

К.т.н., главный специалист Веселов В.В. *,
ООО «Институт проектирования, архитектуры и дизайна»
к.т.н., доцент Беляков В.А.,
к.т.н., доцент Сальников В.Б.,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННЫЙ МАЛОЗАГЛУБЛЕННЫЙ ФУНДАМЕНТ: ЕГО РАБОТА В СЕЗОННО-ПРОМЕРЗАЮЩИХ ГРУНТАХ, ПРАКТИКА ТЕПЛООВОГО РАСЧЁТА, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И СТРОИТЕЛЬСТВА

Аннотация: Объектом исследования являются теплоизолированные фундаменты мелко заложения. В статье рассматривается метод решения нестационарной и нелинейной тепловой задачи промерзания-оттаивания грунта в двумерной постановке с использованием компьютерных программ на основе метода конечных элементов, например, программы COSMOS/M (Structural Research & Analysis Corp.). Приводятся характерные особенности по заданию исходных данных в программу расчета, вызванные нелинейностью и нестационарностью задачи.

Ключевые слова: морозозащищенный фундамент мелко заложения; пенополистирол; тепловой расчет; температура массива грунта

1. Введение

Не смотря на то, что по технологии морозозащищенных фундаментов мелко заложения (МЗМЗ) [1,12,13,15] построено уже несколько миллионов квадратных метров индивидуального жилья (в основном 1-2-этажного), данная технология все еще считается *экспериментальной* – за домами ведутся постоянные наблюдения, главная цель которых – установить *предельные ресурсы долговечности* различных теплоизоляционных материалов, находящихся многие годы в земле.

Пока же никаких противопоказаний их применению не выявлено. Такой же вывод следует из 30-55-и летних наблюдений и в России за дорогами с утепляющим слоем из пенополистирола, за гидротехническими сооружениями и, особенно – за поведением пенополистирола в качестве эффективного заполнителя для бетона в конструкциях зданий, совмещающих несущую и теплозащитную функции [2, 3].

Конструкция МЗМЗ обеспечивает эффективную защиту от промерзания и от всех известных негативных проявлений морозного пучения грунтов. Положительным фактором является значительное сокращение материалоемкости и объемов

земляных работ: глубина заложения фундамента составляет 0.5-0.8 м вместо привычных в Средней России 1.5-2.5 м, а на Севере и на Востоке – до 3-3.5 м, назначаемых требованиями действующих нормативных документов по условиям промерзания грунтов. Кроме того, на 15-20% сокращаются тепловые потери, что достигается экономией тепловой энергии в процессе эксплуатации здания.

Опасность промерзания грунтов можно иллюстрировать следующим. В процессе влияния отрицательных температур в структуре большинства типов грунтовых массивов происходит рост образования кристаллов льда за счет поступления (миграции) воды из незамерзших слоев, или от воды, накопившейся вокруг фундамента в предзимний период. Силы пучения настолько велики, что могут поднять даже нагруженный фундамент, если он не заглублен ниже границы промерзания. В результате поверхность грунта поднимается от 2-3, иногда до 10-15 см, часто вместе со зданием. Однако если здание отапливается, никаких негативных проявлений пучения не видно.

Как показано на рисунке 1.а, теплоизолированный фундамент представляет собой обычный фундамент, под подошвой которого (и на некотором расстоянии от него) укладываются слой теплоизоляционного материала (экструдированного пенополистирола), который может воспринимать нагрузки от сооружения и одновременно – предотвращать промерзание грунта ниже подошвы. Утепление фундамента будет эффективно и в случае свайных фундаментов: под свайным ростверком также не должно быть мерзлого грунта.

Конструкция теплоизолированного фундамента в 1999 году защищена патентом России (авторы В.В. Лушников и Ю.Р. Оржеховский, [4]). Одна из первых публикаций по данной теме также появилась ещё в 1999 году [5]. Отличие его от зарубежных аналогов (МФМЗ) состоит в том, что пенополистирол выполняет не только теплозащитные, но еще и опорные функции, т.е. воспринимает нагрузки от строения.

Прочность экструдированного пенополистирола, как правило, более высокая, чем у большинства грунтов залегающих под подошвой фундаментов. Он не более сжимаем, чем грунт, а долговечность его ничуть не меньше, чем у более прочных материалов.

Другая конструкция, также защищенная патентом России в 2004 году (В.В. Лушников, Ю.Р. Оржеховский и В.В. Веселов, [6]), показанная на рисунке 1.б, решает защиту от промерзания по-другому, без выполнения опорных функций.

Теплотехнические расчеты показывают, что промерзание грунта можно исключить изоляцией фундамента с обеих его граней сверху (и с боков), укладкой изоляции под отмостку, под пол, в обратную засыпку... Если же дом строится без перехода через зиму, внутреннюю изоляцию можно существенно уменьшить или даже полностью исключить. Из существующей практики и из теплотехнических расчетов следует, что такой фундамент нельзя делать зимой или ранней весной – тогда под фундаментом на несколько лет сохранится мерзлота.

Экструдированные пенополистиролы сейчас можно найти достаточно легко. Например, в Санкт-Петербурге работают дилеры нескольких отечественных и зарубежных фирм, выпускающих такие материалы («Пеноплэкс», «Dow Chemical Company» и др.). В 2005 году в Екатеринбурге появился крупный производитель экструзионного полистирола – завод «ЭКСТРОЛ». На основании испытаний материала, проведенных в сертифицированной лаборатории аккредитованного Испытательного центра ОАО «УралНИИАС» и лаборатории долговечности строительных материалов «НИИСФ» [14] можно утверждать, что пенополистиролы имеют очень низкий коэффициент теплопроводности ($\lambda=0,03$ Вт/м*К, высокую стойкость к биологическим воздействиям, морозостойкость и обладают гидрофобными свойствами (заряд на поверхности гранулы полистирола участвует в процессе смачивания) [2, 3]. Пенополистирол обладает также демфирующим эффектом при сжатии. Единственная опасность для материала – ультрафиолетовое излучение, но пенопласт легко защитить пленкой, листом асбофанеры и др.

В отличие от утверждений авторов статьи [1], материалом для теплоизоляции фундамента может быть любой из известных ныне теплоизоляционных материалов. Современные проектные решения предъявляют к используемому материалу достаточно высокие эксплуатационные требования по долговечности, он должен длительное время работать в грунтовых (часто обводненных) условиях без снижения своих теплоизоляционных и прочностных свойств. Данным требованиям в полной мере удовлетворяет экструдированный пенополистирол [3, 16].

Так реализуется идея теплоизолированного фундамента. Заканчивая краткое пояснение конструкций МФМЗ и эффективности самой идеи, хотелось бы отметить, что фактически это старая идея «российского» поверхностного фундамента, но претворяемая в жизнь с применением новых материалов, решений старых и новых задач теплофизики.

Таким образом, новизна МФМЗ – фактически только в материалах для изоляции (экструзионный пенопласт вместо опилок), в правильной (научно обоснованной) их расстановке.

На рисунках 2 и 3 показаны конструкции теплоизолированных фундаментов и фундаментов традиционного типа.

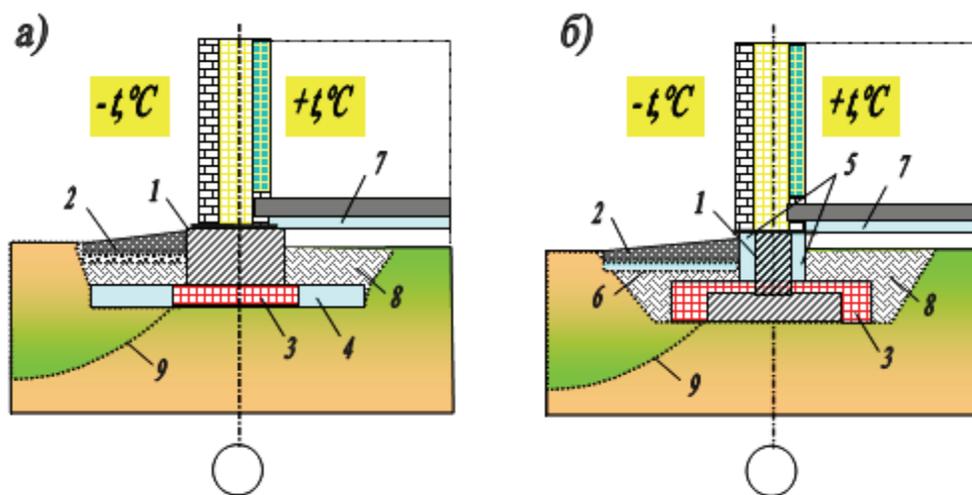


Рисунок 1. Конструкции теплоизолированных фундаментов

а, б – с теплоизоляцией соответственно по низу и по верху фундамента

1 – фундамент; 2 – отмостка; 3 – основной теплоизолирующий элемент (пенополистирол); 4-7 – дополнительная теплоизоляция из пенопласта (4 – по низу фундамента; 5 – то же, с боковых поверхностей; 6 – то же, под отмосткой; 7 – то же, под полом); 8 – обратная засыпка (дополнительное утепление); 9 – граница промерзания грунта

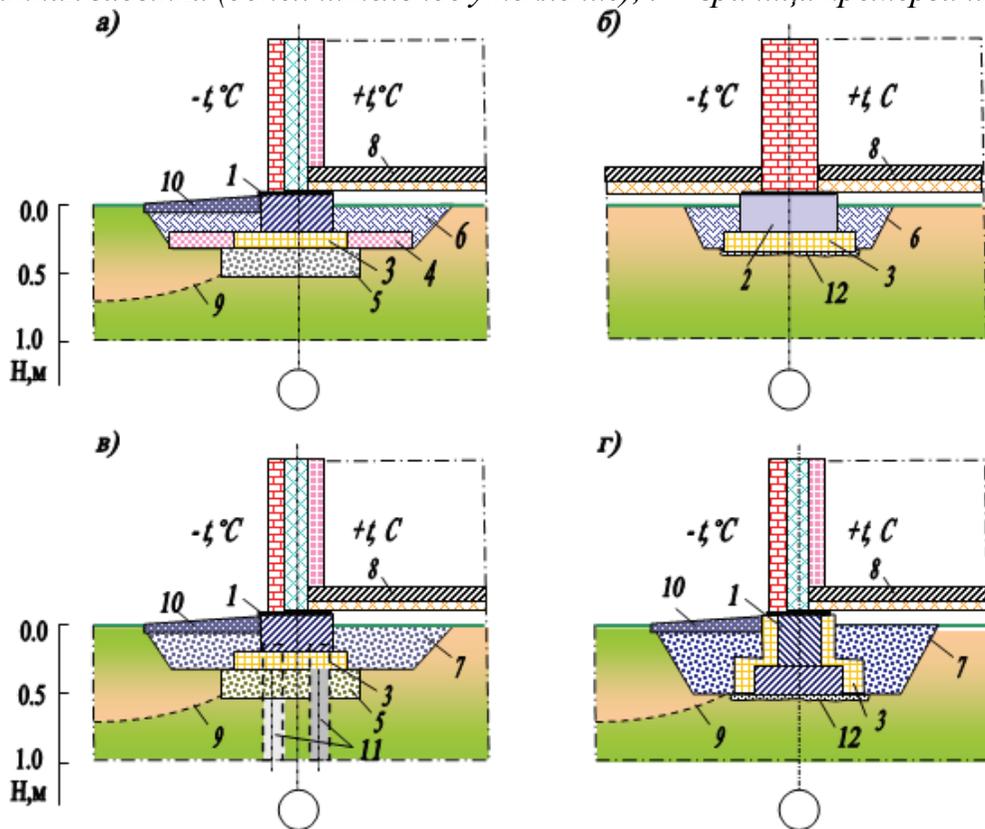


Рисунок 2. Конструкции теплоизолированных фундаментов

а, в, г – для ленточного фундамента наружной стены; б – для столбчатого фундамента под колонну; а, б, г – для фундамента на естественном основании; в – для свайного фундамента;

г – фундамент с утеплением боковых граней и подошвы.

1 – ленточный фундамент; 2 – столбчатый фундамент; 3 – теплоизолирующий элемент; 4 – дополнительная теплоизоляция (пенополистирол), 5 – подсыпка из непучинистого материала; 6 – обратная засыпка местным грунтом; 7 – то же (шлак, керамзит); 8 – утепленный пол; 9 – граница промерзания грунта; 10 – отмостка; 11 – сваи; 12 – песчаная или бетонная подготовка

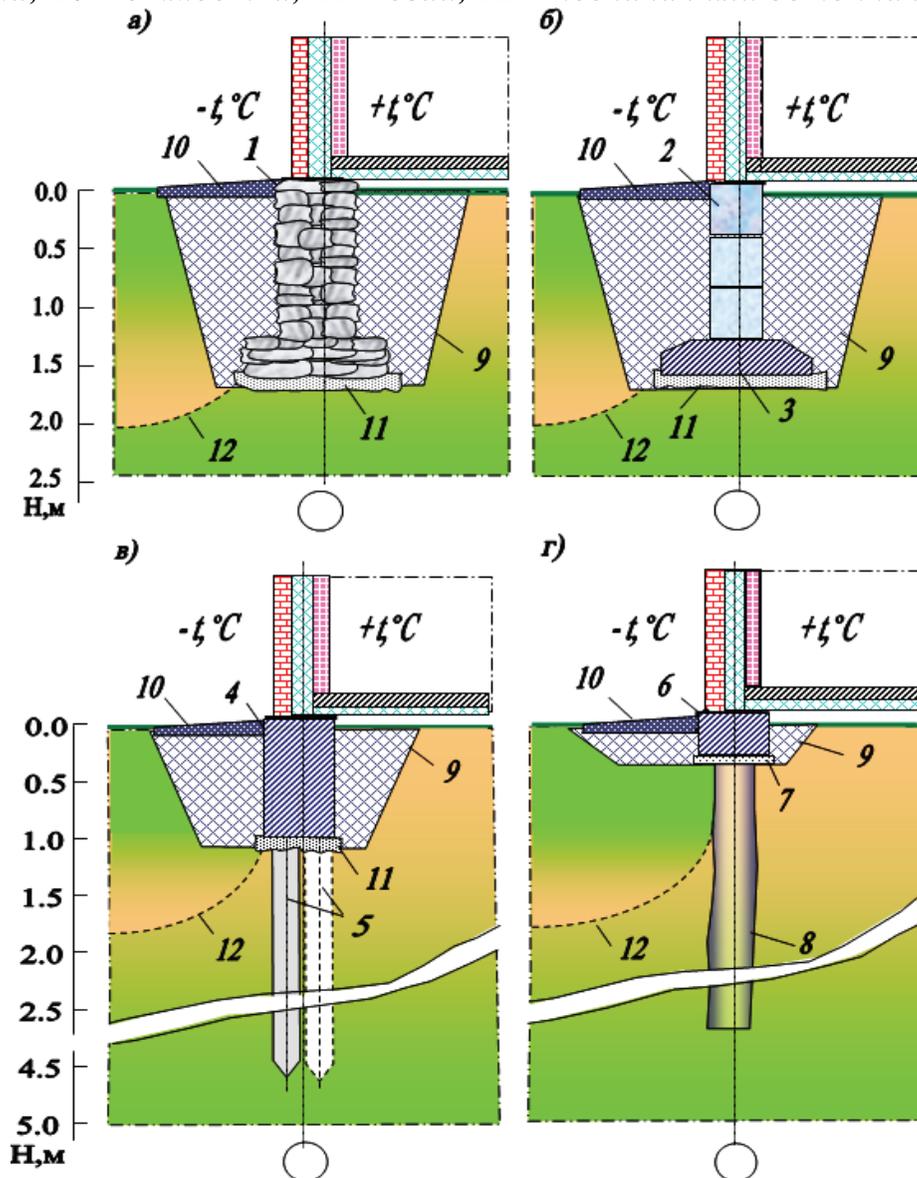


Рисунок 3. Конструкции фундаментов традиционного типа

а – бутобетонный фундамент; б – сборный фундамент; в – то же, из забивных свай; г – то же, на буронабивных сваях.

1 – бутовый фундамент; 2 – сборные блоки; 3 – железобетонная подушка; 4 – низкий ростверк; 5 – забивные сваи; 6 – высокий ростверк; 7 – противопучинистая (воздушная) прослойка; 8 – буронабивная свая; 9 – обратная засыпка; 10 – отмостка; 11 – бетонная или песчаная подготовка; 12 – граница промерзания грунта

Работы по разработке метода решения тепловых задач для обоснования конструкций теплоизолированных фундаментов выполнялись в период с 1999 года по 2004 год в ОАО институте «УралНИИАС» (Екатеринбург) группой ученых при участии авторов. Результаты исследований легли в основу двух научно-поисковых тем 2002-2003 гг., кандидатских диссертации в 2004 [7] и 2006 [17] годах, кроме того, в настоящее время исследования по данной тематике продолжены совместно с кафедрами «Материаловедение в строительстве» и «САПРОС» ФГАОУ ВПО «УрФУ» [8,16].

II. Постановка задачи

Для теплового прогноза состояния оснований зданий и сооружений в условиях сезонного промерзания грунтов, (например, при устройстве теплоизолированных фундаментов, позволяющих снизить глубину заложения до 0.5–1 м в любых природно-климатических условиях, не допустив опасного промерзания грунта ниже подошвы) требуется выполнить численный анализ температурных полей в грунте в процессе промерзания-оттаивания.

В настоящее время отсутствуют четкие рекомендации по выполнению тепловых расчетов промерзания-оттаивания грунта (нелинейных и нестационарных, с учетом фазовых переходов воды). При решении таких задач в двух- и трехмерной постановке компьютерными программами на основе МКЭ возникают трудности с постановкой задачи: заданием граничных условий, выбором расчетной схемы задачи и др.

Рассмотрим решение нестационарной и нелинейной тепловой задачи в двумерной постановке с использованием компьютерных программ расчета на основе метода конечных элементов, например, программы COSMOS/M.

Программа имеет достаточно универсальный характер и позволяет решать множество задач данного класса. Особенности конкретной задачи (конфигурация расчетной области, неоднородность по теплофизическим свойствам, граничные условия и т.п.) отражаются в исходной информации и не требуют изменения алгоритма решения. Тем не менее, среди перечисленных вопросов (применительно к задачам промерзания грунтов) есть принципиальные вопросы – способ задания краевых условий, конфигурация расчетной области и прочие, заслуживающие отдельного рассмотрения и анализа.

Была рассмотрена задача промерзания оголенной от снега и растительности поверхности (расчетная схема «*бесснежная поляна*»).

Расчетная схема «*бесснежная поляна*» – полупространство (в частном, двумерном случае – полуплоскость) из бесконечного по простиранию массива вещества, неоднородного по теплофизическим характеристикам, ограниченного сверху плоскостью (линией). Эта «поляна», как постулируется нормативами, свободна от снега и растительного покрова; на нее воздействуют: сверху – знакопеременный

тепловой поток от наружного воздуха и солнечной радиации, снизу – геотермальный поток, характеризующий влияние нижележащего массива грунта, с характерным для рассматриваемой местности температурным градиентом.

При задании исходных данных в программу теплотехнического расчета, прежде всего, необходимо ввести теплофизические характеристики грунтов. Так как учитывается нелинейная работа грунтов, требуются специальные приемы для задания исходных значений в компьютерную программу. Значения теплофизических величин для грунтов взяты по табл. Б.8 Приложения Б СП 25.13330.2012 (актуализированная версия СНиП 2.03.04-88) «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».

Нелинейность теплофизических свойств грунтов вызвана различием значений характеристик для талого и мерзлого состояний грунта. Диапазон температур, в пределах которого происходят фазовые переходы, находится в пределах от 0 °С до –3 °С (для глин и суглинков в среднем от 0 °С до –2 °С, а для песков от 0 °С до 0.2-0.5 °С).

При вводе исходных данных в программу расчета конкретные значения характеристик для талого и мерзлого состояния грунта трансформированы в непрерывные зависимости свойств грунта от температуры (т.к. программа расчета не воспринимает резких скачков и разрывов при задании таких функций). Например, для суглинка, с теплопроводностью $\lambda = 1.57/1.45$ Вт/(м·К) для мерзлого/талого грунта, зависимость теплопроводности от температуры показана на рис. 4.

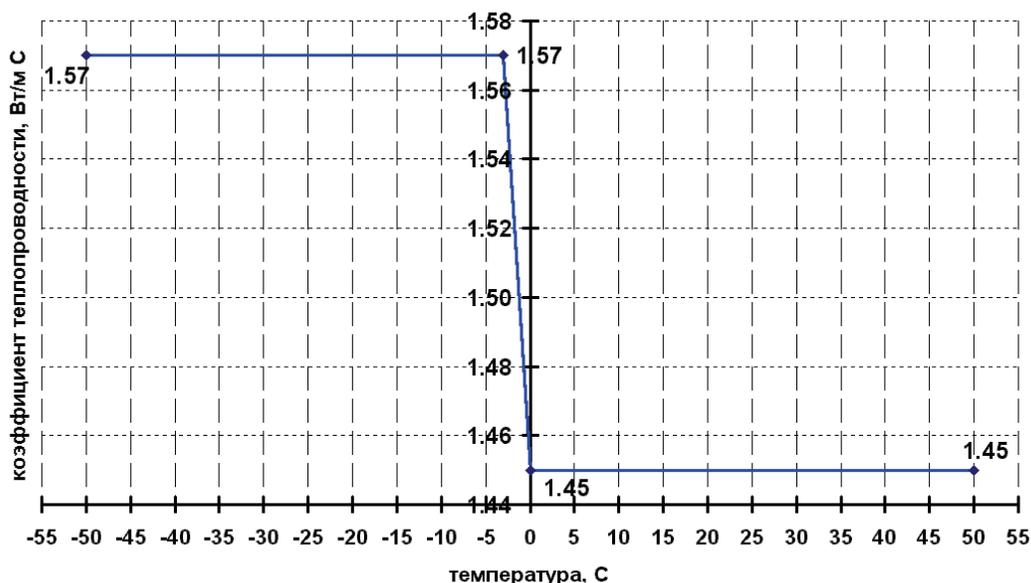


Рисунок 4. График зависимости теплопроводности грунта от температуры

Для теплоемкости грунта сохраняется нелинейность свойств; при этом для ввода значений теплоемкости в программу расчета использованы аналогичные принципы построения непрерывных зависимостей, описывающие изменения теплоемко-

сти грунта при изменении температуры. Кроме того, в предлагаемой методике расчетов принято, что все тепловыделения и теплопоглощения, связанные с фазовыми переходами воды, будут учтены при задании зависимости теплоемкости грунта от температуры. В этом случае на графике зависимости удельной теплоемкости от температуры появляется характерный скачок на интервале температур основных фазовых переходов от $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Количественно площадь скачка на графике равна удельной теплоте фазовых переходов объема жидкости в грунте.

III. Результаты

Выявлено, что различный диапазон задания фазовых переходов при постоянной площади под графиком (рис. 5) практически не влияет на температурные поля за пределами зоны фазовых переходов (выше и ниже ее по глубине грунта). Также он не влияет на глубину промерзания, т.к. размер зоны фазовых переходов при этом составляет не более 5-15 см (при промерзании грунта в естественных условиях).

Таким образом, основным фактором, влияющим на распределение температуры в грунте за пределами зоны фазовых переходов, будет площадь эпюры графика эффективной теплоемкости. Кроме того, существуют ситуации, связанные с наличием теплоизоляции в грунте (при теплоизоляции фундаментов, дорог и других заглубленных сооружений), для которых задание интервала фазовых переходов требует отдельного анализа: при промерзании под подошвой теплоизолированного фундамента возникает большая зона грунта в пластично-мерзлом состоянии с температурами от начала ($t_{\text{зам}}$) до окончания замерзания ($t_{\text{к}}$).

Заметим, что для реальных грунтов температура $t_{\text{зам}}$ несколько меньше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, нижняя граница диапазона фазовых переходов условно принята за температуру конца замерзания $t_{\text{к}}$ (при этой температуре в грунте уже не остается большого количества незамерзшей воды). Ниже для примера при известной влажности и плотности грунта определяется площадь эпюры участка графика имеющего характерный пик (график эффективной теплоемкости см. рис. 5).

Для построения графика удельной теплоемкости, выполнены следующие вычисления: масса воды в объеме грунта равна произведению его влажности на плотность сухого грунта $0.3 \times 1400 = 420\text{ (кг/м}^3\text{)}$.

Теплота фазовых переходов для вычисленной массы воды в объеме грунта:

$Q_{\text{ф.п.}} = 420 \times 3.35 \cdot 10^5 = 140.7\text{ МДж/м}^3$, где $3.35 \cdot 10^5\text{ Дж/кг}$ – удельная теплота фазовых переходов для воды. Площадь эпюры участка графика, имеющего характерный пик, равна: $140.7\text{ МДж/м}^3 / (1^{\circ}\text{C} \times 1400) = 100500\text{ Дж/(кг}^{\circ}\text{C)}$, где $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ – длина участка графика.

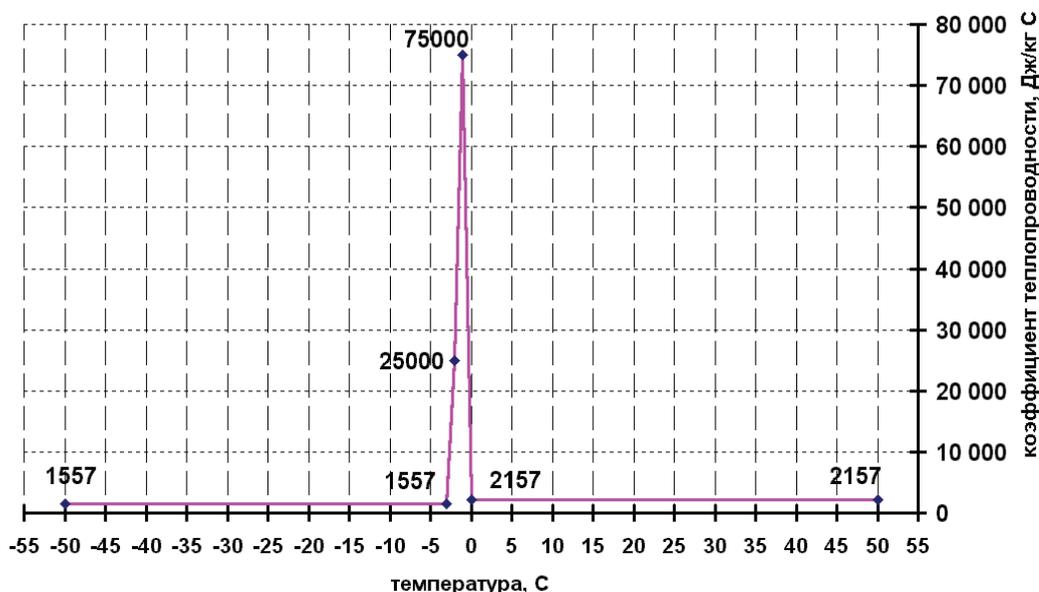


Рисунок 5. График зависимости удельной теплоемкости грунта от температуры, с учетом фазовых переходов воды содержащейся в объеме грунта

При вводе исходных данных в расчет значения температур воздуха по СП [9] также были трансформированы в непрерывные зависимости температуры от времени. Для примера, на рис. 6 показан график зависимости температуры воздуха от времени.

Графики изменения величины солнечной радиации в зависимости от времени года были построены по значениям суммарной солнечной радиации из [9, 10]. Общий вид графика, для Екатеринбурга, показан на рис. 7.

При выполнении расчетов учтено не суммарное значение солнечной радиации, а только поглощенная ее часть.

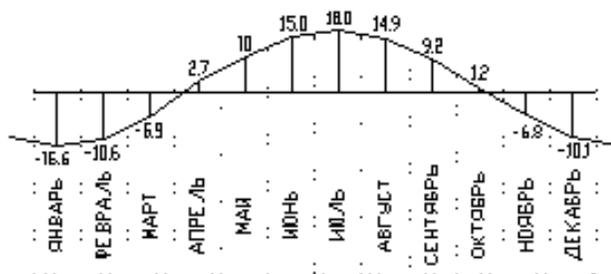


Рисунок 6. Кривая нормативной температуры наружного воздуха, Екатеринбург

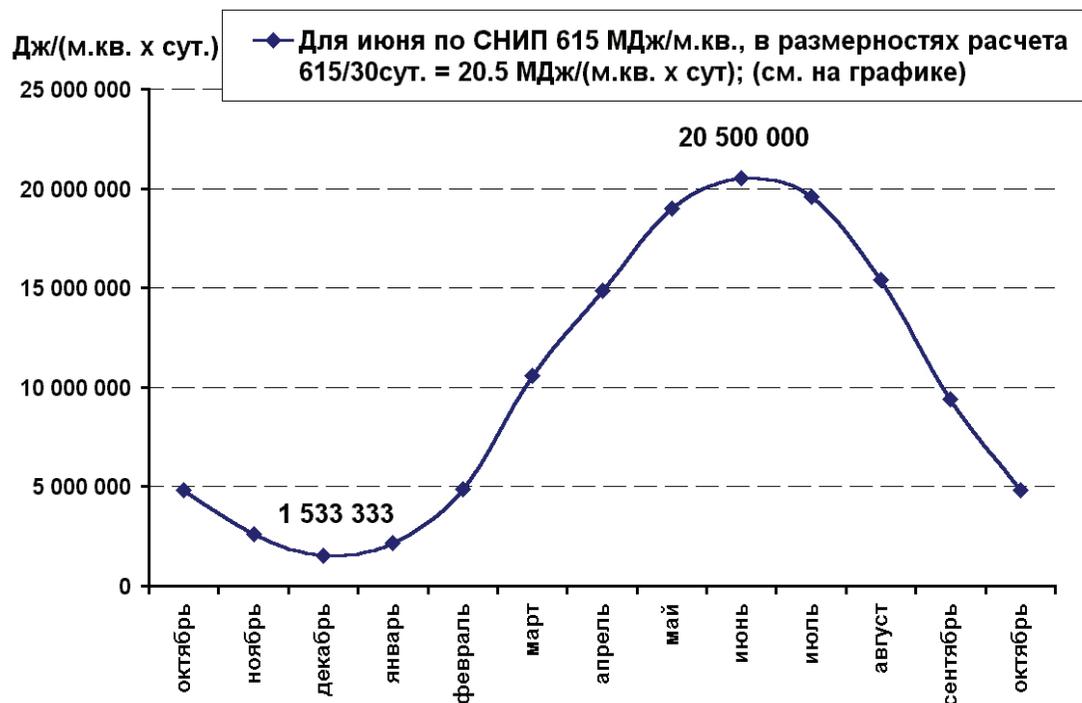


Рисунок 7. Зависимость изменения величины солнечной радиации от времени для города Екатеринбурга

Для расчета величины поглощенной радиации учитывалась характеристика отражательной способности земной поверхности (альбедо α_L). Средневзвешенное значение коэффициента отражения грунтом солнечной радиации (использованное в расчетах) принято равным $\alpha_L = 0.3$, а коэффициента поглощения – равным 0.7. Заметим, что если использовать в расчетах схему «бесснежная поляна», когда зимой снег расчищается, а летом удаляется какая-либо растительность с поверхности грунта, очевидно завышается рассчитываемая глубина промерзания.

Далее приводятся результаты анализа по определению оптимальной глубины расчетной зоны. Ставилась цель выявить, до какой глубины на результат решения тепловых задач влияют различные возмущающие факторы на поверхности и их сочетания, т.е. определить размеры расчетной зоны. Само понятие расчетной зоны (как оно здесь сформулировано выше) не является абсолютно точным и определенным, поскольку теоретически воздействие поверхности распространяется бесконечно глубоко. Для примера, задав на «гарантированной» глубине 50 м постоянную температуру, уже на 49-м метре, пусть даже немного, но температура будет изменяться: строго постоянной температура будет только на глубине 50 м. Следовательно, понятие расчетной зоны привязано к определенным допускам; она не задается абсолютно точно.

Численным анализом установлено, что глубина 15 м и задаваемое на ней краевое условие, обладают инвариантностью относительно верхних краевых условий задачи. Следовательно, расчетная глубина обеспечена доказательной

базой и выбрана правильно. Влияние возмущающих факторов приводилось к поверхности расчетной зоны. Однако возможны случаи, когда какие-либо возмущения действуют на определенной глубине от поверхности. При этом для нахождения глубины расчетной зоны необходимо к соответствующей глубине действия возмущающего фактора прибавить 15 м. Таким образом, такая расчетная глубина выбрана как универсальная нижняя граница, позволяющая корректно рассчитывать не только тепловые задачи с естественным температурным режимом на поверхности, но и заглубленные сооружения, подвалы и проч.

Формирование и динамика процессов сезонного промерзания грунтов определяются структурой радиационно-теплового баланса поверхности. Для изучения связи тепловых процессов в грунтах и горных породах с тепловыми процессами, протекающими на земной поверхности, необходимо рассматривать влияние всех составляющих радиационно-теплового баланса на температуру поверхности и подстилающих пород. Так, как в среднем за год теплосодержание слоя грунта в пределах глубины расчетной зоны не меняется (т.е. никакое количество тепла не накапливается и не вытекает из слоя), существует некий поток, влияющий на массив грунта как краевое условие снизу. На этом основании было составлено уравнение теплового баланса и на этой основе оценена степень влияния каждого источника тепла (радиации, геотермального тепла, потерь через конвекцию).

Расчетами выявлено, что температуры внизу расчетной зоны и величины теплового потока снизу мало отражаются на верхних слоях (например, на глубине промерзания), а геотермальный поток тепла почти не влияет на них. Этот фактор (тепловой поток снизу) следует считать малозначительным и задавать его в реальных расчетах можно обоснованно с точностью до порядка. В частности, величина такого теплового потока согласуется с понятием геотермальной ступени. Градиент температур в грунте в среднем составляет 20°C на 1000 м или $(0.02^{\circ}\text{C}/\text{м})$.

Таким образом, фактически равнозначно следующее:

а) Задавать на глубине 15 метров температуру 3 или 15°C . При задании граничного условия снизу через постоянную температуру на заданной глубине; менее предпочтительный способ задания граничного условия по сравнению с тепловым потоком.

б) Задавать соответствующий геотермальной ступени тепловой поток (с точностью до порядка, в зависимости от средней теплопроводности массива). Это является естественным «люфтом», практически не влияющим на тепловой баланс системы.

Соответственно, пытаться подобрать нужную температуру/поток на фиксированной глубине в зависимости от остальных исходных данных, т.е. решать обратную задачу, бесполезно.

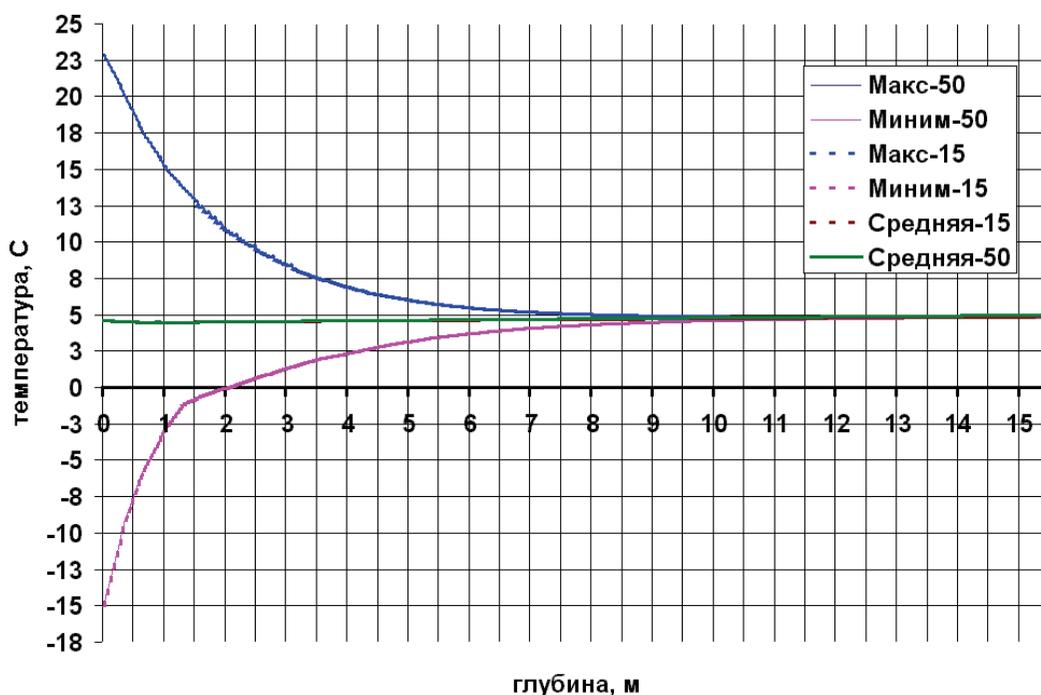


Рисунок 8. Общий вид графика среднегодовой температуры и ее амплитуды по глубине расчетной зоны, для Екатеринбурга, без учета возмущающих факторов

Решая с помощью компьютерных программ нестационарные тепловые задачи, требуется задать некую начальную температуру для каждого узла расчетной зоны близкую к предполагаемым реальным значениям. Разумеется, можно задать точные значения температур, полученные аналитически для конкретного случая.

Также рассмотрен и решен такой постановочный вопрос, как проблема задания начального распределения температур в массиве грунта. Предложено два способа назначения начального распределения температур. Например, при решении задачи, можно задать начальную температуру от 5 до 10⁰ С для всего массива грунта. После чего требуется произвести расчет большого числа годовых циклов. Практика показывает, что в течение 3-5 годовых циклов задача «сама» выходит на температурное распределение, характерное для грунта в естественных условиях залегания. Далее достаточно добавить рассчитываемую конструкцию и продолжить выполнение расчета.

Начальное распределение температур в грунте, близкое к реальному, также можно получить, составив уравнение теплового баланса для расчетного года и построив график среднегодовых температур в грунте (рис. 8).

Приведенные в статье подходы к решению тепловых задач промерзания-оттаивания грунта с помощью компьютерной программы COSMOS/M на основе метода МКЭ были использованы автором статьи для разработки и обоснования методики расчета теплоизолированных фундаментов на сезонно промерзающих грунтах УрФО, основные положения которой приведены ниже.

Очевидно, что проектированию должны предшествовать инженерно-геологические изыскания. Для жилых одноэтажных зданий индивидуальной застройки сведения о строении и характеристиках грунтов принимаются, как правило, по результатам ранее проведенных изысканий или обследований грунтов, изучения опыта строительства на соседних участках и др.

Строительство зданий и сооружений на теплоизолированных фундаментах предполагает организацию наблюдений за состоянием зданий в процессе строительства и последующей эксплуатации. В ходе наблюдений должна контролироваться глубина промерзания грунтов возле фундаментов, состояние термоизоляции, возможные деформации фундаментов и надземной части строений. В зарубежной практике строительства зданий и сооружений, возводимых на теплоизолированных фундаментах, предусматривается установка приборов для натуральных измерений температуры в массиве грунта возле фундаментов. Далее приведены основные элементы расчета и проектирования ленточного теплоизолированного фундамента:

1. Оценка пучинистости грунтов согласно СП 22.13330.2012
2. Назначение допустимой (безопасной) глубины промерзания
3. Расчет и проектирование

Согласно действующим нормативам грунты по степени морозоопасности, разделяют на пять групп: практически непучинистые, слабо- средне- сильно- и чрезмернопучинистые.

Существующий подход к оценке пучинистости грунтов и строительству на пучинистых грунтах характеризуется допусками на деформации пучения. Такой допуск имеет количественные границы (коэффициент пучения), в зависимости от типа здания.

Например, при коэффициенте пучения $f=0.01$ (практически непучинистые грунты) деформации пучения в Екатеринбурге составят 2 см на 2 м промерзания, т.е. фактически безопасную нормируемую величину деформаций: нормы разрешают при залегании в основании практически непучинистых грунтов заглубляться выше глубины сезонного промерзания.

Таким образом, можно заглубить фундамент выше глубины сезонного промерзания, но при этом специальными мероприятиями добиться такого уменьшения глубины, чтобы промерзание грунта ниже подошвы фундамента происходило в безопасных пределах.

Зная параметр пучения R_f , характеризующий степень морозоопасности грунта, можно определить коэффициент пучения грунта f , а также глубину промерзания, после чего вычислить итоговые деформации морозного пучения. При этом, снижается реальное проявление пучинистости в несколько раз (например, для сильнопучинистого грунта, за счет уменьшения глубины промерзания при использовании теплоизоляции), а конечная величина деформаций до 2 см (т.е. как для практически непучинистого грунта). Формально возникает ситуация, при которой можно уменьшить глубину заложения фундамента в совершенно безопасных пределах.

С другой стороны, не существует прямой пропорции между величиной пучения и глубиной промерзания (подобная зависимость различна для различных грунтов). Кроме того, при промерзании на небольшую глубину грунт себя ведет как более пучинистый, чем если он промерзает на большую глубину. Этот факт учитывается в проведенных исследованиях введением соответствующих коэффициентов в специальных теплотехнических расчетах.

Расчет и проектирование включает определение основных размеров и глубины заложения фундамента, определение осадки фундамента с учетом повышенной сжимаемости пенополистирола, назначение безопасной глубины промерзания и назначение параметров теплоизоляции.

На отметке заложения фундамента должны залегать грунты несущего слоя – любые грунты, кроме песчаных рыхлых, глинистых текучей консистенции, а также илов и торфов. При наличии на указанной глубине илов, торфов, глинистых грунтов текучей консистенции и рыхлых песков рекомендуется применение свайных фундаментов из забивных или набивных свай, стальных многосекционных трубчатых свай, искусственных оснований из втрамбованного щебня и др.

Для условий УрФО глубину заложения фундаментов-ростверков от поверхности планировки d_f рекомендуется принимать в пределах 0.5-1.0 м.

Предложен следующий Алгоритм расчета ленточного фундамента

1) Определение размеров и глубины заложения фундамента исходя из несущей способности грунта и пенополистирола:

$$P_{НОРМ} < N_{ГР}; \quad (1)$$

$$P_{РАСЧ} < R_{ПР}, \quad (2)$$

где P – среднее давление по подошве фундамента, тс/м² (кПа)

$N_{ГР}$ – несущая способность грунта (II-я критическая нагрузка), тс/м² (кПа)

$R_{ПР}$ – расчетное сопротивление пенополистирола, тс/м² (кПа)

Ширина ленточного фундамента $b_{Ф}$, в м, определяется по формулам:

$$b_{Ф} = n / N_{ГР}; \quad (3)$$

$$b_{Ф} = n / R_{ПР}, \quad (4)$$

где n – расчетная нагрузка на 1 м длины ленточного фундамента, тс/м (кН/м).

Нагрузка n рассчитывается по грузовым («тяготеющим») площадям. Для одноэтажных зданий нагрузка n составляет 5-7 тс/м (50-70 кН/м). Меньшие значения нагрузок соответствуют домам с кирпичными стенами толщиной 64 см (или меньшей толщины, но с эффективным утеплителем), высотой до 4 м и одним

железобетонным перекрытием; бóльшие значения – домам с двумя железобетонными перекрытиями (над фундаментом и над помещением). Для двухэтажных зданий нагрузки возрастают в среднем в 1.8 раза. Указанные нагрузки следует принимать для предварительных расчетов; нагрузки подлежат уточнению в зависимости от конкретных размеров грузовых площадей; фактической толщины стен, размеров оконных и дверных проемов, материалов и схемы опирания перекрытий, конструкции кровли и проч.

2) Определение осадки фундамента с учетом повышенной сжимаемости теплоизоляционного материала. Пенополистирол имеет модуль деформации E_{BK} , отличный от модуля деформации материала фундамента. Осадка фундамента, вычисляемая с учетом сжимаемости материала утеплителя, не должна превышать нормируемой предельной допустимой:

$$S \leq S_{\text{ПРЕД}}, \quad (5)$$

где S – осадка фундамента с учетом повышенной сжимаемости материала утеплителя, см, определяемая по формуле (6)

$$S = S_{\text{СР}} \frac{E_{BK} + K_0 H_{BK}}{E_{BK}}, \quad (6)$$

где $S_{\text{СР}}$ – осадка фундамента без учета сжимаемости утеплителя, см;
 K_0 – коэффициент жесткости грунтового основания ($P_{\text{СР}}/S_{\text{СР}}$), МПа/м;
 E_{BK} – модуль деформации пенополистирола, МПа;
 H_{BK} – толщина пенополистирола, м.

3) Определение безопасной глубины промерзания $H_{[\text{ДОП}]}$, исходя из оценки пучинистости грунта с учетом допусков на деформации:

$$h_{\text{ПУЧ}} < h_{[\text{ДОП}]}; \quad (7)$$

где $h_{\text{ПУЧ}}$ – величина морозного пучения, см;
 $h_{[\text{ДОП}]}$ – допустимая величина морозного пучения с учетом конструктивных особенностей сооружения, см.

4) Назначение параметров теплоизоляции и обеспечение условия:

$$H_{\text{РАСЧ}} < H_{[\text{ДОП}]}, \quad (8)$$

т.е. расчетная глубина промерзания $H_{\text{РАСЧ}}$ не должна превышать безопасную (допустимую) глубину промерзания $H_{[\text{ДОП}]}$ (определенную по п. 3 предлагаемого алгоритма расчета).

Основные параметры утепления следующие: ширина $b_{из}$ и толщина $h_{из}$ теплоизолирующего элемента, факт наличия или отсутствия основной (базовой) и дополнительной засыпки (рисунок 9). Эти параметры следует принимать по таблицам 1-2 в зависимости от глубины заложения фундамента в грунт $d_{ф}$, характеристики пучинистости грунта f , а также от параметра местности – суммы отрицательных градусо-суток. Для справки в таблице 3 приведены выборочные значения сумм отрицательных градусо-суток для различных городов.

Базовую теплоизолирующую засыпку предлагается выполнять с вылетом на 600 мм за грань фундаментной подушки и высотой, равной глубине заложения фундамента $d_{ф}$ – по условиям производства работ. Дополнительная засыпка полезна из-за экономии пенопласта; она выполняется высотой, равной глубине заложения фундамента $d_{ф}$ и средним вылетом около 600 мм (см. рисунок 9). В качестве материала теплоизолирующей засыпки возможно применение керамзитового гравия, различных шлаков, отходов деревообрабатывающей промышленности и др.

Приведенные в таблицах 1-2 параметры теплоизолированных фундаментов получены по программе расчета теплоизолированного фундамента (на основе компьютерной программы «Cosmos/m») для средних значений теплофизических характеристик талых и мерзлых грунтов. Данные таблиц 1 и 2 относятся к регионам с параметром местности равным соответственно 1600 и 2400 градусо-суток.

Значения параметра местности равное 2400 градусо-суток принятое в таблице 2 является предельным для сезоннопромерзающих грунтов. В случае, если подбор теплоизоляции производится для регионов с параметром местности больше чем 1600, но менее 2400, толщину пенополистирола и теплофизические свойства засыпки необходимо определять по интерполяции с использованием таблиц 1-2, а также с учетом толщины плит экструдированного пенополистирола у конкретного производителя.

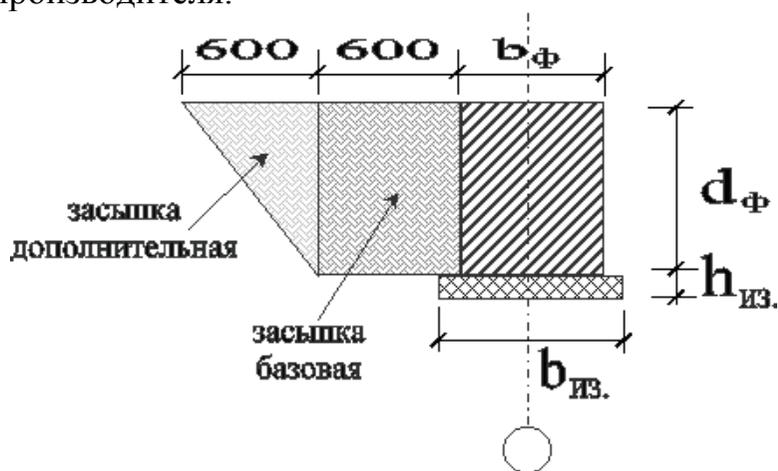


Рисунок 9. Схема к расчету теплоизолированного фундамента
 $b_{ф}$ и $d_{ф}$ – соответственно ширина и глубина заложения фундамента;
 $b_{из}$ и $h_{из}$ – ширина и толщина теплоизолирующего элемента

Таблица 1. Параметры теплоизолированных фундаментов (для суммы отрицательных градусо-суток 1600)

Глубина заложения, м	Параметры фундамента		Степень пучинистости грунта				
			Пучинистый		Среднепучинистый		Непучинистый
d _ф = 0.5	b _{из} , см		b _ф + 20		b _ф + 20		b _ф + 10
	h _{из} , см		5		5		3
	Засыпка, Вт/м °С	базовая	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3
		дополнительная	-		-		-
d _ф = 1.0	b _{из} , см		b _ф + 20		b _ф + 20		b _ф
	h _{из} , см		5		5		3
	Засыпка, Вт/м °С	базовая	0.2	0.3	0.3	-	-
		дополнительная	-		-		-

Таблица 2. Параметры теплоизолированных фундаментов (для суммы отрицательных градусо-суток 2400)

Глубина заложения, м	Параметры фундамента		Степень пучинистости грунта				
			Пучинистый		Среднепучинистый		Непучинистый
d _ф = 0.5	b _{из} , см		b _ф + 20		b _ф + 20		b _ф + 20
	h _{из} , см		10		10		7
	Засыпка, Вт/м °С	базовая	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2
		дополнительная					-
d _ф = 1.0	b _{из} , см		b _ф + 20		b _ф + 20		b _ф + 10
	h _{из} , см		10		10		5
	Засыпка, Вт/м °С	базовая	0.2	-	0.2	0.3	-
		дополнительная			-		-

Таблица 3. Параметр местности для различных городов

П/П	Город	Сумма отрицательных градусо-суток
1	Пермь	1645
2	Екатеринбург	1685
3	Курган	1940
4	Ивдель	2100
5	Тобольск	2120
6	Омск	2145
7	Новосибирск	2170
8	Ханты-Мансийск	2400

В случае, если необходимо подобрать параметры утепления фундамента при глубине заложения, отличной от 0.5 и 1.0 м (таблицы 1 и 2), необходимо:

- при глубине заложения $d_{\text{ф}} < 0.8$ м использовать табличные значения параметров теплоизоляции (таблицы 1 и 2), соответствующие глубине заложения $d_{\text{ф}} = 0.5$ м;
- при глубине заложения фундамента $d_{\text{ф}} > 0.8$ м, необходимо использовать табличные значения параметров теплоизоляции (таблицы 1 и 2) для глубины заложения $d_{\text{ф}} = 1$ м.

Данные таблиц 1 и 2 относятся к поверхностным ленточным фундаментам, для фундаментов других типов параметры утеплителя должны устанавливаться согласно теплотехническому расчету. В случае, если в доме будет создана положительная температура до наступления зимнего сезона (при строительстве без перехода «через зиму»), дополнительное утепление со стороны фундамента, обращенной внутрь дома, не требуется.

В качестве фундаментов применяются монолитные железобетонные плиты, расположенные на поверхности грунта, под плиты выполнена щебёночная подготовка толщиной 300 мм, а также теплоизоляция экструзионным пенополистиролом «Экстрол» по периметру наружных стен и в цокольной части. Существенным обстоятельством является то, что размеры теплоизоляции в угловых участках фундаментов должны приниматься удвоенной ширины, на длине не менее 1.5 м с каждой стороны краев фундамента.

Для примера, решения по теплоизоляции фундаментов материалом «Экстрол» в варианте дома без подвала и с подвалом – показаны на рисунках 10 и 11.

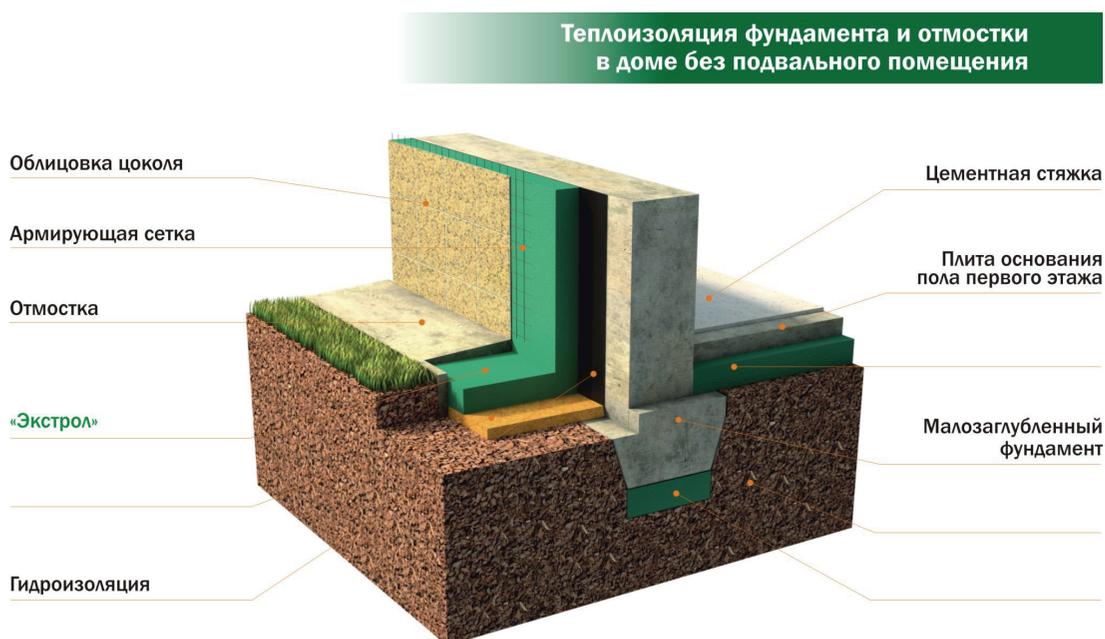


Рисунок 10.



Рисунок 11.

IV. Выводы

Полученные результаты исследований имеют прикладную направленность и были апробированы при ремонте и строительстве жилых и промышленных зданий. При участии авторов [2] и [5] конструкции теплоизолированных фундаментов нашли применение на ряде объектов строительства. Наиболее сложные и интересные: строительство комплекса жилых деревянных домов (Санкт-Петербург 2000 г.); строительство 3-4 этажного гаража для автомашин личного пользования с паркингом (Екатеринбург, 2001 г.); реконструкция 2-х этажного общественного здания, получившего повреждения в результате промерзания грунтов, проведено утепление фундаментов (Екатеринбург, 2002 г.); строительство 2-х этажной котельной (пос. Шабры, Екатеринбург, 2003 г.); Строительство коттеджного поселка на 180 домов в р.п. Верхнее-Дуброво вблизи Екатеринбурга в 2004-2006 гг.

На данных объектах в 2001-2002 и в 2004-2011 годах были проведены натурные эксперименты по измерению температур под подошвой фундаментов (в рамках научно-технического сопровождения строительства). Кроме того, технические решения по устройству теплоизолированных фундаментов в 2013-2014 годах реализованы на ряде объектов на стадии проектирования, как альтернатива другим техническим решениям на основе технико-экономической оценки различных вариантов.

Практическая реализация результатов исследовательской работы обеспечивается разработанными территориальными строительными нормами ТСН 50-302-02 «Проектирование оснований и фундаментов строящихся и реконструируемых зданий и сооружений в г. Ханты-Мансийске», которые регламентируют

этапы проектирования и строительства малозаглубленных теплоизолированных фундаментов для малоэтажных домов.

Литература

- 1 Design guide for frost-protected shallow foundations / U.S. Department of Housing and Urban Development, Office of Policy Development and Research -1994.– 46 p.
- 2 Веселов В.В., Зобова М.В. Анализ конструктивных решений узла утепления цоколя с применением экструзионного пенополистирола «ЭКСТРОЛ» // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2007, №10. С.32-35. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.extrol.org/articles/id-4.html>.
- 3 Конструкции из полистиролбетона для строительства жилых зданий. / Носков А.С., Беляков В.А. // Жилищное строительство. Москва, 2008. № 5. С. 24-25.
- 4 Патент RU № 2135693, МКИ 6 E 02 D 27/01, 27/35. Теплоизолированный фундамент /В.В. Лушников и Ю.Р. Оржеховский. – Оpubл. 27.08.99, Бюл. № 24. – 12 с.
- 5 Лушников В.В., Оржеховский Ю.Р. и др. Поверхностные фундаменты для малоэтажных домов. // Стройкомплекс Среднего Урала, 1999, № 11. С. 20-22.
- 6 Пат. 2237780 МКИ 7 E 02 D 27/01, 27/35. Теплоизолированный фундамент / В.В. Лушников, Ю.Р. Оржеховский, В.В. Веселов.– № 2002118813/03; Заявл. 12.07.2002; Оpubл. 27.01.2004; RU БИПМ № 3.
- 7 Веселов В.В. Методика расчета теплоизолированных фундаментов на сезонно промерзающих грунтах: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02.– Пермь, 2004.– 24 с.
- 8 Веселов В.В., Беляков В.А. Секреты «теплого фундамента» Новый уральский строитель. Екатеринбург, 2011. № 9-10 (114). С.53-60.
- 9 СП 131.13330.2012 (актуализированная версия СНиП 23-01-99*). Строительная климатология / Минрегион России.– М.: Минрегион России, 2013. – 140 с.
- 10 Пособие к СНиП 23-01-99* Строительная климатология / Госстрой России.– М.: ГУР ЦПП, 2003.– 86 с.
- 11 Альбом технических решений для массового применения (Раздел 1 «Стены и фундаменты, шифр 05-1061/5-091», Раздел 2 «Кровля и полы, шифр 05-1061/5-02», Раздел 3 «Стены, кровля, полы цокольных и парковочных этажей», шифр 05-1061/5-03».) с теплоизоляцией на основе экструзионной плиты утепления «Экстрол» марок 35..45 по ТУ 2244-001-77909577-2005». ОАО институт «УралНИИАС», Екатеринбург,

- 2006 г. [Электронный ресурс]. Системные требования: WinRar. URL: http://www.extrol.org/certificat_files/file_20100121165545_e3c81f.rar.
- 12 American Society of Civil Engineers, SEI/ASCE 32-01, Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundations, 2001. <http://www.PUBS.ASCE.org>.
 - 13 Morris, Richard A., Frost-Protected Shallow Foundations: Current State-of-the-Art and Potential Application in the U.S. Prepared for Society of the Plastics Industry, Inc. <http://www.nahb.org/generic.aspx?genericContentID=3326>.
 - 14 Протокол испытаний № 225 от 25.12.2001. НИИСФ РААСН. Испытательная лаборатория теплофизических и акустических измерений.
 - 15 Crandell, Jay H., Peter M. Steurer, and William Freebome. Demonstration, Analysis, and Development of Frost Protected Shallow Foundations and Freezing Index Climatology for Residential Construction Applications in the United States. Proceedings of the 7th International Cold Regions Engineering Specialty Conference. Edited by D.W. Smith and D.C. Sego. Canadian Society for Civil Engineering, Montreal Quebec, (1994).
 - 16 Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчета / Инженерно-строительный журнал. Санкт-Петербург: СпбГПУ, 2011, № 8 (26). С.13-18.
 - 17 Сальников В.Б. Разработка и исследование системы повышения теплозащиты газозолобетонных панельных стен с отделкой каменными дроблеными материалами на Среднем Урале: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01.– Екатеринбург, 2006.– 24 с