

# ОЦЕНКА ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ В САМОУПЛОТНЯЮЩЕМСЯ БЕТОНЕ, ПОДВЕРЖЕННОМУ ЦИКЛИЧЕСКОМУ ЗАМОРАЖИВАНИЮ И ОТТАИВАНИЮ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА

© 2022 г. Абдулкадер Эль-Мир<sup>1,\*</sup>, Самер Эль-Захаб<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup> Баламандский университет, Триполи 1400, Ливан  
E-mail: \*abdulkader.elmir@fty.balamand.edu.lb; \*\*samer.elzahab@hotmail.com

Поступила в редакцию 30.11.2021; после доработки 14.01.2022

Принята к публикации 21.01.2022

Разработка и использование самоуплотняющихся бетонов (СУБ) значительно расширились за последнее десятилетие. Данная работа направлена на оценку влияния использования воздухововлекающих добавок (ВВД) на предел прочности при сжатии СУБ, подвергнутых циклам замораживания—оттаивания (З—О). Для сравнения были приготовлены шесть смесей с фиксированным содержанием порошка 580 кг/м<sup>3</sup>, которые были разделены на две категории: немодифицированные и воздухововлекающие смеси СУБ. Для каждой категории водоцементное отношение (в/ц) варьировалось в пределах 0,45, 0,5 и 0,56. Соответствующие измерения предела прочности при сжатии и скорости ультразвука (СУЗ) были проведены на образцах до и после 400 циклов З—О. Результаты испытаний показали, что ВВД увеличивает параметры СУБ, особенно при более низких значениях в/ц. Сведения о характеристиках воздушных полостей подтверждают улучшенные характеристик воздухововлекающего СУБ, который при наличии воздушных полостей также выдерживает разрушающие растягивающие напряжения, возникающие в результате циклов З—О. Кроме того, остаточную прочность при сжатии СУБ можно точно оценить с помощью измерений СУЗ.

*Ключевые слова:* предел прочности при сжатии, циклы замораживания и оттаивания, самоуплотняющийся бетон, ультразвуковой импульс.

**DOI:** 10.31857/S013030822202004X

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка и использование самоуплотняющегося бетона (СУБ) значительно расширились, особенно в строительстве и ремонте таких конструкций, как мосты, плотины и башни. Такой тип хорошо обрабатываемого материала требует больших количеств цемента/порошка для обеспечения надлежащих реологических свойств, что, в свою очередь, облегчает его использование в нагруженных элементах [1, 2]. В целом на цементный сектор приходится около 7 % выбросов углекислого газа, которые могут нанести вред окружающей среде и экосистемам [3]. Чтобы смягчить его пагубное воздействие на окружающую среду, ученые и специалисты по технологии бетона призвали к использованию отходов или побочных материалов в бетоне, таких как зольная пыль, гранулированный доменный шлак и кварцевая пыль. Такая практика оказалась эффективной для получения бетона с высокими эксплуатационными характеристиками при одновременном снижении выбросов CO<sub>2</sub> и уменьшении отходов на полигонах [4, 5]. Использование отработанного перлита (ОП) в СУБ показало многообещающие результаты с точки зрения свойств свежего и затвердевшего бетона [6—8]. Например, Окуиси и др. обнаружили, что природный перлитовый порошок увеличивает предел прочности при сжатии полужестких бетонных смесей по сравнению с контрольной смесью [7]. Ramezaniarouf и др. доказали, что кальцинированный сырой перлит повышает долговечность бетона [8]. Тем не менее нет результатов по оценке совместного действия воздухововлекающих добавок (ВВД) и ОП в СУБ, особенно при холодном воздействии. Такие данные могут представлять особый интерес для инженеров-строителей, которым необходимо оценивать предел прочности при сжатии СУБ, включающего ОП.

Строительная отрасль в значительной степени зависит от использования неразрушающего контроля (НК) для оценки целостности конструкций. Это осуществляется путем косвенной оценки предела прочности бетона при сжатии с использованием упругого отскока молотка, скорости ультразвука (СУЗ) или других средств неразрушающего контроля [9, 10]. В течение последних 60 лет большинство исследователей интуитивно рассматривали факторы, которые могли бы непосредственно проиллюстрировать взаимосвязь между неразрушающим и разрушающим контролем, для получения точных результатов с минимальными разрушениями [11, 12]. Эти факторы включают состав бетона, возраст бетона и условия воздействия окружающей среды. Например, Szilágyi и др. обнаружили сильную корреляцию в параметрах повторяемости

между показателем упругого отскока молотка и прочностью бетона, где коэффициент вариации имел тенденцию к снижению с увеличением среднего значения показателя отскока [13]. Другое исследование показало, что состав бетона обязательно повлияет на показатель отскока, учитывая включение воздухововлекающих добавок, наличие которых может приводить к изменениям коэффициентов вариации показателя отскока [14]. Это было связано с относительным включением воздушных пустот, приводящих к плохой микроструктуре и увеличению общей пористости бетона. Saha и Amanat заметили, что типы заполнителя (то есть: каменная крошка, глиняная кирпичная крошка и заполнители из переработанного бетона) могут влиять на прогнозирование предела прочности бетона при сжатии [15]. Таким образом, для надежной и точной оценки предела прочности при сжатии перед контролем необходимо учитывать ключевые факторы, снижающие прочность бетона.

Использование ВВД доказало способность повышать устойчивость бетона к повреждениям, вызванным действием мороза [16, 17]. Когда бетон подвергается воздействию мороза, вода увеличивается в объеме (около 9 %) и вызывает появление микротрещин, что постепенно увеличивает отслаивание поверхностей после нескольких циклов замораживания—оттаивания (З—О). Кроме того, включение ВВД помогло справиться с гидравлическим давлением, вызванным замерзанием, учитывая их способность сокращать поверхностное натяжение на границе раздела воды. В нескольких исследованиях рассматривалось включение ВВД для улучшения характеристик самоуплотняющихся бетонов в условиях сильного холода [18—20]. Lazniewska-Riekaгczyk изучала влияние типа примеси на воздушно-пустотные параметры безвоздушных и воздухововлекающих высокоэффективных СУБ, изготовленных с различными типами модификаторов вязкости и ВВД. Исследование образцов СУБ с помощью анализатора воздушных пустот показало, что характеристики воздушных полостей строго зависят от типа ВВД [18]. Assaad и др. продемонстрировали, что включение стирол—бутадиенового каучука более эффективно, чем ВВД, для подавления снижения прочности сцепления образцов строительных растворов, подвергнутых циклам замораживания—оттаивания [16]. Puthipad и др. обнаружили, что эффект шарикоподшипника вовлеченных пузырьков воздуха способствует самоуплотняющейся способности свежего СУБ, включающего зольную пыль [21].

Данная исследовательская работа является частью большого исследования, посвященного влиянию воздухововлекающих добавок на свежие свойства и долговечность смесей самоуплотняющихся бетонов. Соответственно, косвенная оценка предела прочности при сжатии была проведена до и после З—О, и эта статья представляет собой продолжение предыдущей статьи [6], направленной на проверку возможности использования отработанного перлита в СУБ. Методы контроля включают определение предела прочности при сжатии, скорости ультразвука и параметров воздушных пустот. Особое внимание уделялось оценке прочности смесей СУБ, подвергнутых 400 циклам З—О. Такие данные могут представлять особый интерес для инженеров, которым требуется оценивать конструкции, подверженные холодному воздействию, при минимизации использования разрушающих методов контроля.

## 2. ПРОЦЕДУРА ЭКСПЕРИМЕНТА

### 2.1. Материалы и пропорции смесей

В этом исследовании использовали портландцемент, соответствующий BS EN 197-1, и коммерчески доступный порошок ОП [22]. Их физические свойства и химический состав приведены в табл. 1.

В качестве заполнителей использовали речной песок (0—4 мм) и гравий (4—16 мм); их относительная плотность, модуль крупности и водопоглощение составляли 2,62/2,65, 3,71/7,45 и 1,1/1,85 соответственно. Гранулометрический состав заполнителей, состоящих из 45 % песка и 55 % гравия, показан на рис. 1. Коммерчески доступный суперпластификатор (СП) на основе поликарбоксилата и синтетическая ВВД добавлялись в смеси СУБ для достижения пригодной удобообрабатываемости и повышенной долговечности в условиях З—О соответственно.

В этом исследовании оценивались три немодифицированные смеси СУБ вместе с тремя другими смесями с ВВД. Содержание связующего компонента при фиксированном количестве воды составляло 320, 360 и 400 кг/м<sup>3</sup> (т.е. 180 кг/м<sup>3</sup>). Таким образом, получаются водоцементные (в/ц) отношения 0,56, 0,5 и 0,45. Отработанный перлит добавлялся в качестве наполнителя раствора для достижения постоянного общего содержания порошка 580 кг/м<sup>3</sup>, в то время как отношение песка к заполнителю оставалось фиксированным на уровне 0,45 для всех смесей СУБ.

Таблица 1

## Химические и физические свойства цемента и ОП

Химический состав	Цемент	ОП
SiO <sub>2</sub>	25,53	73,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,3	14,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,29	19,96
CaO	55,59	1,17
MgO	4,05	0,15
SO <sub>3</sub>	2,34	–
K <sub>2</sub> O	0,78	3,76
Na <sub>2</sub> O	0,33	2,12
TiO <sub>2</sub>	0,28	0,086
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03	–
Физический свойства		
Относительная плотность	3,1	2,33
Уд. поверхность по Блейну, см <sup>2</sup> /г	3450	1670
Потери при прокаливании, %	2,15	1,87

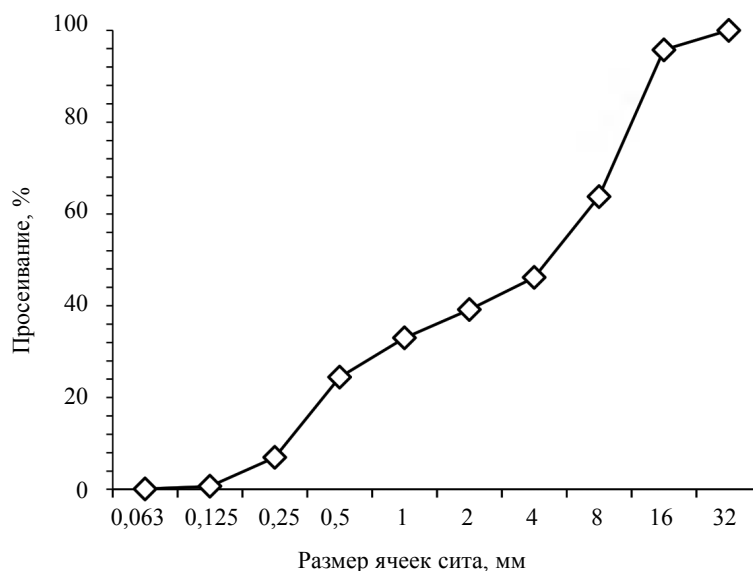


Рис.1. Кривая гранулометрического состава заполнителей.

Содержание суперпластификатора было подобрано таким образом, чтобы обеспечить для бетона класс SF3 [23], показывающего высокую текучесть с расплывом, колеблющимся в пределах около  $79 \pm 1,5$  см. ВВД вводили в постоянной соотношении 0,15 % от массы цемента. В табл. 2 приведены пропорции смесей для немодифицированных и воздуховлекающих смесей самоуплотняющихся бетонов.

Смеси перемешивались в смесителе с вращающимися горизонтальными лопастными валами в корытообразном корпусе. В начале заполнители (то есть песок и гравий) доводились до однород-

## Пропорции смесей

ID-смеси	кг/м <sup>3</sup>					в/ц	мм
	Цемент	ОП	Заполнители	СП	ВВД		
320-U	320	260	1511	6,4		0,56	785
360-U	360	220	1520	7,5		0,5	800
400-U	400	180	1530	7,9		0,45	790
320-AE	320	260	1523	1,15	0,48	0,56	770
360-AE	360	220	1534	0,95	0,54	0,50	810
400-AE	400	180	1545	0,98	0,6	0,45	790

ного состояния вместе с примерно 40 % воды в течение 20 с в смесителе. Затем в смеситель с оставшейся водой и требуемым содержанием СП и ВВД добавляли цемент и ОП. Перемешивание продолжалось в течение 1 мин, после чего непосредственно оценивался распыл.

## 2.2. Методы контроля

После окончания перемешивания образцы кубической формы размером 150 мм извлекали из формы через 24 ч, выдерживали в воде в течение 7 суток, после чего перемещали в лабораторное помещение, где температура окружающей среды и относительная влажность воздуха варьировались в пределах  $23 \pm 4$  °C и  $50 \pm 20$  % соответственно. Величина скорости ультразвука в исследуемых смесях определяли с помощью портативного ультразвукового прибора типа «Proseq — TICO» с частотой измерения 54 кГц в соответствии с ASTM C 597-97 [24]. Контактную пасту наносили на деформированные бетонные поверхности кубических образцов с последующим симметричным подключением датчиков к устройству с одного направления для измерения времени прохождения ультразвука через бетонные кубы. СУЗ можно определить из следующего уравнения:

$$V = \frac{d}{t}, \quad (1)$$

где  $d$  — длина образца, м;  $t$  — время, мкс.

Предел прочности при сжатии на тех же образцах оценивали на универсальной гидравлической испытательной машине замкнутого цикла при постоянной скорости нагружения 11,25 кН/с по BS EN 12390-3 [25]. Измерения СУЗ и предела прочности при сжатии проводили для образцов возрастом 28 и 90 дней. Это отражено в методологии исследования, представленной на рис. 2.

Внутренние повреждения от воздействия холода оценивали на образцах бетона толщиной 150 мм возрастом 90 дней. Перед испытанием плотность оценивали по ASTM C642 [26]. Соответствующие кубы бетона сушили в печи, а затем оставляли в лабораторном помещении на 24 ч для остывания. После измерения начальных значений СУЗ образцы помещали в камеру, температура в которой держалась на уровне  $-20$ °C в течение 4 ч, затем  $+20$ °C в течение 4 ч при том, что образец дополнительно погружали в 3 %-й водный раствор NaCl. Изменение СУЗ регистрировали до количества в 400 циклов З—О с шагом 50 циклов. Таким образом, коэффициент долговечности (КД) был рассчитан по уравнению:

$$DF = \left( \frac{V_n}{V_0} \right)^2, \quad (2)$$

где  $V_n$  и  $V_0$  представляют собой значения СУЗ, зарегистрированные после определенного количества циклов З—О и измеренные перед проведением испытания через 90 дней соответственно. Важно отметить, что после каждых 50 циклов ФТ образцы извлекались из морозильной камеры, сушились в печи, затем выдерживались в лабораторном помещении в течение 24 ч для охлаждения при температуре окружающей среды  $23 \pm 4$  °C и относительной влажности  $50 \pm 20$  %. После этого

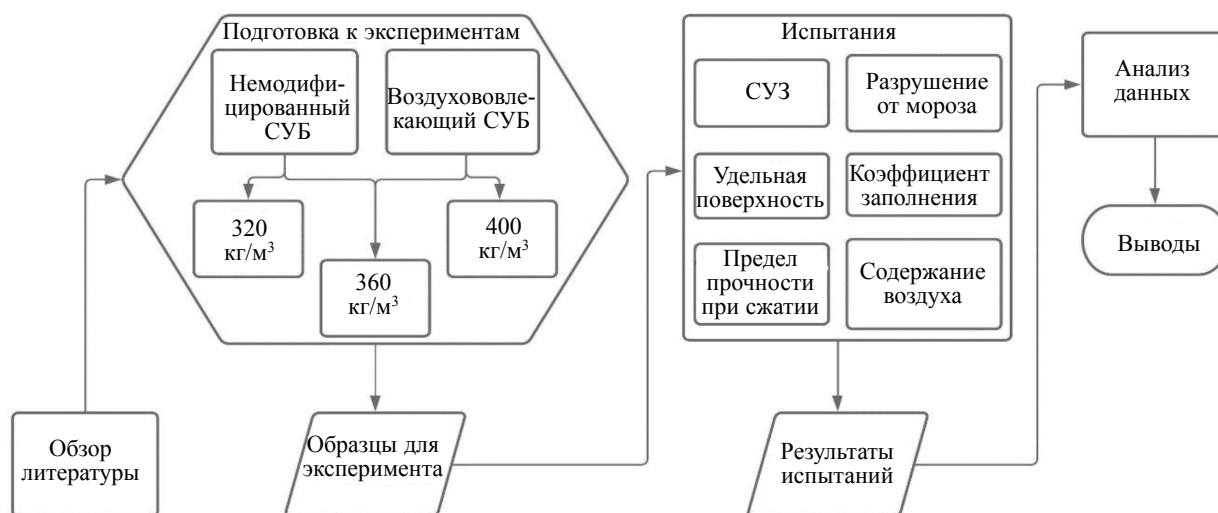


Рис. 2. Методология исследования.

проводили измерения СУЗ, а затем образцы возвращались в морозильную камеру до завершения 400 циклов З—О. Наконец, образцы были испытаны на сжатие.

Характеристики воздушных пустот затвердевшего бетона определялись с помощью компьютеризированной системы анализа изображений «RapidAir». Перед проведением испытаний была проведена подготовка/полировка поверхности нарезанных образцов размером  $150 \times 150 \times 20$  мм из кубов со стороной 150 мм в соответствии с ASTM C457 [27]. Процентное содержание бетона каждой смеси рассчитывалось и учитывалось в интегрированном модуле анализа пористости согласно EN 480-11 [28]. Следовательно, были определены содержание воздуха (в %), удельная поверхность (в  $\text{мм}^{-1}$ ) и коэффициент заполнения (в мм).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

#### 3.1. Контроль бетона в стандартных условиях

Влияние содержания цемента и ВДВ на предел прочности при сжатии через 28 и 90 дней для смесей СУБ показано на рис. 3. Можно заметить, что предел прочности при сжатии имеет тенденцию к увеличению при наличии добавок цемента. Например, предел прочности при сжатии через 28 суток увеличилась с 52,9 до 62,9 и 76,5 МПа для немодифицированных смесей СУБ, содержащих 320, 360 и 400  $\text{кг/м}^3$  цемента соответственно. Это может быть напрямую связано с более высоким содержанием связывающего компонента, что может приводить к увеличению количества продуктов гидратации и, следовательно, к уменьшению пористости в гидратирующей системе [9]. Интересно отметить, что улучшение  $\sigma_{\text{сж}}$  через 28 дней было заметным из-за включения ОП, отражающего наличие пуццолановой активности между 28 и 90 днями в гидратирующей матрице. Такие результаты согласуются с современными литературными данными, которые можно объяснить комбинацией явлений, включая более высокую пуццолановую активность и определенное количество воды для затворения, поглощаемой материалами из ОП, что может способствовать реакциям гидратации и развитию прочности с течением времени [6, 7]. Включение ВВД было связано с более низкими значениями предела прочности при сжатии, что может быть естественным образом связано с относительным увеличением объема воздуха. Например, предел прочности при сжатии снизился с 62,9 и 76,5 для немодифицированных до 51,6 и 55 МПа для воздухововлекающих смесей, изготовленных из 360 и 400  $\text{кг/м}^3$  цемента соответственно. Это можно объяснить увеличением содержания воздуха в смесях с ВВД по сравнению с немодифицированными смесями. Согласно табл. 3 содержание воздуха увеличилось с 3,13 и 2,70 % до 9,95 и 8,64 % для воздухововлекающих смесей с содержанием связывающего компонента 360 и 400  $\text{кг/м}^3$  соответственно. Тем не менее стоит отметить, что воздухововлекающие смеси требуют более низкой потребности

Результаты измерения параметров пористости, предела прочности при сжатии и скорости ультразвука

ID смеси	Удельный вес	Параметры пористости			До циклов З—О				После 400 циклов З—О	
		Содержание воздуха, %	Удельная поверхность, мм <sup>-1</sup>	Коэффициент заполнения, мм	СУЗ, км/с		σ <sub>сж</sub> , МПа		СУЗ, км/с	σ <sub>сж</sub> , МПа
					28 дн.	90 дн.	28 дн.	90 дн.		
320-U	2357	3,54	39,48	0,168	4,392	4,575	52,9	66,9	4,35	64,10
360-U	2385	3,13	23,71	0,299	4,463	4,63	62,9	77	4,29	70,50
400-U	2391	2,70	17,18	0,443	4,595	4,69	76,5	90,9	4,12	77,90
320-AE	2177	10,19	26,95	0,144	4,05	4,158	38,4	48,3	3,96	46,26
360-AE	2208	9,95	30,83	0,129	4,15	4,254	51,6	61,3	4,05	58,48
400-AE	2219	8,64	44,55	0,181	4,315	4,45	55,0	64,5	4,16	59,48

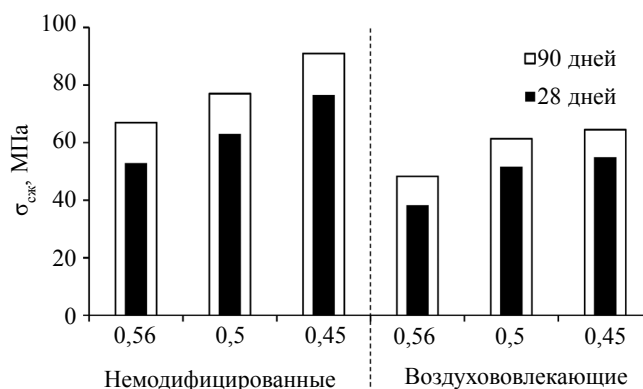


Рис. 3. Влияние в/ц на нарастание прочности немодифицированных и воздухововлекающих смесей.

в СП для достижения требуемой удобообрабатываемости, что может быть связано с добавлением ВВД, которые способствуют высаливанию смесей [30].

Значения СУЗ, определенные через 28 и 90 дней для немодифицированных и воздухововлекающих смесей СУБ, показаны на рис. 4. Ясно, что у смесей, приготовленных с повышенным содержанием цемента, проявлялись повышенные значения СУЗ (например, СУЗ у 28-суточного образца увеличилась с 4,227 до 4,520 км/с для смесей с содержанием цемента 320 и 400 кг/м<sup>3</sup> соответственно). Это может быть связано с уменьшением в/ц, что, в свою очередь, снижает пористость бетона [6]. Независимо от содержания цемента, смеси, включающие ВВД, имели сниженные СУЗ. Так, СУЗ 90-суточных образцов снизились с 4,392, 4,463 и 4,595 км/с до 4,05, 4,15 и 4,315 км/с для смесей с содержанием цемента 320, 360 и 400 кг/м<sup>3</sup> соответственно. Такие результаты согласуются с современной литературой, отражающей влияние ВВД на пористость и плотность цементной матрицы [16, 19]. Следует отметить, что снижение механических свойств воздухововлекающих смесей связано со снижением характеристик плотности (см. табл. 3).

Регрессионный анализ широко используется в материаловедении для создания эмпирических моделей, которые облегчают прогнозирование механических свойств. Зависимость между результатами измерения σ<sub>сж</sub> и СУЗ, определенными для образцов через 28 и 90 дней, представлена на рис. 5. Интересно отметить, что аппроксимирующая кривая по стандарту BS EN 13791 [30] занижает фактический предел прочности при сжатии, поэтому при использовании предложенной модели рекомендуется положительный сдвиг по оси σ<sub>сж</sub>.

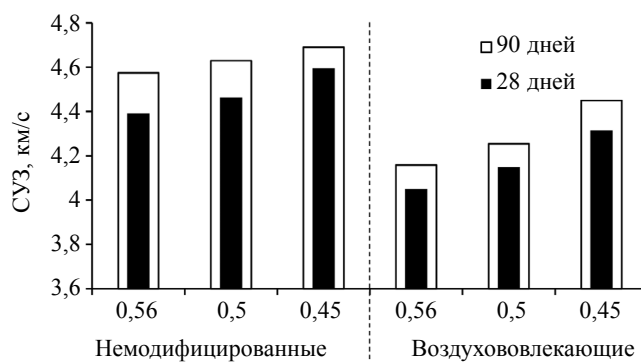


Рис. 4. Влияние в/ц на нарастание СУЗ в немодифицированных и воздуховвлекающих смесях.

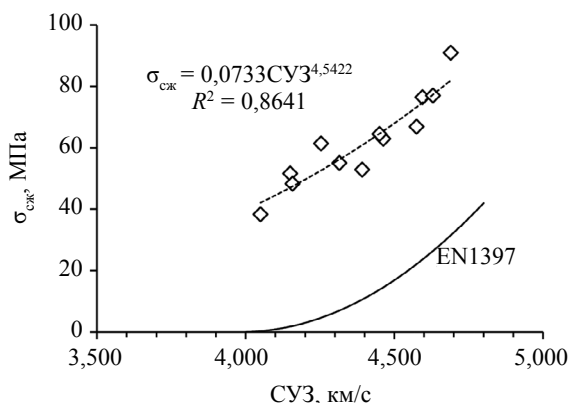


Рис. 5. Взаимосвязь между СУЗ и пределом прочности при сжатии.

### 3.2. Бетон, подверженный циклам З—О

На рис. 6 представлено изменение КД, определяемого через каждые 50 циклов З—О для смесей СУБ, приготовленных с различным в/ц. Независимо от включения ВВД в СУБ, все смеси показали высокий КД после 200 циклов З—О; после 400 циклов З—О КД немного уменьшился. Например, КД снизился с 98 до 92 и 86 % для смесей 320-U, 360-U и 400-U соответственно. Это можно объяснить внутренним растрескиванием цементного теста, которое более выражено при накоплении циклов З—О [18]. Падение КД особенно заметно для немодифицированных смесей, приготовленных с в/ц 0,45. Действительно, смесь 400-U показала наибольшее падение прочности в 14 % под воздействием мороза. Это может быть связано с соответствующими характеристиками пористости, имеющих относительно высокий коэффициент заполнения и низкое содержание воздуха 2,7% и 0,443 мм соответственно.

Влияние ВВД на КД и падение прочности для смесей СУБ, подвергнутых 400 циклам З—О, представлено на рис. 7. Как правило, влияние снижения содержания цемента (т.е. увеличение концентрации ОП) приводило к повышению устойчивости к циклам З—О, в то время как использование ВВД оказалось эффективным в снижении деградации бетона, особенно для смесей СУБ, приготовленных с относительно низким в/ц. Использование ВВД привело к уменьшению скорости падения КД и  $\sigma_{сж}$ ; например, КД увеличился с 77 до 87 %, в то время как падение  $\sigma_{сж}$  уменьшилось с 14 до 8 % для смеси СУБ, приготовленной с 0,45 в/ц. Это можно объяснить действием пузырьков воздуха, которые действуют как резервуары для отведения незамерзшей воды, когда она течет из зон заморзания через систему капиллярных пор. Следовательно, растягивающие напряжения/давление в затвердевшей фазе, вызывающие внутренние повреждения бетона, ослабевают. Интересно отметить, что самая высокая значение КД после 400 циклов

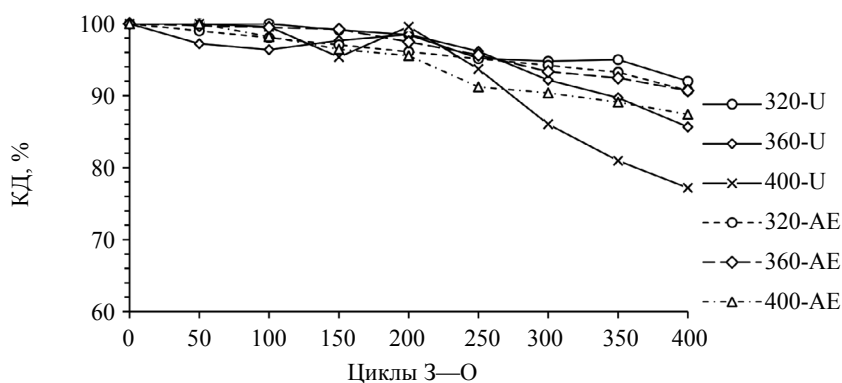


Рис. 6. Изменение КД с увеличением числа циклов З—О.

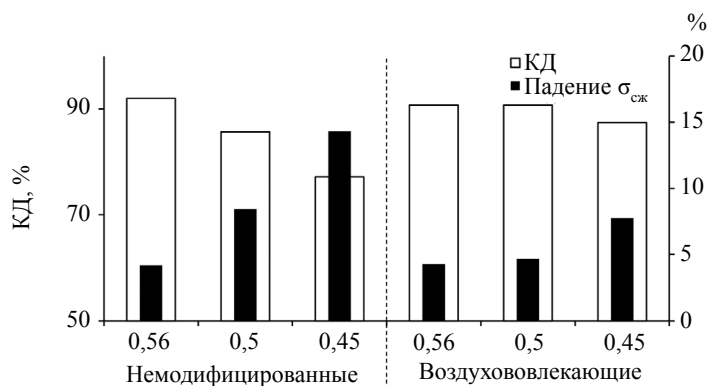


Рис. 7. Влияние в/ц на КД немодифицированных и воздухововлекающих смесей.

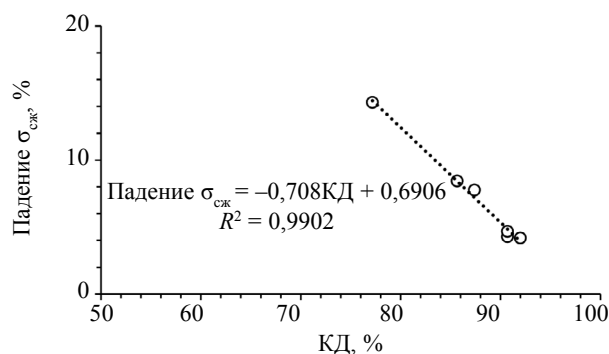
З—О наблюдалась для смеси 0,56 в/ц; таким образом показывается более низкое воздействие на смеси, приготовленные с более высоким содержанием в/ц.

Аналогичные тенденции наблюдались при определении предела прочности при сжатии у смесей СУБ с воздухововлекающими добавками. Можно заметить, что падение прочности улучшается при введении ВВД; например, уменьшение  $\sigma_{сж}$  на 14 %, отмеченное для немодифицированной смеси 400-U, уменьшилось до 8 % при добавлении ввд. Интересно отметить, что ВВД кажутся эффективными для смесей с относительно низким в/ц соотношением. Таким образом, добавление ВВД улучшило устойчивость к циклам З—О, при этом обнаруживается благотворное влияние такой добавки на уменьшение внутренних повреждений под действием мороза. Однако снижение предела прочности при сжатии сопровождалось уменьшением коэффициента заполнения, что, по-видимому, благоприятно для сопротивления бетона к З—О [31]. Например, коэффициент заполнения уменьшился с 0,299 до 0,129 мм для смесей 360-U и 360-AE соответственно. Такие результаты согласуются с другими свойствами затвердевшего бетона (например,  $\sigma_{сж}$  и СУЗ), что, в частности, отражает важность обеспечения воздушных пустот в СУБ для повышения устойчивости к холодам. Стоит отметить, что использование ОП помогло улучшить микроструктуру бетона и способствовало компенсации разрушительных растягивающих напряжений при холоде, благодаря комплексным и синергетическим эффектам вследствие объединения ВВД и ОП в СУБ.

На рис. 8 показана зависимость между КД и результирующим падением предела прочности при сжатии после 400 циклов З—О. Можно заметить, что чем ниже КД, тем больше падение предела прочности при сжатии. Точное соотношение с  $R^2$ , равным 0,99, между КД и измерением падения  $\sigma_{сж}$ , выражалось как

$$\text{Падение } \sigma_{сж} = -0,708 \text{ КД} + 0,6906.$$



Рис. 8. Взаимосвязь между падением  $\sigma_{сжк}$  и КД после 400 циклов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Самоуплотняющийся бетон является очень надежным и универсальным типом бетона, но все еще требует более глубоких исследований его поведения в различных условиях, включая замораживание—оттаивание. Эта исследовательская работа предусматривала изучение поведения самоуплотняющихся бетонов в циклах замораживание—оттаивание с процессами воздухоовлечения и без него. Образцы были испытаны в нормальных условиях и в условиях замораживания—оттаивания. Данная работа является продолжением предыдущей работы, направленной на оценку эффективности отработанного перлита в самоуплотняющихся бетонах. Соответственно, можно выделить важные выводы.

Во-первых, механические свойства самоуплотняющихся бетонов, включая предел прочности при сжатии и скорости ультразвука, не улучшались при добавлении воздухоовлекающих добавок. Тем не менее воздухоовлекающие добавки доказали свою эффективность в сдерживании ухудшения самоуплотняющихся бетонов под воздействием холода. Положительный эффект достигается за счет пузырьков воздуха, образующихся при добавлении воздухоовлекающих добавок, которые действуют как резервуары для рассеивания внутреннего давления, создаваемого увеличением объема при замораживании. Кроме того, независимо от содержания цемента, предел прочности при сжатии самоуплотняющихся бетонов, содержащих воздухоовлекающие добавки, был всегда ниже по сравнению с немодифицированными смесями.

Вышеупомянутая работа может быть расширена за счет включения других видов примесей и их влияния на самоуплотняющиеся бетоны. Кроме того, аналогичные подходы можно использовать для исследования других экстремальных погодных условий, с которыми могут столкнуться самоуплотняющиеся бетоны, такие как длительное воздействие высокой температуры и высокой влажности. Дальнейшим шагом также было бы изучение влияния таких экстремальных условий на самоуплотняющийся бетон, используемый в железобетоне, и насколько хорошо самоуплотняющиеся бетоны помогают защитить арматуру от внешних условий.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Assaad J.J., Khayat K.H. Form pressure characteristics of self-consolidating concrete used in repair // Cem. Concr. Compos. 2021. V. 122. P. 104118. Doi:10.1016/j.cemconcomp.2021.104118
2. Hwang S.D., Khayat K.H. Durability characteristics of self-consolidating concrete designated for repair applications // Mater. Struct. Constr. 2009. V. 42. P. 1—14. Doi: 10.1617/s11527-008-9362-1
3. Ali M.B., Saidur R., Hossain M.S. A review on emission analysis in cement industries // Renew. Sustain. Energy Rev. 2011. V. 15. P. 2252—2261. Doi: 10.1016/j.rser.2011.02.014
4. Megat Johari M.A., Brooks J.J., Kabir S., Rivard P. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete // Constr. Build. Mater. 2011. V. 25. P. 2639—2648. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.013
5. Justnes H. How to Make Concrete More Sustainable // J. Adv. Concr. Technol. 2015. V. 13. P. 147—154. Doi:10.3151/jact.13.147
6. Mir El, Nehme S.G. Utilization of industrial waste perlite powder in self-compacting concrete // J. Clean. Prod. 2017. V. 156. P. 507—517. Doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.103
7. Okuyucu D., Turanli L., Uzal B., Tankut T. Some characteristics of fibre-reinforced semi-lightweight concrete with unexpanded perlite // Mag. Concr. Res. 2011. V. 63. P. 837—846. Doi: 10.1680/macr.2011.63.11.837

8. Ramezaniapour A.A., Motahari Karein S.M., Vosoughi P., Pilvar A., Isapour S., Moodi F. Effects of calcined perlite powder as a SCM on the strength and permeability of concrete // *Constr. Build. Mater.* 2014. V. 66. P. 222—228. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.05.086
9. Revilla-Cuesta V., Skaf M., Serrano-López R., Ortega-López V. Models for compressive strength estimation through non-destructive testing of highly self-compacting concrete containing recycled concrete aggregate and slag-based binder // *Constr. Build. Mater.* 2021. V. 280. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122454
10. Singh N., Singh S.P. Evaluating the performance of self compacting concretes made with recycled coarse and fine aggregates using non destructive testing techniques // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 181. P. 73—84. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.039
11. Brozovsky J. High-strength concrete-NDT with rebound hammer: Influence of aggregate on test results // *Nondestruct. Test. Eval.* 2014. V. 29. P. 255—268. Doi:10.1080/10589759.2014.926897
12. Breyse D., Balayssac J.P. Strength assessment in reinforced concrete structures: From research to improved practices // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 182. P. 1—9. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.093
13. Szilágyi K., Borosnyói A., Zsigovics I. Extensive statistical analysis of the variability of concrete rebound hardness based on a large database of 60 years experience // *Constr. Build. Mater.* 2014. V. 53. P. 333—347. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.113
14. Mir El, Nehme S.G. Repeatability of the rebound surface hardness of concrete with alteration of concrete parameters // *Constr. Build. Mater.* 2017. V. 131. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.085
15. Saha A.S., Amanat K.M. Rebound hammer test to predict in-situ strength of concrete using recycled concrete aggregates, brick chips and stone chips // *Constr. Build. Mater.* 2021. V. 268. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121088
16. Assaad J.J., Hamzeh F., Hamad B. Qualitative assessment of interfacial bonding in 3D printing concrete exposed to frost attack // *Case Stud. Constr. Mater.* 2020. V. 13. Doi:10.1016/j.cscm.2020.e00357
17. Ley M.T., Welch D., Peery J., LeFlore J. Determining the air-void distribution in fresh concrete with the Sequential Air Method // *Constr. Build. Mater.* 2017. V. 150. P. 723—737. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.037
18. Liu K., Yan J., Hu Q., Sun Y., Zou C. Effects of parent concrete and mixing method on the resistance to freezing and thawing of air-entrained recycled aggregate concrete // *Constr. Build. Mater.* 2016. V. 106. P. 264—273. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.074
19. Łażniewska-Piekarczyk B. The influence of admixtures type on the air-voids parameters of non-air-entrained and air-entrained high performance SCC // *Constr. Build. Mater.* 2013. V. 41. P. 109—124. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.086
20. Shon C.S., Abdigaliyev A., Bagitova S., Chung C.W., Kim D. Determination of air-void system and modified frost resistance number for freeze-thaw resistance evaluation of ternary blended concrete made of ordinary Portland cement/silica fume/class F fly ash // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2018. V. 155. P. 127—136. Doi:10.1016/j.coldregions.2018.08.003
21. Puthipad N., Ouchi M., Rath S., Attachaiyawuth A. Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash // *Constr. Build. Mater.* 2016. V. 128. P. 349—360. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.087
22. BS EN 197-1, Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, British Standards Institution, UK, 2011.
23. S. EFNARC, Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, UK, 2002.
24. ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, 1997.
25. BS EN 12390-3, Testing hardened concrete Part 3: Compressive strength of test specimens, British Standards Institution, UK, 2011.
26. ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, 2013.
27. ASTM C457, Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, 2016.
28. BS EN 480-11, Admixtures for concrete, mortar and grout — test methods. Determination of air void characteristics in hardened concrete, 2005.
29. Łażniewska-Piekarczyk B. The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete // *Constr. Build. Mater.* 2013. V. 40. P. 659—671. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.032
30. EN 13791, Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components, 2007.
31. Shah H.A., Yuan Q., Zuo S. Air entrainment in fresh concrete and its effects on hardened concrete—a review // *Constr. Build. Mater.* 2021. V. 274. Doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121835