

УДК 691.32

**Соков В.Н.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [Sersok\\_07@mail.ru](mailto:Sersok_07@mail.ru)

**Бегляров А.Э.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: [Beotlandrey007@yandex.ru](mailto:Beotlandrey007@yandex.ru)

**Московский государственный строительный университет**

Адрес организации: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

### **Комплексное воздействие электрогидротеплосилового поля на формирование структуры цементного камня**

#### **Аннотация**

Разработана энергосберегающая и ускоренная технология многослойных стеновых строительных изделий, получаемых под действием электрогидротеплосилового поля. За счет использования эффекта от увеличения в объеме при нагреве зёрен предварительно подвспененного полистирола стало возможным сократить технологический процесс, уменьшить энергозатраты и получить теплоизоляционный материал с улучшенными эксплуатационными свойствами. Благодаря воздействию электрогидротеплосилового поля создаются условия для получения более плотной матрицы наружных слоёв блока и равномерно распределенной мелкопористой структуры.

**Ключевые слова:** электропрогрев, электрогидротеплосиловое поле, многослойные изделия, избыточное давление, гидродинамический поток, объемное прессование, пенополистиролбетон.

В настоящее время перед мировым сообществом как никогда остро стоит вопрос экономии энергетических ресурсов во всех отраслях экономики. Известно, что промышленность производства строительных материалов является одной из наиболее энергоёмких. В этой связи, разработка новых эффективных строительных изделий, получаемых в короткие сроки и при минимальных материальных затратах видится особенно актуальной.

Самая значительная доля энергии при производстве строительных материалов расходуется в процессе тепловой обработки. Кроме того, этот передел занимает наибольшее время в технологическом цикле производства. Поэтому повышение эффективности тепловой обработки вкупе с сокращением её длительности является одним из наиболее перспективных способов снижения стоимости строительства и повышения производительности предприятий.

Исследования, проведенные Б.Г. Скрамтаевым, А.Е. Десовым, В.И. Сорокером, Л.А. Малининой, С.А. Мироновым, С.В. Шестоперовым, А.В. Уиттингтоном, Дж. Г. Уилсоном, Е. Шилдом, Дж. В. Маллином и другими учеными показали, что, при прочих равных условиях, на интенсивность твердения бетона в значительной мере влияет состав бетона, водоцементное отношение и подвижность бетонной смеси. У бетонов с низким В/Ц отмечается более высокий темп твердения в начальный период времени. Однако такие смеси отличаются трудоёмкостью при укладке их в формы. Поэтому, в заводских условиях очень большое значение приобретают показатели подвижности бетонной смеси, под действием которых изменяется используемое оборудование и применяемая техника производства бетонных работ. В этой связи, особенно перспективным видится возможность направленного регулирования подвижности бетонной смеси на разных стадиях производства.

В то же самое время, Л.А. Малинина, проанализировав роль избыточного давления в процессе тепловлажностной обработки [1] указывает, что обжатие бетона, которое создается механическим путем и равняется 0,005-0,01 МПа позволяет значительно сократить цикл пропаривания с одновременным увеличением прочности бетона в 1,2-1,5 раза. В экспериментах, проведенных Л.А. Малининой, С.А. Мироновым и С.Е. Королевой прочность бетона подвергаемого прогреву в формах под давлением 0,25 МПа была в 1,5 раза выше, чем в обычных закрытых формах.

В ФТИ им. А.Ф. Йоффе проводились исследования по воздействию давления на пористость и прочностные свойства цементного камня. Объектом данных исследований было определение влияния давления на цементную пасту [2]. Вывод по упрочнению всего образца связывался с увеличением доли кристаллической структуры и, как следствие этого, уменьшением общей пористости образца. Кроме указанных, проведён целый ряд других исследований (Юнг, Хамский, Гудермо и др.), из результатов которых можно сделать вывод, что особенно эффективным видится создание такой технологии, при которой тепловая обработка бетона осуществлялась бы под действием избыточного давления. В этом случае создаются улучшенные условия структурообразования бетона.

С учётом указанных технологических особенностей авторами разработана энергосберегающая технология ускоренного получения новых стеновых строительных изделий (рис. 1) с улучшенными физико-техническими показателями [11], суть которой заключается в следующем. В перфорированную форму укладывается пенополистиролбетон, содержащий предварительно подвспененные зёрна полистирола. Форма закрывается крышкой, устанавливается в наклонное положение и включается в цепь переменного тока. В дальнейшем происходит электропрогрев продолжительностью около 25 мин. через металлические электроды, расположенные на противоположных сторонах формы. При температуре выше  $80^{\circ}\text{C}$  полистирол увеличивается в объёме, создавая внутреннее избыточное давление [12, 15]. В ходе этого свободная влага отжимается до значений, близких к теоретически необходимым для гидратации вяжущего, образуется более прочная структура бетона и ускоряется его тепловая обработка. В свою очередь происходит уплотнение материала на величину объёма удалённой влаги, снижение капиллярной пористости и повышение прочности межпоровых перегородок. После окончания электропрогрева осуществляется выдержка изделий в форме в пределах 50 мин чтобы релаксировались внутренние напряжения и произошёл набор структурной прочности. Далее с изделий снимают боковую часть формы и они отправляются на окончательную термообработку, находясь на поддоне [14, 16]. Это обстоятельство позволяет повысить теплоотдачу от теплоносителя к изделию, что заметно снижает продолжительность термообработки и расход тепловых ресурсов на её осуществление [13].

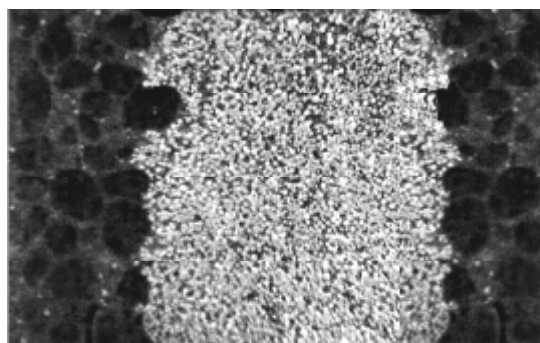


Рис. 1. Изображение разработанных изделий

Авторами подробно исследован процесс структурообразования бетона в условиях действия избыточного давления и повышенной температуры. В ходе исследования установлен ряд особенностей, происходящих при формировании структуры изделий.

К концу этапа активного электропрогрева формируется цементная матрица с минимальным значением капиллярной пористости, сформированная адгезионными контактами частиц твердой фазы и сильно пересыщенной жидкой фазой в порах минерального контакта. После отключения смеси от цепи переменного тока и прекращения интенсивных процессов массопереноса при постепенном остывании материала активно формируется структура минерального каркаса.

При активном теплосиловом воздействии увеличивается скорость химических реакций, протекающих как в жидкой фазе, так и на поверхности гидратирующихся зерен. повышается скорость возникновения зародышей новых фаз, а также увеличивается концентрация продуктов химических реакций в жидкой фазе. Под действием внутреннего

гидростатического давления и определяющегося им напряженного состояния цементной матрицы, а также активного массопереноса происходит диспергирование зерен цемента, создание их более плотной упаковки, ускоряются процессы диффузии продуктов химических реакций в раствор и создаются препятствия процессам формирования коагуляционной структуры.

При кристаллизации из сильно пересыщенной водной фазы образование и рост кристаллов происходят как на поверхности, так и внутри пористых гидратирующихся зерен, а также вокруг диспергированных в жидкой фазе различных твердых частичек - центров кристаллизации. Образующаяся при этом в условиях дефицита свободной воды и продолжающегося теплосилового воздействия гелевая структура характеризуется высокой дисперсностью минерального компонента, и как результат – высокой его реакционной способностью, а также пониженным содержанием воды. Реакционная способность таких систем связана с увеличением числа точек контакта диспергированных частиц и повышения взаимосвязи между ними вследствие сил Ван-Дер-Ваальса и электростатических сил физического порядка [3, 17].

Одновременно с реакциями кристаллизации дисперсных образований из пересыщенного раствора протекает процесс упрочнения адгезионных контактов между частицами уплотненной твердой фазы. Продвижение фронта гидратации вглубь цементных зерен сопровождается отсосом с поверхности гидратов пленочной воды. Формирование структуры конгломерата практически завершается к окончанию периода постепенного остывания материала и дальнейшее ее упрочнение и уплотнение осуществляется за счет роста кристаллических новообразований, а также заполнения объема микропор.

Результатом является сближение частиц твердого вещества. Однако их сближение и связанные с ним изменения объема водонасыщенной межпоровой системы возможны только в результате отжатия воды, поэтому изменение объема равно объему удаляемых из перфорированных форм воды и воздуха. Этот процесс продолжается до тех пор, пока силы связи влаги с материалом не превысят усилия уплотнения.

Для обеспечения нормального протекания рассмотренных процессов в технологическом плане, требуется поддержание давления определенное время с целью обеспечения постоянной скорости роста кристаллов в условиях сближения частиц цементного зерна, что позволит получать в более короткие сроки цементный камень повышенных значений прочности. Поэтому требуется поддержание температуры прогрева такое время, которое нужно для достижения прочности цементного камня, превышающего температурные деформации твердеющего бетона в ходе снижения температуры прогрева. Приблизительно время, нужное для получения прочной структуры, можно определить из формулы Чепелевского М.Л. [4], по которой определяется масса суммы кристалликов образовавшихся в течение индукционного периода:

$$m = \int_0^{\tau_1} K' \lambda^3 \tau^3 \rho I dt = \frac{\rho K'}{4} I \lambda^3 \tau^4 ,$$

где  $K'$  – значение константы скорости кристаллизации;

$\tau$  – значение длительности индукционного периода;

$I$  – величина скорости образования зародышей;

$\lambda$  – значение линейной скорости роста кристаллов;

$\rho$  – величина плотности кристаллов.

Отсюда минимальное время прогрева равно:

$$\tau = \left( \frac{4m}{K' \rho I \lambda^3} \right)^{1/4} .$$

Однако выведенные значения соответствуют процессу кристаллизации одной соли, а в нашем случае это полиморфное соединение, и ближе к истинному показателю будет полученное в результате экспериментов значение, от 15 минут при термосном выдерживании в утепленных формах, до 1 часа в неутепленных формах, при температуре окружающей среды в пределах 18-20 °С.

Исследованиями Юнга было установлено, что под действием механических колебаний в растворе возникают центры кристаллизации [5].

При достижении критического напряжения в формирующейся кристаллической решетке происходит перекристаллизация. В основе процесса перекристаллизации лежит сочетание процессов кристаллизации и растворения. В насыщенных растворах она

происходит из-за создания динамического равновесия между твердой и жидкой фазами. Это ведёт к образованию укрупнённых кристаллов за счет растворения мелких частиц и отложения растворившейся части твердой фазы на более крупных кристаллах. Под действием этого осадки, находящиеся в контакте с насыщенным раствором, становятся более однородными, изменяя свой гранулометрический состав [6, 18]. Помимо динамического равновесия между жидкой фазой и кристаллами в насыщенном растворе, перекристаллизация объясняется также зависимостью растворимости частиц от размеров [7]. Образование наклонных участков на графиках (рис. 2, рис. 3) [8], указывает нам на изменение твердеющего бетона проводить ток, т.е. на перекристаллизацию.

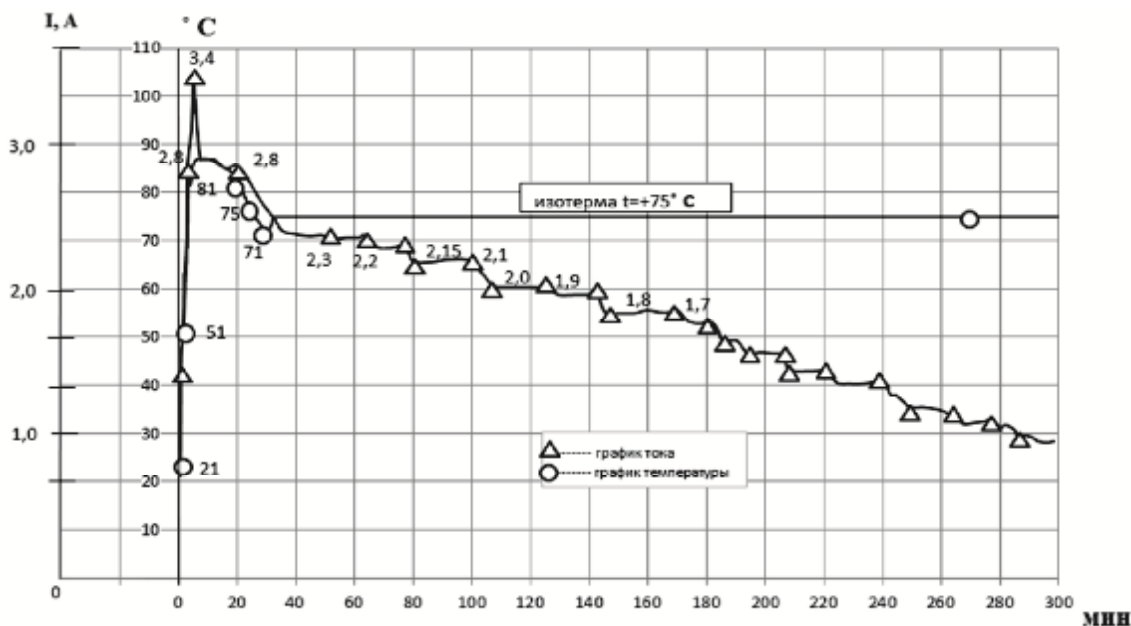


Рис. 2. График зависимости тока от температуры во времени, при электропрогреве полистиролбетона

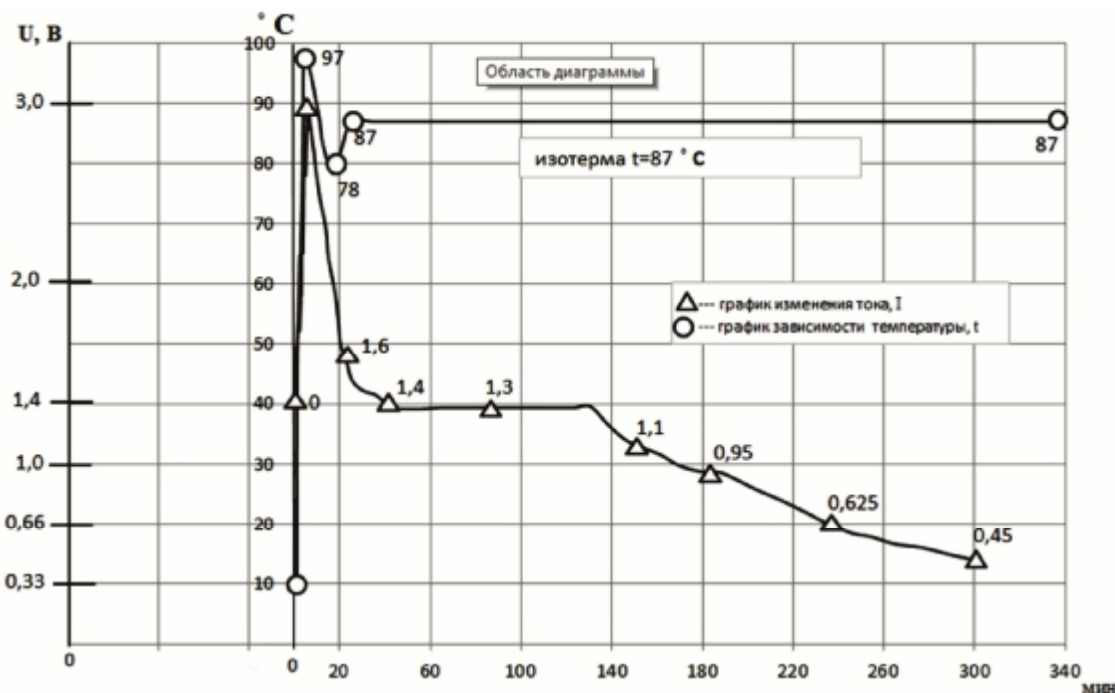


Рис. 3. График изменения тока во времени при изотерме  $t = 87^\circ\text{C}$

Это совпадает с термодинамической теорией роста кристаллов Гиббса-Фольмера, основанной на представлении о прерывистом, послойном росте кристаллов. Такая перекристаллизация приводит к изменению соотношения кристаллической и квазикристаллической частей, т.е. степень «кристалличности» образцов при возникновении давления растёт, что совпадает с выводами Гудермо А. [9] и Черного Ю.Ф. [10].

Комплекс вышеперечисленных процессов даёт в итоге повышенную, на 30 % по сравнению с бетоном нормального твердения, плотность и прочность цементного камня. И как итог повышенную прочность монолитно-слоистых изделий, полученных при гидротеплосиловой обработке. Также происходит снижение на примерно на 40 % времени тепловой обработки и расхода энергоресурсов на её осуществление. Разработаны составы монолитно-слоистых изделий средней плотностью всего блока 370-615 кг/м<sup>3</sup>, термическим сопротивлением 3,15-5,6 м<sup>2</sup> °С/Вт и прочностью на сжатие несущего слоя 8,5-15 МПа. Кроме того, имеется возможность повышения декоративных качеств изделий при помощи окрашивания различными пигментами [19].

### Список библиографических ссылок

1. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1977. – 158 с.
2. Бахтибаев А.Н., Бетехтин В.Н. Воздействие давления на пористость и прочностные свойства цементного камня // Физические основы прочности и пластичности. – Н. Новгород, 1990.
3. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат, 1986.
4. Хамский Е.В. Пересыщенные растворы: Изд. «Наука». – Л., 1975. – 99 с.
5. Вегман Е.Ф., Руфанов Ю.Г., Федорченко И.Н. Кристаллография, минералогия, петрография и рентгенография. – М.: «Металлургия», 1990. – 263 с.
6. Хамский Е.В. Кристаллизация из растворов: Изд. «Наука». – Л., 1967. – 149 с.
7. Mallin J.W. Crystallization London, 1961. – 342 p.
8. Кириченко В.А. Термообработка полистиролбетона в трехслойных панелях. Дисс. ... канд. тех. Наук: Научно-исследовательский центр «Строительство». – М., 2009.
9. Гудермо М. Прочность цементного камня в зависимости от его структуры. Шестой международный конгресс по химии цемента. Т.Н. Гидратация и твердение цемента. – М.: Стройиздат, 1976. – С. 302-306.
10. Черный Ю.Ф., Баглюк Г.А. Динамическое горячее прессование вязкого пористого тела в сб. научных трудов «Физика и техника высоких давлений: Изд-во «Наукова думка», № 14, 1990. – С. 27-76.
11. Бегляров А.Э. Эффективные стеновые монолитно-слоистые изделия объемного прессования. Дисс. ... канд. тех. Наук: МГСУ. – М., 2011.
12. Соков В.Н., Бегляров А.Э. Эффективные трехслойные монолитные изделия с наноструктурированным переходным слоем // Строительные материалы, 2013, № 11. – С. 41-43.
13. Sokov V., Beglyarov A. The new wall blocks of volumetric pressing and effective technology of the production of it, International conference «Ibausil», Veimar-Germany, 2012. – P. 1304-1308.
14. Соков В.Н., Бегляров А.Э. Способ изготовления трёхслойных строительных изделий. Патент № 2444435РФ // Оpubл. 10.03.2012. Бюл. № 7.
15. Жуков А.Д., Орлова А.М., Наумова Т.А., Никушкина Т.П., Майорова А.А. Экологические аспекты формирования изоляционной оболочки зданий // Научное обозрение, 2015, № 7. – С. 209-212.
16. Жуков А.Д., Орлова А.М., Наумова Т.А., Талалина И.Ю., Майорова А.А. // Системы изоляции строительных конструкций. Научное обозрение, 2015, № 7. – С. 213-217.
17. Румянцев Б.М., Жуков А.Д. Принципы создания новых строительных материалов // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. Сер. Политематическая, 2012, Вып. 3 (23). Код доступа: vestnik.vgasu.ru (дата обращения: 2015.05.08).

18. Жуков А.Д., Чукунин А.С., Химич А.О., Аристов Д.И., Новикова М.С. Напряженное состояние в технологии материалов ячеистой структуры // Научное обозрение, 2015, № 7. – С. 218-221.
19. Орлова А.М., Славин А.М. Исследование свойств смешанного железистоокисного пигмента на основе гальваношламов // Промышленное и гражданское строительство, 2009, № 12. – С. 55-56.

**Sokov V.N.** – doctor of technical science, professor

E-mail: [Sersok\\_07@mail.ru](mailto:Sersok_07@mail.ru)

**Beglyarov A.E.** – candidate of technical science, associate professor

E-mail: [Beglandrey007@yandex.ru](mailto:Beglandrey007@yandex.ru)

**Moscow State University of Civil Engineering**

The organization address: 129337, Russia, Moscow, Jaroslavskoe sh., 26

### **The complex effect of electric-hydro-thermal-power field on structure formation of cement stone**

#### **Resume**

At present, the international community more than ever has an urgent need to save energy in all economic sectors. It is known that the industry production of building materials is one of the most energy-intensive. In this context, the development of new efficient building products, obtained in a short time and with minimal material costs seems particularly relevant.

The largest share of energy in the production of building materials consumed in the process of heat treatment. In addition, the redistribution takes the most time in the technological cycle of production. Therefore, improving the efficiency of heat treatment along with the reduction of its duration is one of the most promising ways to reduce construction costs and improve the productivity of enterprises.

Developed energy-saving and express technology of multilayer wall building products produced under the action of electric-hydro-thermal-power field. By using the effect of the increase in volume in the time of heating grains pre-foamed polystyrene became possible to reduce the manufacturing process, reduce energy costs and gain multi-layer goods with improved performance characteristics. Due to the effects of electric-hydro-thermal-power field are created conditions for receiving a more dense matrix of outer layers of the block and evenly distributed fine-pored structure.

**Keywords:** electric-heating, electric-hydro-thermal-power field, multi-layer product, the excess pressure, hydrodynamic flow, volume compression, foam-polystyrene-concrete.

#### **Reference list**

1. Malinina L.A. Thermal-moisture processing of hard concrete. – М.: Strojizdat, 1977. – 158 p.
2. Bahtibaev A.N., Betekhtin V.N. Effects of pressure on the porosity and strength properties of the cement paste // Fizicheskie osnovy prochnosti i plastichnosti. – N. Novgorod, 1990.
3. Volzhenskij A.V. Mineral binders. – М.: Strojizdat, 1986.
4. Hamskij E.V. Supersaturated solutions: Izd. «Nauka». – L., 1975. – 99 p.
5. Vegman E.F., Rufanov Yu.G., Fedorchenko I.N. Crystallography, mineralogy, petrography, and radiography. – М.: «Metallurgiya», 1990. – 263 p.
6. Hamskij E.V. Crystallization from solutions: Izd. «Nauka». – L., 1967. – 149 p.
7. Mallin J.W. Crystallization London, 1961. – 342 p.
8. Kirichenko V.A. Heat treatment in polystyrene sandwich panels. Diss. ... kand. tech. nauk: Nauchno-issledovatel'skij centr «Stroitel'stvo». – М., 2009.
9. Gudermo M. Strength of cement stone, depending on its structure. – М.: Strojizdat, 1976. – P. 302-306.

10. Chernyj Yu.F., Baglyuk G.A. Dynamic hot pressing viscous porous body // *Fizika i tekhnika vysokih davlenij: Izd-vo «Naukova dumka»*, № 14, 1990. – P. 27-76.
11. Beglyarov A.E. Effective wall monolithic-layer goods of volumetric pressing. Diss...kand. tekhn. Nauk: MGSU. – M., 2011.
12. Sokov V.N., Beglyarov A.E. Effective three-layer monolithic product with nanostructured transition layer // *Stroitel'nye materialy*, № 11, 2013. – P. 41-43.
13. Sokov V., Beglyarov A. The new wall blocks of volumetric pressing and effective technology of the production of it, International conference «Ibausil», Veimar-Germany, 2012. – P. 1304-1308.
14. Sokov V.N., Beglyarov A.E. A method for producing three-layer construction products. Patent № 2444435RF // *Opubl. 10.03.2012. Byul. № 7*.
15. Zhukov A.D., Orlova A.M., Naumova T.A., Nikushkina T.P., Majorova A.A. Environmental aspects form an insulating shell of buildings // *Nauchnoe obozrenie*, 2015, № 7. – P. 209-212.
16. Zhukov A.D., Orlova A.M., Naumova T.A., Talalina I.YU., Majorova A.A. Insulation systems of building structure // *Nauchnoe obozrenie*, 2015, № 7. – P. 213-217.
17. Romyancev B.M., Zhukov A.D. Principles of creation of new building materials / *Internet-Vestnik VolgGASU. Ser. Politematicheskaya*, 2012, V. 3 (23). Kod dostupa: [vestnik.vgasu.ru](http://vestnik.vgasu.ru) (reference date: 2015.05.08).
18. Zhukov A.D., Chkunin A.S., Himich A.O., Aristov D.I., Novikova M.S. The state of stress in technology of cellular structure materials // *Nauchnoe obozrenie*, 2015, № 7. – P. 218-221.
19. Orlova A.M., Slavin A.M. The investigation of the properties of mixed iron color based on halvano-slime // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2009, № 12. – P. 55-56.