T_5 = T_8; \lambda_8 \frac{\partial T_8}{\partial y} = \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y}; \\ \text{при } x = x_n; y_0 \leq y \leq y_{n0}; \frac{\partial T_8}{\partial x} = 0; \\ \text{при } x_0 \leq x \leq x_n; y = y_0; \frac{\partial T_8}{\partial y} = 0; \\ \text{при } x = x_0; y_0 \leq y \leq y_{n0}; \frac{\partial T_8}{\partial x} = 0. \end{array} \right. \quad (10)$$

В качестве дополнительных источников теплоты Q (11) рассматриваются составляющие теплового баланса техподполья $Q_{от}$ – теплота от инженерных коммуникаций, Вт; $Q_{пер}$ – теплота, поступающая через перекрытие 1-го этажа, Вт; $Q_{инф}$ – теплота, теряемая за счет воздухообмена подвального помещения с окружающей средой, Вт.

$$Q = Q_{от} + Q_{пер} - Q_{инф}. \quad (11)$$

Величина теплоступлений от инженерных коммуникаций ($Q_{от}$) (трубопроводов системы отопления) вычислялась согласно известным зависимостям для цилиндрической трубы [26], Вт.

Тепловой поток через перекрытие первого этажа ($Q_{пер}$) [27] (12), Вт

$$Q_{пер} = \frac{F}{R_{пер}}(T_{П} - T_{В}), \quad (12)$$

где F – площадь пола первого этажа, м²; $R_{пер}$ – приведенное сопротивление теплопередаче перекрытия над техподпольем, (м²·К)/Вт; $T_{П}$ – нормируемая температура воздуха внутри помещения над техподпольем, К; $T_{В}$ – температура воздуха внутри техподполья, К.

Тепловые потери на нагрев воздуха $Q_{ин}$ Вт, поступающего через вентиляционные продухи, вычислялись по известным зависимостям, приведенным в [27], Вт.

Начальное условие характеризует распределение температуры во всех областях математической модели в начальный момент времени $\tau=0$ и имеет вид (13)

$$T_i = T_{cp} = O_H, \quad (13)$$

где T_{cp} – температура наружного воздуха.

При определении коэффициента теплоотдачи на различных поверхностях ограждающих конструкций использовались эмпирические зависимости, приведенные в [22], описывающие теплообмен в условиях естественной конвекции. Средние значения коэффициентов теплоотдачи определялись по уравнениям подобия для характерных случаев.

Для описания процесса конвективного теплообмена на границе «снег – наружный воздух» использовались зависимости, приведенные в нормативных документах (14)

$$\alpha = 23\sqrt{v_{cp} + 0,3}, \quad (14)$$

где v_{cp} – средняя скорость ветра, м/с.

Из зависимости (14) видно, что коэффициент теплоотдачи на границе «снег – наружный воздух» является функцией от скорости движения ветра $\alpha=f(v_{cp})$, поэтому в математической модели эта величина задается как переменная.

Ввиду малых температур на поверхностях ограждающих конструкций внутри подвального помещения, а следовательно, и значений количества теплоты, теряемой различными поверхностями в подвальном помещении за счет излучения (1–2 % от суммарных тепловых потерь), этой составляющей теплообмена пренебрегаем.

На основе анализа существующих численных методов решения теплотехнических задач для решения задачи теплообмена чердачного пространства с окружающей средой был выбран широко используемый метод прогонки с неявной разностной схемой [23].

Тестирование численного решения задачи теплопереноса

Численное решение описанной задачи по вышеизложенному методу осуществлялось с помощью пакета программ, разработанных в объектно-ориентированной среде Delphi 7.0. При создании пакета программ использовался модульный принцип.

Основной программный модуль, реализующий решение уравнения параболического типа общего вида с граничными условиями 1–4 рода в однослойных и многослойных областях и состоящий из более мелких модулей расчета коэффициентов разностной схемы и решения системы разностных уравнений с трехдиагональной матрицей методом прогонки, тестировался на известных аналитических решениях.

Для тестирования расчетного модуля были получены аналитические решения с последующим сравнением их с результатами численного решения.

Результаты сравнения показывают, что максимальное отклонение численного решения от аналитического не превосходит 0,6 %. Это подтверждает корректность выбора и реализации расчетной схемы.

Сравнение результатов натуральных наблюдений с результатами численного решения

Для проведения численного расчета температурных полей ограждающих конструкций проектируемых зданий в климатических условиях г. Якутска в разработанном программном комплексе (свидетельство о Госрегистрации программ [28]) использованы среднемесячные температуры воздуха для указанного города в соответствии с [1].

При проведении численного моделирования температурных полей проветриваемого техподполья приняты следующие допущения:

1. Среднемесячные температуры воздуха были приняты равными нормативными (несмотря на то, что программный комплекс позволяет задать любой температурный график, включая изменение температуры воздуха по часам в течение суток).
2. Воздухообмен внутри техподполья считался однократным ($k=1 \text{ ч}^{-1}$).
3. Толщина снежного покрова снаружи здания была определена по натурным наблюдениям для данного города.
4. При расчете было учтено наличие тепловыделений от инженерных коммуникаций, проходящих в проветриваемом техподполье (обогреваемые сети бытовой канализации).
5. Тепловыделения от инженерных коммуникаций были учтены как постоянные для периода

отрицательных температур (квазистационарный режим).

Для обеспечения расчета и подбора эффективной толщины утепляющего слоя для инженерных коммуникаций, проходящих в грунте, было проведено сравнение численного решения и результатов, полученных экспериментальным путем (таблица).

На рис. 2 приведено сравнение численного решения и результатов, полученных экспериментальным путем. Сравнение проводилось для глубины заложения в грунт проектируемых трубопроводов бытовой канализации равное 2 м.

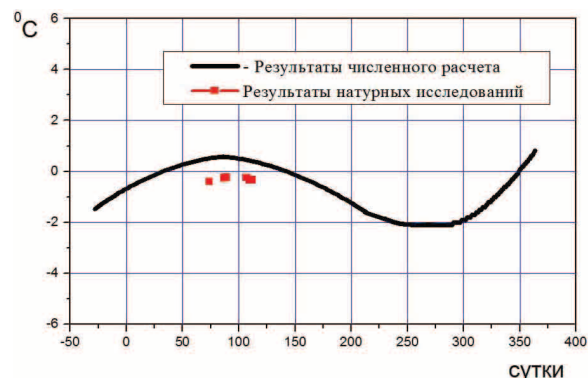


Рис. 2. Сравнение численного решения и результатов, полученных экспериментальным путем

Fig. 2. Comparison of numerical solution and the results obtained experimentally

Как видно из рис. 2, расхождение эмпирических данных с расчетными незначительно и составляет от 42 до 100 %, что является удовлетворительным для подобного класса задач.

В соответствии с проведенными исследованиями, температуры в массиве грунтов, как в зоне строительства, так и за его пределами, принимаются равными их естественным значениям.

Расчет толщины утеплителя для инженерных коммуникаций по результатам численного решения

В соответствии с численным расчетом с использованием разработанного программного комплекса, были определены температуры воздуха на уровне техподполья в период отрицательных температур, а также в грунте под зданием. Как показало решение с использованием программного комплекса, температура грунта под зданием и за его пределами близка к температуре грунта в естественном состоянии. Это объясняется тем, что техподполье находится над поверхностью грунта (практически отсутствует влияние тепловых потоков, действующих на грунт через заглубленные строительные конструкции), а также действием низких температур воздуха и проветривания на уровне приземного слоя в техподполье.

Проведенное численное моделирование (прогнозирование) температурных полей в исследуемом объекте позволило провести расчет необходимой толщины утеплителя для системы канализации здания.

Расчет толщины утепления трубопроводов в грунте проводился в соответствии с нормативной методикой «Инструкция по проектированию сетей водопровода и канализации для районов распространения вечномёрзлых грунтов» [29] по условиям остывания жидкости в конце участка трубопровода.

Температура на конечном участке трубопровода рассчитывалась по зависимости

$$t_{\kappa} = \frac{\lambda_{\text{м}}}{\lambda_{\text{т}}} t_{\text{г}} + \left(t_{\text{п}} - \frac{\lambda_{\text{м}}}{\lambda_{\text{т}}} t_{\text{г}} \right) e^{-\varphi}. \quad (15)$$

где $t_{\text{г}}$ – это температура в грунте на уровне прокладки инженерных сетей, °С (в расчете принято, что тепловое влияние от проектируемого здания на прилегающие грунты незначительно и температура в грунте может быть принята на основании натурных исследований и численного прогноза, $t_{\text{г}} = -2$ °С); $t_{\text{п}}$ – температура сточных вод в системе канализации, ($t_{\text{п}} = 18$ °С); $\lambda_{\text{м}}$, $\lambda_{\text{т}}$ – теплопроводность грунта в зоне прокладки в мерзлом и талом состоянии соответственно, Вт/(м·°С).

Теплопроводность грунта определялись на основании проведенного натурального анализа их типа методом бурения скважин. Преобладающий тип грунтов – суглинок.

Значение φ в (15) определялось как

$$\varphi = \frac{\nu Kl}{CG}, \quad (16)$$

где ν – коэффициент, зависящий от степени заполнения трубопровода (для рассматриваемого случая $\nu = 0,9$); K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м·°С)

(для трубопроводов с изоляцией $K = \frac{1}{R_{\text{и}} + R_0 / \lambda_{\text{т}}}$

($R_{\text{и}}$ – сопротивление теплопередаче утепляющего слоя, R_0 – сопротивление теплопередаче трубопровода); l – длина участка, м; G – расход стоков на участке, кг/ч.

При расчете необходимой толщины утеплителя было принято, что температура стоков не должна быть ниже температуры +5 °С.

В качестве утеплителя трубопроводов подземной части системы канализации были использованы скорлупы из пенополиуретана ($\lambda = 0,041$ Вт/(м·°С)). Для утепления магистралей, проходящих на уровне техподполья, были использованы маты минераловатные *Rockwool*. Расчет толщины утеплителя фирмы *Rockwool* производился с помощью программы той же фирмы.

Как показал расчет по зависимостям (15, 16), необходимая толщина утеплителя для подземной части составила 70 мм (остывание происходит до

температуры +6,8 °С), толщина утеплителя в техподполье 50 мм.

Кроме того, для обеспечения отогревания трубопроводов, например, в период аномально низких температур воздуха, все трубопроводы канализации, проложенные надземно, снабжены «греющим» кабелем.

Заключение

В результате проделанной работы была рассмотрена двумерная нестационарная симметричная задача теплопроводности в полуграниченном массиве с совокупностью граничных условий. Была предложена физико-математическая модель теплообмена техподполья здания с учетом влияния воздухообмена и снегового покрова снаружи здания.

Была проведена серия натурных экспериментов в климатических условиях г. Якутска по определению типов грунта, находящихся в зоне строительства. Анализ проводился на разных глубинах с определением температур для некоторых месяцев в году (таблица).

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными показало, что расхождение их незначительно и составляет от 42 до 100 % (рис. 2), что является удовлетворительным для подобного класса задач.

Результаты численного моделирования показали, что теплота, поступающая через перекрытие над техподпольем и через стены, практически не влияет на температурное поле грунтов как под зданием, так и на расстоянии от него. Данный вывод полностью соответствует требованиям к строительству зданий в климатических условиях г. Якутска, которые «запрещают» тепловое воздействие проектируемых зданий на естественный температурный фон грунтов.

В соответствии с проведенными исследованиями, температуры в массиве грунтов за пределами зоны строительства принимаются равными их естественным значениям.

На основании прогноза температурных полей с помощью моделирования тепловых процессов был произведен расчет необходимой толщины теплоизолирующего слоя инженерных коммуникаций, проходящих в техподполье, грунте внутри и снаружи здания.

Сравнение результатов численного решения с решением, полученным из других теплотехнических компьютерных программ (например, Tempreg-3D), показало их удовлетворительную согласованность. Тем не менее, программа Tempreg-3D не учитывает воздухообмен в техподполье, который играет существенную роль при формировании температурных полей в ограждающих конструкциях и грунте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СП 131.13330.2012 Строительная климатология – взамен СНиП 23–01–99*. Введ. 01.03.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 113 с.
- Порхаев Г.В. Тепловое взаимодействие зданий и сооружений с вечномерзлыми грунтами. – М.: Наука, 1970. – 208 с.
- Крылов Д.А., Федотов А.А. Температурный режим вечномерзлого грунта под зданием со свайным фундаментом // Вестник МГТУ. – 2013. – № 3. – С. 106–116.
- Крылов Д.А., Сидняев Н.И., Федотов А.А. Интегральный метод в задачах математического моделирования распределения температурных полей // Математика и математическое моделирование: Сб. докл. IV Всерос. молодежной научно-инновационной школы. – Саров, 19–22 апреля 2010. – Саров: СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 72–76.
- Крылов Д.А. Математическое моделирование температурных полей с учетом фазовых переходов в криолитозоне // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». – 2012. – № 04, апрель. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/354740.html> (дата обращения 28.07.2014).
- Дячек П.И., Макаревич С.А. Формирование температурного поля грунтов у здания // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: международный научно-технический и производственный журнал. – 2007. – № 3. – С. 77–86.
- Мельникова Ю.С. Математическое моделирование управления нестационарным температурным полем в двухфазных средах // Наука и образование. 2012. URL: <http://www.technomag.edu.ru/doc/330390.html> (дата обращения 28.07.2014).
- Синицын А.А., Карпов Д.Ф., Суханов И.А. Решение проблемы оттаивания мерзлых грунтов при подготовительных строительных работах в условиях малоэтажной застройки // Малоэтажное строительство в рамках Национального проекта «Доступное и комфортное жилье гражданам России»: технологии и материалы, проблемы и перспективы развития в Волгоградской области: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. – С. 99–101.
- Основы математического моделирования распределения температурных полей в многофазных средах / Н.И. Сидняев и др. // Математика и математическое моделирование: Матер. Четвертой Всерос. молодежной науч.-инновационной школы. – Саров: Изд-во «Альфа», 2010. – С. 86–93.
- Lunardini J. Virgil. Effect of convective heat transfer on thawing of frozen soil // Seventh International Conference, Collection Nordicana. – Canada, 1998. – P. 689–695.
- Ebenezer E.K. Predicting Temperature Profiles in Soil During Simulated Forest Fires. – Saskatoon: University of Saskatchewan, 2006. 183 p.
- Ming Zhu, Michalowski R.L. Simulation of Heat Transfer in Freezing Soils Using ABAQUS // ABAQUS Users' Conference. – Michigan, 2005. p.p. 1 – 7.
- Deru M. Model for Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings. PhD. Thesis. – USA: Colorado, 2003. 153 p.
- Belmiloudi A. Heat transfer mathematical modeling. Numerical methods and information technology. – Croatia: InTech, 2011. 654 p.
- Louis Th. Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer. – New Jersey, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. p. 664.
- Annaratone D. Engineering Heat Transfer. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag Berlin 2010. 344 p.
- Lienhard IV J.H., Lienhard V J.H. A Heat Transfer Textbook. – USA; Cambridge; MA: Phlogiston press, 2011. 766 p.
- Serth R.W. Process Heat Transfer. – USA: Elsevier Science and Technology Book, 2007. 755 p.
- Temper-3D. Компьютерная программа для ЭВМ. URL: <https://www.temper3d.ru/> (дата обращения 28.07.2014).
- Карауш С.А., Лысак И.А., Анисимов М.В. Математическое моделирование теплового состояния подвального помещения // Вестник ТГАСУ. – 2006. – № 2. – С. 133–141.
- СП 118.13330.2012 Общественные здания и сооружения. Взамен СНиП 31–06–2009. Введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 53 с.
- СНиП 2.06.04–82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). – М.: Госстрой России, 1989. – 49 с.
- Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. – М.: Наука, 1973. – 415 с.
- Гиндоян А.Г. Тепловой режим конструкций полов. – М.: Стройиздат, 1984. – 222 с.
- Прогнозирование теплового состояния грунтов при освоении северных районов / В.П. Чернядьев, А.Л. Чеховский, А.Я. Стремяков, В.А. Накулин. – М.: Наука, 1984. – 137 с.
- СП 23–101–2004. Проектирование тепловой защиты зданий. Взамен СП 23–101–2000; введ. 26.03.2004 – М.: Госстрой России, 2004. – 86 с.
- СНиП 41–01–2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Взамен СНиП 2.04.05 – 91*; введ.01.01.2004. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 54 с.
- Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2007611123, зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.03.2007; заявка. № 2007610281.
- СН 510–78. Инструкция по проектированию сетей водоснабжения и канализации для районов распространения вечномерзлых грунтов: введ. 11.12.78. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 78 с.

Поступила 27.02.2015 г.

UDC 697.133

PREDICTION OF TEMPERATURE FIELDS OF BUILDING ENVELOPES AND GROUND FOR CALCULATING THE HEAT INSULATION OF ENGINEERING LINES IN THE CLIMATIC CONDITIONS OF YAKUTSK

Maksim V. Anisimov,

Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya square,
634003, Tomsk, Russia. E-mail: teploproekt@list.ru

Vitaly S. Rekunov,

Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya square,
634003, Tomsk, Russia. E-mail: Rekunovvs@mail.ru

Ilya S. Miroshnichenko,

Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya square,
634003, Tomsk, Russia. E-mail: teploproekt@list.ru

The relevance of the research is caused by the necessity to maintain the effective heat insulation of engineering lines at their underground laying in a zone of permafrost soils.

The aim of the research is to predict temperature fields in building envelopes using the developed program complex, and in ground under a building and near it in the climatic conditions of Yakutsk; work out recommendations for effective warming of the engineering networks laid underground.

Methods. The authors propose physical-mathematical model of the thermal state of underground taking into account the air exchange and design features of construction in permafrost conditions. Numerical solution of the problem using the developed software package is made.

Results. The authors developed the computational scheme of predicting temperature fields in building envelopes, in the ground under a building and near it in climatic conditions of Yakutsk. Numerical simulation of temperature fields' change of the basic building envelopes and the soil during a year was carried out. The comparative analysis of the obtained results with the empirical ones shown their satisfactory coordination. The authors selected the effective thickness of a warming layer of engineering lines at their underground laying in a zone of permafrost. Two-dimensional non-stationary symmetric problem of heat conductivity in semi-limited mass with a set of boundary conditions was considered. The authors proposed physical-mathematical model of heat exchange in a technical underground of a building taking into account the influence of air exchange and snow cover outside of a building and carried out a series of field experiments in Yakutsk to define the types of soil in a zone of construction. The results of numerical simulation showed that the warmth coming through the ceiling over technical underground and through the walls, does not actually influence the temperature of soils both under the building, and at distance from it. According to the carried out researches, temperatures in soil mass outside the construction zone are equal to their natural values. Comparison of results of the numerical solution with the solution obtained from other computer programs (for example, *Temper-3D*) showed their satisfactory coordination. Nevertheless, the program *Temper-3D* does not consider air exchange in a technical underground, which plays an essential role in formation of temperature fields in building envelopes and soil.

Key words:

Air exchange, permafrost soils, building envelopes, temperature fields, aired technical underground.

REFERENCES

1. SP 131.13330.2012 *Stroitel'nay klimatologiya* [State of rules 131.13330.2012. Building climatology]. Moscow, Minregion Rossiya, 2012. 113 p.
2. Porkhaev G.V. *Teplovoe vzaimodeystvie zdaniy i sooruzheniy s vechnomerzlyimi gruntami* [Thermal interaction of buildings and structures with permafrost soils]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 208 p.
3. Krylov D.A. *Temperaturny rezhim vechnomerzlogo grunta pod zdaniem so svaynym fundamentom* [Temperature regime of permafrost soil under the building with the pile foundation]. *Vestnik MGTU*, 2010, no. 3, pp. 106–116.
4. Krylov D.A., Sidnev N.I., Fedotov A.A. *Integralny method v zadachakh matematicheskogo modelirovaniya raspredeleniy temperaturnykh poley* [The integral method in the mathematical modeling of distribution of temperature fields]. *Sbornik dokladov 6 Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-innovatsionnoy shkoly: Matematika i matematicheskoe modelirovanie* [Proc. IV All-Russian Youth Scientific and innovative school]. Sarov, 2010. pp. 72–76.
5. Krylov D.A. *Matematicheskoe modelirovanie temperaturnykh poley s ucheto fazovykh perekhodov v kriozolite* [Mathematical modeling of thermal fields with allowance for phase transitions in the permafrost zone]. *Electronic scientific and technical publication «Science and Education»*, 2012, no. 4, April. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/354740.html> (accessed 28 July 2014).
6. Dyachek P.I., Makarevich S.A. *Formirovanie temperaturnogo polya gruntov u zdaniya* [Formation of temperature field of soils at the building]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obedinennykh SNG. Energetika: mezhdunarodny nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi zhurnal*, 2007, no. 3, pp 77–86.
7. Melnikova Yu.S. *Matematicheskoe modelirovanie upravleniya nestatsionarnym temperaturnym polem v dvukhfaznykh sredakh* [Mathematical simulations of non-stationary temperature field in two-phase media]. *Nauka i obrazovanie*, 2012, Available at: <http://www.technomag.edu.ru/doc/330390.html> (accessed 28 July 2014).
8. Sinit'syn A.A., Karpov D.F., Sukhanov I.A. *Reshenie problemy ottaivaniya merzlykh gruntov pri podgotovitelnykh stroitelnykh rabotakh v usloviyakh maloetaznoy zastroyki* [Solution to the problem of thawing frozen soils during preparatory construction work in conditions of low buildings]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Maloetazhnoe stroitelstvo v ramkakh Natsionalnogo proekta «Dostupnoe i komfortnoe zhile grazhdanam Rossii»: tekhnologii i materialy, problemy i perspek-*

- tivy razvitiya v Volgogradskoy oblasti»* [Low-rise construction in the framework of the National project «Affordable and comfortable housing to Russian citizens»: technologies and materials, problems and development prospects in the Volgograd region: Mater. Intern. scientific-practical. Conf.]. Volgograd, 2009. pp. 99–101.
9. Sidnyaev N.I. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya raspredeleniya temperaturnykh poley v mnogofaznykh sredakh [Fundamentals of mathematical modeling of distribution of temperature fields in multiphase media]. *Materialy chetvertoy Vserossiiskoy molodezhnoy nauchno-innovatsionnoy shkoly* [Proc. of the Fourth All-Russian youth scientific-innovative school]. Sarov, 2010. pp. 86–93.
 10. Lunardini J. Virgil. Effect of convective heat transfer on thawing of frozen soil. *Seventh International Conference, Collection Nordicana*. Canada, 1998, pp. 689–695.
 11. Ebenezer E.K. *Predicting Temperature Profiles in Soil During Simulated Forest Fires*. Saskatoon, University of Saskatchewan, 2006. 183 p.
 12. Ming Zhu, Michalowski R.L. *Simulation of Heat Transfer in Freezing Soils Using ABAQUS*. ABAQUS Users' Conference. Michigan, 2005. pp. 1–7.
 13. Deru M., *A Model for Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings*. PhD thesis. USA, Colorado, 2003, 153 p.
 14. Belmiloudi A. *Heat transfer mathematical modeling. Numerical methods and information technology*. Croatia: InTech, 2011. 654 p.
 15. Louis Th. *Heat Transfer Applications for the Practicing Engineer*. New Jersey, Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2011. 664 p.
 16. Annaratone D. *Engineering Heat Transfer*. Berlin; Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2010. 344 p.
 17. Lienhard IV J.H., Lienhard V J.H. *A Heat Transfer Textbook*. USA; Cambridge; MA, Phlogiston press, 2011. 766 p.
 18. Serth R.W. *Process Heat Transfer*. USA, Elsevier Science and Technology Book, 2007. 755 p.
 19. Temper-3D. *Kompyuternay programma dlya IBM* [Computer software]. Available at: (<https://www.temper3d.ru/>) (accessed 28 July 2014).
 20. Karaush S.A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya podvalnogo pomeshcheniya* [Mathematical simulation of thermal condition in a cellar]. *Vestnik TGASU*, 2006, no. 2, pp. 133–141.
 21. *SP 118.13330.2012 Obshchecestvennye zdaniya i sooruzheniya* [State of rules 118.13330.2012. Public buildings]. Moscow, Min-region Rossiya, 2012. 53 p.
 22. *SNiP 2.06.04–82*. Nagruzki i vozdeystviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Rules of construction 2.06.04–2003. Hydrotechnical construction load and influence]. Moscow, Gosstroy Rossiya, 1989. 49 p.
 23. Samarsky A.A. *Ustoychivost raznostnykh skhem* [Stability of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 415 p.
 24. Gindoyan A.G. *Teplovoy rezhim konstruksiy polov* [Heat regime of floor construction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 222 p.
 25. Chernadiev V.P. *Prognozirovanie teplovogo sostoyaniya gruntov pri osvoenii severnykh rayonov* [Prediction of soil heat condition in developing northlands]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 137 p.
 26. *SP 23–101–2004. Proektirovanie teplovoy zashchity zdaniy* [State of rules. Planning thermal protection of buildings]. Moscow, Gosstroy Rossiya, 2004. 86 p.
 27. *SNiP 41–01–2003. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie* [Rules of construction 41–01–2003. Heating, ventilation and conditioning]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 2003. 54 p.
 28. Lysak I.A., Karaush S.A., Anisimov M.V. *Svidetelstvo ob ofitsialnoy registratsii programmy dlya IBM* [The certificate of official registration of computer programs no. 2007611123]. Zaregistrirovano v Reestre program dlya EBM 19.03.2007; zayavka no. 2007610281.
 29. *SN 510–78. Instruksiya po proektirovaniyu setey vodosnabzheniya i kanalizatsii dlya rayonov rasprostraneniya vechnomerzlykh gruntov* [Manual for the design of water supply networks and sewage systems for the areas of permafrost soil]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1978. 78 p.

Received: 27 February 2015.