

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-19-29

***Винокурова О.В., Баранова А.А.**

Ангарский государственный технический университет

*E-mail: neutrino.78@mail.ru

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВОДОЦЕМЕНТНОГО ОТНОШЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПЕНОБЕТОНА

Аннотация. В статье рассмотрено влияние водоцементного отношения на формирование структуры теплоизоляционного пенобетона марки по средней плотности D300. Основанием для анализа послужило противоречие между полученной опытным путём прямой зависимостью прочности пенобетона от водоцементного отношения и практикой усовершенствования структуры материала за счет водоредуцирования. Представлен расчёт оптимального количества воды в пенобетонной смеси, основанный на методе абсолютных объёмов. В расчёт включена формула определения объёма межпорового пространства в зависимости от толщины межпоровой перегородки, диаметра ячейки и вида упаковки. Результаты вычислений подтверждаются фактическими показателями, собранными в ходе эксперимента. Влияние количества воды в пенобетонной смеси на качество пенобетона оценивали прочностью при сжатии и характером макроструктуры материала. Прочность определяли разрушающим методом. При исследовании структуры использован оптический микроскоп в сочетании с программным обеспечением обработки изображения. Наибольшей прочностью обладает материал с толщиной перегородки, превышающей максимальный размер цементного зерна при условии равенства объёма межпорового пространства и суммы абсолютных объёмов компонентов пенобетонной смеси. Структура с замкнутыми порами и плотными межпоровыми перегородками наблюдается в пенобетоне на белковом пенообразователе при водоцементном отношении с учётом воды в пене равном 0,7.

Ключевые слова: водоцементное отношение, макроструктура, диаметр пор, проектирование состава, теплоизоляционный пенобетон.

Введение. В условиях жёсткой конкуренции и экономии затрат поверхностно-активные вещества (ПАВ) получили широкое распространение в качестве компонентов, используемых с целью снижения веса изделий и теплопроводности конструкций. Повышение требований к уровню теплозащиты увеличивает спрос на пеноматериалы. Одним из них является пенобетон на минеральном вяжущем [1–3]. Однако, до сих пор нет чётко сформулированных законов, которые бы легли в основу проектирования состава пенобетона с эксплуатационными показателями, отвечающими современным условиям.

Незначительный объём твёрдых компонентов и увеличение содержания пенообразователя, снижающего смачиваемость поверхности гидратационных вяжущих, требуют для построения структуры пенобетона пониженной плотности достаточного количества воды. Согласно исследованиям [4], при увеличении водоцементного отношения (В/Ц) теплоизоляционного пенобетона наблюдается оптимизация макроструктуры и рост прочности материала.

С другой стороны, одной из распространенных технологических мер в решении ряда проблем, имеющих место при получении материала (усадовые трещины, неоднородность характеристик конечного продукта и потеря устойчивости вспененной массы) является водоредуциро-

вание. Так, по данным публикации [5], разработанный способ изготовления пенобетона, основой которого является двухстадийное вспенивание, позволяет снизить В/Ц и повысить качество структуры. Многочисленны исследования и в области усовершенствования пенобетона за счет использования комплексных модификаторов из мелкодисперсных наполнителей и пластифицирующих добавок [6–9].

Между тем, назначение количества воды в пенобетонной смеси без учета степени заполнения межпорового пространства чревато недоиспользованием потенциала вяжущего компонента и снижением качества продукции. Особенно это касается пенобетона пониженной плотности, где объём твердых компонентов ничтожно мал.

Чтобы правильно сориентироваться в многообразии предложений по модификации пенобетона необходимо дать определение оптимального количества воды в пенобетонной смеси, обозначить и исследовать факторы, влияющие на ее значение, например, параметры макроструктуры материала.

Одним из условий проявления вяжущих свойств является наличие хорошо смачиваемой дисперсионной среды [10]. При этом смачиваемость поверхности обеспечивается как особенностями дисперсионной среды – полярной жидкости, так и спецификой смачиваемой поверхности. Так как межпоровое пространство в пенобетоне

ограничено наличием молекул пенообразователя, то при сужении толщины межпоровой перегородки в результате исключения доли воды возможно изменение поверхностных свойств вяжущего компонента. В связи с чем, толщина перегородки, размер пор и их упаковка приобретают решающую роль в назначении В/Ц пенобетонной смеси [11, 12].

Полагаем, что при планировании состава пенобетона необходимо исходить не только из характеристик сырьевых компонентов, но и заданных параметров микро, макроструктур материала, с учётом необходимых условий для их образования. Развитие математического моделирования и решение задач плотной упаковки [13–20] позволяют осуществить такой подход к проектированию состава пенобетона. Если в области производства тяжёлого бетона, подбору зернового состава заполнителя уделено достаточно внимания [21, 22], на предмет сокращения расхода цемента и воды, то в пенобетоне эта тема почти не затронута.

Для установления оптимального количества воды в пенобетонной смеси были проведены испытания пенобетона марки по средней плотности D300. На основе результатов исследования структуры образцов выведена зависимость между параметрами макроструктуры материала и его водоцементным отношением.

Материалы и методы. В качестве исходных компонентов использованы: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н АО «Ангарскцемент», синтетический пенообразователь «Пентапав 430А», пенообразователь на белковой основе Biofoam.

Пенобетон изготавливали по раздельной технологии с различным объёмом раствора смеси, в котором варьировалось количество воды затворения при фиксированной концентрации рабочего раствора пенообразователя.

Прочность образцов пенобетона определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 10180.

Параметры структуры устанавливали с помощью микроскопа Levenhuk с цифровой камерой Levenhuk M200 BASE и программного обеспечения обработки изображения LevenhukLite 4.11.

Макропористость пенобетона характеризовалась следующими показателями:

- диаметром ячейки и толщиной межпоровой перегородки (средним, максимальным и минимальным значением), среднее значение определялось по формуле:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

- средним квадратичным отклонением в значениях диаметра ячеек и толщины перегородок:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_n - \bar{x})^2}{n}}; \quad (2)$$

- коэффициентом вариации (изменчивости) значения диаметра ячеек и толщины перегородки:

$$CV_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}}. \quad (3)$$

Диаметр пор и толщину перегородки измеряли по сечению в плоскости среза. Замеры производились до получения не менее 300 значений. Для исключения ошибки в пространственной интерпретации в выборку измерений диаметра ячейки и толщины перегородки включали поры, имеющие глубину близкую к их радиусу.

Основная часть. В начале исследования была произведена серия испытаний образцов пенобетона на основе пенообразователей синтетической и белковой природы, с целью получения набора данных, характеризующих влияние параметров пены на формирование цементного камня при различном водоцементном отношении раствора. Результаты работы опубликованы ранее [23, 24], но некоторые из них сведения, необходимые для дальнейшего рассмотрения вопроса, а именно составы и показатели испытаний пенобетона на прочность представлены ниже: при использовании синтетического пенообразователя – в таблице 1, белкового – в таблице 2.

Из результатов испытаний следует, что с увеличением В/Ц смеси до 0,8 прочность пенобетона на синтетическом пенообразователе повышается (табл. 1), независимо от источника поступления воды, которым является пена или раствор. Дальнейшее увеличение количества воды в смеси особо не оказывает влияние на характеристику.

Значения прочности пенобетона на белковом пенообразователе Biofoam выше, чем на синтетическом (табл. 2). Возможно, это обусловлено строением и размером молекул белкового пенообразователя, позволяющих сохранить положение ПАВ на границе раздела воздух-вода и снизить степень его адсорбции на зернах цемента. При этом тенденция роста прочности при повышении воды в смеси не меняется, наибольшее значение достигается при максимально возможном В/Ц, равном 0,7. Дальнейшее увеличение воды в смеси на основе белкового пенообразователя Biofoam приводит к потере устойчивости вспененной массы.

Таблица 1

Результаты испытаний пенобетона марки по средней плотности D300 на синтетическом пенообразователе «Пентапав 430»

Состав на 1 м ³ пенобетонной смеси, кг				Распływ раствора по Суттарду, см	В/Ц смеси (с учётом воды в пене)	Прочность при сжатии, МПа	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м ³
пена		раствор					
Пентапав 430А	вода	цемент	вода				
Концентрация рабочего раствора пенообразователя 9 % (кратность 33)							
1,30	13,0	265	159	22	0,65	0,06	271
1,20	12,0	265	175	30	0,71	0,372	293
1,01	10,1	265	191	33	0,76	0,477	311
1,03	10,3	265	207	38	0,82	0,490	298
0,86	8,6	265	222	41	0,87	0,492	307
0,87	8,7	265	238	43	0,94	0,512	313
Концентрация рабочего раствора пенообразователя 2 % (кратность 28)							
0,49	24,5	265	159	22	0,69	0,135	305
0,46	23,0	265	175	30	0,75	0,316	288
0,47	23,5	265	191	33	0,81	0,507	286
0,39	19,5	265	206	38	0,85	0,449	307
0,44	22,0	265	223	41	0,92	0,468	301
Концентрация рабочего раствора пенообразователя 1 % (кратность 15)							
0,48	43,2	265	143	20	0,70	0,379	283
0,53	47,7	265	159	22	0,78	0,415	289
0,41	36,9	265	175	30	0,80	0,563	301
0,39	35,1	265	191	33	0,85	0,473	299
0,33	29,7	265	207	38	0,89	0,493	313

Таблица 2

Результаты испытаний пенобетона марки по средней плотности D300 на белковом пенообразователе Biofoam

Состав на 1 м ³ пенобетонной смеси, кг				Распływ раствора по Суттарду, см	В/Ц смеси (с учётом воды в пене)	Прочность при сжатии, МПа	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м ³
пена		раствор					
Biofoam	вода	цемент	вода				
Концентрация рабочего раствора пенообразователя 9 % (кратность 10)							
6,15	61,5	245	74	6	0,58	0,335	258
5,89	58,9	245	81	6	0,59	0,366	270
6,17	61,7	245	88	6	0,64	0,529	296
5,71	57,1	245	96	7	0,65	0,763	274
6,30	63,0	245	103	9	0,70	0,783	270

Фактическая структура пенобетона с В/Ц, обеспечивающим максимальную прочность, как правило, представлена:

- сферическими ячейками при использовании «Пентапав 430А» (рис. 1 а),

- ячейками многогранника при использовании белкового пенообразователя Biofoam (рис. 1 б).

При низком значении В/Ц структура пенобетона на обоих пенообразователях имеет рваный характер (рис. 1 в, г).

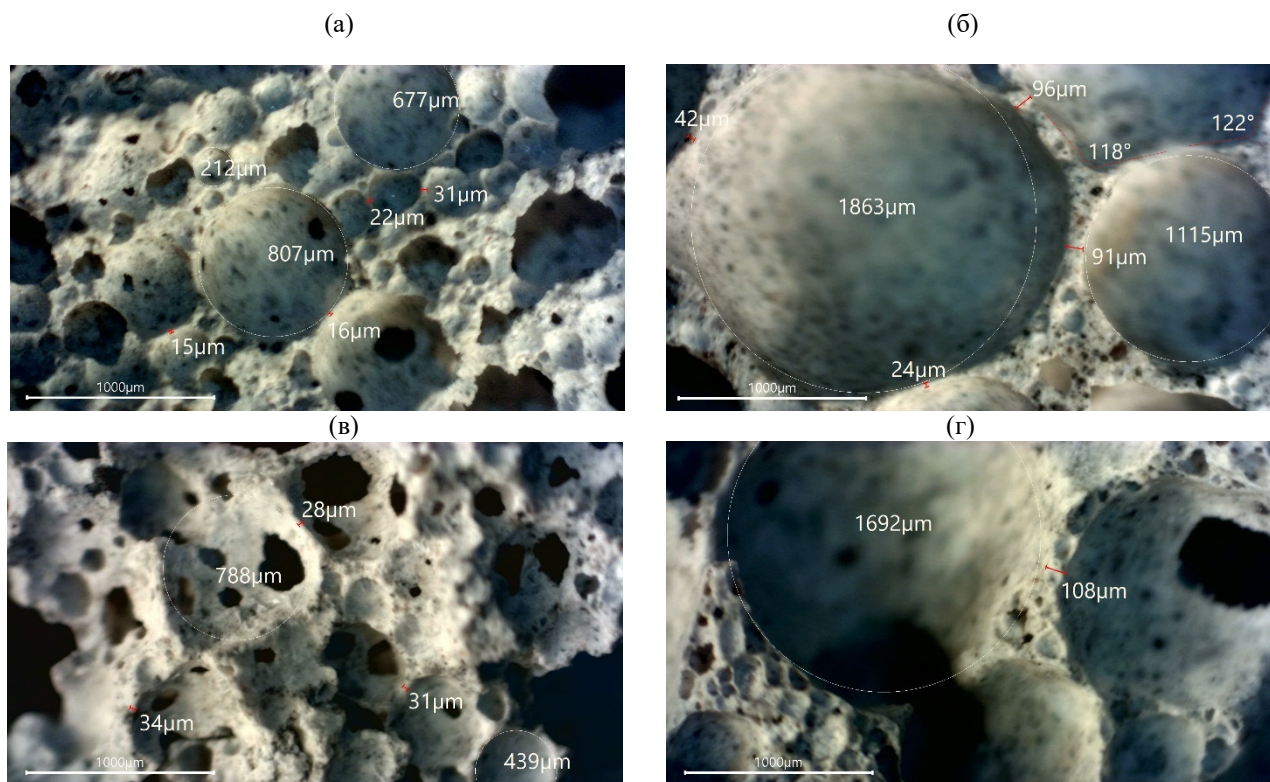


Рис. 1. Фотография структуры пенобетона марки по средней плотности D300 на синтетическом пенообразователе «Пентапав 430А» (а) – с В/Ц = 0,85, (в) – с В/Ц = 0,65 и белковом пенообразователе Biofoam (б) – с В/Ц = 0,7, (г) – с В/Ц = 0,58. Увеличение в 20 раз

При избытке молекул пенообразователя в растворе, адсорбционные слои его молекул на зернах цемента могут замедлить и даже прекратить процессы гидратации вяжущего [25]. Данное утверждение подтверждается результатами, представленными в таблице 1, с повышением концентрации рабочего раствора пенообразователя и кратности пены усиливается негативное влияние снижения количества воды в цементном растворе смеси на прочность материала. Прочность пенобетона с В/Ц смеси равным 0,65 и при использовании рабочего раствора синтетического пенообразователя с концентрацией 9 % составляет всего 0,06 МПа.

Из вышеизложенного следует, что для нормального течения процессов гидратации диаметр зерна цемента должен быть меньше толщины межпоровой перегородки, а само зерно окружено прослойкой дисперсионной среды с низким содержанием молекул пенообразователя. Данное условие в пенобетонной системе может быть обеспечено если зерно цемента находится в среднем слое пенной пленки, в котором согласно общепринятому представлению о трехслойном ее строении, концентрация пенообразователя незначительна [26]. При этом межпоровое пространство должно быть абсолютно заполненным, в противном случае произойдет сужение среднего слоя дисперсионной среды в результате ее перераспределения внутри системы.

Поскольку масса твёрдых компонентов пенобетона ограничена его заданной плотностью, абсолютное заполнение межпорового пространства обеспечивается водой, объём которой для 1 м³ пенобетонной смеси рассчитывается по формуле:

$$B = V_k - \frac{P_g}{\rho_g} - \frac{P_n}{\rho_n}, \quad (4)$$

где B – количество воды в пенобетонной смеси, м³;

V_k – объём межпорового пространства (объём каркаса) в 1 м³ пенобетонной смеси, м³

P_g – расход вяжущего компонента на 1 м³ пенобетонной смеси, кг;

ρ_g – истинная плотность вяжущего компонента, кг/м³;

P_n – расход наполнителя на 1 м³ пенобетонной смеси, кг;

ρ_n – истинная плотность наполнителя, кг/м³.

Только при таком значении объёма воды в пенобетонной смеси, может быть использован заключенный в вяжущий компонент потенциал.

При меньшем количестве воды заполнения межпорового пространства не происходит, так как объёма жидкости и твёрдых компонентов не хватает (рис. 1 в).

В отсутствии среднего слоя смачиваемой среды цементное зерно, адсорбирует сконцентрированные на границе воздух-вода молекулы

пенообразователя и становится обычным минерализатором пены. При увеличении концентрации водного раствора пенообразователя гидрофобная адсорбционная оболочка ПАВ на зернах цемента утолщается, нарушая ход его твердения [25]. Прочность пенобетона снижается.

В свою очередь, объём межпорового пространства V_k , обусловленный диаметром зерна вяжущего, зависит от следующих факторов: размера, вида упаковки и формы пор.

С энергетической точки зрения наиболее предпочтительна структура с одномерным распределением ячеек одинакового размера. Так как абсолютно заполнить трёхмерное пространство ячейками сферической формы невозможно, представим объём межпорового пространства V_k как сумму объёмов покрытия пор и пространства между плотноупакованными ячейками без учёта перегородки:

$$V_k = V_n + V_y, \quad (5)$$

где V_n – объём покрытия пор, м^3 ;

V_y – объём пространства между плотноупакованными ячейками, без учёта перегородок, м^3 .

Объём покрытия пор V_n равен произведению объёма покрытия одной поры на их количество:

$$V_n = V_{n.я.} \cdot N \cdot 10^{-9}, \quad (6)$$

где $V_{n.я.}$ – объём покрытия одной поры, мм^3 ;

N – количество пор в объеме материала, шт.

Объём покрытия одной поры выразим через толщину межпоровой перегородки t как разницу между объёмом ячейки радиусом $(r + \frac{t}{2})$ и объёмом поры радиусом r :

$$V_{n.я.} = V_t - V_я, \quad (7)$$

где V_t – объём ячейки радиусом $(r + \frac{t}{2})$, мм^3 ;

$\frac{t}{2}$ – толщина покрытия поры радиусом r , мм ;

$V_я$ – объём одной поры радиусом r , мм^3 .

Количество пор в 1 м^3 пенобетонной смеси найдём из выражения:

$$V_{n2} = \left[\frac{4\pi}{3} \left(0,414r + \frac{t}{2} \right)^3 - \frac{4\pi}{3} (0,414r)^3 \right] \cdot \frac{0,065 \cdot (1 - V_k)}{\frac{4\pi}{3} (0,414r)^3}, \quad (12)$$

- третьего порядка

$$V_{n3} = \left[\frac{4\pi}{3} \left(0,224r + \frac{t}{2} \right)^3 - \frac{4\pi}{3} (0,224r)^3 \right] \cdot \frac{0,020 \cdot (1 - V_k)}{\frac{4\pi}{3} (0,224r)^3}, \quad (13)$$

где r – радиус поры первого порядка, мм ;

t – толщина перегородки, мм ;

(0,915), (0,065), (0,02) – доля общей пористости, приходящаяся на ячейки первой, второй и третьей размерности соответственно.

$$N = \frac{(1 - V_k) \cdot 10^9}{V_я}. \quad (8)$$

Плотность одномерной гексагональной упаковки шаров в трёхмерном пространстве составляет 74 % [27]. Однако реальная структура пенобетона на синтетическом пенообразователе представлена сферическими ячейками разного диаметра. В пенобетоне, изготовленном с применением Biofoam, поры частично трансформированы в многогранники.

Плотность гексагональной упаковки одинаковых шаров радиусом R возрастет до 80,9 % при заполнении октаэдрических и тетраэдрических пустот шарами размером $0,414R$ и $0,224R$ соответственно. При такой упаковке объём межпорового пространства в 1 м^3 пенобетонной смеси может быть представлен формулой:

$$V_k = \sum_{i=1}^3 V_{ni} + 0,191, \quad (9)$$

где V_{ni} – объём покрытия пор соответствующего порядка размерности, м^3 ;

i – порядок размерности поры;

0,191 – объём пространства между плотноупакованными порами без учёта перегородки между ними, м^3 .

Объём покрытия пор i -ого порядка V_{ni} равен произведению объёма покрытия одной поры i -ого порядка на количество пор соответствующего порядка:

$$V_{ni} = V_{n.я.i} \cdot N_i \cdot 10^{-9}, \quad (10)$$

где $V_{n.я.i}$ – объём покрытия одной поры i -ого порядка, мм^3 ;

N_i – количество пор соответствующего i -ого порядка, шт.

Так как на один шар в гранцентрированной упаковке приходится одна октаэдрическая и две тетраэдрические пустоты, то объём покрытия пор в 1 м^3 пенобетонной смеси составит:

- первого порядка

$$V_{n1} = \left[\frac{4\pi}{3} \left(r + \frac{t}{2} \right)^3 - \frac{4\pi}{3} r^3 \right] \cdot \frac{0,915 \cdot (1 - V_k)}{\frac{4\pi}{3} r^3}, \quad (11)$$

- второго порядка

со стремлением системы к уменьшению поверхностной энергии, при увеличении пористости смеси свыше 75÷80 %, сферические поры трансформируются в многогранники.

Если принять за идеализированную форму ячеек, деформированных в многогранники, правильный додекаэдр, а плотность их упаковки 85,9 % [28], то преобразованная формула объёма межпорового пространства в 1 м³ пенобетонной смеси примет вид:

$$V_k = 1 - \frac{0,859}{\left(\frac{t}{2r_g} + 1\right)^3}, \quad (14)$$

где r_g – радиус вписанной сферы в ячейку формы правильного додекаэдра, мм.

Применим расчётную математическую модель для анализа влияния параметров макроструктуры на формирование цементного камня и сравним полученные результаты с экспериментальными данными.

Используя формулы (4, 9–13), найдём соотношение между В/Ц, толщиной перегородки и радиусом пор в пенобетоне марки по средней плотности D300 при гранцентрированной упаковке с трёхмерным характером распределения сферических ячеек (рис. 2). В расчёте примем условия опыта (табл. 1), где для изготовления пенобетона использован портландцемент с истинной плотностью 3100 кг/м³ в количестве 265 кг на 1 м³ пенобетонной смеси.

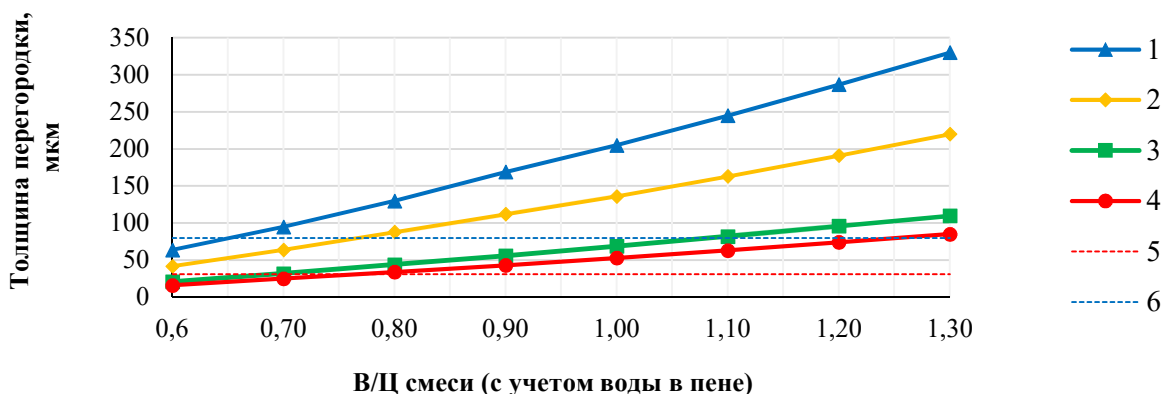
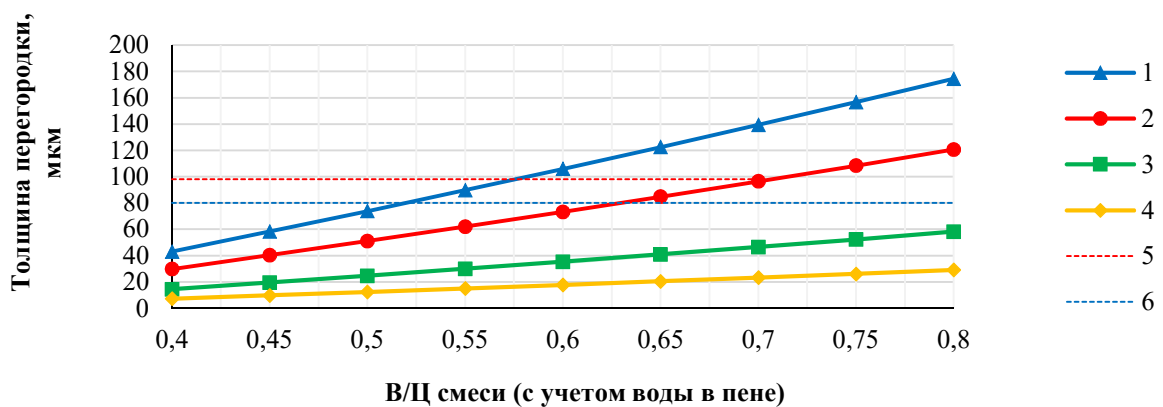


Рис. 2. Зависимость толщины межпоровой перегородки t в пенобетоне марки по средней плотности D300 от В/Ц (с учётом воды в пене) и среднего диаметра поры \bar{d} при трёхмерной гексагональной упаковке сферических ячеек: 1 – $\bar{d} = 1,5$ мм, 2 – $\bar{d} = 1$ мм, 3 – $\bar{d} = 0,5$ мм, 4 – $\bar{d} = 0,38$ мм, 5 – $t = 30$ мкм, 6 – $t = 80$ мкм

При трансформации сферических ячеек в многогранники, результаты расчета зависимости между параметрами макроструктуры и значением В/Ц смеси по формулам (4, 14) в пенобетоне марки по средней плотности D300, представлены

на рисунке 3. Исходные данные, соответствуют условиям опыта таблицы 2: для изготовления пенобетона использован портландцемент с истинной плотностью 3100 кг/м³ в количестве 245 кг на 1 м³ пенобетонной смеси.

Рис. 3. Зависимость толщины межпоровой перегородки t в пенобетоне марки по плотности D300 от В/Ц (с учётом воды в пене) и диаметра вписанной сферы d_g в правильный додекаэдр при деформации пор:



1 – $d_g = 3$ мм, 2 – $d_g = 2,075$ мм, 3 – $d_g = 1$ мм, 4 – $d_g = 0,5$ мм, 5 – $t = 98$ мкм, 6 – $t = 80$ мкм

Информация, полученная на основе расчета, подтверждает результаты эксперимента и позволяет проследить причинно-следственные связи

между исходными данными сырьевых компонентов и конечными характеристиками продукта.

Значения фактических параметров макроструктуры образцов (табл. 3, 4) и оптимального водоцементного отношения пенобетона (табл. 1, 2) согласуются с зависимостью, представленной на рисунке 2 и 3.

В случае пенобетона на синтетическом пенообразователе, для образования структуры, имеющей толщину перегородки 30 мкм и гранецентрированную трехмерную упаковку сферических пор со средним диаметром 0,384 мм, согласно результатам расчета, требуется В/Ц равное 0,77.

Так как размер зерна рядового портландцемента колеблется в пределах от 0 до 80 мкм, толщина перегородки 30 мкм не обеспечивает условие абсолютного заполнения межпорового пространства. Вывод подтверждается фотографией структуры пенобетона (рис. 1а), на которой видны раковины и сообщающиеся поры. Со значением толщины перегородки 80 мкм соотносится В/Ц равное 1,26 (рис. 2). Поэтому при В/Ц менее 0,8 фиксируются низкие прочностные показатели пенобетона, а при В/Ц равном 0,8 и более, они имеют стабильно высокие значения.

Таблица 3

Диаметр ячейки структуры образцов пенобетона

Кратность пены	В/Ц	Диаметр ячейки, мкм			Среднее квадратичное отклонение	Коэффициент вариации
		средний	максимальный	минимальный		
		\bar{d}	d_{max}	d_{min}		
Пенобетон на синтетическом пенообразователе «Пентапав 430А»						
33	0,87	412	2294	73	363	0,88
28	0,85	364	1781	85	259	0,71
15	0,85	384	1504	87	266	0,69
Пенобетон на белковом пенообразователе Biofoam						
10	0,70	2075	3563	486	713	0,34

Таблица 4

Толщина межпоровой перегородки структуры образцов пенобетона

Кратность пены	В/Ц	Толщина перегородки, мкм			Среднее квадратичное отклонение	Коэффициент вариации
		средняя	максимальная	минимальная		
		\bar{t}	t_{max}	t_{min}		
Пенобетон на синтетическом пенообразователе «Пентапав 430А»						
33	0,87	29	83	15	9	0,31
28	0,85	29	79	12	8	0,29
15	0,85	31	68	15	7	0,24
Пенобетон на белковом пенообразователе Biofoam						
10	0,7	98	345	33	49	0,5

В случае трансформации пор в многогранники с радиусом вписанной сферы 2,075 мм при толщине перегородки 80 мкм по данным расчёта требуется В/Ц равное 0,63.

Фактическое среднее значение межпоровой перегородки пенобетона на основе Biofoam с максимальным водоцементным отношением равным 0,7 составляет 98 мкм. Полученное опытным путем, соотношение размера пор, толщины перегородки и В/Ц не противоречит зависимости, определенной на основании расчета. На фотографии структуры данного материала (рис. 1 б)

наблюдаются замкнутые поры с глянцевой поверхностью и плотными межпоровыми перегородками.

Макроструктура пенобетона на Biofoam с В/Ц равным 0,7 отвечает ранее принятым условиям, первое из которых – толщина перегородки превышает максимальный размер зерна цемента, второе – условие равенства объема межпорового пространства и суммы абсолютных объемов сырьевых компонентов смеси. При этом максимальная прочность материала 0,78 МПа выше по сравнению с пенобетоном на синтетическом пенообразователе, где данные условия не соблюдены.

При низком В/Ц макроструктура пенобетона на белковом пенообразователе представлена раковинами (рис. 1 г). С увеличением В/Ц прослеживается переход от неформенной структуры к структуре с отдельными, не сообщающимися порами в форме шара или многогранника.

Выводы.

1. Оптимальное количество воды в пенобетонной смеси зависит от объёма межпорового пространства и доли заполнения его твёрдыми компонентами.

2. Тонкость помола вяжущих компонентов, диаметр воздушных ячеек и их упаковка определяют объём межпорового пространства в пенобетонной смеси.

3. Пенообразователь и кратность пены должны быть согласованы с тонкостью помола твёрдых компонентов.

Реальная структура пенобетона более сложна и разнообразна, чем принятая в расчёте, поэтому в статье предпринята лишь попытка учесть в математической модели основные принципы физико-химических процессов, происходящих при формировании материала.

Надеемся, что представленная работа установит задел для разработки более точного метода. Поскольку, подход к проектированию состава теплоизоляционного пенобетона на минеральном вяжущем в зависимости от макроструктуры материала позволяет подобрать необходимые параметры вяжущих компонентов, а при наличии сырья спрогнозировать структуру и свойства будущего материала. Проведённые расчёты и опыты показывают эффективность управления параметрами макроструктуры для оптимизации строения цементного камня, составляющего каркас пенобетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zhao W., Huang J., Su Q., Liu T. Models for Strength Prediction of High-Porosity Cast-In-Situ Foamed Concrete // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. № 2. Pp. 1–10. DOI:10.1155/2018/3897348.
2. Decký M., Drusa M., Zgútová K., Blaško M., Hájek M., and Scherfel W. Foam concrete as new material in road constructions // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. Pp. 428–433. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.585.
3. Fu Y., Wang X., Wang L., Li Y. Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–25. DOI: 10.1155/2020/6153602.
4. Liu Z., Zhao K., Hu C., Tang Y. Effect of water-cement ratio on pore structure and strength of foam concrete // *Advances in materials science and*

engineering. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2016/9520294.

5. Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Utepov Ye.B., Bazarbayev D.O, Tsygulyov D.V., Yenkebayev S.B., Shakhmov Zh.A. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Is. 103(3). 10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13.

6. Стешенко А.Б. Кудряков А.И. Пенобетон с пластифицирующими и микроармирующими добавками // *ALITinform*. 2018. №3 (52). С. 26–40.

7. Vu K.D., Bazhenova S.I. Modeling the influence of input factors on foam concrete properties. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Is. 103(3). 10311. DOI: 10.34910/MCE.103.11.

8. Abd Elrahman M., El Madawy M. E., Chung S.-Y., Sikora P., Stephan D. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. №7. 1447. DOI:10.3390/app9071447.

9. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Voronov V.V., Zagorodnyuk L.Kh., Fediuk R.S., Baranov A.V., Alaskhanov A.Kh., Svintsov A.P. Durability behaviors of foam concrete made of binder composites // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Is. 8(100). 10003. DOI: 10.18720/MCE.100.3.

10. Сычев М.М. Твердение вяжущих веществ. Л.: Стройиздат, 1974. 80 с.

11. Jones M.R., Ozlutas K., Zheng L. Stability and instability of foamed concrete // *Magazine of Concrete Research*. 2015. Vol. 68. №11. Pp. 1–8. DOI:10.1680/macr.15.00097.

12. Zhao J., Deng Y., Gao P., Lu X., Zhang J., Zong J. Pore Structure, Morphology, and Strength of Self-Compacting Foam Material Backfilled Behind the Underground Pipe-Wall of Yellow River // *Materials*. 2020. Vol. 13. №24. 5724. DOI:10.3390/ma13245724.

13. Nie Z., Lin Y., Tong Q. Modeling structures of open cell foams // *Computational Materials Science*. 2017. Vol. 131. Pp.1–30. DOI: 10.1016/j.comatsci.2017.01.029.

14. Kudryavtsev P.G. Structure of pores in solid porous bodies. Part I. *Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2018. Vol. 10. № 5. Pp. 80–103 DOI: 10.15828/2075-8545-2018-10-5-80-103. (rus).

15. Kubala P. Random sequential adsorption of Platonic and Archimedean solids // *Physical Review E*. 2019. Vol. 100. №4. 042903. DOI:10.1103/PhysRevE.100.042903.

16. Skibinski J., Cwieka K., Wejrzanowski T., Kurzydowski K. Design of Mechanical Properties of Open-Cell Porous Materials Based on μ CT Study of Commercial Foams // *MATEC Web of Conferences*.

2015. Vol. 30. 03005. DOI: 10.1051/mateconf/20153003005.

17. Jin Y., Yoshino H. A jamming plane of sphere packings // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2021. Vol. 118. №14. Pp. 1–8. DOI:10.1073/pnas.2021794118.

18. Cao J., Xu R., Zhang N., Zhang L., Ji X. Characterization of Pore Structure of Microbial Foam Concrete and Its Influence on Properties // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2021. Vol.14. №3. Pp. 158–166. DOI:10.25103/jestr.143.18.

19. Chung S-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches // Applied Sciences. 2017. Vol. 7. №6. 550. DOI:10.3390/app7060550.

20. Drenckhan W., Hutzler S. Structure and energy of liquid foams // Advances in Colloid and Interface Science. 2015. Vol. 224. Pp.1–16. DOI:10.1016/j.cis.2015.05.004.

21. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона. М.: Стройиздат, 1979. 144 с

22. Yazici S., Mardani-Aghabaglou A. Effect aggregate grain size distribution on properties of permeable of concrete // Journal of Fundamental and

Applied. 2017. Vol. 9. №1. Pp. 323–338. DOI: 10.4314/jfas.v9i1.20.

23. Винокурова О.В., Баранова А.А. Влияние пен различной кратности на формирование структуры теплоизоляционного пенобетона // Вестник МГСУ. 2022. Том. 17. №1. С. 50–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59.

24. Винокурова О.В., Баранова А.А. О целесообразности использования пластификаторов в производстве теплоизоляционных пенобетонных // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Том 11. №3. С. 432–439. DOI:10.21285/2227-2917-2021-3-432-439.

25. Стольников В.В. Воздухововлекающие добавки в гидротехническом бетоне. Л.: Госэнергоиздат, 1953. 168 с.

26. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1975. 264 с.

27. Sloane N.J.A. The packing of spheres // Scientific American. 1984. Vol. 250. №1. Pp. 116–125. DOI:10.1038/scientificamerican0184-116.

28. Белов В.В., Образцов И.В., Иванов В.К., Коноплев Е.Н. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2015. 108 с.

Информация об авторах

Винокурова Ольга Владимировна, ведущий специалист сектора испытаний общестроительных материалов, отдел испытаний материалов и конструкций. E-mail: neutrino.78@mail.ru. ОАО «Ангарское управление строительства» (ОАО «АУС»). Россия, 665832, Иркутская область, г. Ангарск, микрорайон 7А, дом 35.

Баранова Альбина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство». E-mail: baranova2012aa@mail.ru. Ангарский государственный технический университет (АнГТУ). Россия, 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, д. 60.

Поступила 15.06.2022 г.

© Винокурова О.В., Баранова А.А., 2022

***Vinokurova O.V., Baranova A.A.**

Angarsk State Technical University

*E-mail: neutrino.78@mail.ru

ON THE QUESTION OF CHOOSING THE OPTIMAL WATER-CEMENT RATIO IN THE PRODUCTION OF THERMAL INSULATING FOAM CONCRETE

Abstract. The article considers the influence of the water-cement ratio on the formation of the structure of thermally insulating foam concrete, having the D300 average density grade. The basis for the analysis is the contradiction between the experimentally obtained direct dependence of the strength of foam concrete on the water-cement ratio and the practice of improving the structure of the material due to water reduction. The computation of the optimal amount of water in the foam concrete mixture based on the method of absolute volumes is presented. The calculation includes a formula for determining the volume of the inter-pore space depending on the thickness of the inter-pore partition, the cell diameter and the type of packing. The actual indicators collected during the experiment confirm the results of the calculations. The influence of the amount of water in the foam concrete mixture on the quality of the foam concrete is evaluated by the compressive strength and the macrostructure character of the material. The strength is determined by the destructive

method. The structure is studied using an optical microscope in combination with image processing software. The greatest strength is possessed by a material with a partition thickness exceeding the maximum size of the cement grain, provided that the volume of the interpore space and the sum of the absolute volumes of the components of the foam concrete mixture are equal. A structure with closed pores and dense interpore partitions is observed in foam concrete on a protein foam former with a water-cement ratio, taking into account water in the foam, equal to 0.7.

Keywords: water-cement ratio, macrostructure, pore diameter, designing the composition, thermal insulating foam concrete.

REFERENCES

1. Zhao W., Huang J., Su Q., Liu T. Models for Strength Prediction of High-Porosity Cast-In-Situ Foamed Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. No.2. Pp.1–10. DOI:10.1155/2018/3897348
2. Decký M., Drusa M., Zgútová K., Blaško M., Hájek M., and Scherfel W. Foam concrete as new material in road constructions. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 161. Pp. 428–433. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.585
3. Fu Y., Wang X., Wang L., Li Y. Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–25. DOI: 10.1155/2020/6153602
4. Liu Z., Zhao K., Hu C., Tang Y. Effect of water-cement ratio on pore structure and strength of foam concrete. *Advances in materials science and engineering*. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–9. DOI: 10.1155/2016/9520294
5. Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Utepov Ye.B., Bazarbayev D.O., Tsygulyov D.V., Yenkebayev S.B., Shakhmov Zh.A. Homogeneous pore distribution in foam concrete by two-stage foaming // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Is. 103(3). 10313. DOI: 10.34910/MCE.103.13
6. Steshenko A.B., Kudyakov A.I. Foam concrete with plasticizing and micro-reinforcing additives. "ALITinform" International Analytical Review. 2018. No. 3(52). Pp. 26–40.
7. Vu K.D., Bazhenova S.I. Modeling the influence of input factors on foam concrete properties. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Is. 103(3). 10311. DOI: 10.34910/MCE.103.11
8. Abd Elrahman M., El Madawy M.E., Chung S.-Y., Sikora P., Stephan D. Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. No.7. 1447. DOI:10.3390/app9071447
9. Lesovik V.S., Glagolev E.S., Voronov V.V., Zagorodnyuk L.Kh., Fediuk R.S., Barano, A.V., Alaskhanov A.Kh., Svintsov A.P. Durability behaviors of foam concrete made of binder composites. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Is. 8(100). P. 10003. DOI: 10.18720/MCE.100.3.
10. Sizov V.P. Design of heavy concrete compositions. [Proektirovanie sostavov tyazhelogo betona]. M.: Strojizdat, 1979. 144 p. (rus).
11. Jones M.R., Ozlutas K., Zheng L. Stability and instability of foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2015. Vol. 68. No.11. Pp.1–8. DOI:10.1680/mac.15.00097.
12. Zhao J., Deng Y., Gao P., Lu X., Zhang J., Zong J. Pore Structure, Morphology, and Strength of Self-Compacting Foam Material Backfilled Behind the Underground Pipe-Wall of Yellow River. *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 24. P. 5724. DOI:10.3390/ma13245724
13. Nie Z., Lin Y., Tong Q. Modeling structures of open cell foams. *Computational Materials Science*. 2017. Vol. 131. Pp.1–30. DOI: 10.1016/j.comatsci. 2017.01.029.
14. Kudryavtsev P.G. Structure of pores in solid porous bodies [Struktura por v tverdyh poristyh telah]. Part I. Nanotehnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2018. Vol. 10. No. 5. Pp. 80–103 DOI:10.15828/2075-8545-2018-10-5-80-103. (rus).
15. Kubala P. Random sequential adsorption of Platonic and Archimedean solids. *Physical Review E*. 2019. Vol. 100. No. 4. 042903. DOI:10.1103/PhysRevE.100.042903.
16. Skibinski J., Cwieka K., Wejrzanowski T., Kurzydowski K. Design of Mechanical Properties of Open-Cell Porous Materials Based on μ CT Study of Commercial Foams. *MATEC Web of Conferences*. 2015. Vol. 30. 03005. DOI: 10.1051/mateconf/20153003005
17. Jin Y., Yoshino H. A jamming plane of sphere packings. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2021. Vol. 118. No. 14. Pp. 1–8. DOI:10.1073/pnas.2021794118
18. Cao J., Xu R., Zhang N., Zhang L., Ji X. Characterization of Pore Structure of Microbial Foam Concrete and Its Influence on Properties. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2021. Vol. 14. No. 3. Pp. 158–166. DOI:10.25103/jestr.143.18
19. Chung S.-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evalu-

ated using micro-CT images and numerical approaches. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7. No. 6. 550. DOI:10.3390/app7060550.

20. Drenckhan W., Hutzler S. Structure and energy of liquid foams. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2015. Vol. 224. Pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.cis.2015.05.004

21. Sizov V.P. Design of heavy concrete compositions. [Proektirovanie sostavov tyazhelogo betona]. M.: Strojizdat, 1979. 144 p. (rus).

22. Yazici S., Mardani-Aghabaglou A. Effect aggregate grain size distribution on properties of permeable of concrete. *Journal of Fundamental and Applied*. 2017. Vol. 9. No. 1. Pp. 323–338. DOI: 10.4314/jfas.v9i1.20

23. Vinokurova O.V., Baranova A.A. The influence of foams, having different expansion ratios, on the structurization of thermal insulation foam concrete [Vliyanie pen razlichnoj kratnosti na formirovanie struktury teploizolyacionnogo penobetona]. *Vestnik MGSU*. 2022. Vol. 17. No 1. Pp. 50–59. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.50-59 (rus).

24. Vinokurova O.V., Baranova A.A. Feasibility of using plasticizers for producing thermal insulation foam concrete [O tselesoobraznosti

ispol'zovaniya plastifikatorov v proizvodstve teploizolyatsionnogo penobetona.]. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate [Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost']*. 2021. Vol. 11. No 3. Pp. 432–439. DOI: 10.21285/2227-2917-2021-3-432-439. (rus).

25. Stol'nikov V.V. Air-entraining additives in hydrotechnical concrete. [Vozduhovovlekayushchie dobavki v gidrotekhnicheskom betone]. Leningrad.: Gosenergoizdat, 1953. 168 p. (rus).

26. Tihomirov V.K. Foam. Theory and practice of their production and destruction [Peny. Teoriya i praktika ih polucheniya i razrusheniya]. M.: Himiya, 1975. 264 p. (rus).

27. Sloane N.J.A. The packing of spheres. *Scientific American*. 1984. Vol. 250. No. 1. Pp. 116–125. DOI:10.1038/scientificamerican0184-116.

28. Belov V.V., Obratsov I.V., Ivanov V.K., Konoplev E.N. Computer implementation of the solution of scientific, technical and educational problems: a tutorial [Komp'yuternaya realizaciya resheniya nauchno-tekhnicheskikh i obrazovatel'nyh zadach: uchebnoe posobie.]. Tver: TvGTU. 2015. 108 p. (rus).

Information about the authors

Vinokurova, Olga V. Leading specialist in the testing sector of general construction materials, Materials and Structures Testing Department. E-mail: neutrino.78@mail.ru. Angarsk Management of Construction, JSC. Russia, 665835, Angarsk, microdistrict. 7A, Bld. 35.

Baranova, Albina A. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Industrial and Civil Engineering". E-mail: baranova2012aa@mail.ru. Angarsk State Technical University (ASTU). Russia, 665835, Angarsk, Tchaikovsky str. 60.

Received 15.06.2022

Для цитирования:

Винокурова О.В., Баранова А.А. К вопросу выбора оптимального водоцементного отношения при производстве теплоизоляционного пенобетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 19–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-19-29

For citation:

Vinokurova O.V., Baranova A.A. On the question of choosing the optimal water-cement ratio in the production of thermal insulating foam concrete. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 11. Pp. 19–29. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-11-19-29