

**Якимович Глеб Дмитриевич**, магистр техн. наук, инженер, Научно-исследовательская испытательная лаборатория бетонов и строительных материалов, Белорусский национальный технический университет (г. Минск, Беларусь)

## **ЭЛЕМЕНТЫ ТЕХНОЛОГИИ СУХОГО ФОРМОВАНИЯ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНОГО КЛИНКЕРА**

© РУП «Институт БелНИИС», 2018  
Institute BelNIIS RUE, 2018

### **АННОТАЦИЯ**

*Данная статья посвящена проблеме достижения удовлетворительных прочностных и эксплуатационных характеристик при сухом формовании быстросхватывающихся бетонных смесей. В предыдущих работах удалось получить безотходную технологию производства гипсовых образцов. При этом благодаря сниженному водогипсовому соотношению прочность образцов выросла на 30–50 %. Благодаря проведенной работе можно говорить, что возможность формования быстросхватывающихся смесей на основе цемента без применения замедляющей добавки гипса, а также с минимальным водовязущим отношением является главным преимуществом использования метода сухого формования. Это открывает обширное поле деятельности в области совершенствования технологии и поиска новых видов вяжущих. Непосредственно в данной работе рассмотрен вопрос достижения максимально возможных прочностей образцов на основе молотого клинкера. Отсутствие добавки гипса снижает стоимость вяжущего, а также ускоряет темпы работ, что является важным показателем для экономического обоснования внедрения данной технологии. Было установлено, что сухие смеси крайне требовательны не только к гранулометрии, но также и к чистоте заполнителей. Так, пылевидные и глинистые частицы, даже находясь в пределах нормы, значительно снижают прочность и долговечность готовых образцов. Не обошли стороной и проблему невозможности воспроизведения прочностных результатов,*

*представленных в свое время советскими и зарубежными учеными. Проводимая в начале 2000-х годов модернизация белорусских цементных заводов полностью изменила свойства белорусского цемента, что повлекло за собой падение прочности образцов сухого формования с 80 до 50 МПа. В данной статье проводилась оценка влияния гранулометрии цементного клинкера на прочностные характеристики мелкозернистого бетона. Данные опыты лишь подтвердили общеизвестные зависимости между прочностью вяжущего и тонкостью его помола. Тем не менее, достигнутая прочность образцов является довольно высокой, что позволило рассмотреть вопросы долговечности образцов для оценки класса по условиям эксплуатации. По результатам испытаний образцы показали высокую морозостойкость, что делает технологию пригодной для изготовления изделий и конструкций, находящихся в условиях попеременно-го замораживания и оттаивания.*

**Ключевые слова:** сухое формование, удешевление вяжущего, тонкость помола, гранулометрия цемента, цементный клинкер.

**Для цитирования:** Якимович, Г. Д. Элементы технологии сухого формования смеси на основе цементного клинкера / Г. Д. Якимович // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2018. – Вып. 10. – С. 289–305. <https://doi.org/10.23746/2018-10-19>

**Gleb Yakimovich**, Master in Engineering Science, Engineer, Research and Testing Laboratory of Concrete and Building Materials, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

## **ELEMENTS OF DRY FORMING TECHNOLOGY OF MIXTURE BASED ON CEMENT CLINKER**

### **ABSTRACT**

*This article is devoted to the problem of achieving satisfactory strength and performance characteristics of the dry forming of*

*quick-setting concrete mixes. In previous works, we were managed to get a non-waste technology for the production of gypsum samples. At the same time, due to the reduced water-gypsum ratio, the strength of the samples increased by 30–50 %. Due to the work carried out, it can be said that the ability to form quick-setting cement-based mixtures without the use of a gypsum retarder, and also with a minimum water-binding ratio is the main advantage of using the dry-molding method. This opens up a vast direction of activity in the field of improving technology and searching for new types of binders. Directly in this paper, the issue of achieving the maximum possible strengths of samples based on ground clinker was considered. The absence of a gypsum additive reduces the cost of the binder, and also speeds the pace of work, an important indicator for the economic justification for the introduction of this technology. It was found that dry mixtures are extremely demanding not only for granulometry, but also for the purity of aggregates. Thus, pulverized and clay particles, even within normal limits, significantly reduce the strength and durability of the finished samples. We were not bypass the problem of the impossibility of reproducing strength results, presented in due time by Soviet and foreign scientists. The modernization of the Belarusian cement plants in the early 2000s completely changed the properties of the Belarusian cement, which led to a drop in the strength of dry molding samples from 80 to 50 MPa. In this paper, the effect of the granular cement of cement clinker on the strength characteristics of fine-grained concrete was assessed. These experiments only confirmed the well-known relationships between the strength of the binder and the fineness of its grinding. Nevertheless, the achieved strength of the samples is quite high, which allowed us to consider the issues of durability of the samples for assessing the class in terms of operating conditions. Based on the test results, the samples showed high frost resistance, which makes the technology suitable for the manufacture of products and structures under alternating freezing and thawing conditions*

**Keywords:** dry forming, cheaper binder, fineness of grinding cement, granulometry, cement clinker.

**For citation:** Yakimovich G. Elements of dry forming technology of mixture based on cement clinker. Contemporary Issues of Concrete

## **ВВЕДЕНИЕ**

Метод сухого формирования бетона является одним из наименее изученных и применяемых методов в строительной науке. Интерес к нему возник в середине прошлого века, было проведено множество исследований, создавались формовочные установки, однако вскоре интерес сошел на нет, уступив место полусухому способу. В данный момент в мире не существует рабочих установок по сухому формированию бетонной смеси.

Современная строительная наука сосредоточена на химической модификации бетонных смесей. Современные добавки на основе поликарбосилатного эфира позволяют получать высокопрочные смеси на низком водоцементном отношении (менее 0,25). Помимо этого, регулировка дозировки компонентов позволяет получать высокопрочный самоуплотняющийся бетон без энергетических затрат на его уплотнение. Обратной стороной применения таких добавок является серьезное повышение стоимости, а также зависимость строительной области от скачков курсов валют.

Ряд работ [1, 2, 3] показал, что существенного прироста прочностных характеристик можно добиться и без применения дорогих импортных добавок. Домол и фракционирование цемента, использование добавки молотого гранитного отсева, сухое формирование и другие методы являются доступной, а главное, абсолютно безопасной и экологичной альтернативой химдобавкам.

Среди существующих методов особо выделяется метод сухого формирования бетонной смеси. Технология, разработанная в свое время на кафедре «Технология бетона и строительные материалы», позволяла получать бетон высокой прочности на сжатие (до 90 МПа) и морозостойкости (до марки F1000). Серьезным достоинством метода является отсутствие каких-либо требований к удобоукладываемости, длительности транспортирования смеси, а также к срокам схватывания.

Основную часть цемента составляет молотый портландцементный клинкер. Тонкие фракции клинкера гидратируются с большой скоростью, создавая в теле бетона внутренние связи, быстро снижающие подвижность бетонной смеси, что значительно затрудняет процесс ее транспортирования и укладки.

При виброуплотнении или введении дополнительной воды эти связи разрушаются, тем самым мелкие фракции перестают участвовать в структурообразовании, становясь инертным наполнителем, что снижает прочность конечного цементного камня. Вводимый в состав цемента гипс при контакте с водой растворяется и немедленно кристаллизуется на поверхности частиц цемента, образуя малопроницаемую для воды пленку, тем самым останавливая процесс гидратации на время, достаточное для качественной укладки бетонной смеси в объем нужной формы.

В то же время при сухом формовании смесь находится в уплотненном состоянии уже изначально, что позволяет избежать нарушения раннего структурообразования, а соответственно, введения гипса в состав цемента. Помимо этого, внутренние связи в теле бетона позволяют производить распалубку образцов непосредственно после насыщения, что увеличивает темпы оборачиваемости форм и снижает металлоемкость производства.

### **СУХОЕ ФОРМОВАНИЕ КЛИНКЕРНО-ПЕСЧАНЫХ ОБРАЗЦОВ**

Проведенные ранее [4] опыты продемонстрировали, что прочность образцов из клинкера в 1,5–2 раза превышает прочность образцов цемента того же производителя и той же тонкости помола и водоцементного отношения. В сочетании с экономическим эффектом удешевления цемента за счет удаления гипса (стоимость гипса в данный момент превышает стоимость цемента в 3–4 раза) рассматриваемая технология может привести к снижению себестоимости продукции.

В качестве образцов использовались кубы 70x70x70 мм. Исходя из опыта формовки образцов [4], минимально допустимое расслоение сухой смеси достигается при соотношении Ц:П, равном 1:2,5–2,7, поэтому данный показатель является при проектировании смеси основным. В качестве мелкого заполнителя применялся песок с модулем крупности 3,2. Сравнивались составы на

обычном песке, мытом, а также состав водозатворенной клинкерно-песчаной смеси.

Уплотнение сухой смеси осуществлялось способом вибро-трамбования, что позволяет при минимальных энергозатратах уплотнить сухую смесь за 20 секунд.

Неоднородность уплотняемой в толстом слое сухой смеси не позволяет однозначно рассчитать время насыщения. Ввиду чего оно осуществлялось в два этапа. Первый этап – вакуумное частичное насыщение образца в течение 25 секунд. Благодаря низкому водоцементному отношению и оттягиванию воды из наружных слоев в ядро образца, стенки образцов имеют высокую начальную прочность, не рассыпаются при распалубке. Так как излишнее количество воды может вызвать разрушение внутренних связей на ранней стадии твердения, необходимо выдержать распалубленные образцы в течение четырех часов.

После выдержки кубы помещались под воду, где посредством капилляров происходит насыщение сердцевины образца. Прочность стенок ограничивает объем поглощаемой воды, тем самым препятствуя излишнему перенасыщению и снижению прочности зоны ядра образцов.

В возрасте 21 суток образцы извлекались из воды и выдерживались в нормально-влажностных условиях. В возрасте 28 суток производилось измерение плотности образцов (образцы № 1, 2 и 3), определялись водоцементное отношение и прочность на сжатие.

Помимо этого, в ходе экспериментов по формованию сухой смеси на основе клинкера было установлено, что вибровоздействие на схватившуюся клинкерно-песчаную смесь приводит к возвращению смеси в жидкое состояние. Для установления эффективности использования сухого формования была проведена серия формовок водозатворенной смеси. С целью замедления схватывания в клинкерно-песчаную смесь вводились добавки пластифицирующего действия. Адсорбируясь на поверхности частиц клинкера, добавка снижает количество поступающей воды и, соответственно, замедляет его гидратацию.

Введение гиперпластификаторов и иных добавок-замедлителей твердения в указанных производителями дозировках не привело к какому-либо значимому увеличению подвижности смеси.

Дальнейшее повышение дозировки привело к существенному замедлению схватывания бетонной смеси до трех-пяти суток.

Способ замешивания клинкерно-песчаной смеси на виброплощадке, используемый для замешивания смесей с низким водоцементным отношением, зарекомендовал себя гораздо лучше: подвижность бетонной смеси сохранялась на уровне, достаточном для укладки ее в формы. Уплотнение осуществлялось с пригрузом и продолжалось до появления на поверхности цементного теста, после чего образцы (номера 4, 5 и 6) твердели в камере нормально-влажностного твердения в течение 28 суток. Результаты сравнительных испытаний сухого и классического формования клинкерного вяжущего представлены в таблице 1.

Таблица 1

### Сравнительные характеристики образцов

Характеристика	Образец					
	1	2	3	4	5	6
1. Плотность сухой виброуплотненной смеси, кг/м <sup>3</sup>	2 133	2 150	2 135	–	–	–
2. Плотность бетона в возрасте 28 суток, кг/м <sup>3</sup>	2 262	2 315	2 274	2 260	2 240	2 250
3. Водоцементное отношение, д. ед.	0,29	0,29	0,28	0,32	0,31	0,29
4. Прочность образцов при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	41,5	42,4	39,8	33,5	31,1	30,8

Согласно данным, прочность образцов, полученных методом сухого формования, оказалась на 30 % выше образцов из водозатворенной смеси. Внутренняя структура образцов из водозатворенной смеси характеризовалась наличием больших пор воздуха, что свидетельствует о недостаточности уплотнения, даже проведенного в соответствии с требованиями стандартов.

В то же время полученные результаты оказались довольно низкими по сравнению с полученными ранее данными для обычных цементных образцов [4]. Для разрешения данной проблемы прорабатывалось несколько вариантов. Одним из первых путей было выбрано улучшение качества мелкого заполнителя мелкозернистой бетонной смеси.

Качество мелкого заполнителя, а именно наличие в нем пылевидных и глинистых примесей, стало одним из первых обрабатываемых вариантов. Повышая водопотребность бетонной смеси и образуя оболочки в зоне контакта цементного камня и заполнителя, примеси, зачастую сложенные слабыми породами, серьезно снижают прочность бетона, а также увеличивают пористость и проницаемость [5]. Это чревато, опять же, снижением морозостойкости и водонепроницаемости

Как говорилось ранее, при сухом формировании отсутствуют какие-либо требования к подвижности смеси, однако в условиях низкого водосодержания оттягивание на себя воды пылевидными фракциями может приостановить гидратацию мелких фракций цемента, препятствуя раннему формированию структуры камня и появлению большого количества дефектов, катастрофически снижающих прочность изделия. Помимо этого, пылевидные и глинистые фракции образуют тонкие оболочки на поверхности частиц цемента и заполнителя, что снижает площадь контакта, а соответственно, прочность мелкозернистого бетона.

Очистка песка осуществлялась путем промывки до тех пор, пока вода, проходящая через песок, не перестала мутнеть. После этого осуществлялась сушка песка до постоянной массы. Общая потеря массы песка составила 1,3 %, что является нормальным для использования песка в водозатворенных бетонных смесях.

Образцы изготавливались из клинкерно-песчаной смеси того же состава и по методологии первого опыта. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

### Характеристики образцов на мытом песке

Характеристика	Образец		
	1	2	3
1. Плотность сухой виброуплотненной смеси, кг/м <sup>3</sup>	2 208	2 225	2 232
2. Плотность бетона в возрасте 28 суток, кг/м <sup>3</sup>	2 362	2 382	2 398
3. Водоцементное отношение, д. ед.	0,28	0,27	0,29
4. Прочность бетонных образцов при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	49,5	53,1	52,0

Полученные для образцов на мытом песке данные показывают прирост прочности на 24,7 % относительно невымытого песка и 63,4 % относительно водозатворенной мелкозернистой смеси. Средняя прочность мелкозернистого бетона составила 51,5 МПа, что соответствует классу В40.

## **ПРОБЛЕМА ДОСТИЖЕНИЯ ВЫСОКИХ ПРОЧНОСТЕЙ ПРИ СУХОМ ФОРМОВАНИИ**

По мере изучения технологии сухого формования становится предельно понятна главная проблема технологии сухого формования, а именно невозможность воспроизведения результатов экспериментов, проводимых более 30 лет назад. Бетонные образцы, производимые по данной технологии, имеют рядовую прочность, не более В35 вместо В60 и рядовую морозостойкость F150 вместо F750 [1, 2].

Известен ряд установок, которые длительное время работали на белорусских заводах, однако ввиду сложности в обслуживании и невостребованности были законсервированы, пришли в негодность, списаны и утилизированы. На данный момент в стране не осталось рабочих установок по изготовлению образцов методом сухого формования бетонных смесей.

При изучении работ советских ученых было установлено, что цементная промышленность СССР выпускала цементы довольно грубого помола, до 2 500–2 800 см<sup>2</sup>/г. В течение проводившейся в начале предыдущего десятилетия модернизации цементного производства Республики Беларусь произошло переоборудование производства с внедрением новых технологий. В том числе дошла крупных фракций цемента. В результате современные цементы имеют удельную поверхность 3 200–3 500 см<sup>2</sup>/г и более однородный гранулометрический состав.

На данный момент установлено [6], что в технологии традиционного формования водозатворенных смесей прочность в возрасте 28 суток главным образом зависит от содержания фракций 3–30 мкм. Определяющее значение для прочности имеет фракция 10–20 мкм. Увеличение доли этой фракции до 80 % от общей массы позволяет получать цемент марок 700–800 ОБТЦ (особо быстротвердеющий).

Однако увеличение тонкости помола сопровождается высокими энергозатратами как на помол (с каждым процентом увеличения тонкости помола расход энергии растет на 4–6 %), так и на дополнительную сепарацию, что существенно увеличивает цену конечного продукта.

Тем не менее, метод сухого формования позволял получать крайне высокие прочностные показатели и на советском цементе, не подвергавшемся таким энергозатратным методам обработки. С точки зрения гранулометрии смеси, именно полифракционные смеси обеспечивают наиболее плотную упаковку и наибольшее снижение пористости бетона. Несмотря на роль фракции 10–20 мкм в твердении бетона, монофракционная смесь характеризуется высокой пористостью, значительно снижающей прочность [6].

Единой точки зрения касаясь гранулометрического состава, обеспечивающего наилучшую уплотняемость смеси, а в особенности состава цемента, на данный момент нет. Ряд авторов указывает на необходимость удаления средних фракций, тогда как другие говорят о непрерывной гранулометрии смеси [7]. Поэтому необходимо отталкиваться непосредственно от старого технологического цикла производства цемента: помол клинкера в шаровой мельнице с отсеиванием крупных фракций более 0,14 мм.

Осуществлялся помол в лабораторной шаровой мельнице барабанного типа, для эксперимента было выбрано 5 фракций с требуемой тонкостью помола от 1 800 до 3 100 см<sup>2</sup>/г. Время и фактическая тонкость помола составов представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Время помола и тонкость помола клинкера**

Характеристика	Фракция				
	1	2	3	4	5
Время помола, мин	65	75	85	95	120
Тонкость помола, см <sup>2</sup> /г	1 890	2 238	2 412	2 736	3 190

Полученные фракции просеивались через сито 0,14 и использовались для изготовления образцов по изложенной выше методике. Стоит отметить, что при формовании образцов с низкой удельной поверхностью клинкера наблюдалось гораздо более

выраженное расслоение сухой смеси, что снова подчеркивает важность нахождения в составе мелких фракций.

В возрасте 28 суток производилось измерение плотности образцов, определялось водоцементное отношение и прочность на сжатие. Результаты испытаний представлены в таблице 4.

Таблица 4

### Сравнительные характеристики образцов

Характеристика	Состав на фракции				
	1	2	3	4	5
1. Плотность сухой виброуплотненной смеси, кг/м <sup>3</sup>	2 240	2 230	2 240	2 230	2 220
2. Плотность в возрасте 28 суток, кг/м <sup>3</sup>	2 310	2 320	2 380	2 390	2 380
3. Водоцементное отношение, д. ед.	0,22	0,24	0,26	0,25	0,28
4. Прочность бетонных образцов при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	29,4	33,4	43,8	44,6	51,5

Полученные данные лишь подтверждают прямую зависимость между тонкостью помола клинкера и прочностью бетона, позволяют однозначно подтвердить, что для способа сухого формования справедливы абсолютно те же законы зависимости между тонкостью помола и прочностью, что и для водозатворенных смесей, и необходимо исследовать иные факторы, которые могли повлиять.

### **ОЦЕНКА ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ БЕТОНА, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДОМ СУХОГО ФОРМОВАНИЯ И ВАКУУМИРОВАНИЯ**

На данный момент технология сухого формования и вакуумирования позволяет достигать высоких прочностей на рядовом сырье и с минимальными энергозатратами, что является серьезным достижением, требующим дополнительного исследования характеристик.

В предыдущих работах нами была выделена одна из главных областей применения технологии сухого формования, а именно ускоренное формование тонкослойных декоративных образцов. Согласно СТБ 1374-2003 [8], для плит, предназначенных для облицовки наружных поверхностей зданий, сооружений и малых

архитектурных форм, установлена минимальная морозостойкость F150. При этом не следует забывать, что согласно приведенной в стандарте методологии, морозостойкостью считается количество циклов попеременного замораживания-оттаивания, в течение которых прочность бетона снижается не более чем на 5 %. При этом допускается потеря массы до 5 %, что является недопустимым при использовании бетона в декоративных изделиях.

В связи с вышеописанным испытания осуществлялись по ГОСТ 10060.2-95 [9], по третьему методу, до появления первых признаков отшелушивания внешней поверхности образцов. Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5

### Характеристики образцов на мытом песке

Характеристика	Требования	Результат					
Количество циклов	500	500					
Прочность на сжатие, МПа:	–						
- контрольных образцов		50,1	49,8	51,3	50,0	53,1	51,8
- средняя прочность		51,6					
- основных образцов		48,5	47,1	49,5	50,3	48,3	50,4
- средняя прочность		49,7					
Снижение прочности, %	Не более 5,0	3,7					

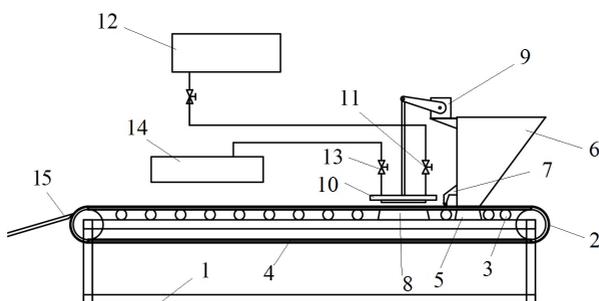
Согласно полученным данным, морозостойкость бетонной смеси соответствует марке F500, а значит, что она пригодна для облицовки наружных поверхностей зданий, сооружений и малых архитектурных форм. Согласно СНБ 5.03.01-02 [10], данный состав подходит для конструкций I–III степени ответственности в условиях попеременного замораживания и оттаивания без ограничения класса по условиям эксплуатации.

По сравнению с предыдущими разработками [1–3] технология вакуумного насыщения не требует энергозатрат на приготовление пара, сильных прессующих усилий, что характеризует ее как малоэнергоёмкую. Отсутствие в технологической схеме парогенераторов, прессов, а также использование смесителей гравитационного действия упрощает и в разы удешевляет

практическую реализацию производства мелкоштучных блоков, а также других изделий с высокими темпами оборачиваемости форм. Проблема расслоения смеси решается путем специальной подготовки лицевой поверхности образцов, заключающейся в укладке тонкого поверхностного слоя клинкерно-песчаной смеси в пропорции К:П 1:2.

Отсутствие добавки гипса исключает образование в теле изделия этtringита, а также снижает стоимость как самого вяжущего, так и процесса его производства. В период с 2010 по 2017 год цементной отраслью Республики Беларусь производилось в среднем около 4,8 млн тонн цемента при себестоимости 74 р/тонн. Стоимость импортируемого гипса составляет порядка 300 р/тонн. Несмотря на невысокий удельный вес гипса в составе цемента (порядка 3–5 %), экономия от его исключения составит от 12 до 16 %, что позволяет снизить стоимость конечного продукта.

Нами предлагается технологическая схема дешевого автоматического устройства формовки тонкослойных (до 2 см) изделий. Схема устройства представлена на рисунке.



**Рисунок.** Схема установки для сухого формования тонкослойных изделий

На стане (1) при помощи системы барабанов (2) и роликов (3) перемещается ленточная полиуретановая форма (4) толщиной до 50 мм. Полиуретан обладает низким сцеплением с бетоном, поэтому формы из него не нуждаются в смазке. Упор (5) служит для ограничения провисания ленты при подаче на нее сухой бетонной смеси из бункера (6). Перемещаясь, лента со смесью проходит под плужковым сбрасывателем (7), в результате чего смесь остается только в формовочных углублениях. Излишки вручную возвращаются в бункер. Пост (8) служит для обеспечения плоскостности

ленты при формовке, что предотвращает разрушение изделия. Далее, сервопривод (9) прижимает полую формующую насадку (10) к ленте. Перфорированный выступ формовочной площадки входит в формовочное углубление, что обеспечивает его уплотнение. Далее, открывается клапан (11), соединяющий полость формующей насадки с вакуумным ресивером (12), в течение 10 секунд в теле изделия создается разрежение 0,8 атм. После чего клапан (11) закрывается, и открывается клапан (13), через который в объем изделия поступает вода из бака (14) в объеме, необходимом для полного насыщения изделия в течение 30 с. После насыщения сервопривод поднимает формующую насадку, и насыщенное изделие постепенно движется к посту распалубки. На конечном барабане происходит загиб формовочной ленты, в результате чего изделие, сохраняющее форму, перемещается на поддерживающую пластину (15), с которой при помощи автоматики или вручную изделие перемещается в камеру нормального твердения для вызревания.

В отличие от разработок предшественников, предлагаемое устройство имеет крайне простую конструкцию и может быть собрано в условиях мелкого подсобного производства. Для смешивания компонентов смеси наиболее подходят смесители гравитационного действия, стоимость которых в 5–6 раз ниже аналогичных по объему бетоносмесителей принудительного действия, что также удешевляет производственную линию. Автономное устройство такого типа должно стать идеальным решением для старта малого бизнеса.

Тем не менее, существуют серьезные опасения, что даже при успешной реализации технологии данный проект приживется только в странах, где цементные заводы обладают достаточной гибкостью и могут позволить себе внедрение новых продуктов, таких как молотый клинкер. Это создает предпосылки к расширению области использования технологии сухого формования. На данный момент существует целый спектр комплексных быстросхватывающихся вяжущих, использование которых возможно только путем специальных энергозатратных технологических приемов. Применение технологии сухого формования позволит значительно упростить производство изделий из специальных, кислотостойких и жаростойких бетонов.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе проведенных экспериментов нами была найдена рациональная область применения технология сухого формования, выделен ряд особенностей формовки изделий на клинкерном вяжущем, а также проведена оценка прочностных и эксплуатационных характеристик мелкозернистого бетона. Полученные образцы демонстрируют характеристики, позволяющие использовать данный метод для создания реальных изделий, пригодных для эксплуатации в климате Республики Беларусь.

В статье представлена технологическая схема устройства для формовки тонкослойных изделий методом сухого формования и вакуумирования. Замена цемента молотым клинкером позволяет снизить стоимость вяжущего и потребность в дорогостоящих формах, что делает технологию привлекательной для развивающегося малого бизнеса.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Батяновский, Э. И. Особо плотный бетон сухого формования. / Э. И. Батяновский. – Мн. : НПООО «Стринко», 2002. – 224 с.
2. Хуторцов, Г. М. Новый способ получения высокоплотных бетонов. / Г. М. Хуторцов // Бетон и железобетон. – 1971. – № 4. – С. 18–20.
3. Дрозд, А. А. Технология и физико-механические свойства вакуумпрессованного бетона сухого формования : диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук / Дрозд Александр Алексеевич. – БПИ, Минск, 1991. – 219 с.
4. Якимович, Г. Д. Получение мелкоштучных изделий методом сухого формования / Г. Д. Якимович // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол. : О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2017. – Вып. 9. – С. 515–530.
5. Берг, О. Я. Высокопрочный бетон // О. Я. Берг (ред.), Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко. – М. : Стройиздат, 1971. – 209 с.

6. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества: учеб. / А. В. Волженский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1986. – 464 с.
7. Львович, К. И. Песчаный бетон и его применение в строительстве / К. И. Львович. – СПб. : Строй-Бетон, 2007. – 323 с.
8. Плиты облицовочные бетонные. Технические условия : СТБ 1374-2003. – Введ. 2003-01-07. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2003. – 8 с.
9. Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многовариантном замораживании и оттаивании : ГОСТ 10060.2-95. – Введ. 1996-08-10. – Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 1996. – 31 с.
10. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02. – Введ. 2003-01-07. – Минск: РУП «Минсктиппроект», 2003. – 140 с.

Статья поступила: 22.11.2018

## REFERENCES

1. Batjanovskij Je. I. *Osobo plotnyj beton suhogo formovaniya* [Especially dense concrete of dry molding]. Minsk : «Strinko», 2002. 224 p. (rus)
2. Hutorcov G. M. *Novyj sposob poluchenija vysokoplotnyh betonov* [New way of producing high-performance concrete]. Beton i zhelezobeton. 1971. № 4. Pp.18–20. (rus)
3. Drozd A. A. *Tehnologija i fiziko-mehaničeskie svojstva vakuumpressovannogo betona suhogo formovaniya: dissertacija na soiskanie učennoj stepeni kand.tehn.nauk* [Technology and physical and mechanical properties of vacuum-pressing dry-cast concrete, dissertation]. Minsk : BPI, 1991. 219 p. (rus)
4. Yakimovich G. D. *Problemyi sovremennogo betona i zhelezobetona* [Problems of modern concrete and reinforced concrete]: sb. nauch. tr. Minsk, 2017. Vol. 9. Pp. 515–530. (rus)

5. Berg O. Ya., Shherbakov E. N., Pisanko G. N. *Vysokoprochnyj beton* [High-strength concrete]. Moscow : «Strojizdat», 1971. 209 p. (rus)
6. Volzhenskij A. V. *Mineral'nye vjazhushhie veshhestva : uchebnik* [Mineral binders: Textbook]. Moscow : Strojizdat, 1986. 464 p. (rus)
7. Lvovich K. I. *Peschanyiy beton i ego primenenie v stroitelstve.* [Sand concrete and its application in construction.]. SPb. : Sroy-Beton, 2007. 323p. (rus)
8. STB 1374-2003. *Plityi oblitsovochnye betonnyie. Tehnicheskie usloviya* [Concrete veneers. Technical specifications]. Minsk : Ministerstvo arhitektury i stroitelstva Respubliki Belarus, 2003. 8 p. (rus)
9. GOST 10060.2-95. *Betonyi. Uskorennyye metodyi opredeleniya morozostoykosti pri mnogovariantnom zamorazhivanii i ottaivanii* [Concretes. Accelerated methods for determining frost resistance in the case of multiple freezing and thawing]. Minsk : Ministerstvo arhitektury i stroitelstva Respubliki Belarus, 1996. 31p. (rus)
10. SNB 5.03.01-02. *Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii* [Concrete and reinforced concrete constructions]. Minsk : «Minsktiproekt», 2003. 140 p. (rus)

Received: 22.11.2018