

DOI: 10.34031/article_5d35d0b6c4cf71.39272431

^{1,*}Домнина К.Л., ²Pivarčiová E., ¹Репко В.Н., ¹Сотникова М.В.¹Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашиникова

Россия, 427430, Удмуртская Республика, г. Воткинск, ул. П.И. Шувалова, д. 1

²Technical University in Zvolen, Department of Manufacturing and Automation Technology,
Faculty of Environmental and Manufacturing Technology

Slovakia, 960 53, Zvolen, Študentská 26

*E-mail: domnina@vfistu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПЕНОБЕТОНЕ, АРМИРОВАННОМ ПОЛИЭТИЛЕНТЕФТАЛАТНЫМ ВОЛОКНОМ (ПЭТФ-ВОЛОКНОМ)

Аннотация. В статье проводится анализ температурных полей над образцами пенобетона, армированными ПЭТФ-волокнами, который разработан в Воткинском филиале Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашиникова. Эффективность армирования ПЭТФ-волокнами в области улучшения прочностных свойств уже была доказана, но до сих пор недостаточно изучено влияние армирования ПЭТФ-волокнами на теплофизические свойства пенобетонов. В лабораториях Технического университета г. Зволень, Словакия (TUZVO) мы провели анализ теплопередачи с помощью естественной конвекции путем нагрева армированных образцов пенобетона. Был использован метод голографической интерферометрии, позволяющий визуализировать температурные поля в режиме реального времени. Температурные поля, возникающие над поверхностью образцов, отображались и регистрировались посредством интерферометра Маха-Цендера методом «живой границы» на протяжении всей длины интерференционных полос. Предложена методика по расчету параметров теплообмена по аналогии с нагревом плоской плиты. Был проведен качественный и количественный анализ голографических интерферограмм температурного поля; рассчитаны локальные параметры теплообмена: коэффициенты теплоотдачи α и теплопроводности λ . Установлено, что российские образцы пенобетона, армированные ПЭТФ-волокном, обладают более высокой теплостойкостью и лучшей изоляцией по сравнению с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: голографическая интерферометрия, интерферометр Маха-Цендера, теплообмен, пенобетон, полиэтилентерефталатное волокно (ПЭТФ-волокно).

Введение. Проблема энергосбережения в строительстве вытекает из необходимости развития направления по созданию и производству эффективных недорогих материалов с высокими теплофизическими и прочностными характеристиками. В числе перспективных материалов такого вида находятся ячеистый пено- и газобетон. Преимущество при организации производства ячеистого бетона в России, в частности, на региональном уровне, отдается неавтоклавному пенобетону (плотность 600–800 кг/м³) ввиду более низких капитальных вложений, а также более простой технологии изготовления [1]. Помимо этого пенобетон способен решить существующие задачи в области теплоэнергетики и теплотехники: создание одновременно теплоизоляционного и прочного конструкционного материала.

Материалы. Для экспериментальных исследований были использованы образцы конструкционно-теплоизоляционного неавтоклавного пенобетона плотностью 600 кг/м³, изготовленные в Воткинском филиале Ижевского государственного технического университета по классической технологии. В качестве сырья применялись портландцемент нормальнотвердеющий ЦЕМ I 42,5Н

ОАО «Сухоложскцемент» песок природный карьерный ООО «Волковский карьер» г. Чайковский, вода, пенообразователь Foamix C ООО «М-Альянс» г. Москва и армирующее ПЭТФ-волокно ООО «ПЭТ» г. Чайковский.

Эффективность армирования ПЭТФ-волокнами в области улучшения прочностных свойств уже была доказана [2, 3]. Но до сих пор недостаточно изучено влияние армирования ПЭТФ-волокнами на теплофизические свойства пенобетонов.

Для конструкционно-теплоизоляционных пенобетонов одним из основных показателей качества (наряду с прочностью, морозостойкостью, трещиностойкостью, паропроницаемостью и т.д.) является теплопроводность, оцениваемая коэффициентом теплопроводности λ , Вт/м·К, и коэффициентом теплоотдачи α , Вт/(м²·К). Экспериментальные исследования проводились в лабораториях Технического университета г. Зволень, Словакия (TUZVO).

Методика. Методы голографической интерферометрии широко используются для измерения и визуализации параметров изменений объектов при различных внешних воздействиях [4–6]. Они основаны на принципе сравнения двух

волновых фронтов, причем один из них или оба записывают и восстанавливают голографическим методом.

Голографический интерферометр Маха-Цендера является прибором с широкими возможностями настройки, который используется в том

числе для исследования температурных полей. Типичный оптический набор для голографической интерферометрии устройством Маха-Цендера приведен на рис. 1.

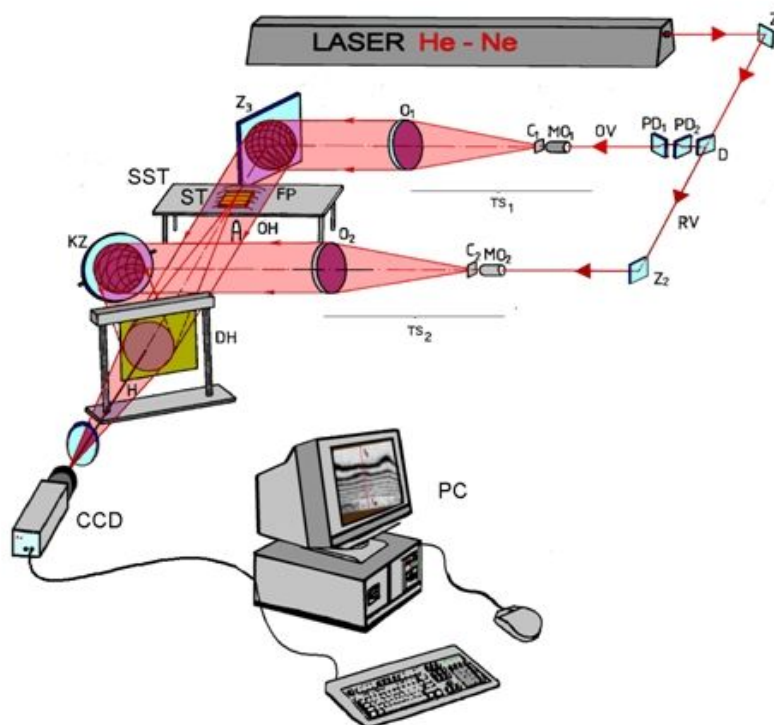


Рис. 1. Схема голографического переменного одноволнового интерферометра Маха-Цендера:

OV – линия объекта; RV – опорная линия; D – разделитель; H – голографическая плата; DH – держатель голографической платы; KZ – зеркало в карданной подвеске; O₁, O₂ – объективы; Z₁, Z₂, Z₃ – зеркала; C₁, C₂ – перфорированные жалюзи; FP – фазовый объект (начальное температурное поле над объектом испытания); MO₁, MO₂ – объективы микроскопических объектов; PD₁, PD₂ – планшеты; ST – объект испытания; TS₁, TS₂ – телескопические комплекты; OH – источник нагрева; SST – держатель для захвата объекта испытания; CCD – камера; ПК – компьютер с аппаратным и программным обеспечением

После отражения от зеркала лазерный луч (Z₁) разбивается на разделительной плате (D) на два объема – объектный и эталонный. Часть пучка распределяется (D), передается, и свет распространяется в его исходном направлении. Посредством дополнительных зеркал (Z₂, Z₃), а также зеркала, расположенного в карданной подвеске (KZ), пучки света направляются в место расположения голографической платы (HD). Для записи более обширных полей лучи должны быть усилены с помощью телескопических комплектов (TS₁, TS₂).

Объем лучей (OV), передающих значение температурного поля (FP) над испытуемым твердым телом (ST), попадает на голографическую плату (H), закрепленную в держатель (DH). Другой объем параллельных лучей (опорная линия RV) падает на зеркало, размещенное в карданной подвеске.

Поворачивая зеркало (KZ) вокруг двух независимых друг от друга осей, можно настроить ограниченную или бесконечную ширину полосы в контрольной области за голограммой.

Голограмма получается при одновременном экспонировании голографической платы двумя световыми потоками при однородном значении коэффициента преломления в измеряемой области, т.е. без входа в фазовый объект.

После фотохимической обработки голографической платы можно восстановить исходный размер объекта, который в режиме реального времени интерферируется с реальным объемом объекта, деформированного оптическими неоднородностями, т.е. при сбое в любом месте с изменением показателя преломления света, например, при изменении плотности воздуха из-за изменения температуры, изменятся и локальные значения оптического пути света. Любое измене-

ние значения коэффициента преломления искажает реальную объектную волну и проявляется в виде появления интерференционных полос.

В качестве источника голографической интерферометрии использовался гелий-неоновый лазер с длиной волны $\lambda = 0,6328 \cdot 10^{-6}$ м.

В эксперименте использовался метод «живой границы» или метод реального времени «Infinite-Fringe». Данный метод позволяет наблюдать одновременно за изменениями коэффициента интерференции и изменениями фазовой неоднородности в реальном времени.

Анализ голографических интерферограмм

Функциональная зависимость температуры от величин состояния окружающей среды, длины модели, длины световой волны и количества темных полос от положения неоднородной области определяется в соответствии с [7] по формуле:

$$T(x, y) = \frac{T_{\infty}}{1 - 0,805 \cdot \frac{T_{\infty}}{l \cdot p_{\infty}} \cdot \left(s - \frac{1}{2}\right)}, \quad (1)$$

где $T(x, y)$ – расположение температур, температура в соответствующем интерференционном порядке; T_{∞} – температура воздуха в контрольной области; p_{∞} – давление в данной области; s – интерференционный порядок; λ – длина световой волны; l – длина модели.

Воздух в контрольной области с температурой T_{∞} взаимодействует с поверхностью модели с температурой T_x в положении x , что приводит к локальному теплообмену между поверхностью и воздухом.

Значение локального (местного) коэффициента теплоотдачи α_x зависит от многих факторов, например, от типа жидкости, скорости потока, формы поверхности, положения наблюдаемой области или разницы температур поверхности и воздуха [8]. Значение локального коэффициента теплоотдачи можно рассчитать по формуле [9]:

$$\alpha_x = -\lambda_v \left(\frac{dT}{dy} \right)_x \frac{1}{T_x - T_{\infty}}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности (определяется температурой поверхности); T_x – температура поверхности модели в положении x .

Рассмотрим нагрев горизонтальной плоской плиты: нагрев происходит снизу, температура нижней нагреваемой поверхности t_1 , верхней поверхности – t_2 . Согласно основному закону теплопроводности – закону Фурье, плотность теплового потока q равна [10]:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}. \quad (3)$$

Для плотности стабилизированного теплообмена q через плиту шириной d следует:

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_2}{d}. \quad (4)$$

Если температура газа (или жидкости) над плитой соответствует t_{∞} , то согласно закону Ньютона-Рихмана о плотности потока тепла [11]:

$$q = \alpha (t_2 - t_{\infty}), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

Из условия равенства плотности тепловых потоков через плиту следует:

$$\lambda \frac{t_1 - t_2}{d} = \alpha (t_2 - t_{\infty}). \quad (6)$$

Из уравнения (6) можно рассчитать неизвестный коэффициент теплопроводности плиты:

$$\lambda = \alpha \cdot d \cdot \frac{t_2 - t_{\infty}}{t_1 - t_2}. \quad (7)$$

Экспериментальные исследования теплообмена

Для измерения теплопередачи использовались экспериментальные образцы из пенобетона, армированного ПЭТФ-волокном, размерами $40 \times 40 \times 15$ мм. В качестве нагревателей использовались два электрических щитовых нагревательных элемента общей входной мощностью 300 Вт с возможностью ручного регулирования тепловой мощности в пределах 15–100 %.

Голографические интерферограммы температурного поля над нагретым экспериментальными образцами регистрировались при температуре окружающей среды $23,5$ °C ($296,65$ К) и давлении 98100 Па.

Голограммы записывались интерферометром Маха-Цендера на неограниченное число интерференционных полос в режиме реального времени. В ходе экспериментов мы наблюдали расположение температурного поля над образцами, отражающего все три вида теплообмена (теплопроводность, излучение и конвекцию), а также определяли теплофизические свойства образцов.

Голографические интерферограммы, полученные в ходе эксперимента, представлены на рис. 2.



Рис. 2. Голографические интерферограммы температурных полей

Результатом интерферометрической визуализации температурных полей является изображения голографических интерферограмм, которые могут быть оценены как количественно, так и качественно.

При качественной оценке интерферограмм 2D температурных полей и установке интерферометра на произвольную ширину полос в контрольной области интерференционные полосы представляли собой пучки фазовых объектов с тем же значением показателя преломления, т.е. изотермы диапазонов температуры (пучки с определенной температурой). Если они находились близко друг к другу, это означало наличие большого термического градиента (значительное изменение температуры на небольшом участке). Полосы, расположенные дальше друг от друга, представляли собой участки с почти одинаковыми температурами.

На основе полученных голографических интерферограмм также проводился количественный анализ. Экспериментально температуры

были рассчитаны в соответствии с (1). Далее из интерферограмм были вычислены локальные коэффициенты теплоотдачи α_x в соответствии с (2) по температуре контактной поверхности, температуре и расстоянию между первыми полосами отсчёта, расположенными над счетчиком. Коэффициенты теплоотдачи рассчитывались по сечениям на расстоянии 20, 22, 24 мм от левого края исследуемого образца.

В областях, где проходил поток воздуха (по конечной ширине образца он находился в середине), возникали специфические колокообразные полосы, причем градиент температуры был наименьшим, а отдельные изотермы были более удалены друг от друга. В этих зонах конкретных колоколовидных полос оценивали коэффициент теплоотдачи α . На рисунке 3 показаны расчетные значения локального коэффициента теплоотдачи на расстоянии 20, 22 и 24 мм от края образца.

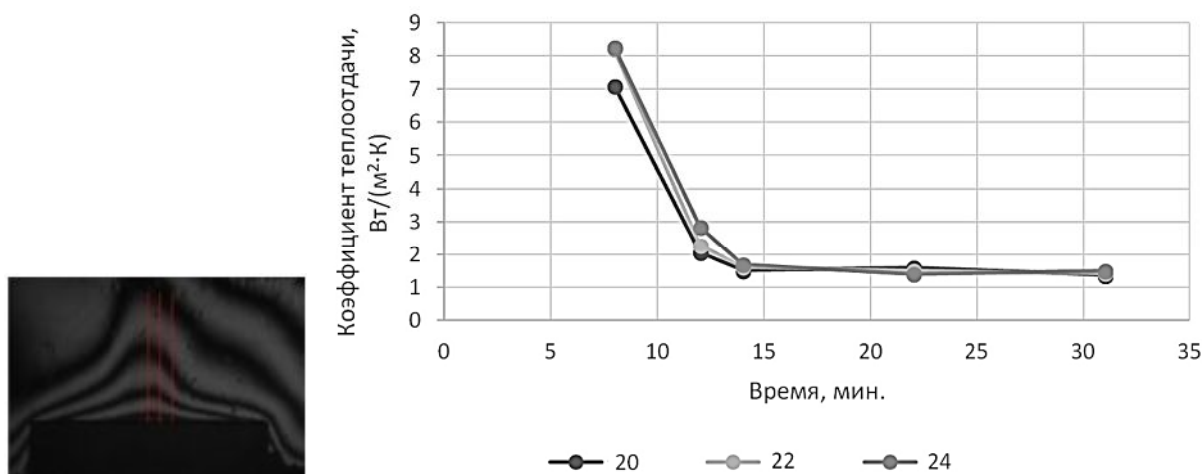


Рис. 3. Расчетные значения локального коэффициента теплоотдачи образцов армированного пенобетона

Чем плотнее полосы, тем выше коэффициент теплоотдачи α . В конкретных колоколовидных интерференционных полосах наблюдалась более низкая теплопроводность, а также более высокое сопротивление на больших расстояниях.

Для расчета коэффициента теплопроводности использовался локальный коэффициент теплоотдачи $\alpha=1,54 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, полученный при расчете сечения интерференционных полос над серединой образца. С помощью выражения (7) мы

определили значение коэффициента теплопроводности пенобетонного армированного образца $\lambda = 0,025 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

По сравнению с газобетонными блоками шведской фирмы YTONG ($\lambda=0,0294 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$), применяемыми в Словакии для малоэтажного строительства, российские образцы пенобетона, армированные ПЭФТ-волокном, показали более низкое значение теплопроводности, что означает более высокую теплостойкость и лучшую изоляцию.

Выводы. В статье мы провели анализ теплопередачи с помощью естественной конвекции путем нагрева образца пенобетона, армированного ПЭТФ-волокнами.

Температурные поля, возникающие над поверхностью образца, отображались и регистрировались посредством установки интерферометра Маха-Цендера на протяжении всей длины интерференционных полос в режиме реального времени. Количественный анализ изображений голографической интерферограммы позволил получить коэффициенты теплоотдачи α_x , необходимые для последующего расчета коэффициента теплопроводности λ для образцов с известной системой армирования с заданными размерами и свойствами арматуры и самих образцов. Этот подход можно использовать и для других типов армирования пенобетона.

Источник финансирования. Грантовый проект VEGA 1/0086/18 при поддержке Министерства образования, науки, исследований и спорта Словацкой Республики. Исследования температурных полей в комплексе профилированных поверхностей теплопередачи (VEGA 1/0086/18 grant project: Researching temperature fields in a set of shaped heat transfer surfaces).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пустыльник О.С. Проблемы и перспективы производства высококачественного пенобетона // Поколение будущего: взгляд молодых ученых : сборник научных статей 6 Международной молодежной научной конференции 09-10 ноября 2017 года. Том 3. Курск. 2017. С. 217–221.
2. Домнина К.Л., Сотникова М.В. Моделирование системы армирования мелкозернистых бетонов // Молодежь. Наука. Современность: IV Всероссий. науч.-практ. конф. с международ. участием (10 апреля 2017 г.): сборник статей. Филиал ФГБОУ ВО «УдГУ» в г. Воткинске. Ижевск: Издательский центр «Удмуртский университет». 2017. С. 133–136.
3. Домнина К.Л., Сотникова М.В. К вопросу прочности на сжатие мелкозернистого фибробетона // Наука Удмуртии. 2018. № 2 (84). С. 29–33.
4. Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 336 с.
5. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
6. Jones R., Wykes C. Holographic and Speckle Interferometry. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 1989.
7. Černecký J., Pivarčiová E. Possibilities and Prospects of Holography. Izhevsk, Russia : State Technical University, 2007. ISBN 978-5-7526-0303-7.
8. Černecký J., Koniar J., Brodnianska Z. The Effect of Heat Transfer Area Roughness on Heat Transfer Enhancement by Forced Convection // Journal of Heat Transfer of the ASME journals. 2014. №136 (4).
9. Pavelek M., Janotková E., Štětina J. Vizualizační a optické měřicí metody (Visualisation and optical measurement methods). Brno: VUT (University of Technology in Brno), 2007.
10. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. Учебн. пособие для неэнергетических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1975. 496 с.
11. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача. М.: Атомиздат, 1977. 352 с.

Информация об авторах

Домнина Ксения Леонидовна, старший преподаватель кафедры «Техническая механика». E-mail: domnina@vfstu.ru. Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова. Россия, 427430, Удмуртская Республика, г. Воткинск, ул. П.И. Шувалова, д. 1.

Pivarčiová Elena, кандидат наук, доцент кафедры технологии производства и автоматизации факультета экологии и технологии производства. E-mail: pivarciova@tuzvo.sk. Технический университет в Зволене. Словакия, 960 53, Зволен, ул. Студенческая, д. 26.

Репко Валентин Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры «Техническая механика». E-mail: olga.koalchenko@mail.ru. Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова. Россия, 427430, Удмуртская Республика, г. Воткинск, ул. П.И. Шувалова, д. 1.

Сотникова Мария Вячеславовна, студент 4 курса направления «Строительство». Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета им. М.Т. Калашникова. Россия, 427430, Удмуртская Республика, г. Воткинск, ул. П.И. Шувалова, д. 1.

Поступила в мае 2019 г.

© Домнина К.Л., Pivarčiová E., Репко В.Н., Сотникова М.В., 2019

^{1,*}Domnina K.L., ²Pivarčiová E., ¹Repko V.N., ¹Sotnikova M.V.

¹Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Russia, 427430, Udmurt Republic, Votkinsk, st. Shuvalova, 1

²Technical University in Zvolen, Department of Manufacturing and Automation Technology,

Faculty of Environmental and Manufacturing Technology

Slovakia, 960 53, Zvolen, Študentská 26

*E-mail: domnina@vfistu.ru

HEAT EXCHANGE IN FOAM CONCRETE REINFORCED BY POLYETHYLENE TEREPHTHALATE FIBER (PET FIBER)

Abstract. The article analyzes temperature fields over foam concrete samples reinforced by PET fibers. The samples are developed at the Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University. The effectiveness of reinforced PET fibers has already been proven, but so far, the effect of PET reinforcement on the thermophysical properties of foam concrete has not been well studied. In the laboratories of the Technical University in Zvolen, Slovakia (TUZVO), the heat transfer is analyzed using natural convection by heating reinforced foam concrete samples. The method of holographic interferometry is used, which allows to visualize temperature fields in real time. Temperature fields arising above the samples are displayed and recorded by a Mach-Zehnder interferometer using the «living boundary» method throughout the entire length of the interference fringes. A method for calculating the parameters of heat transfer by analogy with the heating of a flat plate has been proposed. Qualitative and quantitative analyzes of holographic interferograms of the temperature fields are carried out. The local heat transfer parameters are calculated: the heat transfer coefficient α and the heat conductivity coefficient λ . It has been established that the samples of foam concrete reinforced by PET fibers made in Russia have a higher heat resistance and better insulation than foreign analogues.

Keywords: holographic interferometry, Mach-Zehnder interferometer, heat transfer, foam concrete, polyethylene terephthalate fiber (PET fiber).

REFERENCES

1. Washer O.S. Problems and prospects for the production of high-quality foam concrete [*Problemy i perspektivy proizvodstva vysokokachestvennogo penobetona*]. Pokolenie budushchego: vzglyad molodyh uchenykh : sbornik nauchnykh statej 6 Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii 09-10 noyabrya 2017 goda. Tom 3. Kursk. 2017. Pp. 217–221. (rus)
2. Domnina K.L., Sotnikova M.V. Modeling the system of reinforcement of fine-grained concretes [*Modelirovanie sistemy armirovaniya melkozernistykh betonov*]. Molodezh'. Nauka. Sovremennost': IV Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunarod. uchastiem (10 aprelya 2017 g.): sbornik statej. Filial FGBOU VO «UdGU» v g. Votkinske. Izhevsk: Izdatel'skij centr «Udmurtskij universitet». 2017. Pp. 133–136. (rus)
3. Domnina K.L., Sotnikova M.V. On the issue of high compression of fine-grained fiber-reinforced concrete [*K voprosu prochnosti na szhatie melkozernistogo fibrobetona*]. Science of Udmurtia. 2018. No. 2 (84). Pp. 29–33. (rus)
4. Ostrovsky Yu.I., Butusov M.M., Ostrovskaya G.V. Holographic interferometry [*Golograficheskaya interferometriya*]. M.: Science, 1977. 336 p. (rus)
5. West Ch. Holographic interferometry [*Golograficheskaya interferometriya*]. Moscow: Mir, 1982. 504 p. (rus)
6. Jones R., Wykes C. Holographic and Speckle Interferometry. Cambridge University Press. Cambridge, UK, 1989.
7. Černecký J., Pivarčiová E. Possibilities and Prospects of Holography. Izhevsk, Russia: State Technical University, 2007. ISBN 978-5-7526-0303-7.
8. Cernecky J., Koniar J., Brodnianska Z. The Effect of Heat Transfer Area Roughness on Heat Transfer Enhancement by Forced Convection. Journal of Heat Transfer of the ASME journals. 2014. No. 136 (4).
9. Pavelek M., Janotková E., Štětina J. Vizualizační a optické měřicí metody (Visualisation and optical measurement methods). Brno: VUT (University of Technology in Brno), 2007.
10. Nashchokin V.V. Technical thermodynamics and heat transfer [*Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha*]. Uchebn. posobie dlya neenergeticheskikh special'nostej vuzov. M.: Vysshaya shkola, 1975. 496 p. (rus)
11. Novikov I.I., Resurrection K.D. Applied thermodynamics and heat transfer [*Prikladnaya termodinamika i teploperedacha*]. M.: Atomizdat. M.: Atomizdat, 1977. 352 p. (rus)

Information about the authors

Domnina, Kseniia L. Senior lecturer. E-mail: domnina@vfistu.ru. Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Russia, 427430, Udmurt Republic, Votkinsk, st. Shuvalova, 1.

Pivarčiová, Elena. PhD, Assistant professor. E-mail: pivarciova@tuzvo.sk. Technical University in Zvolen, Department of Manufacturing and Automation Technology, Faculty of Environmental and Manufacturing Technology. Slovakia, 960 53, Zvolen, Študentská 26.

Repko, Valentin N. PhD, Professor. Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Russia, 427430, Udmurt Republic, Votkinsk, st. Shuvalova, 1.

Sotnikova, Mariia V. Bachelor student. Votkinsk branch of Kalashnikov Izhevsk State Technical University. Russia, 427430, Udmurt Republic, Votkinsk, st. Shuvalova, 1.

Received in May 2019

Для цитирования:

Домнина К.Л., Pivarčiová E., Репко В.Н., Сотникова М.В. Исследование теплообмена в пенобетоне, армированном полиэтилентерфталатным волокном (пэтф-волокном) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. № 7. С. 121–127. DOI: 10.34031/article_5d35d0b6c4cf71.39272431

For citation:

Domnina K.L., Pivarčiová E., Repko V.N., Sotnikova M.V. Heat exchange in foam concrete reinforced by polyethylene terephthalate fiber (pet fiber). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2019. No. 7. Pp. 121–127. DOI: 10.34031/article_5d35d0b6c4cf71.39272431