

Измерение температуры пенобетона при термообработке микроволновым излучением

Александр Владимирович Мамонтов¹, Владимир Николаевич Нефёдов^{2✉}, Игорь Васильевич Назаров³, Валентин Павлович Симонов⁴, Сергей Анатольевич Хриткин⁵

¹ Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, Россия, niipmt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4229-0734>

^{2, 3, 4, 5} Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

²6034348@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9753-7389>

³<http://orcid.org/0000-0002-8869-1920>

⁴<http://orcid.org/0000-0002-1769-9327>

⁵<http://orcid.org/0000-0002-6941-4725>

Аннотация. Рассмотрена актуальная задача снижения энергетических затрат технологического процесса тепловой обработки плиты из пенобетона. Показано, что для решения поставленной задачи целесообразно использовать в качестве источника теплоты энергию микроволнового излучения. Рассмотрены основные преимущества микроволнового метода тепловой обработки плиты из пенобетона по сравнению с традиционными методами. Разработана конструкция микроволновой установки для тепловой обработки плит из пенобетона. Источники микроволнового излучения разработанной установки имеют выводы энергии в виде раскрыва прямоугольных волноводов, которые используются в качестве излучающих антенн. Для расчёта распределения температуры на поверхности плиты из пенобетона использован метод Гюйгенса-Кирхгофа, а для расчёта распределения температуры по толщине плиты из пенобетона – метод нагруженных длинных линий. Предложена методика измерения распределения температуры плиты из пенобетона. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения температуры по поверхности и по толщине плиты из пенобетона шириной 1500 мм, высотой 1000 мм и толщиной 200 мм, плотностью 1000 кг/м³ на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Полученные экспериментальные результаты показали высокую эффективность использования микроволнового излучения для технологических процессов тепловой обработки плиты из пенобетона. Технологии с использованием микроволнового излучения могут быть использованы для тепловой обработки изделий из бетона, железобетона и полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: микроволновое излучение, электродинамическая система, пенобетон, распределение температуры, диэлектрический материал, источник микроволновой энергии

Для цитирования: Мамонтов А. В., Нефёдов В. Н., Назаров И. В., Симонов В. П., Хриткин С. А. Измерение температуры пенобетона при термообработке микроволновым излучением // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 44–48. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-4-44-48>

The foam concrete temperature measuring during its microwave heat treatment

Alexandr V. Mamontov¹, Vladimir N. Nefedov^{2✉}, Igor V. Nazarov³, Valentin P. Simonov⁴, Sergey A. Khritkin⁵

¹ Research Institute of Advanced Materials and Technology, Moscow, Russia, niipmt@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4229-0734>

^{2, 3, 4, 5} National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

²6034348@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9753-7389>

³<http://orcid.org/0000-0002-8869-1920>

⁴<http://orcid.org/0000-0002-1769-9327>

⁵<http://orcid.org/0000-0002-6941-4725>

Abstract. The actual problem of accelerating and reducing the energy costs of the foam concrete slabs heat treatment technological process is considered. It is shown that to solve this problem, it is advisable to use the microwave radiation energy as a heat source. The main advantages of the microwave method of foam concrete slabs heat treatment in comparison with traditional methods are considered. The design of a microwave installation for the foam concrete slabs heat treatment has been developed. The installed microwave radiation sources have energy outputs in the form of a rectangular waveguide openings, which are used as radiating antennas. Huygens-Kirchhoff method was used to calculate the temperature distribution on the foam concrete slab surface; the method of loaded long lines was used to calculate the temperature distribution over the foam concrete slab thickness. A method for measuring the foam concrete slab temperature distribution is proposed. The results of theoretical and experimental temperature distribution studies on the surface and the cross-section of foam concrete slab with a width of 1500 mm, a height

of 1000 mm and a thickness of 200 mm, a density of 1000 kg/m³ on the electromagnetic fields oscillation frequency of 2450 MHz are shown. The obtained experimental results showed a high efficiency of using microwave radiation for the foam concrete slabs heat treatment technological processes. Microwave technologies can be used for heat treatment of products made of concrete, reinforced concrete and polymer composite materials.

Keywords: microwave radiation, electrodynamic system, foam concrete, temperature distribution, dielectric material, microwave energy source

Введение. Изделия из пенобетона используются в различных областях строительной индустрии [1–3]. Современные тенденции развития производства изделий из пенобетона направлены на ускорение их твердения, снижение энергетических затрат и повышение прочности [4–5].

Традиционные методы тепловой обработки плит из пенобетона включают следующие этапы технологического процесса [6–8]:

нагрев плиты из пенобетона и её опалубки до оптимального значения температуры +70 °С с использованием пара или электронагревательных установок;

поддержание оптимального значения температуры плиты из пенобетона и материала опалубки в течение времени, которое необходимо до получения распалубочной прочности плиты.

Пенобетон обладает низкой теплопроводностью, поэтому традиционные методы нагрева плиты из пенобетона сопровождаются большими энергетическими и временными затратами. Перепад температуры от внешних слоёв к внутренним слоям плиты из пенобетона не позволяет реализовать высокую скорость технологического процесса, а возникающие внутренние напряжения между внешними и внутренними слоями нагреваемой плиты приводят к различным дефектам внутренней структуры пенобетона и снижают прочностные характеристики получаемых изделий [6–8].

Результаты научных исследований по ускоренному набору прочности плит из пенобетона показали высокую эффективность использования для этих целей энергии микроволнового излучения [9–11]. Применение микроволнового излучения позволяет значительно повысить экономические показатели технологического процесса.

В научных публикациях [10–12] показано, что микроволновый метод по сравнению с традиционными методами тепловой обработки плит из пенобетона имеет следующие преимущества:

микроволновое излучение проникает мгновенно вглубь плиты из пенобетона независимо от теплопроводности материала и значительно ускоряет протекание реакции гидратации с выделением теплоты внутри обрабатываемого материала плиты;

объёмный характер нагрева плиты из пенобетона ускоряет технологические процессы в несколько раз и не приводит к появлению внутренних напряжений и других механических дефектов структуры пенобетона;

технологический процесс тепловой обработки плиты из пенобетона не инерционен, поэтому его можно автоматизировать;

микроволновое излучение не нагревает окружающее пространство – воздух, что существенно снижает энергетические затраты на технологический процесс ускоренного набора прочности плиты из пенобетона;

в качестве опалубки для плиты из пенобетона целесообразно использовать теплоизоляционный материал с малыми диэлектрическими потерями, так как это позволяет не учитывать отдачу теплоты в окружающее пространство и приводит к уменьшению энергетических затрат;

использование теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями для изготовления опалубки, например из полипропилена или фторопласта, позволяет снизить энергетические затраты на поддержание номинального значения температуры в плите из пенобетона в течение времени, необходимого для набора требуемой распалубочной прочности.

Конструкция и параметры микроволновой установки. Для тепловой обработки плиты из пенобетона размером 1000×1500×200 мм предложена микроволновая установка лучевого типа [13, 14].

На рис. 1 представлено поперечное сечение конструкции микроволновой установки лучевого типа для равномерного нагрева плиты из пенобетона. Микроволновая установка состоит из выполненной из металла прямоугольной рабочей камеры 1 со съёмной крышкой 4. На двух противоположных боковых поверхностях рабочей камеры расположены

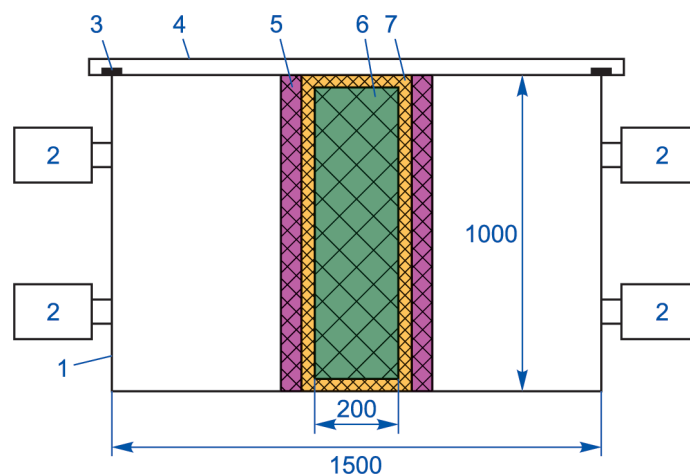


Рис. 1. Поперечное сечение микроволновой установки лучевого типа для равномерного нагрева плиты из пенобетона:

1 – рабочая камера; 2 – источники микроволнового излучения; 3 – металлическая пружинная прокладка; 4 – верхняя крышка рабочей камеры; 5 – направляющие фиксаторы плиты из пенобетона; 6 – плита из пенобетона; 7 – опалубка плиты

Fig. 1. Cross-section of the beam type microwave installation for uniform heating of the foam concrete slab:

1 – working chamber; 2 – microwave radiation source; 3 – metal spring gasket; 4 – top cover; 5 – guide clamps for the foam concrete slab; 6 – foam concrete slab; 7 – formwork for the foam concrete slab

источники микроволнового излучения 2. Крышка опирается на фланец, на котором расположена специальная пружинистая прокладка 3 из металла, предотвращающая выход микроволнового излучения из рабочей камеры во внешнее пространство. На двух других противоположных боковых поверхностях рабочей камеры расположены специальные направляющие 5 для фиксации плиты из пенобетона. Направляющие выполнены из материала с малыми диэлектрическими потерями.

Микроволновая установка работает следующим образом. Плита из пенобетона 6, которая расположена в опалубке 7, выполненной из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями, например из фторопласта или полипропилена, помещается в рабочую камеру. Затем опускается крышка, включаются источники микроволнового излучения.

При достижении плитой из пенобетона оптимальной температуры +70 °С с рабочей камеры микроволновой установки снимается крышка, опалубка с плитой пенобетона извлекается из камеры и переносится на определённое время в тёплое помещение, где плита из пенобетона набирает распалубочную прочность. Плита из пенобетона расположена в опалубке из теплоизоляционного материала, которая играет роль термоса.

Основные параметры микроволновой установки
лучевого типа для ускоренного отверждения плиты
из пенобетона

Мощность микроволнового излучения	9,6 кВт
Частота колебаний электромагнитного поля.....	2450 МГц
Размеры рабочей камеры установки (Д×Ш×В) ...	1500×1500×1000 мм
Масса плиты из пенобетона	300 кг
Время нагрева плиты от +20 °С до +70 °С	22 мин
Размеры плиты (Д×Ш×В).....	1500×1000×200 мм
Теплоёмкость пенобетона	0,84 Дж/(г·°С)
Плотность пенобетона	1000 кг/м ³
Относительная диэлектрическая проницаемость пенобетона:	
мнимая часть ε''	0,13
действительная часть ε'	4,5
Теплопроводность пенобетона.....	0,14 Вт/(м·°С)

Расположение источников микроволнового излучения на боковых стенках рабочей камеры микроволновой установки лучевого типа должно обеспечить равномерное распределение температуры на поверхности плиты из пенобетона площадью 1,5 м².

В качестве источника микроволнового излучения использован источник, работающий на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц, массой 12 кг, длиной 400 мм, шириной 200 мм и высотой 200 мм. Вывод энергии микроволнового излучения из источника осуществляется с использованием антенны в виде раскрыва прямоугольного волновода поперечным сечением 72×34 мм.

Расчёт распределения температуры на поверхности плиты из пенобетона. При расчёте диаграммы направленности излучения микроволновой мощности из раскрыва

прямоугольного волновода использован метод Гюйгенса-Кирхгофа [15].

Метод расчёта Гюйгенса-Кирхгофа применяли с учётом следующих основных предположений:

электромагнитное поле в раскрыве прямоугольного волновода остается невозмущённым, т. е. структура поля такая же, как и в прямоугольном волноводе на основном типе волны H_{10} ;

отсутствуют затекающие на наружную поверхность прямоугольного волновода токи;

отсутствует отражённая обратно внутрь волновода волна.

При этих предположениях диаграммы направленности микроволнового излучения из раскрыва прямоугольного волновода выражаются следующими функциями в плоскостях E , H соответственно [15]:

$$F_E = \left[1 + \sqrt{1 - (\lambda/(2a))^2} \cos \theta \right] \frac{\sin(kb \sin \theta/2)}{kb \sin \theta/2};$$

$$F_H = \left[\cos \theta + \sqrt{1 - (\lambda/(2a))^2} \right] \frac{\cos(ka \sin \theta/2)}{1 - (2a \sin \theta/\lambda)^2},$$

где λ – длина волны источника микроволнового излучения; a , b – размеры соответственно широкой и узкой стенок волновода; θ – угол, составляющий интересующее направление относительно направления распространения энергии в прямоугольном волноводе; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства.

Распределение мощности микроволнового излучения из раскрыва прямоугольного волновода описывается функциями в плоскостях E , H параллельно узкой или широкой стенкам волновода соответственно:

$$|F_E|^2 = \left[\left[1 + \sqrt{1 - (\lambda/(2a))^2} \cos \theta \right] \frac{\sin(kb \sin \theta/2)}{kb \sin \theta/2} \right]^2; \quad (1)$$

$$|F_H|^2 = \left[\left[\cos \theta + \sqrt{1 - (\lambda/(2a))^2} \right] \frac{\cos(ka \sin \theta/2)}{1 - (2a \sin \theta/\lambda)^2} \right]^2. \quad (2)$$

При расчёте распределения температуры на поверхности плиты из пенобетона использованы выражения (1), (2).

Расчёт распределения температуры по толщине плиты из пенобетона. Распределение температуры по толщине плиты из пенобетона рассчитывали методом нагруженных длинных линий [13, 14]:

$$T(z) = T(0)e^{-2\alpha z},$$

где $T(z)$ – температура плиты из пенобетона на расстоянии z от поверхности в направлении распространения энергии электромагнитного поля; $T(0) = +70$ °С – номинальное значение температуры на поверхности плиты из пенобетона; $\alpha = \pi \varepsilon'' / (\lambda \sqrt{\varepsilon'})$ – постоянная затухания амплитуды напряжённости электрического поля в материале плиты [13], ε' , ε'' – действительная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости пенобетона.

Распределение температуры по толщине плиты из пенобетона происходит по экспоненциальному закону. Сложение двух экспоненциальных зависимостей распределения температуры по толщине плиты из пенобетона от источников микроволнового излучения в микроволновой установке лучевого типа удовлетворяет требованиям технологического процесса.

Методика измерения температуры на поверхности плиты из пенобетона. На рис. 2 показана плита из пенобетона размером 1500×1000 мм и указаны характерные расстояния между источниками микроволнового излучения и точками, в которых измеряли температуру плиты.

Плиту нагревали до номинального значения температуры +70 °С. Затем плиту поднимали из микроволновой установки, снимали опалубку с боковой поверхности плиты и измеряли температуру в точках, показанных на рис. 2. Температуру измеряли в местах проекции расположения выводов энергии источников микроволнового излучения, между источниками и на краях плиты.

Методика измерения температуры по толщине плиты из пенобетона. Измерение распределения температуры по толщине плиты из пенобетона заключалось в том, что после нагрева поверхности плиты до оптимальной температуры +70 °С на разную глубину в плиту из пенобетона помещали термометр с чувствительным элементом в виде термопары.

Температуру измеряли в местах проекции расположения излучающих волноводов источников микроволнового излучения, и между источниками на разных глубинах: 25; 50; 75; 100 мм с каждой стороны плиты.

Результаты рассчитанного и измеренного распределения температуры плиты из пенобетона. Равномерное распределение температуры на поверхности плиты из пенобетона получено на расстоянии 650 мм от стенки камеры микроволновой установки. Номинальное значение температуры на поверхности плиты +70 °С достигнуто при условии, что на боковой стенке рабочей камеры установлено шесть источников микроволнового излучения выходной мощностью 0,8 кВт каждый. Расстояние между источниками микроволнового излучения по длине и высоте боковой стенки рабочей камеры микроволновой установки составляло 500 мм, а расстояние от центра волновода источников до края плиты из пенобетона – 250 мм. При этих условиях обеспечивается равномерное распределение температуры по боковой поверхности плиты из пенобетона. Отклонение измеренных значений температуры на поверхности плиты из пенобетона от номинального значения температуры не превышало 4 °С.

На рис. 3 представлены рассчитанные и измеренные распределения температуры по толщине плиты из пенобетона, создаваемые источниками микроволнового излучения, расположенными на обеих боковых стенках рабочей камеры микроволновой установки. Заштрихованная область соответствует области экспериментальных значений температуры материала плиты. Отклонение измеренных значений температуры по толщине плиты пенобетона от номинального значения температуры плиты +70 °С не превышало 5 °С.

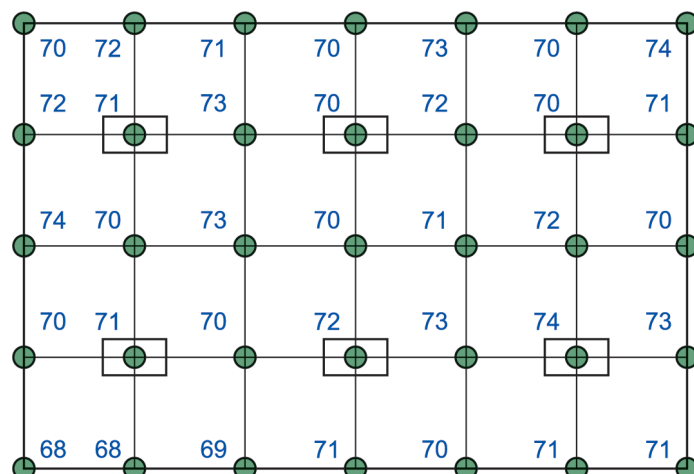


Рис. 2. Распределение измеренных значений температуры (в градусах Цельсия) на поверхности плиты из пенобетона размером 1500×1000 мм; расстояние между источниками микроволнового излучения, расположенными на боковой стенке установки, и точками, в которых производится измерение, составляет 250 мм

Fig. 2. Distribution of measured temperature values (in degrees Celsius) on the surface of a foam concrete slab with dimensions of 1500×1000 mm; the distances between the microwave radiation sources located on the side wall of the installation and the measured points is 250 mm

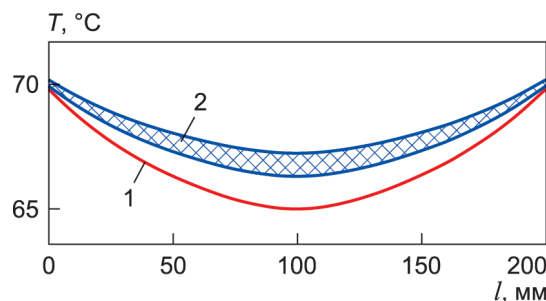


Рис. 3. Рассчитанная зависимость (1) распределения температуры по толщине плиты из пенобетона, создаваемая источниками микроволнового излучения, расположенными на обеих боковых стенках рабочей камеры установки и область (2) экспериментальных значений

Fig. 3. Calculated temperature distribution dependence over the thickness of the foam concrete slab (1) created by the located on both side walls of the microwave installation chamber microwave sources and the range of experimental values (2)

Заключение. Предложена микроволновая установка лучевого типа для высокоэффективного и равномерного нагрева плиты из пенобетона. Показано, что длительность нагрева плиты из пенобетона массой 300 кг от температуры +20 °С до температуры +70 °С составила 22 мин при мощности микроволнового излучения 9,6 кВт. Следовательно, микроволновое излучение позволяет снизить энергетические затраты на нагрев плиты из пенобетона и выдержке её до распалубочной прочности при оптимальной температуре по сравнению с традиционными методами нагрева.

Представлены методы расчёта и методики измерения распределения температуры по толщине и на поверхности

плиты из пенобетона. Расхождение рассчитанных и измеренных значений температуры плиты не превышало 4 °С. Отклонение измеренной температуры от номинального значения на поверхности и по толщине плиты из пенобетона не превышало 5 °С.

Список литературы

1. Гиндин М. Н., Хитров А. В. Технологическая линия для производства мелких стеновых блоков из автоклавного пенобетона на массовом сырье // Строительные материалы. 2003. № 6. С. 4–6.
2. Малинина Л. А., Батраков В. Г. Бетонovedение: настоящее и будущее // Бетон и железобетон. 2003. № 1. С. 2–6.
3. Леонович С. Н., Свиридов Д. В., Шукин Г. А., Беланович Л. Л., Карпушенков С. А., Савенко В. П. Компенсация усадки пенобетона // Строительные материалы. 2015. № 3. С. 3–7.
4. Субханкулова Э. Р., Кондратьев В. В., Морозова Н. Н., Хозин В. Г. Трещинообразование пенобетона плотностью 200 кг/м³ // Строительные материалы. 2006. № 1. С. 46–47.
5. Ружинский С. Р., Портник А. А., Савиных А. В. Все о пенобетоне. СПб.: Строй Бетон, 2006. 630 с.
6. Шахова Л. Д. Технология пенобетона. Теория и практика. Монография. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2010. 248 с.
7. Удачкин И. Б. Ключевые проблемы развития производства пенобетона // Строительные материалы. 2002. № 3. С. 8–9.
8. Ахундов А. А., Удачкин В. И. Перспективы совершенствования технологии пенобетона // Строительные материалы. 2002. № 3. С. 10–11.
9. Нefедов В. Н., Мамонтов А. В. Тепловая обработка бетона с использованием микроволнового излучения // Материалы международной научно-технической конференции «Инновационные информационные технологии», Прага-2013. М.: ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информика», 2013. С. 258–264.
10. Нefедов В. Н., Мамонтов А. В. Применение микроволнового излучения для тепловой обработки бетона // Материалы международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, 2015. С. 944–945.
11. Mamontov A. V., Nefedov V. N., Simonov V. P., Chechetkin A. A., Microwave Method of Curing of Concrete, *T-Comm: Telecommunications and transport*, 2016, vol. 10, no. 8, pp. 79–82.
12. Ревенко Б. С. Получение ячеистых бетонов с привлечением СВЧ-технологий // Молодой ученый. 2017. № 14. С. 118–119.
13. Архангельский Ю. С. Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева: учебник. Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2010. 279 с.
14. Нefедов В. Н., Мамонтов А. В., Симонов В. П. Измерение температуры стенок композитных труб при термообработке в СВЧ-установках типа бегущей волны // Измерительная техника. 2016. № 8. С. 45–48.
15. Мамонтов А. В., Резник С. В., Нefедов В. Н., Гузева Т. А. Методы снижения уровня побочных излучений от СВЧ-установок

лучевого типа для термообработки материалов // Технологии электромагнитной совместимости. 2013. № 3. С. 24–28.

References

1. Gindin M. N., Khitrov A. V., Tekhnologicheskaya liniya dlya proizvodstva melkikh stenovykh blokov iz avtoklavnoy penobetona na massovom syr'e, *Construction Materials*, 2003, no. 6, pp. 4–6 (In. Russ.)
2. Malinina L. A., Batrakov V. G., Betonovedenie: nastoyashchee i budushchee, *Beton i zhelezobeton*, 2003, no. 1, pp. 2–6. (In. Russ.)
3. Leonovich S. N., Sviridov D. V., Shchukin G. L., Belanovich A. L., Karpushenkov S. A., Savenko V. P., Kompensatsiya usadki penobetona, *Construction Materials*, 2015, no. 3, pp. 3–7. (In. Russ.)
4. Subkhankulova E. R., Kondrat'ev V. V., Morozova N. N., Khozin V. G., Treshchinoobrazovanie penobetona plotnost'yu 200 kg/m³, *Construction Materials*, 2006, no. 1, pp. 46–47. (In. Russ.)
5. Ruzhinskii S. R., Portik A. A., Savinykh A. V., *Vse o penobetone*, St. Petersburg, StroiBeton Publ., 2006, 630 p. (In. Russ.)
6. Shakhova L. D., *Tekhnologiya penobetona. Teoriya i praktika. Monografiya*, Moscow, Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov Publ., 2010, 248 p. (In. Russ.)
7. Udachkin I. B., Klyuchevye problem razvitiya proizvodstva penobetona, *Construction Materials*, 2002, no. 3, pp. 8–9. (In. Russ.)
8. Akhundov A. A., Udachkin V. I., Perspektivy sovershenstvovaniya tekhnologii penobetona, *Construction Materials*, 2002, no. 3, pp. 10–11. (In. Russ.)
9. Nefedov V. N., Mamontov A. V., Teplovaya obrabotka betona s ispol'zovaniem mikrovolnovogo izlucheniya, *Proceedings of the Conference Scientific and Technical "Innovatsionnye informatsionnye tekhnologii"*, Praga-2013, Moscow, FGAU GNII ITT "Informika" Publ., 2013, pp. 258–264. (In. Russ.)
10. Nefedov V. N., Mamontov A. V., The concrete treatment with the use of microwave radiation, *Proceedings of the 25th International Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2015)*, 6–12 September, Sevastopol, 2015, pp. 944–945.
11. Mamontov A. V., Nefedov V. N., Simonov V. P., Chechetkin A. A., Microwave Method of Curing of Concrete, *T-Comm: Telecommunications and transport*, 2016, vol. 10, no. 8, pp. 79–82.
12. Revenko B. S., Poluchenie yacheistyykh betonov s privlecheniem SVCH-tekhnologii, *Molodoi uchenyi*, 2017, no. 14, pp. 118–119. (In. Russ.)
13. Arkhangel'skii Yu. S., Ustanovki sverkhvysokochastotnogo dielektricheskogo nagreva: uchebnik, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov Publ., 2010, 279 p. (In. Russ.)
14. Nefedov V. N., Mamontov A. V., Simonov V. P., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 856–860. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1057-3>
15. Mamontov A. V., Reznik S. V., Nefedov V. N., Guzeva T. A., Metody snizheniya urovnya pobochnykh izlucheniit ot SVCH-ustanovok luchevoego tipa dlya termoobrabotki materialov, *Technologies of electromagnetic compatibility*, 2013, no. 3, pp. 24–28. (In. Russ.)

Статья поступила в редакцию 20.07.2020; принята к публикации 20.08.2020.