

4. Generalova Ye. M. Rol fasadnikh sistem v borbe za energoeffektivnost [The Role of Facade Systems in the Fight for Energy Efficiency]. *AVOK: Ventilyatsiya, otoplenie, kondi-tsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika* [AVOK: Ventilation, Heating, Air Conditioning, Heat Supply and Building Thermal Physics]. 2017, no. 8, pp. 48–53.
5. Kupriyanov V. N. K raschetu velichini solnechnogo faktora solntsezashchitnikh ustroystv [On calculating the solar factor of sun protection devices]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2021, no. 11, pp. 40–45. DOI: 10.31659/0044-4472-2021-11-40-45.
6. Pinus B. I., Kazharsky V. V., Korneeva I. G. *Zhelezobetonnii i kamennii konstruktii: Raschet i konstruirovaniye elementov perekritii mnogoetazhnogo zdaniya* [Reinforced Concrete and Masonry Structures: Calculation and Design of Floor Elements of a Multi-Story Building]. Irkutsk: Irkutskii natsionalnii issledovatel'skii tekhnicheskii universitet; 2023. 98 p.
7. Fokin K. F. *Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastei zdaniy* [Construction thermal engineering of enclosing parts of buildings]. Moscow: Stroyizdat; 1973.
8. Vasilenko A. N., Spivak I. Ye. *Tekhnologicheskie protsessy v stroitel'stve* [Technological processes in construction]. Voronezh: Voronezhskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet; 2023. 76 p.
9. Zemtsov V. A., Shmarov I. A., Zemtsov V. V., Kozlov V. A. Metodika rascheta prodolzhitel'nosti insolyatsii pomeshchenii zhi-lich i obshchestvennykh zdaniy i territorii po solnechnim kartam [Methodology for calculating the duration of insolation of premises of residential and public buildings and territories using solar maps]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2018, no. 7, pp. 32–37.
10. Zolina T. V., Kupchikova N. V. Tsifrovie keisi kak instrument tsifrovoy transformatsii proektnoi deyatel'nosti [Digital cases as a tool for digital transformation of project activities]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2023, no. 4 (46), pp. 86–91. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-86-91.
11. Kupchikova N. V., Batalov M. A. Tsifrovizatsiya v realizatsii investitsionno-stroitel'nogo proekta kritogo gorno-lizhnogo kompleksa «Ledyanoe serdtse» s masshtabirovaniem v regioni Rossiiskoi Federatsii [Digitalization in the implementation of the investment and construction project of the indoor ski resort "Ice Heart" with scaling to the regions of the Russian Federation]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2024, no. 1 (47), pp. 32–37. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-47-1-32-37.
12. Zolina T. V., Kupchikova N. V., Kulebyanov A. V. Konstruktivnie resheniya obshchestvennogo sooruzheniya pri terrori-sticheskikh ugrozakh na primere realizatsii investitsionno-stroitel'nogo proekta [Structural Solutions for Public Facilities under Terrorist Threats: An Example of an Investment and Construction Project]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2024, no. 2 (48), pp. 118–122. DOI: 10.52684/2312-3702-2024-48-2-118-122.
13. *GOST R 51379-2019. Energoberezhenie. Energeticheskii pasport potrebitelya toplivno-energeticheskikh resursov. Osnovnie polozeniya* [Energy Saving. Energy Passport for a Consumer of Fuel and Energy Resources. Basic Provisions]. Moscow: Standartinform; 2019.
14. Generalova E. M., Generalov V. P. Special Features and Development Prospects of Social Rental Housing in Russia. *Architectural, Construction, Environmental and Digital Technologies for Future Cities*. Cham: Springer Nature Switzerland AG; 2022, vol. 227, pp. 363–374. DOI: 10.1007/978-3-030-94770-5_28.
15. Stec W., van Paassen A. H. C. Definition of the thermal comfort and energy performance of a building with dynamic solar shading. *Energy and Buildings*. 2007, vol. 39, iss. 6, pp. 673–681.

© Н. П. Умнякова, Н. В. Купчикова, К. В. Любавина

Ссылка для цитирования:

Умнякова Н. П., Купчикова Н. В., Любавина К. В. Разработка и верификация активно регулируемой фасадной системы для физкультурно-оздоровительного комплекса с купольным светопрозрачным покрытием // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 75–81.

УДК 699.812.2

DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-81-86

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЛЕГКОГО ВЫСОКОПРОЧНОГО БЕТОНА

В. С. Федоров, Д. Р. Асмаловский, В. Е. Левитский

Федоров Виктор Сергеевич, академик Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-0906-716X; e-mail: fvs_skzs@mail.ru;

Асмаловский Даниил Романович, аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация;

Левитский Валерий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Российская Федерация

Объект исследования – легкий высокопрочный бетон плотностью 1950–1980 кг/м³ и прочностью на сжатие 62 МПа. Актуальность – недостаточная изученность теплофизических свойств бетонов необходимых для расчетной оценки огнестойкости конструкций. Ранее авторами была опубликована программа планирования эксперимента [21]; настоящая работа представляет результаты ее реализации. Метод – определение коэффициента теплопроводности при стационарном тепловом режиме на десяти образцах-плит (250 × 250 × 50 мм) с использованием измерителя ИТП-МГ4. Результаты – среднее значение теплопроводности составило 0,946 Вт/(м·К), диапазон 0,880–1,038 Вт/(м·К), коэффициент вариации – 5,2 %, 95%-й доверительный интервал – 0,911–0,981 Вт/(м·К). Установлено статистически значимое снижение теплопроводности на 21 % относительно тяжелого бетона (1,2 Вт/(м·К)) при сохранении высокой прочности. Выводы: легкий высокопрочный бетон занимает промежуточное положение между конструкционным тяжелым и теплоизоляционным керамзитобетоном; полученные данные могут служить основой для расчетов огнестойкости и развития нормативной базы.



Ключевые слова: легкий высокопрочный бетон, теплопроводность, экспериментальные исследования, статистическая обработка, огнестойкость, пористый заполнитель.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF LIGHTWEIGHT HIGH-STRENGTH CONCRETE

V. S. Fedorov, D. R. Asmalovskiy, V. Ye. Levitskiy

Fedorov Viktor Sergeevich, Academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Building Structures, Buildings, and Facilities Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0906-716X; e-mail: fvs_skzs@mail.ru;

Asmalovskiy Daniil Romanovich, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation;

Levitskiy Valeriy Yevgenyevich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Building Structures, Buildings, and Facilities Department, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

Object of the study – lightweight high-strength concrete with a density of 1950–1980 kg/m³ and compressive strength of 62 MPa. Motivation – insufficient knowledge of thermophysical properties of lightweight high-strength concrete required for fire resistance design. The authors previously published an experimental planning programme [21]; this paper presents the results of its implementation. Method – thermal conductivity was measured under steady-state heat flow on 10 slab specimens (250 × 250 × 50 mm) using an ITP-MG4 instrument. Results – the average thermal conductivity was 0.946 W/(m·K) range 0.880–1.038 W/(m·K), coefficient of variation 5.2 %, 95% confidence interval 0.911–0.981 W/(m·K). A statistically significant reduction of 21 % compared to ordinary heavy concrete 1.2 W/(m·K) was found, while high strength was maintained. Conclusions – lightweight high-strength concrete occupies an intermediate position between structural heavy concrete and insulating lightweight aggregate concrete; the obtained data can serve as a basis for fire resistance calculations and the development of regulatory documents.

Keywords: lightweight high-strength concrete, thermal conductivity, experimental study, statistical analysis, fire resistance, porous aggregate.

Введение

В современном строительстве наблюдается устойчивый тренд к применению материалов, обеспечивающих снижение массы конструкций без потери несущей способности. Легкий высокопрочный бетон (ЛВБ) является одним из наиболее перспективных решений, так как сочетает низкую плотность 1950–1980 кг/м³ с высокой прочностью на сжатие до 62 МПа [1]. Такие характеристики позволяют уменьшать сечения колонн и балок, снижать нагрузку на фундаменты и улучшать теплоизоляционные свойства ограждений.

Однако при всех преимуществах поведение ЛВБ при воздействии высоких температур, характерных для пожаров, остается недостаточно изученным. Пожарная безопасность зданий напрямую зависит от огнестойкости несущих элементов, которая определяется комплексом теплофизических характеристик материала – теплопроводностью, теплоемкостью и температуропроводностью [2–4]. Именно теплопроводность контролирует распределение температуры в сечении элемента и скорость прогрева арматуры, что критично для прогнозирования потери несущей способности [5].

Для тяжелых бетонов на плотных заполнителях накоплен обширный экспериментальный материал [6, 7], однако для легких высокопрочных бетонов данные фрагментарны. Известно, что высокопрочные бетоны характеризуются более плотной структурой, что при нагреве может приводить к паротепловому взрыву из-за затрудненного выхода водяного пара [8, 9]. В то же время пористая структура легкого высокопрочного бетона, напротив, может способствовать сбросу давления и снижению риска разрушения. Для проверки этой гипотезы необходимо располагать достоверными данными по теплопроводности при нормальной

температуре, которые служат базой для последующих высокотемпературных испытаний и численного моделирования [10, 11].

В работах [12, 13] показано, что теплопроводность бетона зависит от плотности, вида заполнителя, влажности и температуры. Для керамзитобетона плотностью 900 кг/м³ коэффициент теплопроводности составляет около 0,24 Вт/(м·К) [14], тогда как для тяжелого бетона плотностью 2400 кг/м³ – 1,2–1,5 Вт/(м·К). ЛВБ с плотностью 1950 кг/м³ по логике должен занимать промежуточное положение, однако количественные данные для подобных составов с прочностью выше 60 МПа практически отсутствуют.

Ранее авторами была опубликована программа планирования эксперимента по оценке огнестойкости сжатых элементов из легкого высокопрочного бетона [21], в которой были определены состав, размеры образцов, методы испытаний и режимы нагрева. Настоящая работа является прямым продолжением указанного исследования и посвящена экспериментальному определению коэффициента теплопроводности при нормальной температуре – первого этапа в цепи оценки огнестойкости.

Цель настоящей работы – получить экспериментальные значения коэффициента теплопроводности ЛВБ, провести их статистическую обработку и сравнить с показателями традиционных бетонов.

Задачи исследования:

1) провести испытания на десяти образцах и определить числовые значения теплопроводности, термического сопротивления и плотности теплового потока;

2) выполнить статистический анализ с оценкой доверительных интервалов и коэффициента вариации;

3) сравнить полученные результаты с нормативными данными для тяжелого бетона и керамзитобетона;

4) сформулировать выводы о месте легкого высокопрочного бетона в классификации бетонов по теплотехнической эффективности.

Методы

Исследовался легкий высокопрочный бетон состава, детально описанного в ранее опубликованной работе [21]. Основные компоненты: портландцемент, керамзитовый гравий фракции 5–10 мм, кварцевый песок, суперпластификатор и микрокремнезем. Водоцементное отношение – 0,32. Образцы – плиты размером 250 × 250 × 50 мм (рис. 1) – изготовлены в заводских условиях и выдержаны 28 суток при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности 95 ± 5 %. Физико-механические характеристики: средняя плотность 1950–1980 кг/м³, прочность кубиковая на сжатие 62 МПа, модуль упругости 32,97 ГПа.



Рис. 1. Образцы бетонных плит (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Specimens of concrete slabs (illustration by the authors)

Испытания проведены на измерителе теплопроводности ИТП-МГ4 (рис. 2), реализующем метод стационарного теплового потока с плоским нагревателем. Принцип действия основан на создании одномерного температурного поля в образце, помещенном между нагревательной и охлаждающей

плитами, и измерении перепада температур и теплового потока. Коэффициент теплопроводности λ вычисляется по формуле:

$$\lambda = (Q \cdot \delta) / (A \cdot \Delta T), \quad (1)$$

где Q – тепловой поток (Вт), δ – толщина образца (м), A – площадь поверхности (м²), ΔT – разность температур на гранях (К).

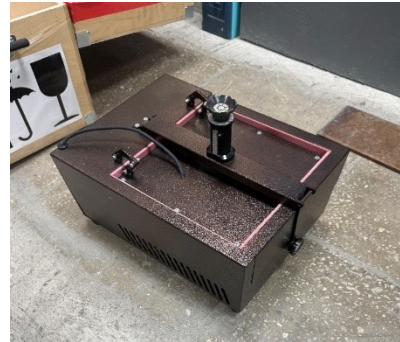


Рис. 2. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 (иллюстрация авторов)
Fig. 2. Thermal conductivity meter ITP-MG4 (illustration by the authors)

Измерения выполнены при средней температуре образца 25 ± 1 °С. Каждый образец испытан однократно в стационарном режиме после достижения теплового равновесия, при этом скорость изменения температуры не более 0,1 °С за 10 мин. Дополнительно регистрировались термическое сопротивление R (м²·К/Вт) и удельный тепловой поток q (Вт/м²). Подробное описание установки и методики калибровки приведено в [21].

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведены результаты испытаний десяти образцов. Значения теплопроводности изменяются от 0,880 до 1,038 Вт/(м·К), среднее – 0,946 Вт/(м·К). Размах значений 0,158 Вт/(м·К) указывает на некоторую неоднородность материала, что типично для легких бетонов с пористыми заполнителями. Термическое сопротивление варьируется от 0,048 до 0,056 м²·К/Вт, что при толщине 50 мм соответствует среднему $\lambda \approx 0,95$.

Таблица 1

Результаты измерений теплопроводности, термического сопротивления и теплового потока

№ п/п	№ образца	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Термическое сопротивление R , м ² ·К/Вт	Тепловой поток q , Вт/м ²
1	2	3	4	5
2	1	0,910	0,056	263,3
3	2	0,914	0,054	291,7
4	3	0,990	0,054	272,8
5	4	0,976	0,051	293,6
6	5	0,971	0,050	287,6
7	6	1,038	0,048	311,4
8	7	0,880	0,052	281,9
9	8	0,959	0,054	268,5
10	9	0,895	0,049	276,3
11	10	0,926	0,051	289,5

Примечание: толщина образцов 0,05 м, площадь 0,0625 м².

Статистические показатели выборки представлены в таблице 2. Коэффициент вариации 5,2 % свидетельствует о высокой воспроизводимости метода.

Доверительный интервал для среднего при 95 %-й вероятности составляет 0,911–0,981 Вт/(м·К). Верх-

ная граница (0,974 Вт/(м·К)) может быть использована в инженерных расчетах как нормативное значение с обеспеченностью 0,95.

Таблица 2

Статистические показатели

№ п/п	Показатель	Значение
1	2	3
2	Количество образцов	10
3	Среднее значение λ , Вт/(м·К)	0,946
4	Размах (max–min), Вт/(м·К)	0,158
5	Среднеквадратическое отклонение, Вт/(м·К)	0,049
6	Коэффициент вариации, %	5,2
7	95 %-й доверительный интервал для среднего	0,911 – 0,981
8	Верхняя 95 %-я доверительная граница, Вт/(м·К)	0,974

По данным СП 50.13330.2012 [14], тяжелый бетон плотностью 2400 кг/м³ имеет теплопроводность 1,2 Вт/(м·К), а керамзитобетон плотностью 900 кг/м³ – 0,24 Вт/(м·К). Полученное среднее значение 0,946 Вт/(м·К) для ЛВБ плотностью ~1950 кг/м³ оказывается на 21 % ниже, чем у тяжелого бетона, такое различие статистически значимо, так как верхняя доверительная граница 0,974 также ниже 1,2. Снижение теплопроводности объясняется меньшей плотностью и наличием пористого заполнителя, который создает дополнительные тепловые сопротивления на границах зерен [15].

В то же время легкий высокопрочный бетон значительно уступает по теплоизоляционным свойствам керамзитобетону 0,24, однако его прочность 62 МПа почти в 5–6 раз выше, чем у керамзитобетона конструкционной марки. Таким образом, ЛВБ занимает нишу конструкционно-теплоизоляционного материала, позволяя создавать несущие элементы с улучшенными теплозащитными характеристиками по сравнению с тяжелым бетоном.

Снижение теплопроводности легкого высокопрочного бетона связано с двумя факторами: (1) уменьшением объемной доли твердой фазы и (2) увеличением контактного термического сопротивления на границах «цементный камень – пористый заполнитель». Как показано в работах [16, 17], теплопроводность двухфазных композитов сильно зависит от теплопроводности заполнителя и его объемной концентрации. Для керамзитового гравия с замкнутой пористостью теплопроводность составляет около 0,2–0,3 Вт/(м·К), что значительно ниже, чем у кварцевого заполнителя ~3–5 Вт/(м·К). При замещении части плотного заполнителя пористым общая теплопроводность матрицы падает.

Однако рост пористости сопровождается снижением прочности. В исследуемом материале удалось сохранить высокую прочность 62 МПа благодаря низкому В/Ц и использованию микрокремнезема, уплотняющего цементный камень, что обеспечивает баланс между теплофизическими и механическими свойствами.

Полученные результаты согласуются с данными [18, 19], где для легких бетонов с плотностью 1800–2000 кг/м³ указаны значения λ в диапазоне 0,8–1,0 Вт/(м·К). Некоторый разброс в наших

данных 0,88–1,04 может быть вызван локальной неоднородностью распределения заполнителя, что характерно для легких бетонов. В дальнейшем необходимо изучить влияние влажности, так как вода увеличивает теплопроводность [20], а также провести испытания при повышенных температурах для оценки изменения λ в условиях пожара – это станет следующим этапом после реализации программы, описанной в [21].

В работе рассматривался только один состав ЛВБ при нормальной влажности и комнатной температуре. Не учитывались температурная зависимость λ , влияние влажности и длительных эксплуатационных факторов. Не проводилось также прямое сравнение с другими легкими бетонами аналогичной прочности. Эти вопросы составляют перспективу дальнейших исследований.

Заключение

По результатам проведенного экспериментального исследования можно сделать следующие выводы:

1) определен коэффициент теплопроводности легкого высокопрочного бетона плотностью 1950–1980 кг/м³ и прочностью 62 МПа. Среднее значение $\lambda = 0,946$ Вт/(м·К), 95%-й доверительный интервал – 0,911–0,981 Вт/(м·К);

2) полученное значение теплопроводности статистически достоверно (на 21 %) ниже, чем у тяжелого бетона 1,2 Вт/(м·К), что подтверждает тепло-техническую эффективность легкого;

3) по сравнению с керамзитобетоном теплопроводность ЛВБ выше, однако его прочность значительно превосходит последний, что делает легкий высокопрочный бетон пригодным для несущих конструкций с повышенными требованиями к теплозащите;

4) высокая однородность результатов с коэффициентом вариации 5,2 % свидетельствует о надежности использованной методики и возможности применения полученных данных для расчетов огнестойкости;

5) настоящая работа является прямым продолжением ранее опубликованного планирования эксперимента [21]. Полученные данные о теплопроводности при нормальной температуре служат

базой для последующих высокотемпературных испытаний и численного моделирования.

В качестве дальнейших направлений рекомендовано изучение теплопроводности ЛВБ в условиях повышенных температур, а также при различных уровнях влажности и с разными типами

пористых заполнителей. Результаты работы могут быть использованы при разработке нормативных документов по проектированию огнестойких конструкций из легких бетонов.

Список литературы

1. Каприелов С. С., Шейнфельд А. В., Карпенко Н. И., Селютин Н. М., Моисеенко Г. А., Безгоднов И. М. Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных самоуплотняющихся легких бетонов на искусственных и природных пористых заполнителях. *Бетон и железобетон*. 2025;628(3):52-68. DOI: 10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68.
2. Buchanan A. H. *Structural design for fire safety*. Chichester: Wiley, 2002. 456 p.
3. Purkiss J. A. *Fire safety engineering design of structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007. 415 p.
4. Kodur V. R., Raut N. Performance of concrete structures under fire hazard: emerging trends. *The Indian Concrete Journal*. 2010;84(2):23-31.
5. Fedorov V. S., Levitsky V. E. Modeling of concrete thermal power resistance during the high-temperature heating. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 463 :012041. DOI: 10.1088/1757-899X/463/1/012041.
6. Kodur V. Properties of concrete at elevated temperatures. *ISRN Civil Engineering*. 2014; 2014: 468510. DOI: 10.1155/2014/468510.
7. Khoury G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2000;2(4):429-447. DOI: 10.1002/pse.45.
8. Phan L. T., Carino N. J. Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. *ACI Materials Journal*. 2002;99(1):54-66.
9. Chan S. Y. N., Peng G.F., Anson M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*. 1999;21(1):23-27.
10. Fedorov V. S., Levitsky V. E., Isaeva E. A. Basic principles in the theory of force and thermal force resistance of concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(6):584-596.
11. Левитский В. Е. Деформативные характеристики нагруженного бетона при нестационарном нагреве. *Строительство и реконструкция*. 2024;(1):64-77.
12. Bentz D. P., Peltz M. A., Duran-Herrera A., Valdez P., Juarez C. A. Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Building Physics*. 2011;34(3):263-275.
13. Kim K. H., Jeon S. E., Kim J. K., Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(3):363-371.
14. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. М.: Минрегион России, 2012.
15. Zhang B., Poon C. S. Use of furnace bottom ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties. *Journal of Cleaner Production*. 2015; 99: 94-100.
16. Wang L., Aslani F. Modelling of thermal conductivity of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2020; 262: 120870. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120870.
17. Федоров В. С., Асмаловский Д. Р. Экспериментальная оценка огнестойкости сжатых элементов из легкого высокопрочного бетона для зданий и сооружений транспортного комплекса // *Московский транспорт. Наука и проектирование*. – 2025. – №1(1) – С.33-42
18. Купчикова Н. В. Численное моделирование насыпей транспортных сооружений с учетом слабого подстилающего слоя // *Московский транспорт. Наука и проектирование*. – 2025. – №1(1) – С.43-54
19. Demirboga R., Gül R. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003;33(5):723-727.
20. Ünal O., Uygunoğlu T., Yildiz A. Investigation of thermal conductivity of lightweight concrete containing expanded perlite. *Journal of Thermal Science and Technology*. 2017;37(1):45-52.
21. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of heat in solids*. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1959. 510 p.
22. Федоров В. С., Левитский В. Е., Асмаловский Д. Р. Планирование эксперимента по оценке огнестойкости сжатых элементов из легкого высокопрочного бетона. *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2025;51(1):23-28. DOI: 10.52684/2312-3702-2025-51-1-23-28.
23. Федоров В. С., Левитский В. Е. Специфика реакции бетона на воздействие высокой температуры. *Строительство и реконструкция*. 2025;(6):47-59.
24. Kočí J., Maděra J., Černý R. Thermal properties of lightweight concrete with recycled aggregates at elevated temperatures. *AIP Conference Proceedings*. 2018;1988(1):020018. DOI: 10.1063/1.5047628.

References

1. Kapriyelov S. S., Sheinfeld A. V., Karpenko N. I., Selyutin N. M., Moiseenko G. A., Bezgodov I. M. Prochnostnie i deformatsionnie kharakteristiki visokoprochnikh samouplotnyayushchikhsya legkikh betonov na iskusstvennikh i prirodnikh poristikh zapolnityakh [Strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting lightweight concretes based on artificial and natural porous aggregates.]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2025; no. 3 (628), pp. 52–68. DOI: 10.37538/0005-9889-2025-3(628)-52-68.
2. Buchanan A. H. *Structural design for fire safety*. Chichester: Wiley; 2002. 456 p.
3. Purkiss J. A. *Fire safety engineering design of structures*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2007. 415 p.
4. Kodur V. R., Raut N. Performance of concrete structures under fire hazard: emerging trends. *The Indian Concrete Journal*. 2010, no. 2 (84), pp. 23–31.
5. Fedorov V. S., Levitsky V. E. Modeling of concrete thermal power resistance during the high-temperature heating. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 463, pp. 012041. DOI: 10.1088/1757-899X/463/1/012041.

6. Kodur V. Properties of concrete at elevated temperatures. *ISRN Civil Engineering*. 2014, vol. 2014, pp. 468510. DOI: 10.1155/2014/468510.
7. Khoury G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2000, no. 2 (4), pp. 429-447. DOI: 10.1002/pse.45.
8. Phan L. T., Carino N. J. Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. *ACI Materials Journal*. 2002, no. 1 (99), pp. 54-66.
9. Chan S. Y. N., Peng G. F., Anson M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*. 1999, no. 1 (21), pp. 23-27.
10. Fedorov V. S., Levitsky V. E., Isaeva E. A. Basic principles in the theory of force and thermal force resistance of concrete. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022, no. 6 (18), pp. 584-596.
11. Levitskii V. E. Deformativnie kharakteristiki nagruzhennogo betona pri nestatsionarnom nagreve. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2024, no. 1, pp. 64-77.
12. Bentz D. P., Peltz M. A., Duran-Herrera A., Valdez P., Juarez C. A. Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Building Physics*. 2011, no. 3 (34), pp. 263-275.
13. Kim K. H., Jeon S. E., Kim J. K., Yang S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003, no. 3 (33), pp. 363-371.
14. SP 50.13330.2012. *Teplovaya zashchita zdaniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 23-02-2003* [Thermal protection of buildings. Updated version of SNIp 23-02-2003.]. Moscow: Minregion Rossii; 2012.
15. Zhang B., Poon C. S. Use of furnace bottom ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties. *Journal of Cleaner Production*. 2015, no. 99, pp. 94-100.
16. Wang L., Aslani F. Modelling of thermal conductivity of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. 2020, no. 262, pp. 120870. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120870.
17. Fedorov V. S., Asmalovskii D. R. Eksperimentalnaya otsenka ognestoikosti szhatikh elementov iz legkogo visokoprochnogo betona dlya zdaniy i sooruzhenii transportnogo kompleksa. *Moskovskii transport. Nauka i proektirovanie*. 2025, no. 1 (1), pp. 33-42.
18. Kupchikova N. V. Chislennoe modelirovanie nasipei transportnikh sooruzhenii s uchetom slabogo podstilayushchego sloya. *Moskovskii transport. Nauka i proektirovanie*. 2025, no. 1 (1), pp. 43-54.
19. Demirboga R., Gül R. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*. 2003, vol. 33 (5), pp. 723-727.
20. Ünal O., Uygunoğlu T., Yildiz A. Investigation of thermal conductivity of lightweight concrete containing expanded perlite. *Journal of Thermal Science and Technology*. 2017, vol. 37 (1), pp. 45-52.
21. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of heat in solids*. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press; 1959. 510 p.
22. Fedorov V. S., Levitskii V. E., Asmalovskii D. R. Planirovanie eksperimenta po otsenke ognestoikosti szhatikh elementov iz legkogo visokoprochnogo betona [Planning an experiment to assess the fire resistance of compressed elements made of lightweight high-strength concrete]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya* [Caspian Engineering and Construction Bulletin]. 2025, no. 1 (51), pp. 23-28. DOI: 10.52684/2312-3702-2025-51-1-23-28.
23. Fedorov V. S., Levitskii V. Ye. Spetsifika reaktsii betona na vozdeistvie visokoi temperature [Specificity of concrete reaction to high temperature]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and Reconstruction]. 2025, no. 6, pp. 47-59.
24. Kočí J., Maděra J., Černý R. Thermal properties of lightweight concrete with recycled aggregates at elevated temperatures. *AIP Conference Proceedings*. 2018, no. 1 (1988), pp. 020018. DOI: 10.1063/1.5047628.

© В. С. Федоров, Д. Р. Асмаловский, В. Е. Левитский

Ссылка для цитирования:

Федоров В. С., Асмаловский Д. Р., Левитский В. Е. Экспериментальная оценка теплопроводности легкого высокопрочного бетона // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 81-86.

УДК 624.21.036.6

DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-86-93

ЭКОНОМИЧНОЕ ПРОЛЕТНОЕ СТРОЕНИЕ МОСТА С ЭФФЕКТИВНЫМИ ПРОЛЕТАМИ

А. В. Макаров, Д. В. Ивасик, А. А. Васильченко

Макаров Александр Владимирович кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация; e-mail: pr.makarov@mail.ru;

Ивасик Дмитрий Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: + 7 (903) 370 03-24; e-mail: jvc777@inbox.ru;

Васильченко Анжелика Алексеевна, старший преподаватель кафедры «Строительство и эксплуатация транспортных сооружений», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: + 7 (903) 370-03-29; e-mail: t766om@gmail.com

В нашей стране в последнее десятилетие стало больше строиться транспортных развязок, мостов, путепроводов, эстакад. Ранее путепроводы строились из сборного железобетона и были неразрезной системы, с советских времен был принят курс на развитие строительства из готовых конструкций. В неразрезных системах изгибающие моменты в пролетах меньше, чем в разрезных. В статье показано на основе расчетов, что одинаковые по длине пролеты не обеспечивают равномерное распределение изгибающих моментов. Проведенные исследования показали, что одинаковые опорные изгибающие моменты возникают в неразрезной балке при равномерно распределенной нагрузке постоянной и полной временной, когда крайние пролеты имеют конкретное соотношение к длине средних пролетов. Получены ко-