

УДК 691.322

*НАЗИРОВ РАШИТ АНВАРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
nazirovra@gmail.com*

ВОЛКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ, аспирант,

volkov-sasha@yandex.ru

*Инженерно-строительный институт,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОЕМОКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Приведены расчеты составов бетонов с энергоэффективным заполнителем в виде инкапсулированной воды и водными растворами солей – отходами аффинажного производства. Определены плотность, теплоемкость и теплопроводность бетонов с разной объемной долей заполнителя. Показано влияние теплоемкого заполнителя на основные теплофизические свойства бетонов с матрицей из тяжелого и легкого бетонов. Экспериментальным путем установлена теплоемкость водных растворов солей, которая составила не менее 3 кДж/кг·°С.

Ключевые слова: теплоемкие бетоны; теплоемкий заполнитель; расчет составов; теплофизические свойства; аккумуляция тепла.

RASHIT A. NAZIROV, DSc, Professor,

nazirovra@gmail.com

ALEKSANDR N. VOLKOV, Research Assistant,

volkov-sasha@yandex.ru

*Civil Engineering Institute, SibFU,
82, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia*

THEORETICAL CALCULATION OF THERMAL PROPERTIES OF CEMENT CONCRETES WITH THERMAL STORAGE AGGREGATE

The paper presents calculations of concrete compositions with energy-efficient aggregate in the form of encapsulated water with its various volume contents. Density, heat capacity and thermal conductivity of concretes are determined with the various volume ratio of thermal storage aggregate. The influence of thermal storage aggregate on basic thermal properties of cement concretes with heavy and light concrete matrix is shown herein. Heat capacity of 3 kJ/kg·°C for aqueous solution of salts was obtained experimentally.

Keywords: thermal storage concrete; thermal storage aggregate; composition calculations; thermal properties; heat accumulation.

Для повышения комфорта в помещении и снижения энергоёмкости строительных систем актуальной является оценка эффективности составов бетонов с использованием теплоемкого заполнителя и материалов с переменным фазовым состоянием. Применение таких материалов направлено на регу-

лирование некоторых показателей, таких как сдвиг по фазе и амплитуда колебания температур на поверхности и в объеме материала. Это позволяет нивелировать экстремальные значения температур, накапливать тепловую энергию и тем самым экономить электрическую и тепловую энергию [1]. В качестве примера в статье представлен расчет и результаты теоретических исследований составов бетонов с энергоэффективным заполнителем в виде инкапсулированной воды и водных растворов солей с различным объемным содержанием. Применение инкапсулированных водных растворов солей позволяет значительным образом понизить температуру замерзания воды без существенного уменьшения теплоемкости заполнителя.

Составы бетонов обычно рассчитывают по абсолютным объемам. Расчетную величину плотности бетона ρ , содержащего менее плотный, но имеющий большую теплоемкость заполнитель, можно определить как сумму плотностей растворной части и заполнителя, умноженных на соответствующие объемные доли их содержания в 1 м^3 бетона:

$$\rho = \rho_m \cdot \varphi_m + \rho_L (1 - \varphi_m), \quad (1)$$

где ρ_m – плотность затвердевшей растворной части бетона, в которой распределен заполнитель; ρ_L – плотность теплоемкого заполнителя; φ_m – объемная доля растворной части в бетоне.

Теплоемкость бетона можно рассчитать по формуле [2, 3]

$$\rho \cdot C = \sum_i \left(\frac{\lambda_i}{\alpha_i} \varphi_i \right), \quad (2)$$

где λ_i , α_i и φ_i – соответственно теплопроводность, температуропроводность и объемная доля i -х компонентов бетона.

Таким образом, зная расчетную плотность бетона ρ , теплоемкости растворной части c_m и заполнителя c_L , его теплоемкость C можно рассчитать по формуле

$$C = c_m \frac{\rho_m}{\rho} \varphi_m + c_L \frac{\rho_L}{\rho} (1 - \varphi_m). \quad (3)$$

Наиболее трудно прогнозируется теплопроводность бетонов. Основной причиной является сложность многокомпонентной структуры, формирующейся в процессе изготовления и твердения бетона, зависящей от специфики технологий производства и твердения материала. Имеется множество публикаций по расчету теплопроводности многокомпонентных твердых систем, анализ которых проведен нами в исследовании [4].

Максимальную и минимальную теплопроводность бетона как системы, состоящей из двух компонентов – раствора и крупного заполнителя, можно рассчитать, применяя метод электроанalogии так, как если бы растворная часть и заполнитель располагались послойно вдоль или поперек направления теплового потока:

$$\lambda_{\max} = \lambda_m \cdot \varphi_m + \lambda_L (1 - \varphi_m), \quad (4)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{\lambda_m \cdot \lambda_L}{\varphi_m \cdot \lambda_L + \lambda_m (1 - \varphi_m)}. \quad (5)$$

Совершенно очевидно, что максимальное значение теплопроводности получается при расположении этих слоев вдоль направления теплового потока, формула (4), а минимальное – поперек, формула (5).

Для ориентировочных расчетов эффективной теплопроводности λ нами принята средняя величина между значениями, рассчитанными по формулам (4) и (5):

$$\lambda = \frac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}. \quad (6)$$

В результате проведенных теоретических расчетов, согласно приведенным выше формулам, получены графики изменения плотности, теплоемкости и теплопроводности цементных бетонов с матрицей из тяжелого бетона в зависимости от объемной доли заполнителя в виде обыкновенной воды (рис. 1). В расчете использованы справочные значения теплоемкости и теплопроводности бетонов: для матрицы из тяжелого бетона – $c_m = 840$ Дж/кг·°С, $\lambda_m = 1,5$ Вт/м·°С, $\rho_m = 2400$ кг/м³; для матрицы из легкого бетона – $c_m = 840$ Дж/кг·°С, $\lambda_m = 0,4$ Вт/м·°С, $\rho_m = 600$ кг/м³ и воды $c_L = 4180$ Дж/кг·°С, $\lambda_L = 0,6$ Вт/м·°С, $\rho_L = 998$ кг/м³.

Хорошо видно, что изменяя объемную долю теплоемкого заполнителя от 10 до 90 %, можно значительно увеличить теплоемкость бетонов с 990 до 3500 Дж/кг·°С при одновременном снижении плотности с 2260 до 1130 кг/м³ и теплопроводности с 1,36 до 0,64 Вт/м·°С.

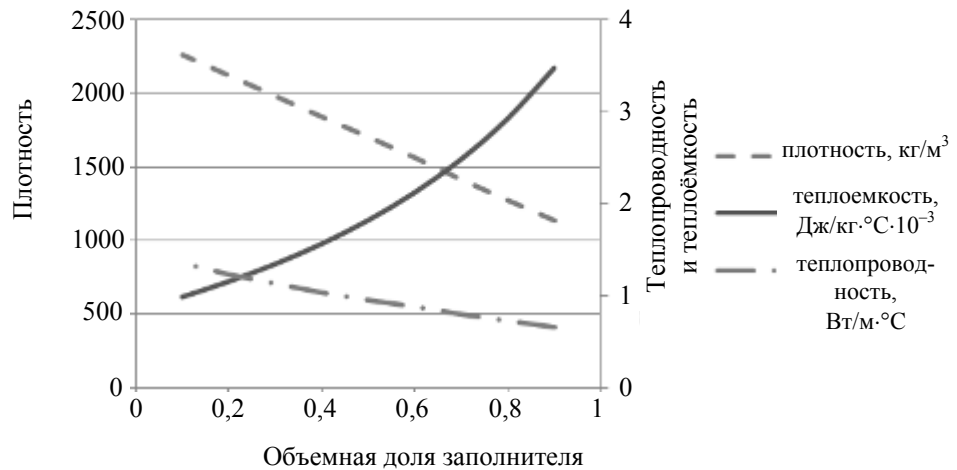


Рис. 1. Изменение плотности, теплопроводности и теплоемкости бетонов с матрицей из тяжелого бетона плотностью 2400 кг/м³

Для теплоемких бетонов с матрицей из легкого бетона наблюдается обратная связь, как это видно на рис. 2. С увеличением доли более плотного

и теплопроводного заполнителя от 10 до 90 % плотность бетона увеличивает-ся от 640 до 960 кг/м³, а теплопроводность с 0,4 до 0,6 Вт/м·°С, одновременно повышается и теплоемкость от 1361 до 3971 Дж/кг·°С.

Следует отметить, что теплоемкость бетона с матрицей из тяжелого бе-тона увеличивается в 3,51 раза, а с матрицей из легкого – только в 2,92 раза. Теплопроводность и плотность бетонов с матрицей из тяжелого бетона уменьшается в 2 раза, а с матрицей из легкого они увеличиваются.

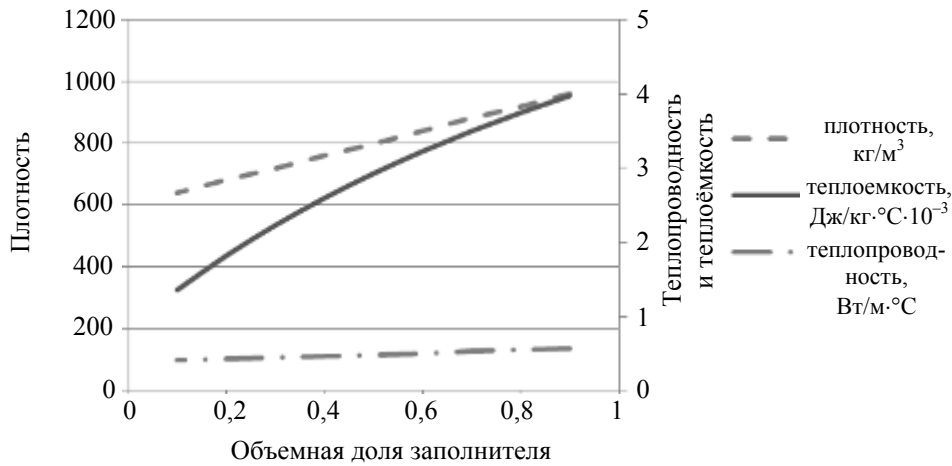


Рис. 2. Изменение плотности, теплопроводности и теплоемкости бетонов с матрицей из легкого бетона плотностью 600 кг/м³

На рис. 3 хорошо видно, что удельное количество тепла, накопленное при нагреве разработанными составами, меньше, чем у воды, однако значи-тельно больше рядовых составов тяжелых и легких бетонов.

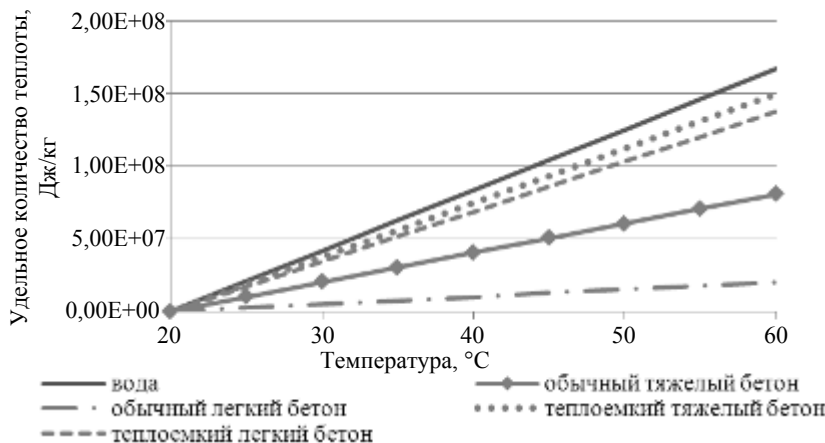


Рис. 3. Накопление тепловой энергии водой и бетонами различных составов при нагреве (теплоемкие бетоны с содержанием заполнителя 80 %)

Большее накопление тепловой энергии предложенными теплоемкими материалами по сравнению с обычными позволит нивелировать экстремальные значения изменения температур (на поверхности и во всем объеме) бетонов, аккумулировать тепловую энергию и тем самым экономить электрическую и тепловую энергию при эксплуатации строительных объектов.

На практике теплоемкость инкапсулированного заполнителя цементных бетонов можно изменять в значительных пределах и при этом использовать материалы с изменяющимся фазовым состоянием, весьма перспективные с позиции энергосбережения и энергоэффективности. Эффективность применения таких материалов оценивается величиной скрытой энергии, выделяемой или поглощаемой в процессе кристаллизации, плавления, испарения и конденсации.

В суровых климатических условиях России, где преобладает отрицательная температура наружного воздуха, особо актуальным является применение теплоемких заполнителей с солевыми растворами, имеющими пониженную температуру замерзания при относительно высокой теплоемкости. В качестве солевых растворов для изготовления теплоемкого заполнителя могут быть использованы упаренные растворы отходов завода ОАО «Красцветмет» в г. Красноярске, представляющие собой водные растворы хлоридов натрия и кальция с небольшим содержанием железа, никеля, меди, цинка и свинца в пределах допустимых концентраций (ПДК).

Для определения температуры замерзания солевых растворов и теплоемкости использован метод дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). В результате эксперимента получены графические зависимости теплоемкости от температуры исследуемых материалов. По графикам определена теплоемкость солевых растворов, которая оказалась не менее 3 кДж/кг·°С. Резкий скачок на кривых ДСК свидетельствует о кристаллизации растворов солей, которая происходит при температуре –32 °С для солевого раствора плотностью 1,28 кг/м³ и –60 °С для солевого раствора плотностью 1,38 кг/м³. В целом следует заметить, что при увеличении содержания солей (плотности растворов) температура замерзания и теплоемкость упаренных растворов понижаются.

Основные свойства упаренных растворов после первой и второй стадии упаривания представлены в таблице.

Свойства солевых растворов

| Вид раствора | Плотность, кг/м ³ | pH | Теплоемкость, кДж/кг °С | Температура замерзания, °С |
|---|------------------------------|-----|-------------------------|----------------------------|
| Солевой упаренный раствор после I стадии выпаривания | 1,28 | 8,2 | Не менее 3,0 | –32 °С |
| Солевой упаренный раствор после II стадии выпаривания | 1,38 | 5,2 | | Ниже –50 °С |

Использование теплоемких заполнителей с солевыми растворами позволит существенным образом расширить область применения теплоемких бетонов при отрицательных температурах, а при их эксплуатации в зимних условиях уменьшить число циклов замораживания материала с изменением объема в заполнителе, что будет способствовать повышению долговечности строительных конструкций.

Таким образом, варьируя плотность матрицы и объемную долю теплоемкого заполнителя, можно получать бетоны с широким диапазоном значений плотности и теплофизических свойств. Составы бетонов с теплоемким заполнителем в виде инкапсулированной воды и водными растворами солей в значительной степени позволяют увеличить теплоемкость бетонов, что делает их востребованными в системах аккумуляции тепла и холода, инженерных системах кондиционирования и рекуперации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Rinaldi, N.* Thermal Mass, Night Cooling and Hollow Core Ventilation System as Energy Saving Strategies in Buildings. Master Thesis, 2009. – 335 p.
2. *Чиркин, В.С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники: справочник / В.С. Чиркин. – М. : Атомиздат, 1989. – 484 с.
3. *Флеминг, И.В.* Применение метода расчета теплофизических свойств композиционных материалов к кабельным резинам / И.В. Флеминг, В.С. Ким // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 62–65.
4. *Назирова, Р.А.* Моделирование теплопроводности легких бетонов на крупном заполнителе / Р.А. Назирова, А.Н. Волков, Л.М. Фаткулина-Яськова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 2. – С. 238–246.

REFERENCES

1. *Rinaldi N.* Thermal Mass, Night Cooling and Hollow Core Ventilation System as Energy Saving Strategies in Buildings. Master Thesis. 2009. 335 p.
2. *Chirkin V.S.* Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki: spravochnik [Thermal properties of nuclear technology materials]. Moscow : Atomizdat, 1989. 484 p. (rus)
3. *Fleming I.V., Kim V.S.* Primenenie metoda rascheta teplofizicheskikh svoystv kompozitsionnykh materialov k kabel'nym rezinam [Cable rubber design techniques for thermal properties of composites]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2010. V. 317. No. 4. Pp. 62–65. (rus)
4. *Nazirova R.A., Volkov A.N., Fatkulina-Yas'kova L.M.* Modelirovanie teploprovodnosti legkikh betonov na krupnom zapolnitele [Coarse aggregate-based light concrete modeling]. *Kazan State University of Architecture and Engineering News*. 2013. No. 2. Pp. 238–246. (rus)