

УДК 666.973.6/666.972.16

А. А. Мечай, Е. И. Барановская, М. В. Попова, А. А. Гарабажу, Р. В. Жишко
Белорусский государственный технологический университет

ПОЛУЧЕНИЕ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА НИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО ЦЕМЕНТА

Разработаны составы теплоизоляционного ячеистого бетона с использованием механоактивированного портландцемента (МАЦ). Для получения ячеистобетонной смеси цемент подвергался механоактивации в дисмембраторной мельнице с классификационной камерой. Разработаны технологические параметры и оптимальные режимы механоактивации портландцемента в данной установке. Установлено, что наиболее эффективным является использование механоактивированного цемента, полученного при частоте вращения ротора мельницы 3000–3500 об/мин и угле поворота лопатки классификационной камеры (-15°). За счет использования МАЦ коэффициент конструктивного качества образцов ячеистого бетона увеличивается в 1,8 раза по сравнению с контрольными образцами.

Согласно данным дифференциально-термического анализа продукты твердения и структура образцов ячеистого бетона с использованием МАЦ характеризуются более высоким содержанием низкоосновных гидросиликатов кальция (тоберморита и ксонотлита) по сравнению с контрольными образцами. Использование МАЦ при получении ячеистого бетона оказывает существенное влияние на процессы формирования гидросиликатной матрицы при тепловлажностной обработке, что позволяет оптимизировать микроструктуру межпоровой перегородки и улучшить физико-механические свойства автоклавного ячеистого бетона.

Разработка технологии высокопрочного теплоизоляционного ячеистого бетона автоклавного твердения с марками по плотности D250–D350 обеспечит уменьшение энергозатрат при его производстве на 20–30% и снижение теплопотерь через ограждающие конструкции зданий на 30–35%.

Ключевые слова: механоактивация, дисмембраторная мельница с классификационной камерой, коэффициент конструктивного качества, низкоосновные гидросиликаты кальция, теплоизоляционный ячеистый бетон.

A. A. Mechay, Ye. I. Baranovskaya, M. V. Popova, A. A. Garabazhiu, R. V. Zhishko
Belarusian State Technological University

PRODUCTION OF AERATED CONCRETE OF LOW DENSITY USING MECHANOACTIVATED CEMENT

The compositions of thermal insulation aerated concrete using mechanoactivated cement (MAC) were developed. The cement was subjected to mechanoactivation in dismembratory mill with classification bowl for aerated concrete mix preparation. The technological parameters and optimal modes of Portland cement mechanoactivation in this installation were developed. It was observed that the usage of mechanoactivated cement produced at the rotor speed of 3000–3500 rpm and an angle of rotation of the blade (-15°) is the most effective. The strength-density ratio of aerated concrete samples with mechanoactivated cement is increased by 1.8 times compared to the control samples.

According to the data of the differential thermal analysis the products of hardening and the structure of aerated concrete samples using MAC are characterized by higher content of low-basic calcium hydrosilicates (tobermorite and xonotlite) compared to the control samples. The usage of MAC in aerated concrete production has a significant influence on the processes of formation of hydrosilicate matrix in steam treatment that optimizes the microstructure of the interpore partition and improves physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete.

The development of high-strength thermal insulation autoclaved aerated concrete technology with grades of concrete density D250–D350 will provide saving energy in its production by 20–30% and reduce structural heat loss by 30–35%.

Keywords: mechanoactivation, dismembratory mill with classification bowl, strength-density ratio, low-basic calcium hydrosilicates, thermal insulation aerated concrete.

Введение. Автоклавный ячеистый бетон благодаря высоким теплофизическим свойствам является практически единственным стеновым материалом, обеспечивающим, согласно

требованиям ТКП 45-2.04-43-2006, значения показателей термического сопротивления для наружных стен из всех видов строительных материалов – не менее $3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$; совмещенных

покрытий, чердачных перекрытий – не менее $6 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$.

В связи с постоянным ужесточением требований по теплопотерям, которые должны составлять не более $60 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год в многоэтажном и $90 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год в малоэтажном исполнении, необходимо повышать термическое сопротивление стен до уровня $R_{\text{норм}} = 6 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С}/\text{Вт}$. Обеспечить такие показатели для стен из ячеистого бетона плотностью $400\text{--}500 \text{ кг}/\text{м}^3$ можно только за счет увеличения толщины стены до $70\text{--}80 \text{ см}$, поэтому актуальным является получение теплоизоляционного бетона с плотностью $250\text{--}300 \text{ кг}/\text{м}^3$ и прочностью не менее $1,0 \text{ МПа}$. Снижение плотности стеновых блоков из ячеистого бетона на каждые $50 \text{ кг}/\text{м}^3$ позволяет снизить расход топлива на обогрев зданий на 1 кг условного топлива на 1 м^2 стены в год. Производство такого материала обеспечит снижение расхода цемента и извести на $20\text{--}30\%$, сокращение энергозатрат на помол сырья, сохранность изделий при транспортировке и снижении нагрузки на фундамент при строительстве [1].

В странах ЕС производство ячеистобетонных изделий с плотностью $250\text{--}300 \text{ кг}/\text{м}^3$ широко распространено благодаря использованию извести с активностью $88\text{--}92\%$, кварцевого песка с содержанием активного SiO_2 не менее 95% и высокотехнологичного оборудования, обеспечивающего точную дозировку компонентов и эффективную гомогенизацию смеси. Кроме того, технология предусматривает использование известково-песчаного вяжущего с удельной поверхностью не менее $5000 \text{ см}^2/\text{г}$, кварцевого песка в песчаном шламе – не менее $3000 \text{ см}^2/\text{г}$. Активность ячеистобетонной смеси должна составлять $18\text{--}20\%$, водотвердое отношение (В/Т) – $0,60\text{--}0,65$. Альтернативным направлением является химизация ячеистобетонных смесей [2]. Однако использование химических добавок часто приводит к нарушению процессов вспучивания и созревания ячеистобетонного массива.

Единственным предприятием в Беларуси, освоившим выпуск ячеистого бетона с плотностью $150\text{--}250 \text{ кг}/\text{м}^3$, является Филиал № 5 «Гродненский комбинат строительных материалов» ОАО «Красносельскстройматериалы». Основным фактором, ограничивающим широкое производство и применение данного материала, является его недостаточная прочность.

Одним из способов улучшения физико-механических свойств вяжущих строительных материалов является механическая активация входящих в него компонентов. Проблема недоиспользования потенциальных возможностей исходного сырья при производстве строитель-

ных материалов в сегодняшних условиях требует немедленного решения, и применение технологии механоактивации открывает новые возможности рационального использования материальных и энергетических ресурсов.

В основе процесса механоактивации лежит увеличение реакционной способности твердых веществ, структура которых изменяется под действием механических сил. Мерой механоактивации можно считать количество накопленной поверхностной энергии, запасенной в виде низкоэнергетических дефектов, существенно снижающих энергию активации реакций химического взаимодействия и повышающих кинетические константы процессов [3]. Измельчение в ударном, ударно-стирающем или истирающем режимах приводит к накоплению структурных дефектов, увеличению кривизны поверхности, фазовым превращениям и даже аморфизации кристаллов, что влияет на их химическую активность. Механоактивация происходит, когда скорость накопления дефектов превышает скорость их исчезновения. Наиболее широко применение данного процесса изучено в технологии тяжелых цементных бетонов [4]. Эффект механоактивации компонентов бетонной смеси заключается в переходе пассивной (или малоактивной) поверхности как вяжущих, так и инертных заполнителей, к химически активному состоянию, которое выражается в повышенной реакционной способности в ходе последующих технологических операций.

Условно можно выделить несколько основных способов активации материалов с использованием энергонапряженных агрегатов тонкого помола – измельчение методом раздавливания, истирания и раскалывания (метод свободного удара), а также совокупностью перечисленных методов. Метод раскалывания свободным ударом используется в измельчителях-дезинтеграторах. Разрушение (измельчение) материала методом свободного удара заключается в воздействии на обрабатываемый материал механических ударных элементов (бил), движущихся с высокой окружной скоростью. Данная модель разрушения материалов позволяет достигать гранулометрии повышенной монодисперсности.

Для материала, измельченного по методу свободного удара, характерна осколочная форма частиц, большое количество сколов, трещин и других дефектов, обеспечивающих условия для образования новой высокоразвитой контактной поверхности. Эффект механоактивации сохраняется в течение определенного промежутка времени после ее осуществления. Чем раньше активированный материал будет использован в производстве, тем выше эффект от его применения.

В технологии ячеистого бетона известен эффект механоактивации при совместном помоле извести и кварцевого песка в трубной мельнице с получением известково-песчаного вяжущего (ИПВ). Частицы извести проникают в микро- и макродефекты частиц кварца, образующиеся при их измельчении, что позволяет ускорить процесс взаимодействия кварца и гидроксида кальция при автоклавировании благодаря большей поверхности контакта реагирующих фаз.

Нормативно-техническими документами Республики Беларусь предусматривается использование извести и кварцевого песка с низким содержанием действующих веществ (не менее 70% CaO и свободного SiO₂ соответственно), что является препятствием для производства ячеистого бетона с плотностью 300 кг/м³ и ниже достаточной прочности. В связи с этим представляет интерес исследование возможности применения механоактивированного цемента (МАЦ) в производстве ячеистого бетона.

Известно, что наиболее эффективным аппаратом для проведения процесса механической активации вяжущих материалов является дисмембратор или дезинтегратор, характеризующийся высокой производительностью и небольшим удельным расходом энергии [5].

Основная часть. На кафедре химической технологии вяжущих материалов БГТУ разработаны составы теплоизоляционного ячеистого бетона с использованием механоактивированного портландцемента. В качестве сырьевых материалов для получения ячеистого бетона с маркой по плотности D300 в соответствии с СТБ 1570–2005 использовали портландцемент марки М500 с удельной поверхностью 320 м²/кг, известь негашеную кальциевую с содержанием активных CaO и MgO 72–73 мас. %, песок молотый кварцевый с удельной поверхностью 280–300 м²/кг, порообразователь – алюминиевую пудру ПАП-1 и воду.

В качестве контрольных применялись образцы ячеистого бетона, полученные с использованием неактивированного цемента.

Для получения ячеистобетонной смеси портландцемент подвергался механоактивации в дисмембраторной мельнице (в том числе с классификационной камерой) [6].

Лабораторная установка дисмембраторного типа с классификационной камерой (рис. 1) разработана на кафедре машин и аппаратов химических и силикатных производств БГТУ.

Принцип действия экспериментальной установки дисмембраторного типа с классификационной камерой заключается в следующем: из расходного бункера 1 цемент подается на шне-

ковый питатель 2, в котором с помощью частотного преобразователя 6 можно изменять частоту вращения шнека, изменяя тем самым производительность установки. Шнековый питатель подает цемент в дисмембратор, где он подвергается измельчению, затем через классификационную камеру материал поступает в приемный бункер 4. При помощи частотного преобразователя 5 в экспериментальной установке можно изменять частоту вращения вала электродвигателя дисмембраторной мельницы, регулируя тем самым интенсивность процесса активации и режим классификации цемента в дисмембраторе. Изменяя угол наклона лопаток в классификационной камере, можно регулировать размер частиц на выходе из нее.

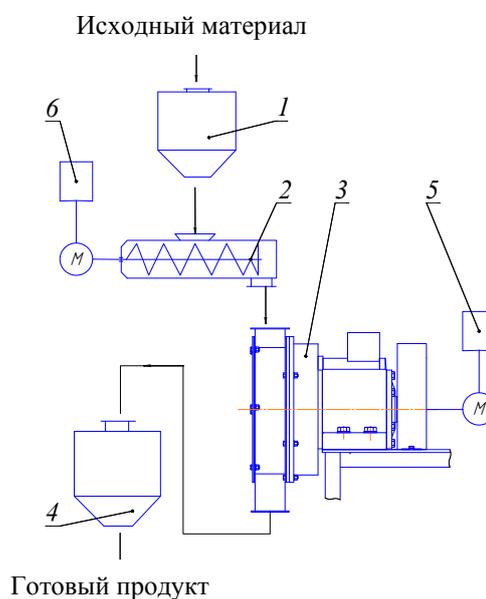


Рис. 1. Экспериментальная установка дисмембраторного типа с классификационной камерой:

1 – расходный бункер; 2 – шнековый питатель;

3 – дисмембраторная мельница с классификационной камерой;

4 – приемный бункер;

5 – частотный преобразователь привода мельницы;

6 – частотный преобразователь привода питателя

В работе использовали цемент, полученный в лабораторных условиях непосредственно перед экспериментом, и цемент со сроком хранения 1,5 мес. На первом этапе работы портландцемент подвергался механоактивации в дисмембраторной мельнице без классификационной камеры при частоте вращения ротора 2500–4000 об/мин.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента конструктивного качества (ККК) ячеистого бетона от частоты вращения ротора мельницы.

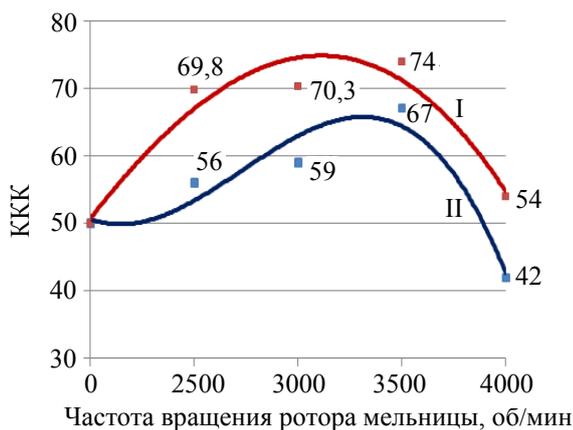


Рис. 2. Зависимость ККК ячеистого бетона от частоты вращения ротора мельницы:

I – ККК ячеистого бетона с использованием цемента, полученного непосредственно перед экспериментом;
 II – ККК ячеистого бетона с использованием цемента со сроком хранения 1,5 мес

Установлено, что прочность образцов ячеистого бетона при использовании механоактивированного цемента, полученного непосредственно перед экспериментом, и цемента со сроком хранения 1,5 мес, полученного в дисмембраторной мельнице при частоте вращения ротора мельницы 3500 об/мин, увеличилась по сравнению с контрольными образцами на 34% и 48% соответственно. Далее для получения ячеистобетонной смеси использовали МАЦ, полученный в дисмембраторной мельнице при частоте вращения ротора 2500–4000 об/мин с классификационной камерой, изменяя угол поворота лопаток в ней от (+15°) до (–30°) (рис. 3).

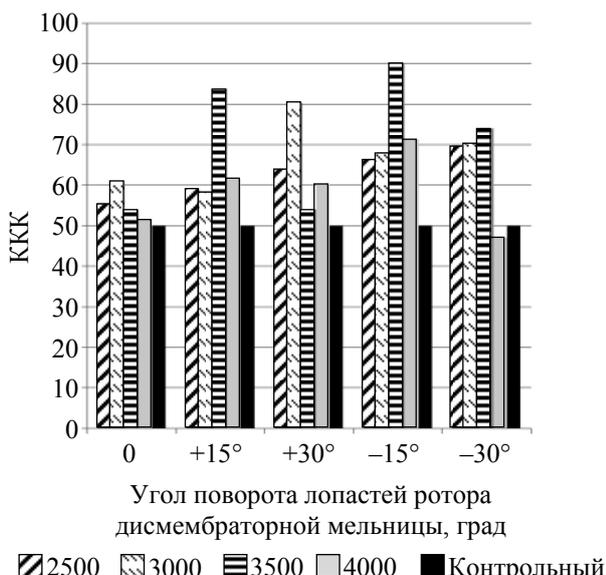


Рис. 3. Зависимость ККК ячеистого бетона с использованием МАЦ, полученного при разном угле поворота лопаток классификационной камеры дисмембраторной мельницы

Наиболее эффективной является механоактивация портландцемента при следующем режиме дисмембраторной мельницы: частота вращения ротора 3000–3500 об/мин, угол поворота лопаток классификационной камеры (–15°). При этом ККК ячеистого бетона с использованием МАЦ увеличивается по сравнению с контрольным образцом (К) в 1,8 раза.

Согласно данным дифференциально-термического анализа (рис. 4), продукты твердения и структура образцов ячеистого бетона с использованием МАЦ характеризуются более высоким содержанием низкоосновных гидросиликатов кальция (тоберморита и ксонотлита) по сравнению с контрольными образцами.

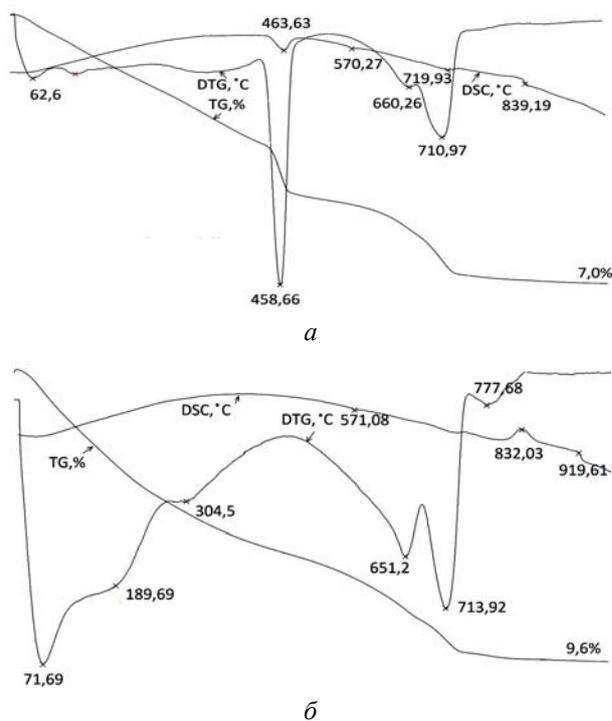


Рис. 4. Дериватограммы образцов ячеистого бетона:
 а – контрольный образец;
 б – образец с использованием МАЦ

Эндоэффект в области температур 305–465°C характерен для дегидратации высокоосновных гидросиликатов кальция типа C_2SH различных модификаций, образующихся при гидратации портландцемента. У образца ячеистого бетона с использованием МАЦ данный эффект отсутствует, что свидетельствует об изменении механизма гидратации механоактивированного цемента в составе ячеистого бетона с образованием преимущественно низкоосновных гидросиликатов кальция, отвечающих за прочностные характеристики готовых изделий. Экзоэффект при 832°C соответствует кристаллизации волластонита, образовавшегося

при дегидратации тоберморитоподобных гидросиликатов кальция. У образца с использованием МАЦ данный эффект интенсивнее, что свидетельствует о более высоком содержании тоберморита.

Основные физико-механические свойства ячеистого бетона с использованием МАЦ представлены в таблице.

Основные физико-механические свойства ячеистого бетона с использованием МАЦ

Состав	Физико-механические свойства		
	марка по плотности	класс по прочности	марка по морозостойкости
Контрольный	D300	B0,5	Не менее F15
С использованием МАЦ	D300	B0,75	Не менее F25

Улучшение физико-механических свойств ячеистого бетона является следствием изменения механизма гидратации цемента, обусловленного его механоактивацией, что приводит к образованию дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция.

Заключение. Проведенные исследования показали эффективность применения механоактивации цемента в технологии теплоизоля-

ционного ячеистого бетона. Использование МАЦ при получении ячеистого бетона оказывает существенное влияние на процессы формирования гидросиликатной матрицы при тепловлажностной обработке, что позволяет оптимизировать микроструктуру цементирующего вещества и улучшить физико-механические свойства автоклавного ячеистого бетона. В результате проведенных исследований разработаны технологические параметры и оптимальные режимы механоактивации портландцемента в дисмембраторной мельнице с классификационной камерой. Установлено, что наиболее эффективным является использование механоактивированного цемента, полученного при частоте вращения ротора мельницы 3000–3500 об/мин и угле поворота лопатки классификационной камеры (–15°). За счет использования МАЦ коэффициент конструктивного качества образцов ячеистого бетона увеличивается в 1,8 раза по сравнению с контрольными образцами.

Разработка технологии высокопрочного теплоизоляционного ячеистого бетона автоклавного твердения с марками по плотности D250–D350 обеспечит уменьшение энергозатрат при его производстве на 20–30% и снижение теплопотерь через ограждающие конструкции зданий на 30–35%.

Литература

1. Соколовский Л. В. Энергосбережение в строительстве. Минск: Стринко, 2000. 46 с.
2. Мечай А. А., Барановская Е. И. Модифицированный автоклавный ячеистый бетон на основе электросталеплавильного шлака: материалы III Междунар. симпоз. «Проблемы современного бетона и железобетона». Минск. 2011. Т. 2. С. 369–387.
3. Воробьев В. В., Таболич А. В. Процессы механической активации компонентов бетона и влияние различных способов активации на его механические свойства: сб. материалов 4-й Междунар. науч.-техн. конф. «Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование». Минск. 2012. С. 54–57.
4. Толмачев С. Н., Беличенко Е. А. Повышение активации тяжелого бетона путем комплексной активации структурных уровней // Строительные материалы. 2012. № 9. С. 76–78.
5. Гарабажиу А. А. Применение дисмембраторной мельницы со встроенным классификатором для исследования процесса активации вяжущих материалов // Вестник ПГУ. 2014. С. 80–88.
6. Мурог В. Ю., Вайтехович П. Е., Костюнин Ю. М. Влияние использования активированного цемента на прочностные характеристики бетонных изделий // Труды БГТУ. Серия 3, Химия и технология неорган. в-в. 2002. Вып. X. С. 233–237.

References

1. Sokolovskiy L. V. *Energoberezhnie v stroitel'stve* [Energy saving in the building industry]. Minsk, Strinko Publ., 2000. 46 p.
2. Mechay A. A., Baranovskaya Ye. I. [Modified autoclaved aerated concrete based on electric furnace slag]. *Materialy III Mezhdunarodnogo simpoziuma («Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona»)* [Materials of International symposium (“Issues of modern concrete and reinforced concrete”)]. Minsk, 2011, vol. 2, pp. 369–387 (In Russian).
3. Vorob'yev V. V., Tabolich A. V. [The processes of mechanical activation of concrete components and the effect of different activation methods on its mechanical properties]. *Sbornik materialov 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii («Pererabotka mineral'nogo syr'ya. Innovatsionnye tekhnologii i oborudovanie»)* [Materials of the 4-th International scientific and technical conference (“Pro-

cessing of mineral raw materials. Innovative technologies and equipment”)]. Minsk, 2012, pp. 54–57 (In Russian).

4. Tolmachev S. N., Belichenko Ye. A. Increase of the activation of heavy concrete by the complex activation of structural levels. *Stroitel'nye materialy* [Constructional materials], 2012, no. 9, pp. 76–78 (In Russian).

5. Garabazhiu A. A. Application of dismembratory mill with integrated classifier for activation process of binding materials researching. *Vestnik PGU* [Bulletin of the Polotsk State University], 2014, pp. 80–88 (In Russian).

6. Murog V. Yu., Vaytekhovich P. Ye., Kostyunin Yu. M. The influence of activated cement usage on strength characteristics of concrete products. *Trudy BGTU* [Proceedings of the BSTU], series III, Chemistry and Technology of Inorganic Substances, 2002, issue X, pp. 233–237 (In Russian).

Информация об авторах

Мечай Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой химической технологии вяжущих материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: AA_M@tut.by

Барановская Екатерина Ивановна – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры химической технологии вяжущих материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: elf01@tut.by

Попова Марина Витальевна – научный сотрудник кафедры химической технологии вяжущих материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: marinnova@tut.by

Гарабажу Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: garazh@tut.by

Жишко Роман Валерьевич – студент факультета химической технологии и техники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: romi4 94@mail.ru

Information about the authors

Mechay Aleksandr Anatol'yevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Chemical Technology of Binding Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: AA_M@tut.by

Baranovskaya Yekaterina Ivanovna – PhD (Engineering), Researcher, the Department of Chemical Technology of Binding Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: elf01@tut.by

Popova Marina Vital'yevna – Researcher, the Department of Chemical Technology of Binding Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: marinnova@tut.by

Garabazhiu Aleksandr Andreevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: garazh@tut.by

Zhishko Roman Valer'yevich – student, the Faculty of Chemical Technology and Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: romi4 94@mail.ru

Поступила 04.03.2016