



Исследование степени однородности пенобетона, изготовленного методом двухстадийного введения пены

^{1*}ЛУКПАНОВ Рауан Ермагамбетович, PhD, профессор, директор, rauan_82@mail.ru,

¹ДЮСЕМБИНОВ Думан Серикович, к.т.н., доцент, dussembinov.duman@mail.ru,

¹ЕНКЕБАЕВ Серик Бейсенгалиевич, PhD, доцент, главный специалист, Yenkebayev-serik@mail.ru,

¹ЦЫГУЛЕВ Денис Владимирович, к.т.н., доцент, denis_riza_72@mail.ru,

¹НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», Казахстан, Астана, ул. Сатпаева, 2,

*автор-корреспондент.

Аннотация. В статье представлен метод производства пенобетона, который предполагает двухстадийное введение пены (ДВП). Предлагаемый метод предполагает улучшение поровой структуры пенобетона, за счет более равномерного распределения пор по всему объему материала. Сравнение качественных показателей полученного материала выполнено по отношению к образцам, изготовленным классическим методом (КМ) и сухой минерализацией пены (СМ). Лабораторные испытания проведены для трех типов образцов, представлены точечным определением прочностных характеристик малых образцов по всему объему пенобетонного блока. Размеры блока составляют: высота – 20 см, ширина – 30 см, длина – 60 см. Полученные результаты испытаний малых кубовидных образцов дали нам косвенное представление о степени однородности материалов трех сравниваемых методов производства. Полученные результаты сравнений показали, что образцы ДВП имеют более равномерное распределение поровой структуры пенобетона относительно образцов КМ и СМ.

Ключевые слова: пенобетон, цемент, песок, пеноконцентрат, прочность, структура, поры, лабораторные испытания, строительные материалы, технология производства.

Введение

Предлагаемый метод производства неавтоклавно-пенобетона предполагает двухстадий-

ное введение пены (ДВП): первичное введение низкоконцентрированного раствора пены происходит на стадии приготовления песчано-цемент-

ного раствора, последующее введение высоконцентрированного раствора пены происходит на стадии изготовления структуры ячеистого бетона. Двухстадийное введение пены позволяет получить продукт с большей степенью однородности, а снижение водоцементного отношения сокращает сроки схватывания, чем обеспечивает улучшение прочностных показателей и также является дополнительным фактором для получения однородной структуры материала.

Классически ячеистый бетон подразделяется на газобетон и пенобетон [1]. Основной отличительной чертой данных материалов является поровая структура. Газобетон производят путем введения газообразующих компонентов, которые в процессе химической реакции с цементным вяжущим образуют газовыделение, что способствует образованию сообщающихся между собой пор [2]. Пенобетон же производят путем введения готовой пены в цементно-песчаную смесь, что позволяет получить замкнутую поровую систему. Одним из часто встречающихся вопросов производителей пенобетона является неустойчивость структуры пенобетонного раствора, усадка, неравномерная плотность материала и как следствие нестабильная прочность и теплопроводность изделия. Причиной данного недостатка может служить множество факторов, основным из которых является высокое водоцементное отношение, что в конечном итоге приводит к неоднородности материала при его схватывании [3].

Прорывным решением в устранении проблемы неоднородности пенобетона стала модернизация технологического процесса его производства. Вместо классического метода (КМ) производства пенобетона [4], представляющего собой перемешивание цементно-песчаного раствора с водой и пеноконцентратом, была предложена технология производства пенобетона методом сухой минерализации (СМ) пены. Метод сухой минерализации представляет собой приготовление пенобетона механическим перемешиванием сухой цементно-песчаной смеси с пеной. В результате применения данной технологии был решен ряд вопросов, касательно качества поровой структуры и плотности, однако проблема усадки материала в процессе схватывания осталась нерешенной. Несмотря на это, классический метод производства продолжают активно использовать с применением разного рода добавок [5].

Нераскрытый вопрос получения качественно пенобетона определил **цель исследовательской работы** – разработка доступной технологии по производству пенобетона, технический результат которой направлен на улучшение поровой структуры материала за счет равномерного распределения пор, а также увеличение прочностных характеристик материала за счет снижения водоцементного отношения и равномерно распределенной структуры несущего скелета.

Для решения были поставлены **следующие**

задачи:

- Исследовать особенности формирования структуры пенобетона при применении различных методов его производства.
- Внести изменения в технологический процесс производства пенобетона, позволяющие получить материал с равномерно распределенной структурой несущего скелета (следовательно, равномерно распределённых строительных свойств).
- Произвести сравнительный анализ методов путем лабораторных испытаний строительных свойств пенобетона (прочность и теплопроводность).

В статье приводятся результаты сравнительного анализа методов производства пенобетона, а именно влияние технологического процесса приготовления материала на его качество, без оценки возможного влияния ингредиентов (добавок для улучшения физико-механических и строительных свойств материалов).

Для сравнения с предлагаемым методом были взяты два основных метода производства пенобетона, имеющих широкое практическое применение:

Метод 1: классический метод, КМ;

Метод 2: метод сухой минерализации, СМ;

Метод 3: предлагаемый метод двухстадийного введения пены, ДВП.

Методы

Методология исследования включает в себя следующие этапы:

- Подготовка пенобетона сравниваемыми методами;
- Подготовка пенобетона предлагаемым методом двухстадийного введения пены;
- Лабораторные испытания образцов пенобетона;
- Анализ результатов.

Лабораторные исследования и испытания проведены в условиях стандартной методики, технических условий и требований нормативно-технической документации [6, 7]. Важным условием было выдержать одинаковый состав компонентов и ингредиентов (добавок) опытных образцов для каждого метода, а также их размерность. Для каждого из 3 методов (включая предлагаемый) было подготовлено по 5 блоков.

Технологический процесс приготовления образцов методом двухстадийного введения пены представлен на рисунке 1.

Технологический процесс состоит из трех стадий. При производстве необходимо соблюдать строгую последовательность совмещения компонентов (рисунок 1):

Стадия 1: в емкости (А) пеноконцентрат (1) тщательно перемешивается с водой (2), в соотношении к воде – 0,3:40 л; параллельно (независимо) в емкости (Б) пеноконцентрат (1) тщательно перемешивается с водой (2), в соотношении к воде – 1,2:40 л; параллельно в емкости (В) цемент (3)

перемешивается с песком (4), в соотношении цемента к песку 1:3.

Стадия 2: получаемый в емкости (А) раствор посредством пеногенератора (В) преобразуется в пену и совмещается с цементно-песчаной смесью из емкости (Г), в растворосмесителе (Д).

Стадия 3: получаемый в емкости (Б) раствор посредством пеногенератора (В) преобразуется в пену и вводится в растворосмеситель (Д).

Для точечной оценки прочности цельного образца заводского размера (высота – 20 см, ширина – 30 см, длина – 60 см) проведены испытания малых кубовидных образцов, размерностью: 2х2х2 см, отобранных непрерывно по высоте и выборочно по длине и ширине образца (рисунок 2).

Резка цилиндрических и стандартных образцов осуществлялась струнной резкой на максимальных оборотах, для снижения риска нарушения структуры материала. Перед испытаниями каждый элемент образца был промаркирован.

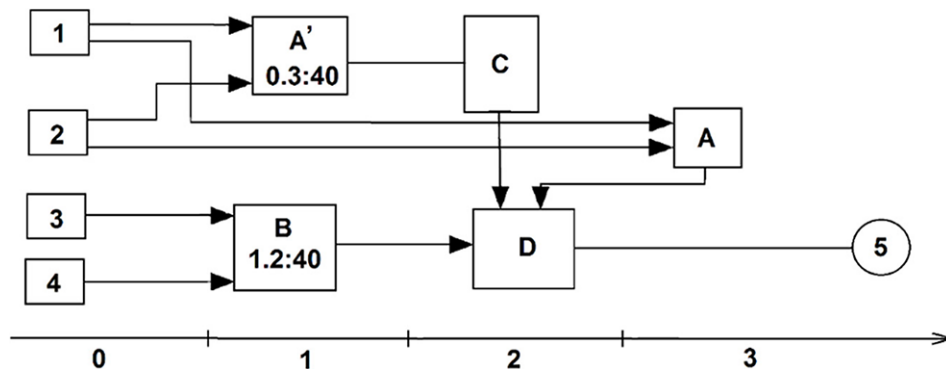
Испытания прочности малых образцов проведены на специализированном оборудовании DMA (рисунок 3). Прибор предназначен для исследования свойств материалов при воздействии нагрузок сжатия, изгиба, сдвига и растяжения.

Результаты и обсуждения

Результаты определения прочности малых кубовидных образцов материала на приборе Dynamic Mechanical Analysis.

Согласно результатам испытаний, частные значения прочности образцов КМ варьируются от 10 кгс/см² (0,98 МПа) до 92 кгс/см² (9,60 МПа), образцов СМ от 27 кгс/см² (2,65 МПа) до 62 кгс/см² (6,10 МПа), ДВП 38 кгс/см² (3,72 МПа) до 54 кгс/см² (5,29 МПа). Согласно исследованиям, прочностные характеристики образцов пенобетона схожего состава в среднем составили 50 кгс/см², что не противоречит полученным результатам и соответствует среднему значению диапазона КМ, верхнему значению прочности диапазона СМ и ДВП.

Для визуального сравнения точечные результаты прочности представлены в виде цветового распределения по 6 значимым сечениям (с двух противоположных краев и по середине блока в поперечном и продольном направлении). На рисунке 4 показаны сравнения прочности в плоскостях С1 (по осям 1 – А÷О, рисунок 2) и L1 (по осям А – 1÷30, рисунок 2). На рисунке 5, в плоскостях С2 (по осям 16 – А÷О, рисунок 2) и L2 (по осям Н –



1 – вода; 2 – пеноконцентрат; 3 – цемент; 4 – песок; 5 – готовый продукт;
А' – емкость для низкоконцентрированного раствора пластифицирующей добавки пеноконцентрата в воде 0,3:40 л, В – цементно-песчаный смеситель, С – пеногенератор, Д – растворосмеситель
Рисунок 1 – Технология приготовления пенобетона методом двухстадийного введения пены

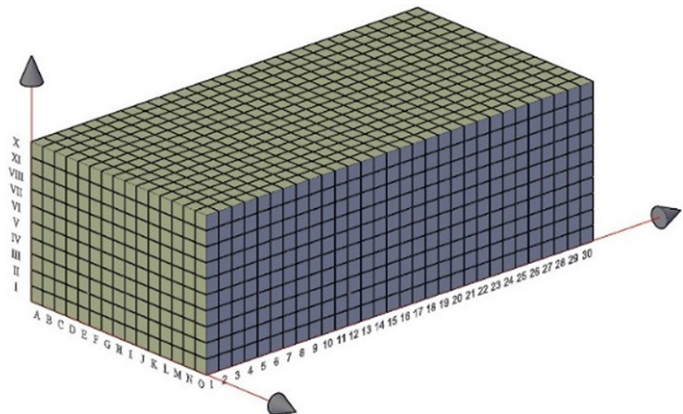
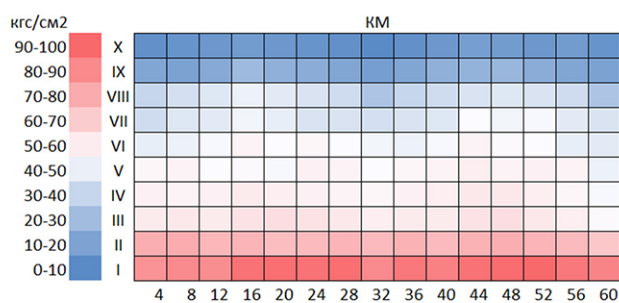
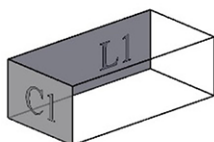


Рисунок 2 – Образцы для определения прочностных свойств пенобетона



Рисунок 3 – Лабораторные испытания образцов пенобетона

Расположения плоскостей

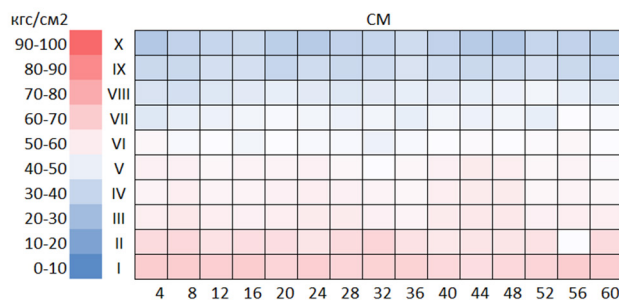
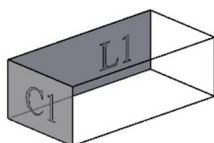


Сечение L1

Сечение C1

А – Классический метод

Расположения плоскостей

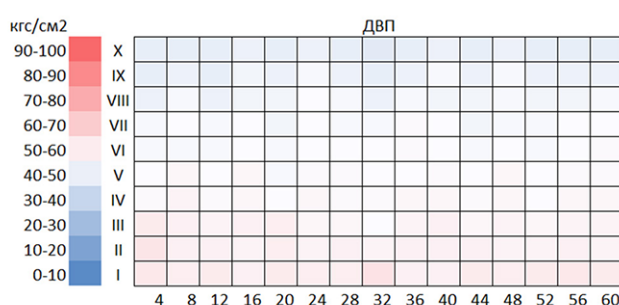
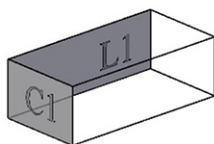


Сечение L1

Сечение C1

В – Метод сухой минерализации пены

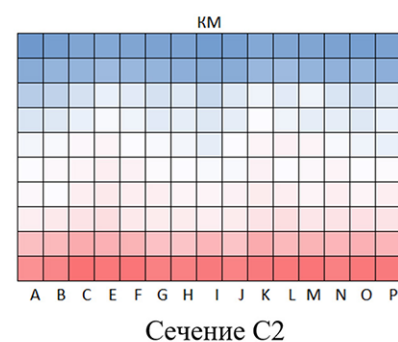
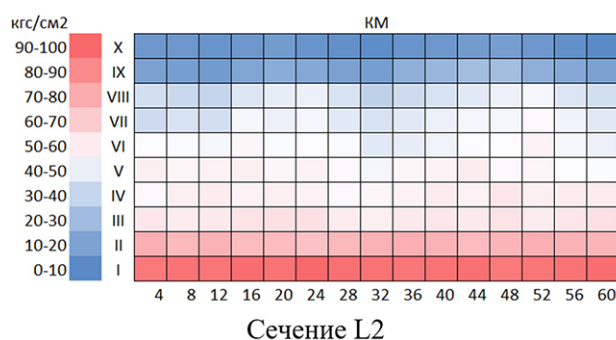
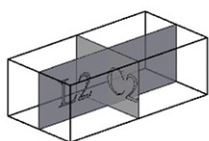
Расположения плоскостей



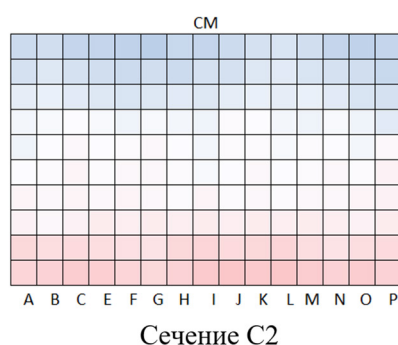
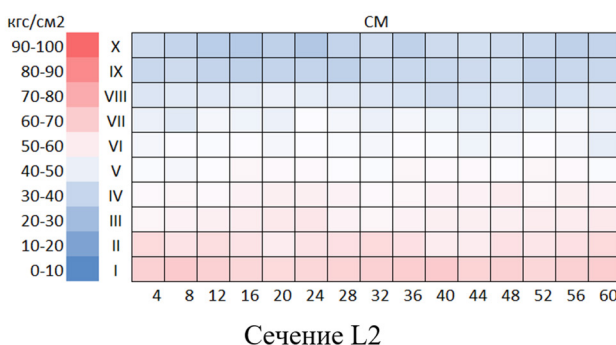
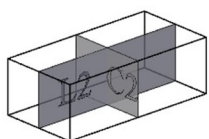
Сечение L1

Сечение C1

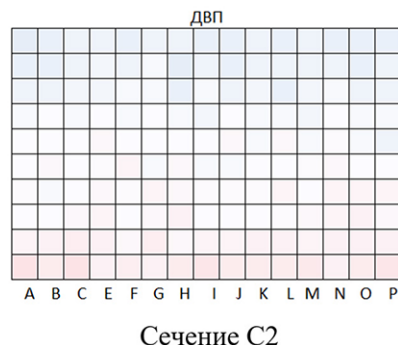
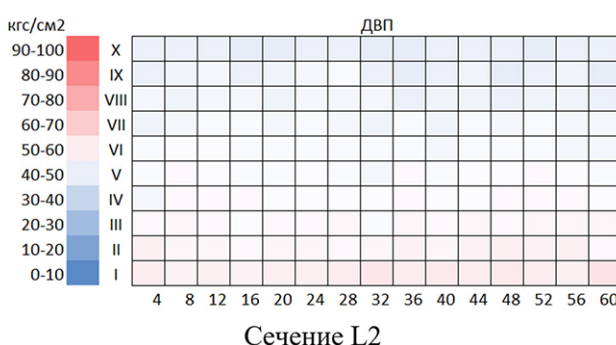
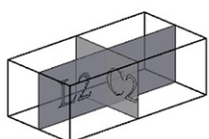
С – Метод двухстадийного введения пены

Расположения
плоскостей

А – Классический метод

Расположения
плоскостей

В – Метод сухой минерализации пены

Расположения
плоскостей

С – Метод двухстадийного введения пены

Рисунок 5 – Диаграмма распределения прочности в сечениях блока C2 и L2

1÷30, рисунок 2). На рисунке 6, в плоскостях СЗ (по осям 30 – А÷О, рисунок 2) и LЗ (по осям О – 1÷30, рисунок 2). Для лучшей сравнительной оценки каждого индивидуального фрагмента (отдельной плоскости) приведена единая цветовая шкала прочностных характеристик, присущая наиболее неоднородному образцу (методу). Таким образом, контраст шкалы и рассматриваемых плоскостей будет способствовать лучшему визуальному восприятию неоднородности рассматриваемой плоскости относительно наиболее неоднородного образца (метода).

Разница контрастов цветовых диаграмм распределения прочности по поперечным и продольным сечениям наглядно показывает отличие однородности распределения частных значений прочностных характеристик сравниваемых методов производства пенобетона. Наибольший контраст наблюдается у блоков КМ (по всем се-

чениям), что свидетельствует о большом разбросе частных значений прочности, следовательно, о наименьшей однородности материала. Наибольшая однородность наблюдается у блоков ДВП, о чем свидетельствует наименьший цветовой контраст по высоте сечения. Средняя степень однородности наблюдается у блока СМ.

Среднее значение минимальной прочности образцов КМ (всех верхних образцов) составляет 13,25 кгс/см² (1,30 МПа), а среднее значение максимальной прочности (всех нижних образцов) составляет 87,9 кгс/см² (8,62 МПа). При этом квадратичное отклонение частных значений верхних образцов составляет 0,25, а нижних 2,09. Коэффициент вариации, или отклонения частных значений не превышают 1,86% от среднего значения для верхних образцов (верхней плоскости блока) и 2,34% – для нижних (нижней плоскости блока), что свидетельствует о тесной связи частных зна-

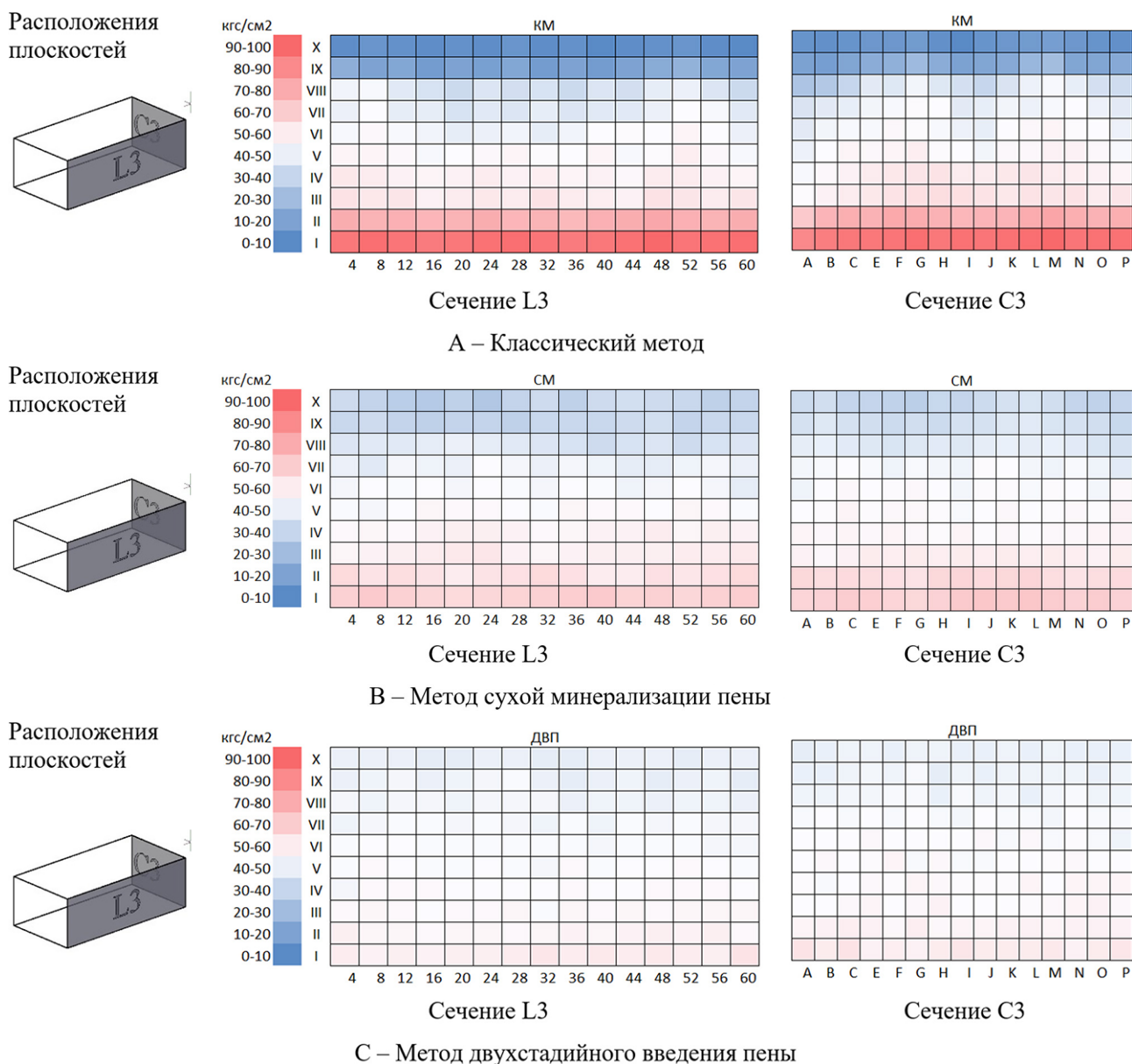


Рисунок 6 – Диаграмма распределения прочности в сечениях блока C3 и L3

чений прочности всех образцов в пределах плоскости рассматриваемой высоты (горизонтальной плоскости). Статистический анализ частных значений прочности и среднеквадратичных отклонений образцов СМ также показал тесную связь частных значений прочности в пределах рассматриваемых плоскостей по высоте. Для нижней плоскости предел отклонений (коэффициент вариации) составляет 1,45%, для верхней – 1,68%. В случае метода ДВП предел отклонений для нижней плоскости составляет 0,59%, для верхней – 2,05%.

Данный анализ позволил дать оценку разброса данных прочностных характеристик в пределах двух критических плоскостей образца (верхняя и нижняя плоскость блока пенобетона) с минимальными и максимальными частными значениями прочности. Анализ показал тесную связь частных значений в пределах плоскости их расположения,

исключая допущение случайных ошибок (поскольку количество частных значений в пределах одной плоскости составляет 225 единиц), тем самым подтверждая предположение о неоднородности материала в поперечной плоскости (по его высоте) и относительно хорошей однородности в горизонтальной плоскости.

Количественную оценку неоднородности материала по высоте может дать статистическая обработка частных значений прочности в поперечных плоскостях, перпендикулярных к горизонтальной плоскости.

Среднее значение прочности поперечной плоскости образцов КМ составляет 43,67 кгс/см² (4,28 МПа), а среднее значение квадратичных отклонений (по высоте) составляет 21,11. Следовательно, отклонения частных (коэффициент вариации) значений прочности от среднеарифметических достигают 48,35%, что свидетельствует о слабой

связи частных значений прочности в пределах поперечных плоскостей (значений по высоте образца), а также неоднородности материала по высоте. Статистический анализ частных значений прочности и среднеквадратичных отклонений образцов СМ показал более тесную связь частных значений прочности в поперечных плоскостях по сравнению с КМ. При среднем значении прочности, равном $44,54 \text{ кгс/см}^2$ ($4,37 \text{ МПа}$), среднеквадратичное отклонение составило $8,56$, а отклонения частных значений (коэффициент вариации) прочности в пределах $19,21\%$. Самая тесная связь частных значений прочности выявлена у образцов ДВП, где среднее значение прочности составило $43,42 \text{ кгс/см}^2$ ($4,25 \text{ МПа}$). При среднеквадратичном отклонении $2,91$, отклонения частных значений прочности в пределах $6,71\%$. Статистический анализ частных значений прочности в поперечных плоскостях подтверждает очевидную неоднородность образцов КМ, относительно СМ и ДВП.

Результаты испытаний (точечного распределения прочности материала) в целом соответствуют результатам испытаний прочности цилиндрических образцов, подтверждая общую тенденцию распределения прочности по высоте каждого из 3 методов, однако, в отличие, дают более точные численные значения прочности по всему объему

образца.

Выводы

- Результирующим фактором качества пенобетона, при одинаковом качественном составе компонентов и ингредиентов, служит технологический процесс его производства. Оценка однородности образцов пенобетона, приготовленных тремя разными методами, проведена сравнением равномерности распределения строительных свойств по всему объему материала.

- Испытания малых образцов на прочность показали, что общий разброс частных значений прочности по всему объему блока КМ составил от 10 до 92 кгс/см^2 , блока СМ от 27 до 62 кгс/см^2 , ДВП 38 до 54 кгс/см^2 .

- В целом результаты исследования подтвердили влияние технологического процесса производства пенобетона на его качество. Предложенная технология производства позволяет равномерно распределить строительные свойства материала (прочность и теплопроводность) по его объему, что может являться косвенным подтверждением равномерного распределения поровой структуры скелета, а следовательно, улучшения качества материала как строительного продукта.

Благодарность: Настоящие исследования были выполнены за счет финансирования Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования РК (грантового проекта №AP13068424).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25485-2019 Бетоны ячеистые. Общие технические требования.
2. Hamad A.J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: review // International journal of materials science and engineering. – 2014. – V. 2. – No. 2. – Pp. 152-157.
3. Raj A., Sathyan D., Mini K.M. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review // Construction and Building Materials. – 2019. – V. 221. – Pp. 787-799.
4. Chica L., Alzate A. Cellular concrete review: New trends for application in construction // Construction and Building Materials. – 2019. – V. 200. – Pp. 637-647.
5. Bartenjeva E., Mashkin N. Technological parameters influence on the non-autoclaved foam concrete characteristics // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2017. – V. 1800. – No. 1. – P. 020012.
6. Енкебаева А.С., Лукпанов Р.Е., Енкебаев С.Б., Цыгулев Д.В. Модельные испытания насыпи золошлакоотвала для оценки влияния геосинтетических материалов армирования на общую устойчивость // Научный журнал Труды университета / КарТУ. № 2 (87). 2022. ISSN 1609-1825 (print), ISSN 2710-3382 (online). – 2022. – С. 162-169.
7. Енкебаева А.С., Лукпанов Р.Е., Енкебаев С.Б., Цыгулев Д.В. Оценка устойчивости насыпи золошлакоотвала с использованием геосинтетических материалов армирования // Там же. № 3 (88). 2022. ISSN 1609-1825 (print), ISSN 2710-3382 (online). – 2022. С. 173-180.

Екі сатылы көбік енгізу әдісімен дайындалған көбік бетонының біркелкілік дәрежесін зерттеу

^{1*}ЛУКПАНОВ Рауан Ермагамбетович, PhD, профессор, директор, rauan_82@mail.ru,

¹ДЮСЕМБИНОВ Думан Серикович, т.ғ.к., доцент, dussembinov.duman@mail.ru,

¹ЕНКЕБАЕВ Серик Бейсенғалиевич, PhD, доцент, бас маман, Yenkebayev-serik@mail.ru,

¹ЦЫГУЛЕВ Денис Владимирович, т.ғ.к., доцент, denis_riza_72@mail.ru,

¹«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Астана, Сәтпаев көшесі, 2,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Мақалада көбік бетонын өндіру әдісі ұсынылған, ол екі сатылы көбік (талшықты) енгізуді қамтиды. Ұсынылған әдіс материалдың бүкіл көлеміне кеуектердің біркелкі таралуына байланысты көбік бетоны-

ның кеуек құрылымын жақсартуды қамтиды. Алынған материалдың сапалық көрсеткіштерін салыстыру классикалық әдіспен (КМ) және көбіктің құрғақ минералдануымен (СМ) жасалған үлгілерге қатысты орындалды. Зертханалық сынақтар үлгілердің үш түрі үшін жүргізілді, көбік бетон блогының бүкіл көлемі бойынша шағын үлгілердің беріктік сипаттамаларын нүктелі анықтаумен ұсынылды. Блоктың өлшемдері: биіктігі – 20 см, ені – 30 см, ұзындығы – 60 см. Кішкентай кубонды үлгілерді сынау нәтижелері бізге салыстырылатын үш өндіріс әдісінің материалдарының біркелкілік дәрежесі туралы жанама түсінік берді. Салыстырудың нәтижелері талшықты үлгілердің КМ және СМ үлгілеріне қатысты көбік бетонының кеуек құрылымының біркелкі таралуына ие екенін көрсетті.

Кілт сөздер: пенобетон, цемент, құм, пеноконцентрат, беріктік, құрылым, тесіктер, зертханалық зерттеулер, құрылыс материалдары, технология.

Study of the Degree of Homogeneity of Foam Concrete Produced by Two-stage Introduction of Foam

¹***LUKPANOV Rauan**, PhD, Professor, Director, rauan_82@mail.ru,

¹**DYUSSEMBINOV Duman**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, dussembinov.duman@mail.ru,

¹**YENKEBAYEV Serik**, PhD, Associate Professor, Chief Specialist, Yenkebayev-serik@mail.ru,

¹**TSYGULYEV Denis**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, denis_riza_72@mail.ru,

¹NPJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Kazakhstan, Astana, Satpayev Street, 2,

*corresponding author.

Abstract. The article presents a method of foam concrete production, which involves a two-stage introduction of foam (DWP). The proposed method involves improving the pore structure of foam concrete, due to a more uniform distribution of pores throughout the volume of the material. A comparison of the qualitative indicators of the obtained material was carried out in relation to the samples made by the classical method (CM) and dry foam mineralization (SM). Laboratory tests were carried out for three types of samples, represented by point determination of strength characteristics of small samples throughout the volume of foam concrete block. Block dimensions are: height – 20 cm, width – 30 cm, length – 60 cm. The obtained results of tests of small cube-shaped specimens gave us an indirect idea of the degree of homogeneity of the materials of the three compared production methods. The obtained results of the comparisons, showed that the fiberboard samples have a more uniform distribution of the pore structure of foam concrete relative to the samples of KM and SM.

Keywords: foam concrete, cement, sand, foam concentrate, strength, structure, pores, laboratory tests, building materials, production technology.

REFERENCES

1. GOST 25485-2019 [Jachiyestiy beton. Obshkiye tehicheskiye trbovaniya]. Cellular Concretes. General technical requirements. обаяния.
2. Hamad A.J. Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: review // International journal of materials science and engineering. – 2014. – V. 2. – No. 2. – Pp. 152-157.
3. Raj A., Sathyan D., Mini K.M. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review // Construction and Building Materials. – 2019. – V. 221. – Pp. 787-799.
4. Chica L., Alzate A. Cellular concrete review: New trends for application in construction // Construction and Building Materials. – 2019. – V. 200. – Pp. 637-647.
5. Bartenjeva E., Mashkin N. Technological parameters influence on the non-autoclaved foam concrete characteristics // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2017. – V. 1800. – No. 1. – P. 020012.
6. Yenkebayeva A.S., Lukpanov R.E., Yenkebayev S.B., Tsygulyov D.V. Model tests of ash-storage embankment to assess the impact of geosynthetic reinforcement materials on overall stability // Scientific journal Proceedings of KarTU University. No. 2 (87). 2022. ISSN 1609-1825 (print), ISSN 2710-3382 (online). – 2022. Pp. 162-169.
7. Yenkebayeva A.S., Lukpanov R.E., Yenkebayev S.B., Tsygulyov D.V. Evaluation of stability of ash-storage embankment using geosynthetic reinforcement materials // Ibid. No. 3 (88). 2022. ISSN 1609-1825 (print), ISSN 2710-3382 (online). – 2022. Pp. 173-180.