ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Научная статья
УДК 637.1
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318

CC BY 4.0

Технология получения полимербетона с улучшенными характеристиками на основе фурфурола для использования в гидротехническом строительстве

Жангазы Нуржанович Молдамуратов[1, 4*], Райхан Сальтайевна Имамбаева[1], Нурлан Сальтаевич Имамбаев[2], Алтайы Аманкулович Игликов[3], Сагынтай Жакыпалиевич Таттибаев[3]

[1] Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан
[2] Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева, Петропавловск, Казахстан
[3] Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати, Тараз, Казахстан
[4] Экспертиза сейсмостойкого строительства, Тараз, Казахстан

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: zhanga_m_n@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Исследования свойств полимербетона показали, что он выгодно отличается от обычного бетона такими показателями, как механическая прочность, стойкость к агрессивным воздействиям различных сред, водостойкость, истираемость, водонепроницаемость, морозостойкость. В настоящее время можно получить полимербетоны с характерными и химическими свойствами: заданной плотностью, прочностью, деформативностью, пластичностью, коррозиостойкостью. **Методы и материалы.** Исследования проводились методом сравнения лабораторных испытаний полимербетона на фурфурольном связующем. Фурфурол обладает большой реакционной способностью и может образовывать смолообразные соединения со многими химическими продуктами. В фурфурол в разных соотношениях добавлялся дифениламин. В качестве отвердителя использовались бензолсульфокислота, серная кислота и их смесь при соотношении 1:1 по весу. Заполнителем различных составов полимеррастворов служил молотый песок или молотый андезит на наноструктурированном микронаполнителе. Испытания проводились на прочность, химическую стойкость, износостойкость, водостойкость, истираемость, адгезию с металлом. Структурные изменения свойств изучались методом электронно-микроскопического анализа. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что раствор дифениламина в фурфуроле, при условии отверждения его серной кислотой, бензолсульфокислотой или смесью этих кислот, является полимерным связующим, способным при твердении в обычных условиях с кислотостойкими заполнителями образовывать материал высокой прочности. Определено, что при приготовлении смолы соотношение фурфурола и дифениламина должно быть в пределах 1:0,5–0,3 по весу. Смола, содержащая 1 весовую часть фурфурола и 0,5 весовую часть дифениламина, условно названа ФД-1; содержащая 1 весовую часть фурфурола и 0,4 весовую часть дифениламина – ФД-2, смола же с 0,3 весовой частью дифениламина – ФД-3. **Заключение и выводы.** Введение в состав полимербетона наноструктурированного микронаполнителя позволит сэкономить дорогостоящую смолу. Сравнением технологий получения смолы ФД и изготовления полимербетона, а также из предварительных данных испытаний изучаемых материалов можно определить возможные технико-экономические преимущества полимербетона на смоле ФД перед применяемым в настоящее время в строительстве гидротехнических сооружений полимербетоном на мономере ФА (фурфуролацетоновый). Полимербетон на смоле ФД обладает высокой прочностью и превышает прочность полимербетона на мономере ФА на 20–25%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимербетон, фурфурол, дифениламин, смола, наноструктурированные микронаполнители, полимеррастворы, гидротехнические сооружения.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках научного проекта № AP13268964.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Молдамуратов Ж.Н., Имамбаева Р.С., Имамбаев Н.С., Игликов А.А., Таттибаев С.Ж. Технология получения полимербетона с улучшенными характеристиками на основе фурфурола для использования в гидротехническом строительстве // Нанотехнологии в строительстве. 2022. Т. 14, № 4. С. 306–318. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-306-318. – EDN: JOZNEX.

© Молдамуратов Ж.Н., Имамбаева Р.С., Имамбаев Н.С., Игликов А.А., Таттибаев С.Ж., 2022

ВВЕДЕНИЕ

В гидротехническом строительстве полимербетон может быть применен при возведении отдельных частей (водоскаты, гасители и др.) сооружений, подвергающихся интенсивному разрушению. Этот материал уложен на ряде гидротехнических сооружений Средней Азии и Казахстана [1].

Обследование Караспанского гидроузла в Туркестанской области Республики Казахстан, на котором водоскат выполнен из полимербетона объемом 575 м^3, показало, что после многолетней эксплуатации сооружения водоскат не разрушился (рис. 1).

Основная причина, которая задерживает широкое применение полимербетонов в строительстве гидротехнических сооружений, – это его высокая стоимость, отсутствие приемлемой технологии изготовления, недостаточная изученность его свойств, которые в значительной степени отличаются от свойств обычного бетона [2, 3]. Основное удорожание падает на стоимость синтетического вяжущего, самым распространенным и дешевым из которых является смола – фурфуролацетоновый мономер ФА. Стоимость 1м^3 полимербетона, изготовленного на мономере ФА, в 2,5–3 раза дороже железобетона и в 4–5 раз – обычного цементного бетона. Высокая стоимость полимерного связующего обусловливается не только высокой стоимостью химических продуктов, из которых его получают, но и большими затратами на осуществление технологических операций по изготовлению [4, 5].

Исследования, проводимые по изысканию фурфурольных смол, дают возможность разработать нетрудоемкую технологию получения связующих для полимербетонов. Фурфурол обладает большой реакционной способностью и может образовывать смолообразные соединения со многими химическими продуктами при довольно простых условиях (обычном давлении и низких температурах). Примером тому может служить получение фурфуроланилиновой смолы, а также образование других смолообразных продуктов при взаимодействии фурфурола с ароматическими аминами и их производными. Однако задача получения экономичного полимерного связующего будет решена только в том случае, если получаемый при простых условиях изготовления смолообразный продукт сможет обеспечить требуемые качества строительных изделий (достаточную прочность, долговечность) [2–5].

Рис. 1. **Водоскат Караспанского гидроузла**

В лаборатории строительных материалов авторами получено полимерное связующее на основе фурфурола и ароматического амина – дифениламина. Установлено, что раствор дифениламина в фурфуроле, при условии отверждения его серной кислотой, бензолсульфокислотой или смесью этих кислот, является полимерным связующим, способным при твердении в обычных условиях с кислотостойкими заполнителями образовывать материал высокой прочности. Это полимерное связующее названо смолой ФД. В данном случае затраты на изготовление будут состоять из стоимости исходных продуктов [4–6].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Оптимальный состав связующего определялся следующим образом. В фурфурол в разных соотношениях добавлялся дифениламин. Смесь перемешивалась. Продукт в фурфуроле растворялся при обычных условия, и образовывалось смолообразное вещество. На этом связующем изготавливали полимербетонные образцы – кубы размером 3×3×3 см, при этом использовались три вида отвердителя: бензолсульфокислота, серная кислота и их смесь при соотношении 1:1 по весу. Заполнителем служил молотый андезит. После хранения в течение определенных сроков при комнатной температуре или в сушильном шкафу затвердевшие образцы испытывались на прочность [7].

Опытами установлено, что при приготовлении смолы соотношение фурфурола и дифениламина должно быть в пределах 1:0,5–0,3 по весу. Смола, содержащая 1 весовую часть (в.ч.) фурфурола и 0,5 весовую часть дифениламина, условно названа ФД-1; содержащая 1 весовую часть фурфурола и 0,4 весовую часть дифениламина – ФД-2, смола же с 0,3 весовой частью дифениламина – ФД-3. Из этих смол готовились полимеррастворные образцы – кубы размером 3×3×3 см. Каждая полимеррастворная смесь содержала 20% смолы ФД. Отверждались эти смеси различным количеством серной кислоты, бензолсульфокислоты (БСК) и комбинированным отвердителем [7–9].

Затвердевшие образцы, отформованные из полимеррастворных смесей, после хранения в течение 28 суток при комнатной температуре испытывались

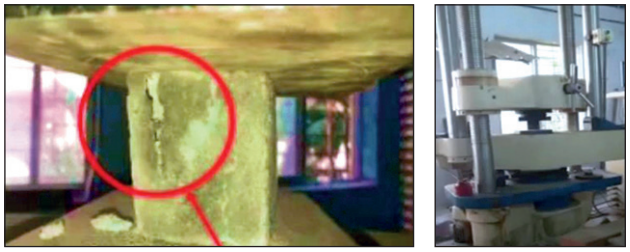

Рис. 2. **Испытание образцов на сжатие**

на сжатие (рис. 2). Результаты испытания позволили установить наиболее оптимальные составы полимербетонов. Данные испытаний образцов приведены на рис. 3, 4, 5.

Максимальная прочность полимеррастворов, отверждаемых различными отвердителями, получена при следующих рецептурах:

I. Заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит; вяжущее – 0,2 в.ч., смола ФД-1; отвердитель – 0,06 в.ч., серная кислота; предел прочности при сжатии – 1270 кг/см^2 (рис. 3).

II. Заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит; вяжущее – 0,2 в.ч., смола ФД-2; отвердитель – 0,1 в.ч., БСК; предел прочности при сжатии – 1220 кг/см^2 (рис. 4).

III. Заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит; вяжущее – 0,2 в.ч., смола ФД-3; отвердитель – 0,08 в.ч., комбинированный; предел прочности при сжатии – 1400 кг/см^2 (рис. 5).

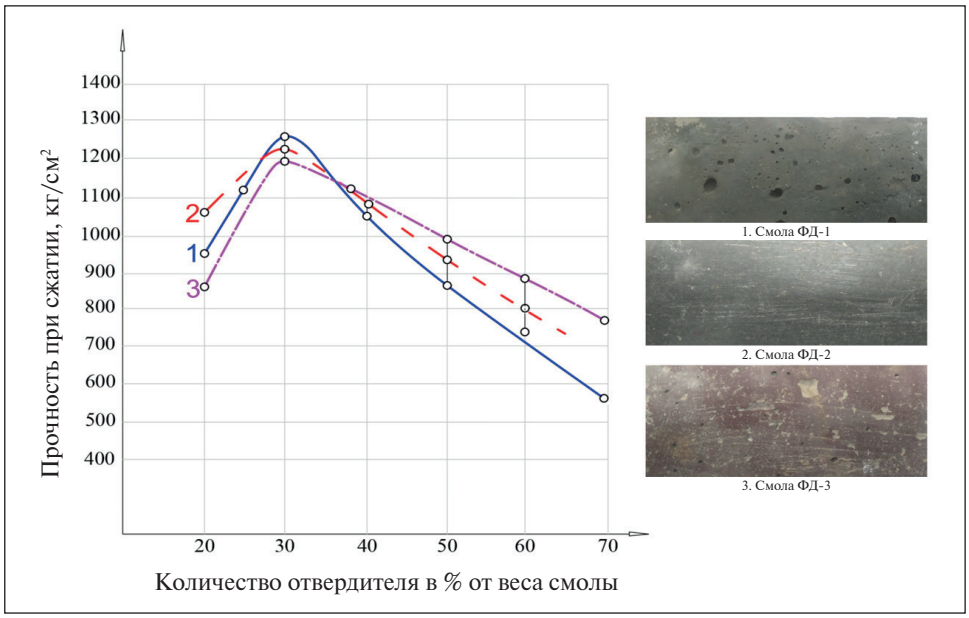

Рис. 3. **Изменение прочности полимербетона на различных смолах в зависимости от количества отвердителя – концентрированной H_2SO_4:** смола ФД-1; смола ФД-2; смола ФД-3

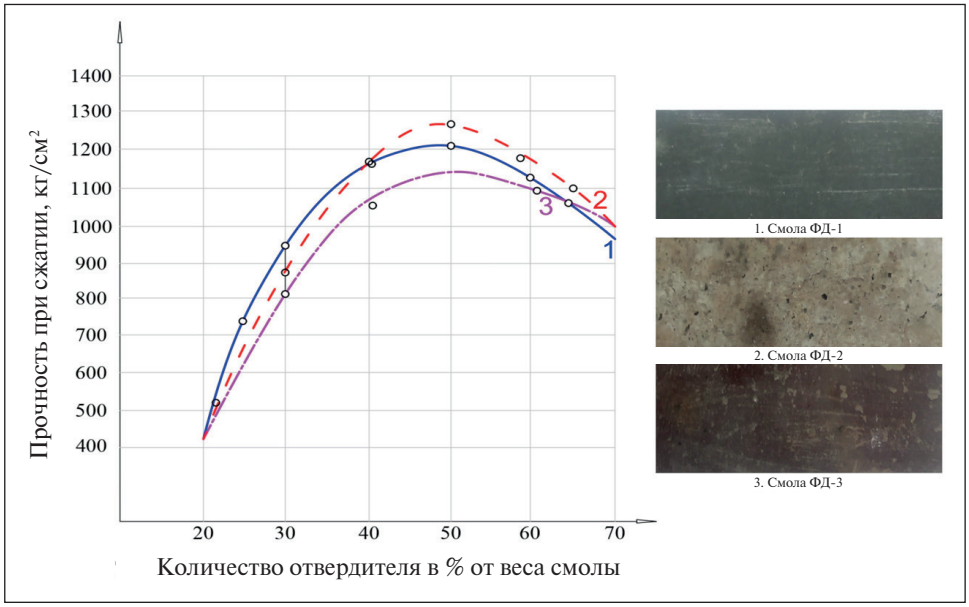

Рис. 4. **Изменение прочности полимербетона на различных смолах в зависимости от количества отвердителя – бензолсульфокислоты:** смола ФД-1; смола ФД-2; смола ФД-3

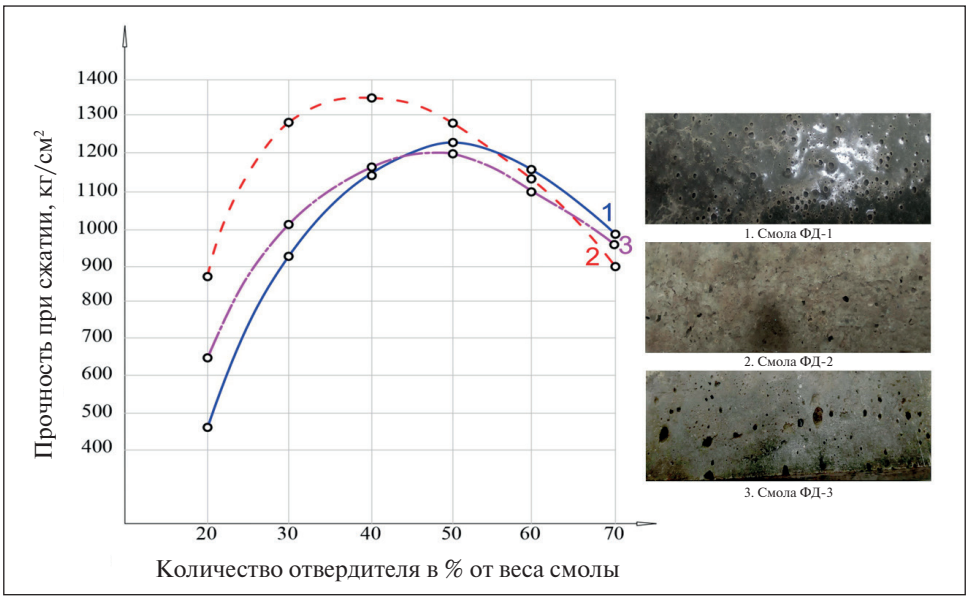

Рис. 5. **Изменение прочности полимербетона на различных смолах в зависимости от количества отвердителя – концентрированной H_2SO_4 и БСК:** смола ФД-1; смола ФД-2; смола ФД-3

Из опытов выяснилось, что наиболее оптимальное соотношение фурфурола и дифениламина в фурфуролдифениламиновой смоле – 1 весовая часть фурфурола и 0,4 весовая часть дифениламина. По этой рецептуре было получено связующее для полимербетонов. Последующие исследования были проведены на этой смоле и на отвердителях – БСК и комбинированном. На основании этого принципа готовились полимеррастворные и полимербетонные образцы различных рецептур, определялся их оптимальный состав и свойства [10, 11].

Для получения сравнительных данных по исследованию основных свойств полимербетона различных рецептур необходимо готовить и испытывать большое число образцов различного возраста [11]. Образцы из полимербетонов для испытания на прочность должны быть следующих размеров: кубы 10×10×10 см, 15×15×15 см и 20×20×20 см, балки 10×10×40 см, 15×15×55 см и т.д. (рис. 6). Изготовление и испытание таких образцов трудоемко и требует большого количества материалов, кроме того, проведение соответствующих испытаний для получения сравнительных данных о стойкости полимербетона к разрушающему действию воды, мороза, агрессивной среды на образцах крупного размера займет слишком много времени [12]. Поэтому для получения сравнительных данных о водостойкости, коррозийности, атмосферостойкости и других свойствах вначале готовились и испытывались на полимеррастворных образцах малого размера (кубики размером 3×3×3 см, балочки 2×2×10 см). Полученные данные при определении свойств полимербетона на фурфурольной смоле с добавками сравнивались со свойствами цементного бетона и полимербетона на фурфурольно-ацетоновом мономере. Последний выбран как наиболее широко изученный. Основным сырьем для получения мономера ФА является фурфурол, который используется для изготовления полимербетона, изучаемого нами. Качества, которые предполагается выработать в полимербетонах, применяемых в гидротехнике и ирригации, – это прочность и водостойкость. Поэтому на полимербетонах, изготовляемых на различных заполнителях, смолах и отвердителях, проводились опыты по улучшению этих качеств. Определение свойств на фурфурольном связующем проводилось по соответствующим методикам испытания строительных материалов [13].

Полимербетон на фурфурольном связующем отверждается кислотными отвердителями: БСК, серной кислотой и их смесью, что делает необходимым применение наноструктурированных микронаполнителей из кислотостойких пород. Соотношение количества смолы и заполнителя для плотного полимербетона обычно подбирают так же, как для цементного бетона (смола должна покрыть зерна заполнителя и заполнить пустоты между ними). Введение в состав полимербетона наноструктурированного микронаполнителя может сэкономить дорогостоящую смолу [12–14].

Испытание различных составов полимеррастворов на наноструктурированном микронаполнителе (молотый песок или молотый андезит) и фурфурольном связующем с добавками позволило установить следующие рецепты [14, 15]:

1. Заполнитель – 1 в.ч., микрозаполнитель; вяжущее – 0,2 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,08 в.ч., комбинированный.

При введении в состав полимербетона мелкого заполнителя – песка Мк = 1,92 – оптимальный состав колеблется в следующих пределах:

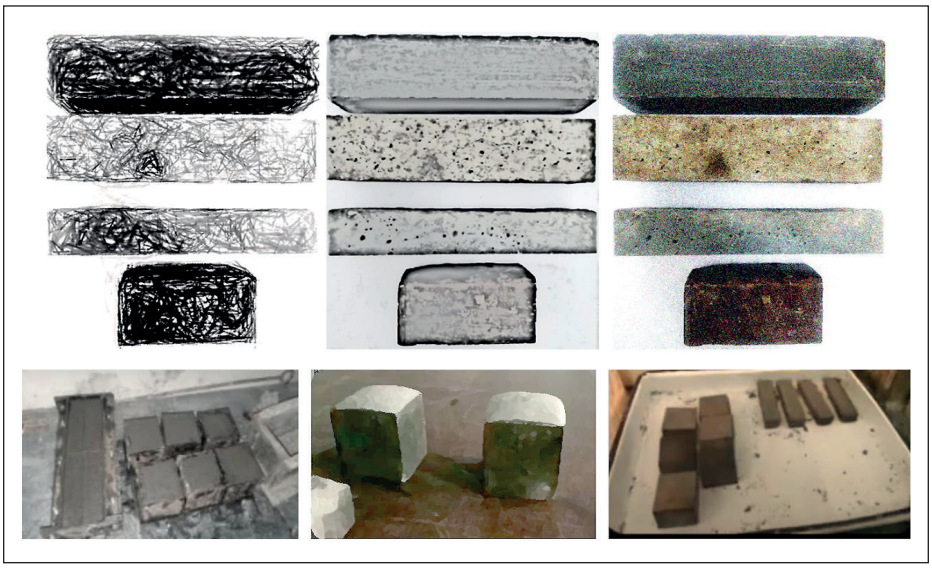

Рис. 6. **Образцы полимербетона на фурфурольном связующем разных размеров**

2. Заполнитель – 1 в.ч., мелкий и микрозаполнитель в соотношениях 1,5:1 по весу; вяжущее – 0,12 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,05 в.ч., комбинированный.

Оптимальный состав полимербетона с крупным заполнителем – гравием крупностью 5–20 мм – может быть следующим:

3. Заполнитель – 1 в.ч., крупный и микрозаполнитель в соотношениях 1,5:1 по весу; вяжущее – 0,1 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,04 в.ч., комбинированный.

При введении в состав полимербетона всех трех видов заполнителей (микрозаполнителя, мелкого, крупного) оптимальный состав будет следующим:

4. Заполнитель – 1 в.ч., наноструктурированный микрозаполнитель, мелкий и крупный в соотношениях по весу 1:1,6:2,5; вяжущее – 0,15 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,06 в.ч., комбинированный.

Все эти составы будут иметь различные прочностные характеристики (табл. 1).

Размер образцов состава 1, 2 – балочки 4×4×4 см и стандартные восьмерки, составы 3, 4 – кубы 10×10×10 см, балочки 10×10×32 см и балочки 10×10×65 см с утолщенными концами.

Прочность полимербетона определяется многими факторами [16–18]. К числу основных из них относятся: содержание в полимербетоне количества вяжущего, отвердителя, режим твердения, минерально-петрографическая характеристика заполнителей. Расход вяжущего определяется пустотностью заполнителей и их крупностью. Чем больше пустотность заполнителя, тем больше потребуется вяжущего и, соответственно, отвердителя. Количество отвердителя оказывает существенное влияние на прочность полимербетона. При его недостатке полимеризация вяжущего идет неполно, что отрицательно сказывается на прочности и других качествах полимербетона. Избыток отвердителя приводит к быстрому схватыванию смеси, уменьшению прочности, к увеличению хрупкости и ухудшению других показателей. Оптимальное содержание вяжущего и отвердителя необходимо выбирать из условия обеспечения такого показателя основной характеристики полимербетона, который будет решающим для его эксплуатации [17, 23].

Таблица 1

Прочность полимербетона разных составов

№ составов	Предел прочности, кг/см²		
	при сжатии	на растяжение при изгибе	при растяжении
1	1200–1300	270–290	100–120
2	1100–1200	260–270	100–110
3	900–950	235–250	90–100
4	900–950	240–255	75–80

Авторами изучалось влияние режимов термообработки на прочность образцов полимербетона на смоле ФД. Применили два способа. Изготовленные образцы после суточного их хранения при температуре 18–20°С помещались в термошкаф, где подвергались сухому подогреву при 60, 80, 100°С. Время выдерживания образцов в шкафу изменялось от 2 до 24 часов. Другая серия образцов сразу после их изготовления подвергалась сухому подогреву при таких же режимах. Разницы в результатах, полученных этими двумя способами подогрева, не наблюдалось. Лучшие результаты показали режимы обработки при 80°С в течение 10 часов и при 100°С в течение 8 часов. Можно сделать вывод, что нагрев полимербетона интенсифицирует полимеризацию связующего ФД [17, 18, 21].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первым условием высокой химической стойкости полимербетонов является достижение полноты отверждения смолы. Повышенную химическую стойкость сообщают полимербетонам химически стойкие заполнители, к самым распространенным из которых относят андезит, диабаз, кварц и др. Химическую стойкость полимербетонам сообщает графит и родственные ему материалы. Для сравнения стойкости различных образцов на смоле ФД в агрессивных средах проводились испытания в тех же агрессивных растворах образцов полимербетона на мономере ФА [13, 21, 23].

Испытания были проведены на серии образцов размером 1×1×3 см следующего состава:

а) заполнитель – 231 в.ч., кварцевый молотый песок; вяжущее – 100 в.ч., смола ФД; отвердитель – 40 в.ч., комбинированный;

б) заполнитель – 173 в.ч., графит; вяжущее – 100 в.ч., смола ФД; отвердитель – 40 в.ч., комбинированный;

в) заполнитель – 315 в.ч., кварцевый молотый песок; вяжущее – 100 в.ч., мономер ФА; отвердитель – 20 в.ч., БСК; ацетон – 1,6 в.ч.

Химическая стойкость полимербетонов определялась по изменению прочности образцов при изгибе [16, 19, 23]. Образцы предварительно подвергались термообработке в течение 12 часов при температуре 80°С через 2 суток после изготовления. В качестве агрессивных сред были использованы растворы кислот: серной 1% и 10%, соляной 1% и 10%, едкого натра 1% и 10%, а также различные растворители (табл. 2, 3).

Прочность эталонных образцов 356 кг/см^2.

Из табл. 2 и 3 видно, что большое снижение прочности малых образцов при испытании их на изгиб отмечалось во всех щелочных и кислых средах, а уже через 30 суток после погружения в агрессивную среду прочность образцов на молотом графите снизилась на 40–50% от исходной. Прочность образцов на молотом графите и молотом песке в органических растворителях (бензоле, толуоле, ацетоне, бензине) повысилась к 30–60 суткам выдерживания на 20–30 % от исходной.

Таблица 2

Химическая стойкость полимерраствора, приготовленного на основе ФД с графитным наполнителем при выдерживании образцов в агрессивных средах

Среда	Концентрация, %	Изменение прочности при изгибе через сутки, кг/см^2					
		30	60	90	120	180	360
Воздух	–	328	334	344	340	334	345
Соляная кислота	1	139	167	187	170	162	154
	10	123	221	150	160	165	180
Серная кислота	1	130	166	160	177	178	200
	10	156	177	158	–	167	150
Едкий натр	1	152	165	141	–	165	172
	10	160	221	193	–	208	210
Толуол	–	439	408	–	374	444	427
Бензол	–	453	411	–	393	315	409
Ацетон	–	407	412	–	423	398	430
Бензин	–	419	426	–	405	400	425

Таблица 3

Химическая стойкость полимерраствора, приготовленного на основе ФД, мономера ФА и молотого песка при выдерживании образцов в агрессивных средах

Среда	Изменение прочности при изгибе через сутки, кг/см²					
	Эталон, кг/см²	30	60	120	180	360
На смоле ФД						
Воздух	306	363	410	435	428	410
Толуол	–	352	418	386	403	415
Бензол	–	383	414	439	393	390
Ацетон	–	382	315	251	227	213
Бензин	–	390	370	375	320	390
На мономере ФА						
Воздух	378	324	344	294	265	290
Толуол	–	392	393	403	385	374
Бензол	–	428	441	378	401	408
Ацетон	–	108	81	65	60	54
Бензин	–	433	378	378	384	390

Полимербетонные образцы на мономере ФА и на молотом песке при выдерживании в ацетоне потеряли около 75%, а на молотом графите – около 10–15% своей первоначальной прочности (табл. 3).

Стойкость этих же образцов в органических растворителях (толуоле, бензоле, бензине) не изменилась по сравнению с исходной и в некоторых случаях несколько увеличивалась. Растворы едкого натра и некоторых кислот практически не вызывают снижения прочности. Снижается она через 30 суток при хранении образцов в воде. Далее прочность стабилизируется.

Испытание образцов на истираемость проводилось по стандартной методике на «круге Амслера». Образцы – кубы размером 7×7×7 см были изготовлены из составов 3 и 7. Заполнитель – 1 в.ч.; вяжущее 0,12 в.ч. – мономер ФА; отвердитель – 0,4 в.ч., БСК.

В качестве заполнителя использовался гравий крупностью 5–20 мм и молотый андезит в соотношениях 1,5:1 (табл. 4).

Методика определения водостойкости полимербетона проста. Образцы – кубики, балочки из полимербетона разных сроков хранения помещались в воду и в различные сроки хранения испытывались на сжатие. Эталонные образцы хранились в сухих условиях. Величина падения прочности образцов, хранившихся неодинаковое время в воде, характеризует водостойкость полимербетона. Для определения водостойкости полимербетона на смоле ФД готовились серии полимербетонных образцов – кубики и балочки на отвердителях разных видов и в различных количествах [19–22]. Результаты испытаний водостойкости этого состава в 28-дневном возрасте приведены в табл. 5; в 60-дневном – в табл. 6 и после сухого подогрева в течение 10 часов при температуре 80°С – в табл. 7.

Из данных таблиц легко вычислить коэффициенты размягчения $K_р$ и водостойкость $K_в$. Так, например, после 60 суток:

$$K_р = 980/1133 = 0.865;\ K_в = 1133/1180 = 0.96.$$

Таблица 4

Истираемость полимербетона различных составов при 600 м пути истирания (среднеарифметические данные по 6 образцам каждого состава)

№ составов	Вес образца до испытания, г	Вес образца после испытания, г	Площадь истирания, см²	Истираемость на 600 м/пути, г/см²	Истираемость цементного бетона М-200
7	754	746	49	0,16	0,6–1,2
3	742	735	49	0,14	

Таблица 5
Изменение водостойкости полимербетона в возрасте 28 дней в зависимости от времени нахождения в воде

Тип отвердителя, количество от веса вяжущего, %	Предел прочности при сжатии до помещения образцов в воду, кг/см²	Предел прочности при сжатии образцов, хранившихся в воде в течение суток, кг/см²									
		30	60	90	120	150	180	270	360	540	720
Серная кислота, 30	1180	1060 1155	980 1133	910 1000	880 920	855 920	825 900	810 905	820 905	815 895	820 900
БСК, 50	1120	1060 1155	965 1065	912 1022	872 990	844 950	820 920	808 898	794 895	805 900	800 910
Комбинированный, 40	1260	1205 1115	1155 1045	1105 1000	1065 935	1045 200	1025 872	1015 859	1020 865	1010 854	1010 860

Таблица 6
Изменение водостойкости полимербетона в возрасте 60 суток в зависимости от времени нахождения в воде

Тип отвердителя, количество от веса вяжущего, %	Предел прочности при сжатии до помещения их в воду, кг/см²	Предел прочности при сжатии образцов, хранившихся в воде в течение суток, кг/см²			
		60	120	180	240
Серная кислота, 30	1220	1105	930	900	905
БСК, 50	1205	1160	1160	1109	1100
Комбинированный, 40	1295	1200	1150	1092	1096

Таблица 7
Изменение водостойкости полимербетона после его сухого подогрева при температуре 80°С в течение 10 часов в зависимости от времени нахождения в воде

Тип отвердителя, количество от веса вяжущего, %	Предел прочности при сжатии до помещения их в воду, кг/см²	Предел прочности при сжатии образцов, хранившихся в воде в течение суток, кг/см²				
		60	120	150	180	240
БСК, 50	1200	1160	1135	1122	1115	1108
Комбинированный, 40	1255	1185	1150	1137	1120	1125

Лучшие показатели водостойкости были получены при сухом подогреве образцов в течение 10 часов при температуре 80°С.

Для определения водостойкости полимербетона с крупным заполнителем изготавливались образцы состава № 3 (табл. 8). Составы были испытаны на водостойкость в минерализованных водах. В качестве минерализованной воды употреблялся 8% раствор сернокислого натрия (табл. 9). Падение прочности полимербетона в минерализованной воде происходит медленнее, чем в чистой [23, 24].

Коррозийное влияние полимербетона на стальную арматуру исследовали по следующей методике [25]. Изготавливались образцы–кубы из состава № 3 размером 10×10×10 см: заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит и гравий крупностью 20–40 мм в соотношении 1:1,5 по весу; вяжущее – 0,1 в.ч., смола ФД; отвердитель – 0,04 в.ч., комбинированный.

В процессе изготовления в каждый образец заделывали стальные шлифованные стержни диаметром 16 мм, длиной 80 мм. Перед бетонированием стержни очищали ацетоном и взвешивали. Образцы хранили в помещении при температуре воздуха 18–20°. После 12-месячного хранения часть образцов раздавливали, стержни извлекали и вновь тщательно взвешивали. Испытание оставшихся образцов производили в 18 и 24-месячном возрастах. Как было установлено, вес стержней не изменялся во времени. Не обнаружены и какие-либо следы коррозии на поверхности стержней. Следовательно,

Таблица 8
Изменение прочности полимербетона на смоле ФД при хранении в воде

№ состава	Предел прочности при сжатии образцов, кг/см²						
	до помещения их в воду	после хранения в воде в течение суток:					
		30	60	90	120	240	360
3	750	620	650	610	590	550	530

Таблица 9
Изменение прочности полимербетона на смоле ФД при хранении в минерализованной воде

№ состава	Предел прочности при сжатии образцов, кг/см²						
	до помещения в минеральную воду	после хранения в воде в течение суток:					
		30	60	90	120	240	360
3	780	715	680	650	670	640	620

среда полимербетона на смоле ФД не оказывает коррозирующего влияния на стальную арматуру [25].

В числителе даны результаты испытаний образцов во влажном состоянии, в знаменателе – результаты испытаний образцов, высушенных до постоянного веса.

Испытания на адгезию с металлической арматурой проводились методом выдергивания стальных стержней гладкого профиля при d = 16 мм марки А–1 из призм 10×10×20 см состава № 3. Глубина заделки стержней составляла 20 см. Выдерживание стержней производилось через 28 и 60 суток после изготовления образцов. Данные испытаний показали, что сцепление арматуры с полимербетоном составляет 108 кг/см² [25].

Модуль упругости полимербетона при сжатии определялся на призмах размером 7×7×22 см тензометрами с базой 20 мм, с ценой деления 1 мм, укрепленными с двух сторон, и индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Нагрузка осуществлялась ступенями, равными 0,1 R призменной. После каждой ступени давалась выдержка продолжительностью 5 мин. В виду упругого последействия отсчеты деформаций производились на каждой ступени дважды: в момент приложения нагрузки для замера упругих деформаций и после выдержки для замера пластической, остаточной деформации.

При растяжении модуль упругости определялся аналогичным путем на образцах-призмах размером 10×10×60 см, с утолщенными торцами. Среднеарифметические данные испытаний 5 образцов были следующими: призменная прочность – 850 кг/см², прочность при растяжении – 90 кг/см², модуль упругости при сжатии – 298 000 кг/см², а при растяжении – 160 000 кг/см².

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний показывают, что полимербетон на смоле ФД мало отличается от полимербетона на мономере ФА. Прочностные показатели у первого больше на 20–25%, а другие свойства малоотличимы.

Стоимость полимербетона на смоле ФД ниже стоимости полимербетона на смоле ФА на 10–15%. Важным преимуществом смолы ФД перед ФА является то, что для ее изготовления не требуется технологического оборудования и рабочей силы.

Для определения оптимальных составов смолы были проведены опыты, аналогичные опытам с дифениламином, и определено, что оптимальное соотношение фурфурола и отходов производства дифениламина – 1:0,75-1, а количество отвердителя (комбинированного) – 40% от веса смолы, которая условно названа нами смолой ФОД (табл. 10).

При исследовании свойств полимербетона на смоле ФОД обнаружено, что он обладает хорошей водостойкостью. Для испытания изготавливались образцы следующих составов:

8. Заполнитель – 1 в.ч., молотый андезит; вяжущее – 0,25 в.ч., смола ФОД; отвердитель – 0,1 в.ч., комбинированный.

9. Заполнитель – 1 в.ч., гравий, песок, молотый песок в соотношении по весу 2,5:1,6:1; вяжущее – 0,15 в.ч., смола ФОД; отвердитель – 0,06 в.ч., комбинированный.

В качестве заполнителя использовался гравий крупностью 5–20 мм, песок Мк = 1,84. Из состава

Таблица 10
Основные свойства полимербетона и полимеррастворов

Физико-технические показатели	Единица измерения	На мономере ФА		На смоле ФД		На смоле ФОД	
		раствор	бетон	раствор	бетон	раствор	бетон
Объемный вес	г/см^3	2,0–2,1	2,1–2,.15	2,0–2,1	2,05–2,2	2,0–2,1	2,1–2,15
Предел прочности при сжатии	кг/см^2	800–1000	600–700	1100–1300	700–750	900–1000	650–750
Предел прочности при растяжении	кг/см^2	80–90	60–70	90–100	80–90	85–90	65–75
Растяжение при изгибе	кг/см^2	180–200	120–160	200–210	180–190	190–195	150–170
Удельная ударная вязкость	кг/см^2	1,8–2,0	2–3	1,8–2,0	2,5–3	1,8–2,0	2,2–3
Усадка линейная	мм/п.м	4,0–4,5	–	3,2–3,6	–	4,0–4,5	–
Усадка объемная	%	4,5–5	–	3,5–3,8	–	4,2–4,5	–
Модуль упругости	кг/см^2	–	200 000–250 000	–	270 000–290 000	–	210 000–240 000
Истираемость	г/см^2	–	0,350	–	0,214	–	0,008
Водопоглощение за 24 часа	% к весу	–	0,010	–	0,012	–	0,008
Водонепроницаемость	атм/сут.	–	18/90	–	18/90	–	18/90

Таблица 11
Изменение прочности полимербетона на смоле ФОД при хранении в воде

№ составов	Предел прочности образцов при сжатии, кг/см^2						
	до помещения в воду	после хранения в воде, сутки					
		30	60	90	120	180	360
8	930	870	840	810	790	765	750
9	550	510	490	475	470	450	460

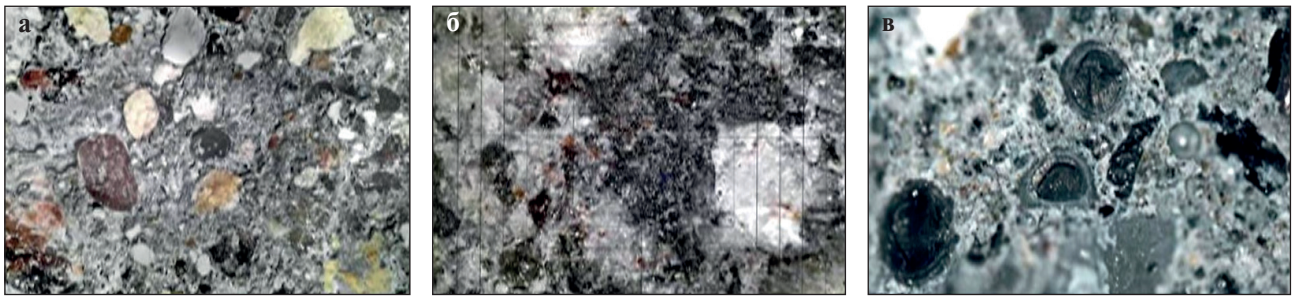

Рис. 7. **Микроструктура образцов полимербетона:** а – на мономере ФА; б – на смоле ФД; в – на смоле ФОД

№ 8 готовились кубы размером 3×3×3 см и из состава № 9 – 7×7×7 см. После хранения при комнатной температуре в течение 60 суток образцы были помещены в воду. Эталоны хранились в сухой среде (табл. 11).

Исследования микроструктуры полимербетонных образцов на мономере ФА, смоле ФД и ФОД выполнялись на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM7500 с приставкой рентгеноспектрального анализа (рис. 7). Полученные результаты коррелируются с выше приведенными экспериментальными данными. Изучение снимком показало, что все три образца имеют схожую структуру. Существенных отличий в структурах не наблюдается.

Предложенные новые образцы полимербетонов на смоле ФД и ФОД имеют улучшенные характеристики и не уступают полимербетону на мономере ФА по прочности, химической стойкости, износостойкости, водостойкости, истираемости и адгезии с металлом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В предлагаемом способе изготовления полимербетона в качестве связующего предложено использовать обычный раствор одного химического продукта в другом. В данном случае не требуется затрат на осуществление технологических операций по получению связующего, и его стоимость будет почти такой же, как стоимость исходных продуктов.

2. Из сравнения технологий получения смолы ФД и изготовления полимербетона, а также из предварительных данных испытаний изучаемых материалов можно определить возможные технико-экономические преимущества полимербетона на смоле ФД перед применяемым в настоящее время в строительстве гидротехнических сооружений полимербетоном на мономере ФА.

3. Полимербетон на смоле ФД обладает высокой прочностью и превышает прочность полимербетона на мономере ФА на 20–25%.

4. Большим преимуществом полимербетона на связующем смеси фурфурола с отходами производства дифениламина по сравнению с другими видами полимербетонов может быть его низкая стоимость. Низкая стоимость полимербетона обусловливается малой стоимостью связующего, состоящего из 1 весовой части фурфурола и 0,75 весовой части отходов химического производства, которые отвозятся в отвал.

5. Технология изготовления полимербетона на связующем – смеси фурфурола и дифениламина, отходов производства дифениламина – аналогична технологии изготовления полимербетона на мономере ФА.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Jakiyayev BD, Moldamuratov ZN, Bayaliyeva GM, Ussenbayev BU, Yeskermessov ZE. Study of local erosion and development of effective structures of transverse bank protection structures. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*. 2021; 9(3): 457–473. Available from: https://doi.org/10.21533/pen.v9i3.2191

2. Kryžanowski A, Mikoš M, Šušteršic J, Planinc, I. Abrasion resistance of concrete in hydraulic structures. *ACI Materials Journal*. 2009; 106(4): 349–356. Available from: https://doi.org/10.14359/56655

3. Balzannikov MI, Mikhasek AA. The use of modified composite materials in building hydraulic engineering structures. *In Procedia Engineering*. 2014; 91: 183–187. Elsevier Ltd. Available from: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.043

4. Mazgaleva A, Bobylskaya V, Reshetnikov M. Concrete Polymer Material for the Protection of Concrete and Reinforced Concrete Structures of Hydraulic Structures from Biological Damage. *In Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022; 402 LNNS: 1148–1158. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96380-4_126

5. Moldamuratov ZhN, Iglikov AA, Sennikov MN, Madaliyeva EB, Turalina MT. Irrigation channel lining using shotcrete with additives. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(3): 227–240. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-3-227-240. – EDN: BIEVUB.

6. Elshin IM. Polymer concretes in construction of hydraulic structures. *Hydrotechnical Construction*. 1981; 15(5): 269–272. Available from: Available from: https://doi.org/10.1007/BF01426730

7. Susilorini RM, Iskandar IR, Santosa BI. Long-Term Durability of Bio-Polymer Modified Concrete in Tidal Flooding Prone Area: A Challenge of Sustainable Concrete Materials. *Sustainability (Switzerland)*. 2022; 14(3): 1565. Available from: https://doi.org/10.3390/su14031565

8. Onyshchenko A, Garkusha M, Klymenko M. Analysis of design and construction of hydrotechnical structures of transport construction in the from of water pipes made of polimer matters. *Dorogi i Mosti*. 2021; 24: 112–133. Available from: https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.24.112

9. Galvão JCA, Portella KF, Joukoski A, Mendes R, Ferreira ES. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*. 2011; 25(2): 1049–1055. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073

10. Sennikov MN, Omarova GE, Moldamuratov ZN. Study of the development of soil in the formation of channels hydraulic and static stability of cross-sectional shapes. *World Applied Sciences Journal*. 2014; 30(1): 99–104. Available from: https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.30.01.14008

11. Mazitova AK, Aminova GK, Buylova EA, Zaripov II, Vikhareva IN. Biodegradable polymer materialsand modifying additives: state of the art. Part III. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(2): 73–78. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-2-73-78

12. Abdrakhmanova LA, Galeev RR, Khantimirov AG, Khozin VG. Efficiency of carbon nanostructures in the composition of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(3): 150–157. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-3-150-157

13. Morozova MV, Ayzenshtadt AM, Akulova MV, Frolova MA, Shamanina AV. Evaluation of the possibility to use powders of polymineral silica-containing sands as a hydrophobizing coating. *Nanotechnologies in Construction*. 2021; 13(4): 222–228. Available from: https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-4-222-228

14. Baldanov AB, Bokhoeva LA, Shalbuev DV, Tumurova TB. Collagen Based Bio-Additives in Polymer Composites. *Nanotechnologies in Construction*. 2022; 14(2): 137–144. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-2-137-144

15. Grzesiak S, Pahn M, Klingler A, Akpan EI, Schultz-Cornelius M, Wetzel B. Mechanical and Thermal Properties of Basalt Fibre Reinforced Polymer Lamellas for Renovation of Concrete Structures. *Polymers*. 2022; 14(4): 790. Available from: https://doi.org/10.3390/polym14040790

16. Kujawa W, Tarach I, Olewnik-Kruszkowska E, Rudawska A. Effect of polymer additives on the microstructure and mechanical properties of self-leveling rubberised concrete. *Materials*. 2022; 15(1): 249. Available from: https://doi.org/10.3390/ma15010249

17. Bondarev BA, Pankov AE, Belyaev TK. The influence of structure forming factors on low-cycle fatigue of a polymer composite material based on furfural acetone monomer (FAM). *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2019; 10(2): 119–125. Available from: https://doi.org/10.15593/2224-9826/2019.1.10

18. Gutarowska B, Kotynia R, Bieliński D, Anyszka R, Wreczycki J, Piotrowska M, Dziugan P. New sulfur organic polymer-concrete composites containing waste materials: Mechanical characteristics and resistance to biocorrosion. *Materials*. 2019; 12(16): 2602. Available from: https://doi.org/10.3390/ma12162602

19. Korneev AD, Meleshkin MF, Borkov PV. The durability of composite materials based on furfurolacetone monomer. *Construction Materials*. 2013; 15: 64–65.

20. Kumar A, Arora HC, Kapoor NR, Mohammed MA, Kumar K, Majumdar A, Thinnukool O. Compressive Strength Prediction of Lightweight Concrete: Machine Learning Models. *Sustainability (Switzerland)*. 2022. 14(4): 2404. Available from: https://doi.org/10.3390/su14042404

21. Flohr A, Osburg A. Design and Development of Concretes for Special Rehabilitation Tasks. *In MATEC Web of Conferences*. 2018; 199: 07001. EDP Sciences. Available from: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819907001

22. Jin-Min G, Yi W, Yi-Shun Z. Experimental research on modified polymer concrete. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2014; 19: 4167–4176.

23. Gunasekaran M. Polymer-Impregnated Concrete Insulators/Insulating Structures. *In 2019 IEEE Electrical Insulation Conference, EIC*. 2019; 193–196. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Available from: https://doi.org/10.1109/EIC43217.2019.9046588

24. Tchetgnia-Ngassam IL, Lespinasse F, Marceau S, Chaussadent T. Physico-chemical properties and durability of polymer modified repair materials. *In Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III – Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR*. 2012. 916–921. Available from: https://doi.org/10.1201/b12750-152

25. Manapbayev B, Alimbayev B, Amanbayev E, Kabdushev A., Moldamuratov Zh. Study of internal corrosion on the turning angles in steel pipes. *E3S Web of Conferences*. 2021; 225:01004. Available from: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202122501004

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Молдамуратов Жангазы Нуржанович – PhD, ассоциированный профессор, директор Центра науки, ТОО «Международная образовательная корпорация», Алматы, Казахстан, zhanga_m_n@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-4573-1179

Имамбаева Райхан Сальтайевна – кандидат технических наук, академический профессор, декан факультета общего строительства, ТОО «Международная образовательная корпорация», Алматы, Казахстан, rimambayeva@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0806-3308

Имамбаев Нурлан Сальтаевич – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры «Строительство и дизайн», НАО «Северо-Казахстанский университет имени М. Козыбаева», Петропавловск, Казахстан, imambaevn@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-3104-8878

Игликов Алтайы Аманкулович – магистр, старший преподаватель кафедры «Строительство и производство материалов», НАО «Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати», Тараз Казахстан, altaiy_1976@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0134-6989

Таттибаев Сагынтай Жакыпалиевич – докторант образовательной программы «Гидротехническое строительство и сооружения», НАО «Таразский региональный университет имени М.Х. Дулати», Тараз, Казахстан, tsagin75@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-2687-0189

ВКЛАД АВТОРОВ

Молдамуратов Ж.Н. – научное руководство; концепция исследования; развитие методологии; итоговые выводы.

Имамбаева Р.С. – написание статьи, научное редактирование текста.

Имамбаев Н.С. – проведение экспериментальных работ; обработка экспериментальных данных; накопление материала.

Игликов А.А. – подготовка образцов, написание статьи, научное редактирование текста.

Таттибаев С.Ж. – проведение экспериментальных работ; обработка экспериментальных данных; накопление материала.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.08.2022; одобрена после рецензирования 23.08.2022; принята к публикации 25.08.2022.