

Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчёта

*К.т.н., начальник отдела В.В. Веселов**,
ОАО «Уральский научно-исследовательский институт архитектуры и строительства»;
к.т.н., старший преподаватель В.А. Беляков,
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина»

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

Теплоизолированный малозаглубленный фундамент получил за рубежом специальное название – морозозащищенный фундамент мелкого заложения (МФМЗ), или, в оригинале, frost-protected shallow foundation (FPSF) [1,2,3,4].

По такой технологии построено несколько миллионов квадратных метров индивидуального жилья, в основном 1-2-этажного. Все строительство считается *экспериментальным* – 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 и из 30-55-летних наблюдений 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 [5,6,7].

Конструкция МФМЗ 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.

В данной 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 тепловой задачи.

Работы по разработке метода решения тепловых задач для обоснования конструкций теплоизолированных фундаментов выполнялись в период с 1999 года по 2004 год в ОАО «УралНИИАС» (Екатеринбург) группой ученых – авторов патентов РФ на изобретение [8,9,10]. Результаты исследований легли в основу двух научно-поисковых тем 2002-2003 гг., кандидатской диссертации в 2004 году [11], кроме того, в настоящее время исследования по данной тематике продолжены совместно с кафедрой «Материаловедение в строительстве» ФГАОУ ВПО «УрФУ» [12].

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 простирающему 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. 3 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°C до -3°C (для глин и суглинков в среднем от 0°C до -2°C, а для песков от 0°C до 0.2-0.5°C).

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. 1.

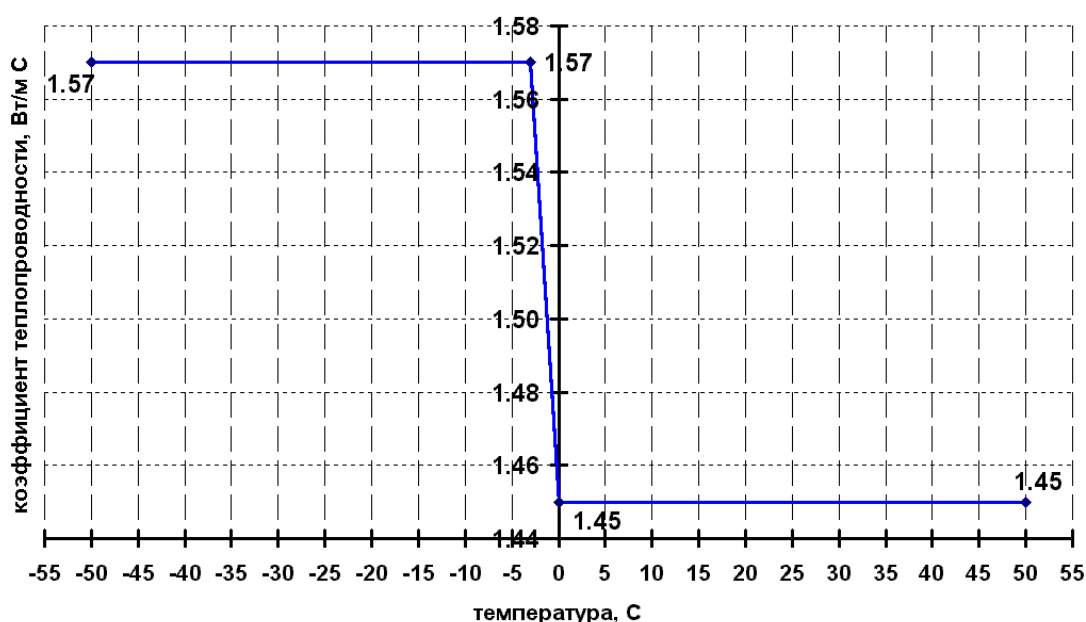


Рисунок 1. График зависимости теплопроводности грунта от температуры

Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчёта

Для теплоемкости грунта сохраняется нелинейность свойств; при этом для ввода значений теплоемкости в программу расчета использованы аналогичные принципы построения непрерывных зависимостей, описывающие изменения теплоемкости 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°C до 0°C . Количественно площадь скачка на графике равна удельной теплоте фазовых переходов объема жидкости в грунте.

Выявлено, что различный диапазон задания фазовых переходов при постоянной площади под графиком (рис. 2) 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°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. 2).

Для построения графика удельной теплоемкости выполнены следующие вычисления: масса воды в объеме грунта равна произведению его влажности на плотность сухого грунта $0.3 \times 1400 = 420$ (кг/м³).

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 $3.35 \cdot 10^5$ Дж/кг – удельная теплота фазовых переходов для воды.

Площадь эпюры участка графика, имеющего характерный пик, равна:

$$140.7 \text{ МДж/м}^3 / (1^{\circ}\text{C} \times 1400) = 100500 \text{ Дж}/(\text{кг}^{\circ}\text{C}),$$

где 1°C – длина участка графика.

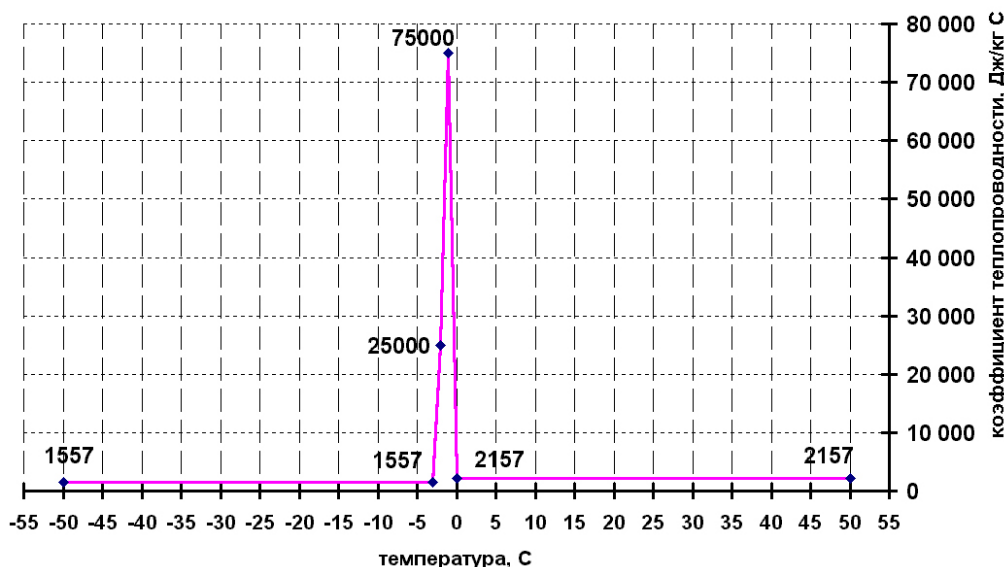


Рисунок 2. График зависимости удельной теплоемкости грунта от температуры с учетом фазовых переходов воды, содержащейся в объеме грунта

Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчёта

При вводе исходных данных в расчет значения температур воздуха по СНиП 2.01.01-82 «Строительная климатология и геофизика» также были трансформированы в непрерывные зависимости температуры от времени. Для примера, на рис. 3 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 СНиП 2.01.01-82 и пособия к нему. Общий вид графика для Екатеринбурга показан на рис. 3.

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

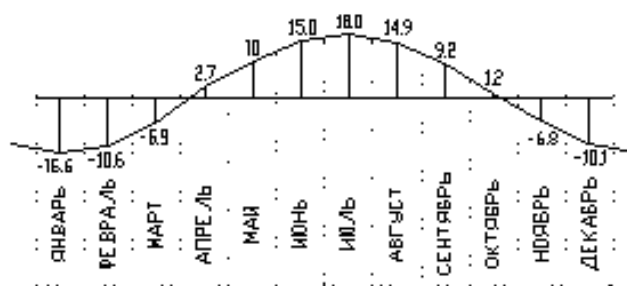


Рисунок 3. Кривая нормативной температуры наружного воздуха, Екатеринбург

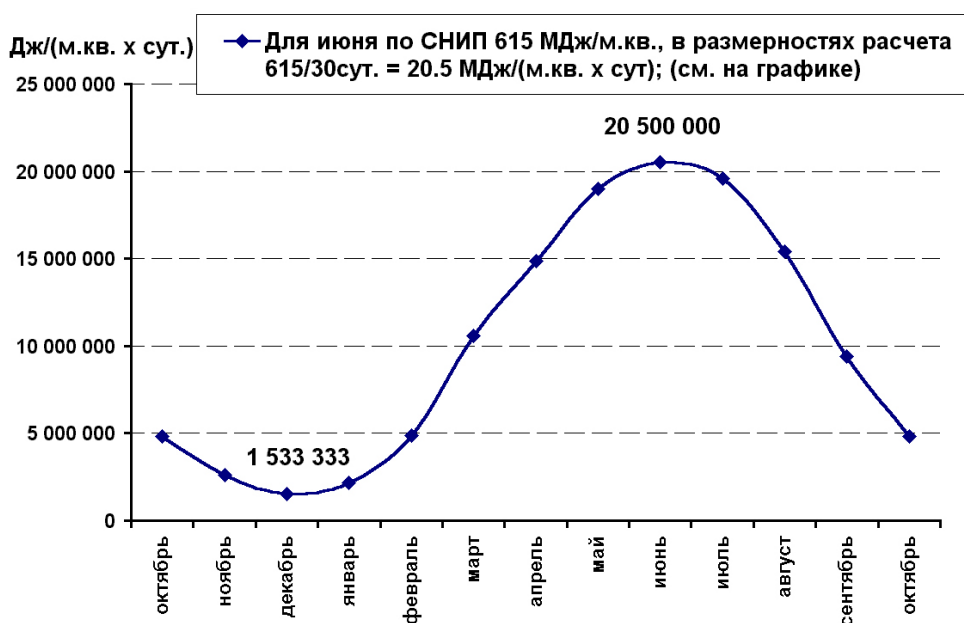


Рисунок 4. Зависимость изменения величины солнечной радиации от времени для Екатеринбурга

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, Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчёта

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-теплого 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-теплого 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, потеря 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 равнозначны следующие варианты.

1. Задавать на глубине 15 метров температуру 3°C 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.

2. 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.

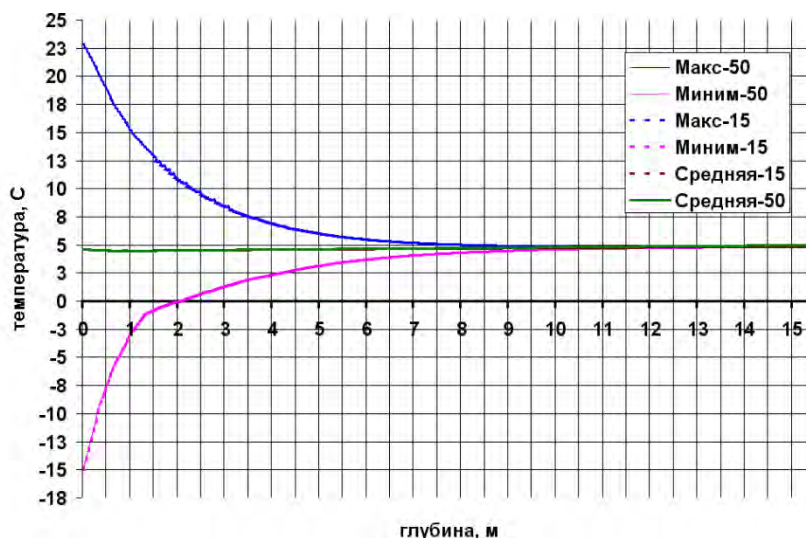


Рисунок 5. Общий вид графика среднегодовой температуры и ее амплитуды по глубине расчетной зоны без учета возмущающих факторов, Екатеринбург

Решая с помощью компьютерных программ нестационарные тепловые задачи, необходимо задать некую начальную температуру, близкую к предполагаемым реальным значениям, для каждого узла расчетной зоны. 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°C до 10°C 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. 5).

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.

Практическая реализация результатов исследовательской работы обеспечена разработанными альбомом технических решений [13] и 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. Standard No. 032-01. Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundations / American Society of Civil Engineers. 2001. 36 p.
3. Morris Richard A. Frost-Protected Shallow Foundations: Current State-of-the-Art and Potential Application in the U.S. [Электронный ресурс] / Prepared for Society of the Plastics Industry, Inc. URL: <http://www.nahb.org/generic.aspx?genericContentID=3326> (Дата обращения: 08.12.2011).
4. Crandell Jay H., Steurer Peter M., Freebome William. Demonstration, Analysis, and Development of Frost Protected Shallow Foundations and Freezing Index Climatography for Residential Construction Applications in the United States // Proceedings of the 7th International Cold Regions Engineering Specialty Conference. Montreal Quebec, 1994. Pp. 64-74.
5. 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.
6. Носков А. С., Беляков В. А. Конструкции из полистиролбетона для строительства жилых зданий // Жилищное строительство. 2008. № 5. С. 24-25.
7. Беляков В. А., Королева М. А., Аузинь И. А. Экономические аспекты решения теплотехнических проблем в современном строительстве // Проблемы и перспективы экономического развития России: инновации, финансирование, управление производством: Сборник научных трудов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. С. 270-272.
8. Патент RU № 2135693, МКИ 6 E 02 D 27/01, 27/35. Теплоизолированный фундамент / В.В. Лушников и Ю.Р. Оржеховский. Опубл. 27.08.99, Бюл. № 24. 12 с.
9. Лушников В. В., Оржеховский Ю. Р. и др. Поверхностные фундаменты для малоэтажных домов // Стройкомплекс Среднего Урала. 1999. № 11. С. 20-22.
10. 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; Опубл. 27.01.2004; RU БИПМ №3.
11. Веселов В. В. Методика расчета теплоизолированных фундаментов на сезонно промерзающих грунтах: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. Пермь, 2004. 24 с.
12. Веселов В. В., Беляков В. А. Секреты «теплого фундамента» // Новый уральский строитель. 2011. № 9-10 (114). С. 53-60.
13. Альбом технических решений для массового применения с теплоизоляцией на основе экструзионной плиты утепления «Экстрол» марок 35..45 по ТУ 2244-001-77909577-2005» [Электронный ресурс] / ОАО институт «УралНИИАС». Екатеринбург, 2006. URL: http://www.extrol.org/sertificat_files/file_20100121165545_e3c81f.rar. (Дата обращения: 08.12.11)

**Владимир Вячеславович Веселов, Екатеринбург, Россия
Тел. моб.: +7(902) 270-00-88; эл. почта: 9022700088@mail.ru*

Веселов В.В., Беляков В.А. Теплоизолированный малозаглубленный фундамент: работа в сезонно-промерзающих грунтах и практика теплового расчёта