

УДК 691.322

Тип статьи: обзорная статья

ГРНТИ 67.09.00

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия

EDN ayfqsm

DOI 10.62980/2076-0655-2024-247-261

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ОТХОДОВ ПОЛИМЕРОВ В КАЧЕСТВЕ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ БЕТОНА

Баруздин А.А.<sup>1</sup>, Закревская Л.В.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Владимирский Государственный Университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

### АННОТАЦИЯ

Приведены основные аспекты применения отходов полимеров в качестве заполнителей бетона. На основании анализа литературных источников установлено, что дробленые полимерные отходы, в том числе трудно утилизируемых сшитых полимеров можно использовать в качестве заполнителя для бетона, что может значительно снизить негативное влияние их на окружающую среду. Введение полимерного заполнителя снижает плотность и теплопроводность получаемого бетона, повышает его износостойкость, стойкость к эрозии и химическую стойкость, может несколько уменьшить усадку и образование микротрещин. В то же время, бетоны с полимерным заполнителем обладают пониженными механическими характеристиками по сравнению с традиционными бетонами, что современные ученые связывают в большей степени с недостаточной адгезией полимерного заполнителя к цементной матрице, их упругой несовместимостью и ограниченной реакцией гидратации вблизи зерен полимерного заполнителя. Для повышения адгезии заполнителя к цементной матрице необходимо обеспечить неровную, шероховатую поверхность частиц полимера. Возможно нанесение на частицы заполнителя специальных составов, повышающих адгезионные свойства или введение полимерных добавок в цементную матрицу. Для обеспечения высоких механических характеристик бетонов с полимерными отходами предпочтительнее использовать отходы с наибольшим модулем упругости для уменьшения упругой несовместимости заполнителя и матрицы и обеспечения разгрузки растворной части. Бетоны с заполнителем из полимерных отходов могут найти применение в конструкциях полов, элементов мощения, фасадных элементов, стеновых блоков. Применение полимерных отходов также возможно в составе химически стойких бетонов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Рециклинг, полимерные отходы, заполнитель, бетон, плотность, характер разрушения, пластичность, химическая стойкость, износостойкость, адгезия, модуль упругости.

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы применения отходов полимеров в качестве заполнителей бетона // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 247-261, DOI 10.62980/2076-0655-2024-247-261, EDN ayfqsm

Type of article - review article

OECD 2.01 Civil engineering

IM ENGINEERING, CIVIL

EDN ayfqsm

DOI 10.62980/2076-0655-2024-247-261

## PROSPECTS FOR THE USE OF POLYMER WASTE AS CONCRETE AGGREGATES

Baruzdin A.A.<sup>1</sup>, Zakrevskaya L.V.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov

### ABSTRACT

The main aspects of the use of polymer waste as concrete aggregates are presented. Based on the analysis of literature sources, it was found that crushed polymer waste, including hard to recycle crosslinked polymers, can be used as an aggregate in concrete, which can significantly reduce their negative impact on the environment. The introduction of a polymer aggregate reduces the density and thermal conductivity of the concrete, increases its abrasion resistance, erosion resistance and chemical resistance, can slightly reduce shrinkage and the formation of microcracks. At the same time, concretes with polymer aggregate have reduced mechanical characteristics compared to traditional concretes, which modern scientists attribute to insufficient adhesion of the polymer aggregate to the cement matrix, their elastic incompatibility and limited hydration reaction near the grains of the polymer aggregate. To increase the adhesion of the aggregate to the cement matrix, it is necessary to provide an irregular, rough surface of the polymer particles. It is possible to apply special compositions to the aggregate particles that increase the adhesive properties or introduce polymer additives into the cement matrix. To ensure high mechanical characteristics of concretes with polymer waste, it is preferable to use waste with the highest modulus of elasticity to reduce the elastic incompatibility of the aggregate and the matrix and ensure unloading of the mortar part. Concretes with polymer waste aggregate can be used in the construction of floors, tile elements, facade elements, wall blocks. The use of polymer waste is also possible in the composition of chemically resistant concretes.

**KEY WORDS:** Recycling, polymer waste, aggregate, concrete, density, fracture pattern, plasticity, chemical resistance, abrasion resistance, adhesion, modulus of elasticity.

**FOR CITATION:** Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Prospects for the use of polymer waste as concrete aggregates // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No-3. – Pp. 247 – 261, DOI 10.62980/2076-0655-2024-247-261, EDN ayfqsm

## ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XX-XXI в. в мировом сообществе остро встает вопрос накопления полимерных отходов и их отрицательного влияния на окружающую среду. Полимерные изделия воздействуют на здоровье населения на протяжении всего цикла их жизни. Производство полимеров сопровождается выбросами вредных веществ: бутadiен, талуол, бензол, стирол. Традиционная переработка полимеров также приводит к загрязнению среды, так как они зачастую изначально содержат токсичные добавки, которые используются для придания желаемых свойств [1].

Ученые говорят о стремительно возрастающей проблеме микропластика, который образуется в процессе естественной деградациии полимерных отходов [2]. Полимерные изделия разрушаются в окружающей среде в результате фотолитического, механического, биологического разложения. Они становятся хрупкими и распадаются, образуя микроскопические фрагменты. Учитывая тот факт, что даже крупные пластиковые отходы часто попадают в организм различных животных, то микропластицики пластика поглощаются и накапливаются еще большим спектром живых организмов. В последствии частицы микропластика могут оказывать отрицательное механическое и токсичное воздействие на организмы, проникать в кровь и клеточные мембраны.

На рисунке 1 представлены данные о доле переработке и утилизации полимерных отходов в России и некоторых других странах [1,3].

## INTRODUCTION

At the turn of the XX-XXI century, the issue of accumulation of polymer waste and its negative impact on the environment is acute in the world community. Polymer products affect the health of the population throughout their entire life cycle. Polymer production is accompanied by emissions of harmful substances: butadiene, toluene, benzene, styrene. Traditional polymer processing also leads to environmental pollution, as they often initially contain toxic additives that are used to impart the desired properties [1].

Scientists talk about the rapidly increasing problem of microplastics, which is formed during the natural degredation of polymer waste [2]. Polymer products are destroyed in the environment as a result of photolytic, mechanical, and biological decomposition. They become brittle and disintegrate to form microscopic fragments. Given the fact that even large plastic waste often enters the body of various animals, microparticles of plastic are absorbed and accumulated by an even larger range of living organisms. Subsequently, microplastic particles can have a negative mechanical and toxic effect on organisms, penetrate into the blood and cell membranes.

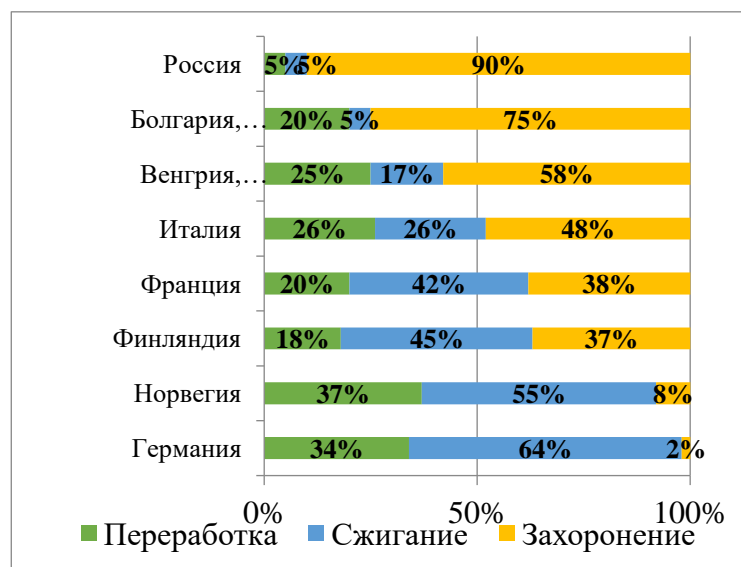
Figure 1 shows data on the share of recycling of polymer waste in Russia and some other countries [1,3].

## РИСУНОК 1

## ДОЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ В РОССИИ И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ СТРАНАХ

Figure 1

The share of recycling and utilization of polymer waste in Russia and some other countries



В России ежегодно образуется 3,5-5 млн. т. пластиковых отходов, при этом 90% отходов не перерабатывается, а отправляется на полигоны для хранения. В странах Евросоюза доля переработки выше, но ведущее значение занимает либо захоронение, либо получение энергии (сжигание), что также негативно отражается на состоянии окружающей среды [1,3].

При этом стратегия развития химического и нефтехимического комплекса Российской Федерации на период до 2030 года предполагает рост потребления изделий из пластмасс на душу населения с 32,3 кг/чел в 2012 г. до 89,8 кг/чел в 2030 г. [4].

In Russia 3.5-5 million tons of plastic waste are generated annually, while 90% of the waste is not recycled, but sent to landfills for storage. In the European Union countries, the share of recycling is higher, but either burial or energy production (incineration) is of leading importance, which also negatively affects the state of the environment [1,3].

At the same time, the strategy for the development of the chemical and petrochemical complex of the Russian Federation for the period up to 2030 assumes an increase in the consumption of plastic products per person from 32.3 kg/person in 2012 to 89.8 kg/person in 2030 [4].

Полимерные отходы условно можно разделить на хорошо утилизируемые, средне утилизируемые и трудно утилизируемые. Часть отходов однородны по своему фракционному, химическому, фазовому составу и не загрязнены. Такие отходы легко переработать и использовать в качестве альтернативы исходному сырью. Большая же часть полимерных отходов представляет собой смесь со стеклом, металлом, бумагой, бытовыми и строительными отходами, что вынуждает прибегать к процедурам очистки и сортировки [5]. Часть отходов, такие как сшитые полимеры, трудно поддаются переработке без трудоемких, дорогостоящих технологий.

К традиционным технологиям, используемым в переработке пластмасс, относятся: измельчение, прессование со связующим, формование под давлением, экструзия, химическое разложение, сжигание и получение энергии [6].

Измельченные отходы полимеров возможно использовать в качестве заполнителей бетонов и композиционных строительных материалов на неорганическом вяжущем. Такое решение может как улучшать часть свойств бетона, так и снижать другие.

#### **Задачи исследования:**

- оценка и анализ целесообразности использования отходов полимеров в качестве заполнителей бетонов;
- анализ особенностей и закономерностей изменения свойств бетонов вследствие использования заполнителей из полимерных отходов;
- выявление наиболее перспективных областей применения бетонов с полимерными заполнителями;

#### **Свойства бетонов с полимерным заполнителем**

Свойства бетонов с полимерным заполнителем полностью объясняются свойствами самого заполнителя. Полимерные заполнители обладают меньшей плотностью и водопоглощением, более высоким пределом прочности при растяжении, меньшей температурой плавления, высокой химстойкостью и износостойкостью [3].

Введение в состав бетонной смеси полимерных заполнителей может ухудшать её удобоукладываемость. Такой эффект объясняется неоднородной формой заполнителя, что снижает текучесть бетонной смеси [3,7–11]. При этом удобоукладываемость закономерно повышается при введении в такую смесь пластификатора [12].

Применение полимерного заполнителя снижает плотность бетона, что связано со сниженным удельным весом самого заполнителя по сравнению с природным сырьем [3,7,8,11–19].

Структура бетона с полимерным заполнителем отличается от структуры традиционного бетона. Исследования показывают, что использование переработанных пластиковых заполнителей увеличивает содержание воздуха в получаемом бетоне. Такой эффект связан с недостаточным взаимодействием полимерного сырья с цементной матрицей, что приводит к увеличению пористости такого бетона [3]. При применении полимерного заполнителя зазор между его частицами и цементной матрицей шире, чем в случае с традиционными заполнителями. Это связано с гладкой поверхностью полимерных отходов, их гидрофобной природой, которая ограничивает движение воды и замедляет реакцию гидратации вблизи такого заполнителя [20].

Прочность бетона на сжатие, растяжение и изгиб уменьшается с увеличением содержания заполнителя из полимерных отходов. Прочность бетона, содержащего

Polymer waste can be conditionally divided into well-recyclable, medium-recyclable and difficult to recycle. Some of the waste is homogeneous in its fractional, chemical, and phase composition and is not contaminated. Such waste is easy to recycle and use as an alternative to raw materials. Most of the polymer waste is a mixture with glass, metal, paper, household and construction waste, which forces us to resort to cleaning and sorting procedures [5]. Some of the waste, such as cross-linked polymers, are difficult to recycle without time-consuming, expensive technologies.

The traditional technologies used in the processing of plastics include: grinding, adhesive pressing, compression molding, extrusion, chemical dissolution, incineration and energy production [6].

Crushed polymer waste can be used as aggregates of concrete and composite building materials based on an inorganic binder. Such a solution can both improve some of the properties of concrete and reduce others.

#### **Research objectives:**

- assessment and analysis of the feasibility of using polymer waste as concrete aggregates;
- analysis of the features and patterns of changes in the properties of concrete due to the use of aggregates from polymer waste;
- identification of the most promising areas of application of concrete with polymer aggregates;

#### **Properties of concrete with polymer aggregate**

The properties of concrete with a polymer aggregate are fully explained by the properties of the aggregate itself. Polymer aggregates have lower density and water absorption, higher tensile strength, lower melting point, higher chemical resistance and abrasion resistance [3].

The introduction of polymer aggregates into the concrete mix may worsen its workability. This effect is explained by the heterogeneous shape of the aggregate, which reduces the fluidity of the concrete mixture [3,7–11]. At the same time, workability increases when a plasticizer is introduced into such a mixture [12].

The use of a polymer aggregate reduces the density of concrete, which is associated with a reduced specific gravity of the aggregate itself compared to natural raw materials [3,7,8,11–19].

The structure of concrete with polymer aggregate differs from that of traditional concrete. Research shows that the use of recycled plastic aggregates increases the air content in the resulting concrete. This effect is associated with insufficient interaction of polymer raw materials with the cement matrix, which leads to an increase in the porosity of such concrete [3]. When using a polymer aggregate, the gap between its particles and the cement matrix is wider than in the case of traditional aggregates. This is due to the smooth surface of polymer waste, their hydrophobic nature, which restricts the movement of water and slows down the hydration reaction near aggregate [20].

The compressive, tensile and flexural strength of concrete decreases with an increase in the content of polymer waste aggregate. The strength of concrete containing heterogeneous polymer waste decreases more clearly

неоднородные полимерные отходы снижается более явно, чем в случае с однородными. Также к более значительной потере прочности приводит использование заполнителей из пластиковых отходов с более низким модулем упругости. Снижение прочности ученые объясняют низкой прочностью сцепления полимерного заполнителя и цементной матрицы, ограниченной реакцией гидратации вблизи зерен пластикового заполнителя, сниженным модулем упругости такого заполнителя по сравнению с природным сырьем, высоким содержанием воздуха и пористостью такого бетона, возможным разрушением пластиковых заполнителей под действием щелочной среды [3,7,11,14–17,19].

В то же время при небольших дозировках заполнителей из полимерных отходов возможно незначительное улучшение механических характеристик бетона. Авторы [15,16] считают, что при применении пластиковых отходов неправильной формы с шероховатой поверхностью и достаточно мелкой фракции снижение прочности можно свести к минимальному. Статья [9] сообщает о приросте прочности на сжатие и изгиб на 6-8 и 8-12% соответственно при замене в бетонной смеси песка на отходы полиэтилентерефталата (ПЭТ) на 5%. Введение в состав бетона с полимерными отходами пластификатора снижает негативный эффект уменьшения механических характеристик на 5% [12].

Использование в составе бетона переработанных пластиковых волокон (фибры) приводит к увеличению прочности на сжатие, растяжение и изгиб. Использование пластиковых волокон с высоким пределом прочности при растяжении приводит к большему эффекту увеличения прочности бетона. На прочность также влияют соотношение сторон волокна и характер его поверхности (гладкая, рельефная, гофрированная). При испытании при образовании трещин волокна продолжают воспринимать нагрузку, за счет того, что напряжение передается от матрицы к волокнам [3].

Статья [18] посвящена исследованию по усилению штукатурного раствора порошком из отходов стекла и волокнами из пластиковых отходов типа ПЭТ. Авторами отмечается увеличение прочности штукатурки, армированной 1-2% пластиковых волокон от массы вяжущего.

Модуль упругости бетона с пластиковыми заполнителями, как правило, ниже, чем у бетона с природными заполнителями. Снижение увеличивается при большей неоднородности заполнителя и уменьшении его модуля упругости. Из-за незначительного модуля упругости самого заполнителя его повышенное включение в смесь может увеличивать упругую несовместимость между ним и матрицей, что приводит к концентрации напряжений на границе раздела фаз [3,7].

При использовании пластиковых заполнителей изменяется характер диаграммы напряжений-деформаций при сжатии бетона. При увеличении содержания такого заполнителя разрушение наступает при меньшей нагрузке, однако, при больших деформациях [15]. При испытании бетона заполнитель не разрушается, а вытягивается наружу [7]. В случае бетона с полимерным заполнителем не наблюдается типичного хрупкого разрушения как в случае с традиционным бетоном. По мере увеличения содержания полимерного заполнителя характер разрушения становится более пластичным. При разрушении частицы пластика образуют между двумя поверхностями связь, предотвращая разрушение всего образца. Образцы бетона с включением пластиковых заполнителей способны выдерживать нагрузку в течение нескольких минут после начала разрушения. Аналогичная картина

than in the case of homogeneous ones. Also, the use of aggregates from plastic waste with a lower modulus of elasticity leads to a more significant loss of strength. Scientists explain the decrease in strength by the low adhesion strength of the polymer aggregate and the cement matrix, limited hydration reaction near the grains of the polymer aggregate, reduced modulus of elasticity of aggregate compared to natural raw materials, high air content and porosity of such concrete, possible destruction of polymer aggregates under the action of an alkaline [3,7,11,14-17,19].

At the same time, with small dosages of aggregates from polymer waste, a slight improvement in the mechanical characteristics of concrete is possible. The authors [15,16] report that when using irregularly shaped plastic waste with a rough surface and a sufficiently fine fraction, the decrease in strength can be reduced to minimal. Article [9] reports an increase in compressive and flexural strength by 6-8 and 8-12%, respectively, when replacing sand in a concrete mixture with polyethylene terephthalate (PET) waste by 5%. The introduction of a plasticizer into the composition of concrete with polymer waste reduces the negative effect of reducing mechanical characteristics by 5% [12].

The use of recycled polymer fiber in the composition of concrete leads to an increase in compressive, tensile and flexural strength. The use of plastic fibers with a high tensile strength leads to a greater effect of increasing the strength of concrete. The strength is also influenced by the aspect ratio of the fiber and the nature of its surface (smooth, embossed, corrugated). During the crack formation test, the fibers continue to perceive the load due to the fact that the stress is transferred from the matrix to the fibers [3].

The article [18] is devoted to a study on reinforcement plaster mortar with powder from glass waste and fibers from plastic waste such as PET. The authors report an increase in the strength of plaster reinforced with 1-2% plastic fibers by weight of the binder.

The modulus of elasticity of concrete with polymer aggregates is usually lower than that of concrete with natural aggregates. The decrease increases with greater heterogeneity of the aggregate and a decrease in its modulus of elasticity. Due to the insignificant modulus of elasticity of the aggregate, its increased inclusion in the mixture can increase the elastic incompatibility between it and the matrix, which leads to stress concentration at the boundary of the phases [3,7].

When using polymer aggregates, the nature of the stress-strain diagram changes during concrete compression. With an increase in the content of such an aggregate, destruction occurs with a lower load, however, with large deformations [15]. When testing concrete, the aggregate is not destroyed, but is pulled outwards [7]. In the case of concrete with a polymer aggregate, there is no typical brittle destruction as in the case of traditional concrete. As the content of the polymer aggregate increases, the nature of the destruction becomes more plastic. When the plastic particles are destroyed, they form a bond between the two surfaces, preventing the destruction of the entire sample.

Concrete samples with the inclusion of plastic aggregates are able to stand the load for several minutes after

наблюдается в случае испытания такого бетона на растяжение, разрушение происходит более постепенно. Авторы статьи [21] отмечают, что в традиционном бетоне природный заполнитель при испытании может разрушаться, растрескиваться, тогда как полимерный заполнитель деформируется вместо дробления и растрескивания. Введение в бетон полимерного заполнителя также может останавливать распространение микротрещин [11].

При использовании заполнителей из полимерных отходов может повышаться стойкость бетона к истиранию. Этот эффект связан с тем, что полимерный заполнитель более прочный и стойкий к истиранию чем природное сырье [3]. Однако существует и обратная точка зрения, авторы работы [7] отмечают снижение стойкости бетона к истиранию. Таким образом, можно сделать вывод, что изменение стойкости бетона к истиранию зависит от вида и качества используемых полимерных отходов.

Статья [10] сообщает о повышении стойкости к эрозии (истирание потоком воды, насыщенным мелкими частицами каменных материалов) бетона с частичной заменой песка на 5% отходов ПЭТ и полиэтилена низкой плотности. Исследуемые образцы бетона также были применены при ремонте поверхности плотины и по утверждению авторов не вызвали технических проблем.

подавляющее большинство видов полимеров не поддаются биологическому разложению и обладают высокой химической стойкостью, поэтому могут сохраняться в естественной среде десятилетиями и веками. При добавлении в бетон в высокощелочной среде полимерные отходы также остаются стабильными. Однако, есть исследования подтверждающие высокую степень разложения ПЭТ волокон в толще бетона на сроках от 150 дней до года. Это связано с воздействиями ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  [14].

При использовании в бетоне заполнителя из полимерных отходов, не смотря на низкое водопоглощение самого заполнителя, зачастую возможно увеличение водопоглощения бетонного камня. Это связано с тем, что из-за недостаточного взаимодействия пластиковых частиц и минеральной матрицы камень становится пористым [3].

Статья [19] посвящена исследованиям, направленным на изучение свойств бетонных смесей, в которых мелкий заполнитель из речного песка был заменен на гранулы, изготовленные путем измельчения отходов ПВХ труб. Отмечается, что бетоны на основе ПВХ заполнителя обладают повышенной устойчивостью к проникновению хлорид ионов. Однако, с другой стороны, авторы работ [8,13] сообщают о повышенном проникновении хлорид-ионов в бетонах с использованием отходов ПЭТ и пенополиуретана за счет больших показателей водопоглощения, водопроницаемости и пористости камня.

Многие исследования сообщают, что бетоны с заполнителями из отходов полимеров обладают большей усадкой по сравнению с контрольными образцами [15,22,23]. Это связано с высокой деформативностью полимерных заполнителей, в результате чего они обеспечивают низкое сопротивление усадке цементного камня. Однако некоторые исследователи получили противоположные результаты. Статья [8] сообщает, что бетоны с заполнителем на основе ПЭТ обладают меньшей усадкой. Свое наблюдение авторы связывают с низким водопоглощением пластиковых заполнителей, таким образом, остается больше воды для увлажнения цементного камня, что влияет на снижение усадки. Авторы работы [19] наблюдали снижение усадки при увеличении содержания

the start of destruction. A similar pattern is observed in the case of tensile testing test of such concrete, the destruction occurs more gradually. The authors of the article [21] reporting, that in traditional concrete, the natural aggregate can be destroyed and cracked during testing, whereas the polymer aggregate is deformed instead of crushing and destroying. The introduction of a polymer aggregate into concrete can also stop the spread of microcracks [11].

When using aggregates from polymer waste, the abrasion resistance of concrete can increase. This effect is due to the fact that the polymer aggregate is more durable and resistant to abrasion than natural raw materials [3]. However, there is also a reverse point of view, the authors of the work [7] report a decrease in the abrasion resistance of concrete. Thus, it can be concluded that the change in the abrasion resistance of concrete depends on the type and quality of the polymer waste used.

Article [10] reports an increase in the resistance to erosion (abrasion by a stream of water saturated with small particles of stone materials) of concrete with partial replacement of sand by 5% of PET and low-density polyethylene waste. The studied concrete samples were also used to repair the surface of the dam and, according to the authors, did not cause technical problems.

The most of polymer types are not biodegradable and have high chemical resistance, therefore they can be preserved in the natural environment for decades and centuries. When added to concrete in a highly alkaline environment, polymer waste also remains stable. However, there are studies confirming a high degree of decomposition of PET fibers in the concrete for periods from 150 days to a year. This is due to the influence of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{OH}^-$  [14].

When using a polymer waste aggregate in concrete, despite the low water absorption of the aggregate itself, it is often possible to increase the water absorption of concrete stone. This is due to the fact that due to the insufficient interaction of plastic particles and the mineral matrix, the stone becomes porous [3].

The article [19] is devoted to research aimed at studying the properties of concrete mixtures in which a fine aggregate from river sand was replaced with granules produced by crushing waste PVC pipes. It is reported that PVC-based concrete aggregates have increased resistance to the penetration of chloride ions. However, on the other hand, the authors of [8,13] report increased penetration of chloride ions in concretes using PET waste and polyurethane foam due to high water absorption, water permeability and porosity of the stone.

Many studies report that concretes with aggregates from polymer waste have a greater shrinkage compared to control samples [15,22,23]. This is due to the high deformability of polymer aggregates, as a result of which they provide low resistance to shrinkage of cement stone. However, some researchers have obtained the opposite results. Article [8] reports that concretes with PET-based aggregate have less shrinkage. The authors attribute their observation to the low water absorption of plastic aggregates, thus there is more water left to moistening the cement stone, which affects the reduction of shrinkage. The authors of the work [19] observed a decrease in shrinkage with an increase in the content of

ПВХ заполнителя в составе легкого керамзитобетона. Они связывают это с тем, что ПВХ гранулы не проницаемы, не впитывают воду, и не дают усадки, таким образом снижается и общая усадка бетона.

В то же время, при использовании в бетоне полимерных волокон (фибры) многие исследования сообщают о снижении усадки [24–26]. Эффект армирования волокнами также проявляется в снижении количества трещин, максимального раскрытия трещин и общей площади трещин. По распространенному мнению, усадка уменьшается за счет того, что при высыхании волокна сдерживают растягивающие напряжения, возникающие вдоль их поверхности. Однако, с другой стороны, статья [27] сообщает, что армирование полипропиленовыми волокнами практически не изменяет усадку изготовленных бетонов на легком заполнителе. Авторы статьи [28] получили результат, заключающийся в том, что неармированные образцы обладали наименьшей усадкой, а образцы, армированные переработанными ПЭТ волокнами или полипропиленовыми волокнами имели усадку на 8-25% больше, но в случае ограниченной усадки волокна повысили сопротивление растяжению и замедлили образование макротрещин.

Статья [29] посвящена исследованию усадки и ползучести бетона с заполнителем из отходов пенополистирола в виде гранул. Усадка по результатам исследования увеличилась на 39-40% по сравнению с эталонными образцами. Также отмечается более высокая ползучесть бетона с заполнителем из пенополистирола, авторы это объясняют неспособностью частиц с низким модулем упругости сдерживать ползучесть цементной матрицы.

Авторы [30] провели исследования по замене песка в составе цементного раствора на отходы ударопрочного полистирола и установили, что вне зависимости от процента замены, растворы остаются такими же устойчивыми к циклам замораживания и оттаивания. В статье [31] исследованы легкие бетоны с заполнителем из термически модифицированного пенополистирола. Авторы отмечают, что бетоны с крупнозернистым переработанным пенополистирольным заполнителем более чувствительны к попеременному замораживанию и оттаиванию, чем бетоны с мелким переработанным заполнителем. Наилучшей морозостойкостью обладает легкий бетон, в составе которого присутствует крупный натуральный заполнитель и мелкий из переработанного модифицированного пенополистирола. В [25] сообщается, что армированные полипропиленовой фиброй бетоны обладают несколько большей морозостойкостью, авторы связывают данное свойство со способностью распределенной фибры сдерживать растягивающие напряжения возникающие из-за замерзания воды в порах бетона.

Согласно [32] присутствие полимерных отходов в составе бетона может улучшать его теплоизоляционные свойства. По результатам испытания бетоны с отходами ПЭТ бутылок обладают на 10-18% лучшей теплоизоляционной способностью по сравнению с обычным бетоном. Авторы [30] сообщают, что растворы содержащие в качестве частичной замены песка отходы ударопрочного полистирола обладают сниженной на 13-56% теплопроводностью. Это связано с меньшей теплопроводностью переработанного заполнителя по сравнению с песком.

Авторами [33] исследована способность бетона с отходами ПЭТ выдерживать изгибающие нагрузки при повышенных температурах. Установлено, что при 200 °C заметных изменений не наблюдается, тогда как при 400 и 600 °C

PVC aggregate in the composition of lightweight expanded clay concrete. They attribute this to the fact that PVC granules are impermeable, do not absorb water, and do not shrink, thus reducing the overall shrinkage of concrete.

At the same time, when polymer fibers are used in concrete, many studies report a decrease in shrinkage [24-26]. The effect of fiber reinforcement is also manifested in reducing the number of cracks, maximum crack opening and total crack area. According to popular belief, shrinkage is reduced due to the fact that, when drying, the fibers restrain the tensile stresses that arise along their surface. However, on the other hand, article [27] reports that reinforcement with polypropylene fibers practically does not change the shrinkage of manufactured concretes on a light filler. The authors of the article [28] obtained the result that the non-reinforced samples had the least shrinkage, and the samples reinforced with recycled PET fibers or polypropylene fibers had a shrinkage of 8-25% more, but in the case of limited shrinkage, the fibers increased tensile resistance and slowed down the formation of macrocracks.

The article [29] is devoted to the study of shrinkage and creep of concrete with a aggregate from foam polystyrene waste in the form of granules. The shrinkage according to the results of the study increased by 39-40% compared to the reference samples. There is also a higher creep of concrete with expanded foam polystyrene aggregate, the authors explain this by the inability of particles with a low modulus of elasticity to withstand the creep of the cement matrix.

The authors [30] conducted studies on the replacement of sand in the composition of cement mortar with high-impact polystyrene waste and found that, regardless of the percentage of replacement, the mortars remain the same resistant to freezing and thawing cycles. In the article [31], lightweight concretes with an aggregate made of thermally modified foam polystyrene are studied. The authors report that concretes with coarse-grained recycled polystyrene aggregate are more sensitive to alternate freezing and thawing than concretes with fine recycled aggregate. Lightweight concrete has the best frost resistance, which contains a large natural aggregate and a small one made of recycled modified foam polystyrene. In [25] it is reported that concrete reinforced with polypropylene fiber has a slightly higher frost resistance, the authors associate this property with the ability of distributed fiber to restrain tensile stresses arising from freezing of water in the pores of concrete.

According to [32], the presence of polymer waste in the composition of concrete can improve its thermal insulation properties. According to the test results, concretes with PET bottle waste have 10-18% better thermal insulation ability compared to traditional concrete. The authors [30] report that mortars containing high-impact polystyrene waste as a partial replacement of sand have a reduced thermal conductivity of 13-56%. This is due to the lower thermal conductivity of the recycled aggregate compared to sand.

The authors [33] investigated the ability of concrete with PET waste to withstand flexural loads at high temperatures. It was found that at 200 °C there are no noticeable changes, whereas at 400 and 600 °C there is a

наблюдается снижение прочности таких бетонов при изгибе, причем оно становится более значительным при увеличении содержания ПЭТ.

Статья [17] посвящена исследованию растворов с использованием переработанных пластиковых пакетов. Авторы отмечают следующее: растворы с добавлением пластиковых отходов более стойки в кислых средах, при погружении образцов в кислоту их потеря веса уменьшалась при увеличении содержания пластиковых отходов. Также авторы отмечают, что образцы с добавлением отходов пластмасс меньше подвержены растрескиванию вследствие усадки, в то время как контрольный образец при испытании на ограниченную усадку имел трещины, составы с пластиковыми отходами не имели трещин или имели, но намного менее интенсивные. Помимо этого, авторы исследовали поведение и прочность образцов при различных температурах и сделали вывод, что при нагреве до 100-125 °С образцы на основе пластиковых отходов сохраняют свой внешний вид и имеют повышенную прочность, что может быть связано с ускорением реакций гидратаций и расширением отходов, которое создает внутренние напряжения. При увеличении температуры более 125 °С образцы теряют свой внешний вид и разрушаются.

#### **Свойства бетонов с заполнителями из отходов сшитых полимеров**

Большинство исследований в области полимерных заполнителей для бетона направлены на переработку отходов ПЭТ, ПВХ, полистирола, пластиковых пакетов. Но также в процессе строительства и сноса образуются отходы сшитых полимеров (полиэтилена, полипропилена). Которые используются для изготовления кабелей и систем коммуникации (водоснабжение, теплоснабжение, канализация).

На 2019 г. мировое производство сшитого полиэтилена превысило 260 тыс. тонн [34]. Рост производства связан с заменой традиционных полимеров на более стойкие сшитые.

При температуре выше 75-100 °С полиэтилен размягчается и течёт. Сшивка позволяет сохранить свойства полимера в более широком температурном диапазоне. Сшивка подразумевает модификацию полимера на молекулярном уровне, в результате чего между молекулами полимера образуются поперечные связи и создается трехмерная структура (Рис.2), которая определяет широкий диапазон рабочих температур, высокие механические и диэлектрические свойства материала, химическую стойкость.

Сшивка может производиться физическим (радиационным) и химическим (пероксидным, силановым, азотным) методами. Это достаточно сложные технологические процессы, которые могут иметь свои недостатки: низкая производительность, дорогостоящее оборудование, неравномерность сшивки, риск брака [35].

В тоже время из-за технологии сшивки, такой полимер трудно поддается традиционным методам переработки. Переработка сшитых полимеров является сложной и серьезной проблемой и представляет угрозу окружающей среде.

decrease in the strength of such concretes during heating, and it becomes more significant with an increase in the PET content.

The article [17] is devoted to the study of mortars using recycled plastic bags. The authors report that mortars with the addition of plastic waste are more stable in acidic, when samples were loaded into acid, their weight loss decreased with an increase in the content of plastic waste. The authors report that samples with the addition of plastic waste are less cracking due to shrinkage, while the control sample had cracks when tested for limited shrinkage, compositions with plastic waste did not have cracks or had, but much less intense. In addition, the authors investigated the behavior and strength of the samples at various temperatures and concluded that when concrete heated to 100-125 °C samples retain their appearance and have increased strength, which may be due to accelerated hydration reactions and waste expansion, which creates internal stresses. When the temperature increases above 125 °C, the samples lose their appearance and destroy.

#### **Properties of concretes with aggregates from waste crosslinked polymers**

Most of the research in the field of polymer aggregates for concrete is aimed at recycling waste PET, PVC, polystyrene, plastic bags. But also in the process of construction and demolition, waste of cross-linked polymers (polyethylene, polypropylene) is formed. They are used for the manufacture of cables and communication systems (water supply, heat supply, sewerage).

In 2019, the global production of cross-linked polyethylene exceeded 260 thousand tons [34]. The increase in production is associated with the replacement of traditional polymers with more resistant crosslinked ones.

At temperatures above 75-100 °C, polyethylene softens and melts. Crosslinking allows to preserve the properties of the polymer over a wider temperature range. Crosslinking involves modification of the polymer at the molecular level, as a result of which cross-links are formed between the polymer molecules and a three-dimensional structure is created (Fig.2), which determines a wide range of operating temperatures, high mechanical and dielectric properties of the material, and chemical resistance.

Crosslinking can be performed by physical (radiation) and chemical (peroxide, silane, azote) methods. These are rather complex technological processes that may have their disadvantages: low productivity, expensive equipment, uneven crosslinking, and the risk of defects [35].

At the same time, due to the crosslinking technology, such a polymer is difficult to recycle using traditional processing methods. The recycling of crosslinked polymers is a complex and serious problem and poses a danger to the environment.

## РИСУНОК 2

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА:

- 1 – полиэтилена;  
2 – сшитого полиэтилена;

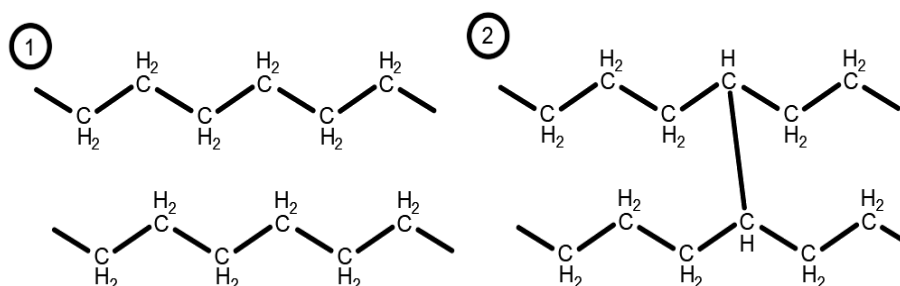


Figure 2

## Molecular structure:

- 1 – polyethylene;  
2 – cross-linked polyethylene;

В полимерной промышленности сшитые полимеры перерабатывают с помощью обработки ультразвуком, методом экструзии с применением сверхкритических спиртов, путем смешения с первичным сырьем и использования в качестве наполнителя новых изделий. Часть из этих методов не обладает высокой производительностью, другая часть сопряжена с использованием дорогостоящего оборудования и применением сложных технологических процессов. Большая часть отходов сшитых полимеров направляется на полигоны для хранения или утилизируется путем сжигания [36].

В то же время дробленые отходы сшитых полимеров возможно использовать в качестве заполнителя строительных композитов на неорганическом вяжущем, что могло бы значительно повысить долю их вторичной переработки.

Статья [37] посвящена исследованию целесообразности включения отходов сшитого полиэтилена в бетонные смеси. Отмечается, что прочность бетона на сжатие, растяжении и изгиб снижается при увеличении содержания сшитого полиэтилена, особенно это характерно для смесей, содержащих крупногабаритные включения сшитого полиэтилена. Снижается модуль упругости бетона и увеличивается усадка. Авторы связывают данные отрицательные эффекты со снижением жесткости каркаса бетона при включении сшитого полиэтилена, меньшим удельным весом кусков полиэтиленового заполнителя по сравнению с натуральными заполнителями и их плохой адгезией к цементной матрице. Положительным эффектом от введения сшитого полиэтилена в состав бетонной смеси является снижение водопоглощения, что связано с незначительным водопоглощением самого полиэтиленового заполнителя.

В статье [38] приведено исследование возможности использования отходов сшитого полиэтилена в качестве заполнителя дорожных бетонных смесей, уплотняемых роликами. Согласно результатам исследования плотность бетона снижалась пропорционально увеличению содержания сшитого полиэтилена. Прочность бетона на растяжение для образцов с заменой крупного заполнителя на отходы полимера на 5% увеличилась на 9-18%, тогда как прочность на сжатие и изгиб осталась практически без изменений. Однако, при больших соотношениях замены (15, 30, 50%) наблюдалось регулярное снижение прочности образцов, авторы связывают это с меньшей адгезией сшитого полиэтилена к цементной матрице по сравнению с натуральным заполнителем. С другой стороны, такие образцы при испытании на изгиб в отличие от контрольного не разделяются на 2 части, авторы связывают данный эффект с

In the polymer industry, crosslinked polymers are processed by ultrasound treatment, extrusion using supercritical alcohols, by mixing with raw materials and using as a filler. Some of these methods do not have high productivity, while the other part involves the use of expensive equipment and the use of complex technological processes. Most of the waste of crosslinked polymers is sent to landfills for storage or disposed of by incineration [36].

At the same time, the crushed waste of crosslinked polymers can be used as an aggregate for building composites based on an inorganic binder, which could significantly increase the proportion of their secondary processing.

The article [37] is devoted to the study of the feasibility of including cross-linked polyethylene waste in concrete mixtures. It is reported that the compressive, tensile and flexural strength of concrete decreases with an increase in the content of crosslinked polyethylene, this is especially typical for mixtures containing large-sized particles of crosslinked polyethylene. The modulus of elasticity of concrete decreases and shrinkage increases. The authors associate these negative effects with a decrease in the rigidity of the concrete frame when crosslinked polyethylene is included, a lower specific gravity of pieces of polyethylene aggregate compared with natural aggregate and their low adhesion to the cement matrix. The positive effect of the introduction of cross-linked polyethylene into the composition of the concrete mixture is a decrease in water absorption, which is associated with a low water absorption of the polyethylene aggregate itself.

The article [38] presents a study of the possibility of using cross-linked polyethylene waste as an aggregate for road concrete mixtures compacted by rollers. According to the results of the study, the density of concrete decreased in proportion to the increase in the content of cross-linked polyethylene. The tensile strength of concrete for samples with the replacement of coarse aggregate with polymer waste by 5% increased by 9-18%, while the compressive and flexural strength remained virtually unchanged. However, with high replacement ratios (15, 30, 50%), a regular decrease in the strength of the samples was observed, the authors attribute this to the lower adhesion of the polyethylene aggregate to the cement matrix compared with the natural aggregate. On the other hand, such samples during the flexural test, unlike the control one, are not divided into 2 parts, the authors associate this effect with the high ability of waste crosslinked polyethylene to absorb energy.



высокой способностью отходов сшитого полиэтилена поглощать энергию.

Статья [39] посвящена исследованию механических и тепловых характеристик бетона и раствора с частичной заменой песка на меламинформальдегидный термореактивный сшитый пластик. В отличие от многих других исследований в данной работе отмечается прирост прочности бетона при замене мелкого заполнителя до 30%, а при замене до 60% прочность оставалась сопоставимой с контрольными образцами. Предел прочности при растяжении раствора также был увеличен на 15% при замене мелкого заполнителя на 20%. Полученные результаты авторы связывают с улучшенными характеристиками частиц такого пластика. Исследуя тепловые характеристики образцов, авторы отмечают снижение показателей теплопроводности по сравнению с контрольными составами. Что связано с более низкой теплопроводностью пластика по сравнению с песком.

#### **Влияние модуля упругости заполнителя и адгезии заполнителя к цементной матрице на свойства бетона**

Многими учеными отмечается пониженная адгезия заполнителей в виде полимерных отходов к цементной матрице [3,7,11,14–17,19,37,38]. Поэтому вопрос; какие параметры могут влиять на величину сцепления заполнителя и минеральной матрицы при исследовании систем с применением полимерных отходов достаточно актуален.

Явления, происходящие в зоне контакта между заполнителем и цементным тестом (в последствии между цементным камнем и заполнителем в бетоне) в зависимости от состава соприкасающихся фаз, а также способа формирования и условий структурообразования при твердении бетона, могут либо привести к образованию дефектов структуры, либо способствовать её упрочнению. При существующей технологии, не предусматривающей специальных мер, даже в традиционных бетонах зона контакта заполнителя и минеральной матрицы является слабым местом. Все факторы способствующие повышению сцепления цементного камня с заполнителем при прочих равных условиях будут повышать и прочность бетона [40,41].

Основными факторами влияющими на прочность сцепления цементного камня и заполнителя являются: крупность и форма, дефектность, шероховатость и чистота поверхности, химико-минералогический состав частиц заполнителя, его пористость и механические характеристики, прочность цементной матрицы и возраст бетона, водоцементное отношение, дисперсность вяжущего, степень обжата заполнителей при усадочных деформациях бетона, толщина прослоек цементного камня между зёрнами заполнителя, соотношение механических характеристик заполнителя и цементной матрицы [40–43].

Один из немаловажных факторов, влияющих на сцепление заполнителя с цементной матрицей – форма зёрен и характер их поверхности. Форма может быть пластинчатой, многогранной, сферической, а поверхность шероховатой или гладкой, окатанной [40,41]. В случае с полимерным заполнителем, химически не взаимодействующим с вяжущим контактный слой практически отсутствует. Сцепление заполнителя с цементным камнем в этом случае осуществляется в основном за счет неровностей поверхности.

The article [39] is devoted to the study of the mechanical and thermal characteristics of concrete and mortar with partial replacement of sand with melamine formaldehyde thermosetting crosslinked plastic. Unlike many other studies, this work shows an increase in the strength of concrete when replacing fine aggregate up to 30%, and when replacing up to 60%, the strength remained comparable with the control samples. The tensile strength of the mortar was also increased by 15% when the fine aggregate was replaced by 20%. The authors attribute the results obtained to improved particle characteristics of such plastic. Examining the thermal characteristics of the samples, the authors note a decrease in thermal conductivity compared to the control compositions. This is due to the lower thermal conductivity of plastic compared to sand.

#### **The effect of the elastic modulus of the aggregate and the adhesion of the aggregate to the cement matrix on the properties of concrete**

Many scientists have reported the low adhesion of aggregates in the form of polymer waste to the cement matrix [3,7,11,14-17,19,37,38]. Therefore, the subject of which parameters can affect the amount of adhesion of the aggregate and the mineral matrix in the study of systems using polymer waste is quite relevant.

Phenomena occurring in the contact zone between the aggregate and the cement paste (subsequently between the cement stone and the aggregate in concrete), depending on the composition of the contacting phases, as well as the method of formation and conditions of structure formation during concrete hardening, can either lead to the formation of structural defects or contribute to concrete reinforcement. With the existing technology, which does not provide for special measures, even in traditional concretes, the contact zone of the aggregate and the mineral matrix is a weak point. All factors contributing to an increase in the adhesion of cement stone to the aggregate, will also increase the strength of concrete [40,41].

The main factors affecting the adhesion strength of cement stone and aggregate are: size and shape, defect, roughness and cleanliness of the surface, chemical and mineralogical composition of aggregate particles, its porosity and mechanical characteristics, strength of the cement matrix and age of concrete, water-cement ratio, dispersion of the binder, the degree of compression of aggregates during shrinkage deformations of concrete, the thickness of the cement stone interlayers between the aggregate grains, the ratio of the mechanical characteristics of the aggregate and the cement matrix [40-43].

One of the important factors influencing the adhesion of the aggregate to the cement matrix is the shape of the grains and the nature of their surface. The shape can be lamellar, polyhedral, spherical, and the surface rough or smooth, rounded [40,41]. In the case of a polymer aggregate that does not chemically interact with the binder, there is practically no contact layer. In this case, the adhesion of the aggregate to the cement stone is mainly due to surface irregularities.

To increase the adhesion of the polymer aggregate to the cement matrix, it is necessary to provide an irregular, rough surface of the aggregate particles. It is also possible

Для повышения адгезии полимерного заполнителя к цементной матрице необходимо обеспечить неровную, шероховатую поверхность частиц заполнителя. Также, возможно нанесение на частицы заполнителя специальных составов, повышающих адгезионные свойства. Другой способ – введение полимерных добавок в цементную матрицу (дисперсии поливинилацетата и латексов, эпоксидные смолы). Такой подход позволит перейти к полимерцементной матрице, которая будет обладать большим сродством с полимерным заполнителем, что, несомненно, повлияет на сцепление составляющих цементного камня.

Упругие деформации бетона под нагрузкой определяются модулем упругости, чем выше модуль упругости, тем меньше при данной нагрузке будет относительная деформация. Если прочность заполнителя не всегда полностью используется и, следовательно, не всегда проявляется, то модуль упругости заполнителя всегда непременно отражается на модуле упругости и других механических характеристиках бетона.

На рисунке 3 представлены эпюры напряжений в бетоне при разных значениях модуля упругости заполнителя [43].

РИСУНОК 3

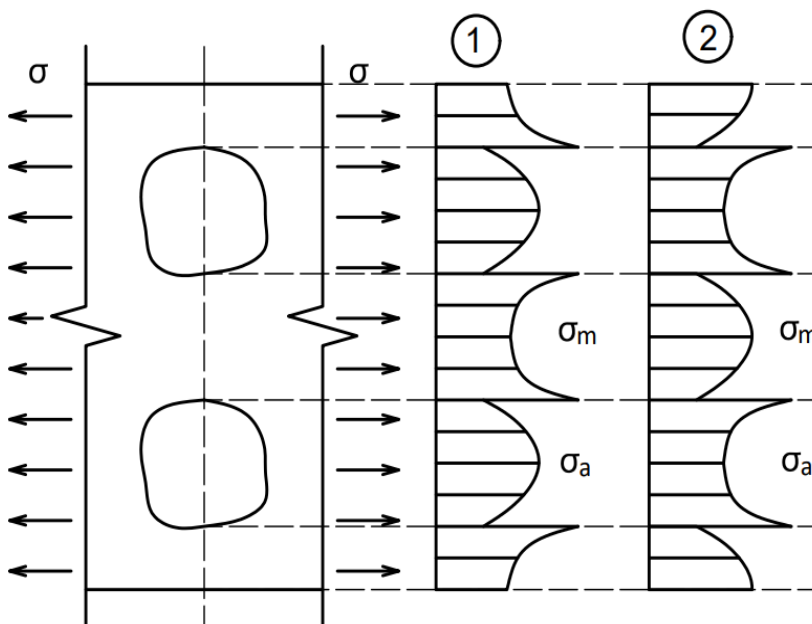
ЭПЮРА НАПРЯЖЕНИЙ В БЕТОНЕ ЕСЛИ:

- 1 – модуль упругости заполнителя меньше модуля упругости раствора ( $E_a < E_m$ );
- 2 – модуль упругости заполнителя больше модуля упругости раствора ( $E_a > E_m$ )

Figure 3

Stress diagram in concrete if:

- 1 – the modulus of elasticity of the aggregate is less than the modulus of elasticity of the mortar ( $E_a < E_m$ );
- 2 – the modulus of elasticity of the aggregate is higher than the modulus of elasticity of the mortar ( $E_a > E_m$ )



Из эпюр можно сделать вывод, что эпюра прямоугольна, если  $E_a = E_m$ , в остальных случаях эпюры криволинейны и тем больше, чем больше  $E_a$  отличается от  $E_m$ . В более слабом компоненте бетона эпюры выпуклы, в более жестком – вогнуты. По абсолютной величине при  $E_a < E_m$  напряжения в цементном камне будут больше, а при  $E_a > E_m$  – меньше. Степень кривизны эпюр и концентрации напряжений также зависят от концентрации заполнителя в бетоне [43].

Таким образом, для обеспечения высоких механических характеристик бетонов с полимерными отходами предпочтительнее использовать отходы с наибольшим модулем упругости для уменьшения упругой несовместимости заполнителя и матрицы и обеспечения разгрузки растворной части.

to apply special compositions to the aggregate particles that increase the adhesive properties. Another method is the introduction of polymer additives into the cement matrix (dispersions of polyvinyl acetate and latexes, epoxy resins). This approach will allow us to switch to a polymer cement matrix, which will have a great affinity with polymer aggregates, which will affect the adhesion of the components of the concrete.

Elastic deformations of concrete under load are determined by the modulus of elasticity, the higher the modulus of elasticity, the less the relative deformation will be under this load. If the strength of the aggregate is not always fully utilized and, therefore, does not always manifest itself, then the modulus of elasticity of the aggregate is always reflected in the modulus of elasticity and other mechanical characteristics of concrete.

Figure 3 shows stress diagrams in concrete at different values of the elastic modulus of the aggregate [43].

From the plots it can be concluded that the plot is rectangular if  $E_a = E_m$ , in other cases the plots are the more curved if  $E_a$  more differs from  $E_m$ . In the weaker component of concrete, the plots are convex, in the harder component they are concave. In absolute value, at  $E_a < E_m$ , the stresses in the cement stone will be greater, and at  $E_a > E_m$  the stresses in the cement stone will be less. The degree of curvature of the plots and stress concentration also depend on the concentration of the aggregate in the concrete [43].

Thus, in order to ensure high mechanical characteristics of concrete with polymer waste, it is preferable to use waste with the highest modulus of elasticity to reduce the elastic incompatibility of the aggregate and the matrix and ensure unloading of the mortar.

## Заключение

Результаты проведенного анализа исследований направленных на использование полимерных отходов в качестве заполнителей бетона можно обобщить следующими основными выводами:

1. Дробленые полимерные отходы возможно использовать в качестве заполнителей бетона, что может помочь значительно уменьшить негативное влияние на окружающую среду.

2. Введение полимерного заполнителя снижает плотность и теплопроводность получаемого бетона, повышает его износостойкость, стойкость к эрозии и химическую стойкость, может несколько уменьшить усадку и образование микротрещин.

3. Зачастую бетоны с полимерным заполнителем обладают сниженной по сравнению с традиционным бетоном прочностью на сжатие, изгиб и растяжение. Современные исследователи связывают такое снижение с низкой адгезией полимерных заполнителей к цементной матрице, ограниченной реакцией гидратации вблизи зерен полимерного заполнителя, сниженным модулем упругости такого заполнителя по сравнению с природным сырьем и как следствие упругой несовместимостью заполнителя и цементной матрицы.

4. При использовании полимерных заполнителей изменяется характер диаграммы напряжение-деформации при сжатии бетона. В случае бетона с полимерным заполнителем не наблюдается типичного упругого хрупкого разрушения, как в случае с традиционным бетоном. По мере увеличения содержания полимерного заполнителя характер разрушения становится более пластичным. Разрушение бетона происходит по другому механизму, в котором преобладают пластические деформации.

5. Ежегодно образуется значительное количество отходов шитых полимеров, которые затруднительно перерабатывать традиционными для полимеров способами. В то же время дробленые отходы шитых полимеров возможно использовать в качестве заполнителя строительных композитов на неорганическом вяжущем, что может значительно повысить долю их вторичной переработки.

6. Для повышения адгезии полимерного заполнителя к цементной матрице необходимо обеспечить неровную, шероховатую поверхность частиц заполнителя. Возможно нанесение на частицы заполнителя специальных составов, повышающих адгезионные свойства или введение полимерных добавок в цементную матрицу, что позволит перейти к полимерцементной матрице, которая будет обладать большим сродством с полимерным заполнителем.

7. Для обеспечения высоких механических характеристик бетонов с полимерными отходами предпочтительнее использовать отходы с наибольшим модулем упругости для уменьшения упругой несовместимости заполнителя и матрицы и обеспечения разгрузки растворной части.

8. Бетоны с заполнителем из полимерных отходов могут найти применение в конструкциях полов, элементов мощения, фасадных элементов, стеновых блоков. Применение полимерных отходов также возможно в составе химически стойких бетонов.

## Литература:

1. Сперанская О., Понизова О., Цитцер О., Гурский Я. Пластик и пластиковые отходы в России: ситуация, проблемы и рекомендации. Международная Сеть по Ликвидации Загрязнителей. 2021.

## Conclusions

The results of the analysis of studies aimed at using polymer waste as concrete aggregates can be summarized by the following main conclusions:

1. Crushed polymer waste can be used as concrete aggregates, which can help significantly reduce the negative impact on the environment.

2. The introduction of a polymer aggregate reduces the density and thermal conductivity of the resulting concrete, increases its abrasion resistance, erosion resistance, chemical resistance, can slightly reduce shrinkage and the formation of microcracks.

3. Often, concretes with a polymer aggregate have a reduced compressive, bending and flexural strength compared to traditional concrete. Modern researchers attribute this decrease to the low adhesion of polymer fillers to the cement matrix, limited hydration reaction near the grains of the polymer aggregate, reduced modulus of elasticity of such a filler compared to natural raw materials and, as a result, elastic incompatibility of the aggregate and the cement matrix.

4. When using polymer aggregates, the nature of the stress-strain diagram during concrete compression changes. In the case of concrete with a polymer aggregate, there is no typical elastic brittle fracture, as in the case of traditional concrete. As the content of the polymer aggregate increases, the nature of the fracture becomes more plastic. The destruction of concrete occurs by another mechanism, in which plastic deformations prevail.

5. A significant amount of waste from crosslinked polymers is generated annually, which is difficult to recycle using traditional polymer methods. At the same time, crushed waste of crosslinked polymers can be used as an aggregate for building composites based on an inorganic binder, which can significantly increase the share of their recycling.

6. To increase the adhesion of the polymer aggregate to the cement matrix, it is necessary to provide an irregular, rough surface of the aggregate particles. It is possible to apply special compounds to the aggregate particles that increase the adhesive properties or introduce polymer additives into the cement matrix, which will allow us to switch to a polymer-cement matrix that will have a greater affinity with the polymer aggregate.

7. In order to ensure high mechanical characteristics of concrete with polymer waste, it is preferable to use waste with the highest modulus of elasticity to reduce the elastic incompatibility of the aggregate and the matrix and ensure unloading of the mortar.

8. Concretes with polymer waste aggregates can be used in the construction of floors, tile elements, facade elements, wall blocks. The use of polymer waste is also possible in the composition of chemically resistant concretes.

## References:

1. Speranskaya O., Ponizova O., Citcer O., Gurskij Ya. Plastic and plastic waste in Russia: the situation, problems and recommendations. *International Pollutant Elimination Network*. 2021 (In Russian).

2. Browne M. A., Galloway T. S., Thompson R. What is the extent of microplastic contamination in habitats? *Integrated Environmental Assessment and Management*. – 2007. – Vol. 3, No. 4. – Pp. 559–561. DOI: 10.1002/ieam.5630030412.
3. Gu L., Ozbakkaloglu T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*. Elsevier Ltd. – 2016. – No. 51. – Pp. 19–42. DOI: 10.1002/ieam.5630030412.
4. Российская Федерация. Приказ. Об утверждении Стратегии развития химического и нефтехимического комплекса на период до 2030 года: приказ от 8 апреля 2014 года №651/172 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420245722?marker=6560IO&section=text> (Дата обращения: 06.09.2024).
5. Кирин Б.С., Клокова А.Н. Современные технологии разделения отходов пластмасс // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2014. – Т. 28, № 3. – С. 31–33.
6. Mankotia K., Singh Chohan J., Singh R. On technological solutions for recycling of recycling of polymer waste: A review. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. – 2024. – Vol. 509. DOI: 10.1051/e3sconf/202450903011.
7. Siddique R., Khatib J., Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*. – 2008. – Vol. 28, No. 10. Pp. 1835–1852. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.
8. Silva R. V., De Brito J., Saikia N. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement & Concrete Composites*. – 2013. – Vol. 35, No. 1. – Pp. 23–31. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017.
9. Rahmani E., Dehestani M., Beygi M.H.A., Allahyari H., Nikbin I.M. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*. – 2013. – Vol.47. – Pp.1302–1308. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.
10. Galvão J. C. A., Portella K. F., Joukoski A., Mendes R., & Ferreira, E. S. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol.25, No.2. – Pp.1049–1055. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.0.
11. Ismail Z. Z., & AL-Hashmi E. A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*. – 2008. – Vol.28. No.11. – Pp.2041–2047. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.08.023.
12. Rai B., Rushad S. T., Kr B., & Duggal S. K. Study of Waste Plastic Mix Concrete with Plasticizer. *ISRN Civil Engineering*. – 2012. DOI:10.5402/2012/469272.
13. Fraj A. Ben, Kismi M., Mounanga P. Valorization of coarse rigid polyurethan foam waste in lightweight aggregate concrete *Construction and Building Materials*. – 2010. – No. 6. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010.
14. Pelisser F., Montedo O. R. K., Gleize P. J. P., & Roman H. R. Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. *Materials Research*. – 2012. – Vol.15, No.4. – Pp.679–686. DOI:10.1590/s1516-14392012005000088.
15. Frigione M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*. – 2010. – Vol. 30, No. 6. – Pp. 1101–1106. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.
16. Thorneycroft J., Orr J., Savoikar P., Ball R.J. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and building materials*. – 2018. – No.161. – Pp.63-69. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127.
2. Browne M. A., Galloway T. S., Thompson R. What is the extent of microplastic contamination in habitats? *Integrated Environmental Assessment and Management*. – 2007. – Vol. 3, No. 4. – Pp. 559–561. DOI: 10.1002/ieam.5630030412.
3. Gu L., Ozbakkaloglu T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*. Elsevier Ltd. – 2016. – No. 51. – Pp. 19–42. DOI: 10.1002/ieam.5630030412.
4. Russian Federation. Order. On approval of the Strategy for the Development of the Chemical and petrochemical complex for the period up to 2030: Order No. 651/172 dated April 8, 2014 [Electronic resource]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420245722?marker=6560IO&section=text> (accessed: 06.09.2024). (In Russian).
5. Kirin B.S., Klokova A.N. Modern technologies of plastic waste separation // *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii*. – 2014. – Vol. 28, No. 3. – Pp. 31–33. (In Russian)
6. Mankotia K., Singh Chohan J., Singh R. On technological solutions for recycling of recycling of polymer waste: A review. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. – 2024. – Vol. 509. DOI: 10.1051/e3sconf/202450903011.
7. Siddique R., Khatib J., Kaur I. Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*. – 2008. – Vol. 28, No. 10. Pp. 1835–1852. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.
8. Silva R. V., De Brito J., Saikia N. Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement & Concrete Composites*. – 2013. – Vol. 35, No. 1. – Pp. 23–31. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.017.
9. Rahmani E., Dehestani M., Beygi M.H.A., Allahyari H., Nikbin I.M. On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*. – 2013. – Vol.47. – Pp.1302–1308. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.041.
10. Galvão J. C. A., Portella K. F., Joukoski A., Mendes R., & Ferreira, E. S. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol.25, No.2. – Pp.1049–1055. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.06.0.
11. Ismail Z. Z., & AL-Hashmi E. A. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. *Waste Management*. – 2008. – Vol.28. No.11. – Pp.2041–2047. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.08.023.
12. Rai B., Rushad S. T., Kr B., & Duggal S. K. Study of Waste Plastic Mix Concrete with Plasticizer. *ISRN Civil Engineering*. – 2012. DOI:10.5402/2012/469272.
13. Fraj A. Ben, Kismi M., Mounanga P. Valorization of coarse rigid polyurethan foam waste in lightweight aggregate concrete *Construction and Building Materials*. – 2010. – No. 6. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.11.010.
14. Pelisser F., Montedo O. R. K., Gleize P. J. P., & Roman H. R. Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete. *Materials Research*. – 2012. – Vol.15, No.4. – Pp.679–686. DOI:10.1590/s1516-14392012005000088.
15. Frigione M. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*. – 2010. – Vol. 30, No. 6. – Pp. 1101–1106. DOI: 10.1016/j.wasman.2010.01.030.
16. Thorneycroft J., Orr J., Savoikar P., Ball R.J. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and building materials*. – 2018. – No.161. – Pp.63-69. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127.

- materials. – 2018. – No.161. – Pp.63-69. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127.
17. Ghernouti Y., Rabehi B. Strength and durability of mortar made with plasticsbag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2012. – Vol.6, No.3. – Pp.145-153. DOI: 10.1007/s40069-012-0013-0.
18. Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H. Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass. *ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity*. – 2019. – Vol.17. – Pp. 170-176. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.023.
19. Kou S.C., LeeG., PoonC.S., Lai W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste management*. – 2009. – Vol.29, No.2. – Pp. 621–629. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.014.
20. Choi Y.W., Moon D.J., Chung J.S., Cho S.K. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and concrete research*. – 2005. – Vol. 35, No.4. – Pp. 776–781. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.05.014.
21. Alqahtani F.K., Iqbal Khan M., Ghataora G., Dirar S. Production of recycled plastic aggregates and its utilization in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. – 2017. – Vol.29, No.4. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001765.
22. Tang W. C., Lo Y., & Nadeem A. Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. – 2008. – Vol.30. No.5. – Pp.403–409. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.01.002.
23. Akçaözoğlu S., Atiş C.D., Akçaözoğlu K. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*. – 2010. – Vol. 30, No.2. – Pp. 285–290. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.09.033.
24. Samchenko S.V., Larsen O.A. Modifying the sand concrete with recycled tyre polymer fiber to increase the crack resistance of building structures // *Buildings*. 2023. T. 13. № 4. C. 897. <https://doi.org/10.3390/buildings13040897>
25. Karahan O., & Atiş C. D. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*. – 2011. – Vol.3, No.2. – Pp.1044–1049. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.07.011.
26. Wongtanakitcharoen T., & Naaman A. E. Unrestrained early age shrinkage of concrete with polypropylene, PVA, and carbon fibers. *Materials and Structures*. – 2006. – Vol.40, No.3. – Pp.289–300. DOI: 10.1617/s11527-006-9106-z.
27. Kayali O., Haque M.N., Zhu B. Drying shrinkage of fibre-reinforced lightweight aggregate concrete containing fly ash. *Cement and Concrete Research*. – 1999. – Vol. 29. – Pp.1835–1840.
28. Kim S. B., Yi N. H., Kim H. Y., Kim J.-H. J., & Song, Y.-C. Material and structural performance evaluation of recycled PET fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*. – 2010. – Vol.32, No.3. – Pp.232–240. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.11.002.
29. Sabaa, B., Ravindrarajah, R.S. Engineering properties of light-weight concrete containing crushed expanded polystyrene waste. *Materials Research Society, Fall Meeting. Symposium MM: Advances in Materials for Cementitious Composites. December 1-3, 1997, Boston, USA*.
30. Wang, R., & Meyer, C. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and*

30. Wang, R., & Meyer, C. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*. – 2012. – Vol.34, No.9. – Pp.975–981. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2012.06.014.
31. Kan A., Demirboğa R. A novel material for lightweight concrete production. *Cement and Concrete Composites*. – 2009. – Vol. 31, No.7. – Pp. 489–495. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2009.05.002.
32. Yesilata B., Isiker Y., Turgut P. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23, No.5. – Pp.1878–1882. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014.
33. Albano C., Camacho N., Hernández M., Matheus A., & Gutiérrez A. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*. – 2009. – Vol. 29, No.10. – Pp. 2707–2716. DOI:10.1016/j.wasman.2009.05.007.
34. Чалов К.В., Луговой Ю.В., Косивцов Ю.Ю. Исследование кинетики термодеструкции шитого полиэтилена // Бюллетень науки и практики. – 2019. – Т. 5, № 12. – С.37–46.
35. Thomas J., Thomas M.E., Thomas S. Crosslinked Polyethylene: State-of-the-Art and New Challenges. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications*. – 2021. – Pp.1–15. DOI: 10.1007/978-981-16-0514-7\_1.
36. Chandran N., Sivadas A., Anuja E., Baby D., Ramdas R. XLPE: Crosslinking Techniques and Recycling Process. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications*. – 2021. – Pp. 167–188. DOI: 10.1007/978-981-16-0514-7\_7.
37. Zéhil G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials. *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 226. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285.
38. Shamsaei M., Aghayan I., Kazemi K.A. Experimental investigation of using cross-linked polyethylene waste as aggregate in roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol.165. – Pp. 290–297. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.109.
39. Dweik H.S., Ziara M.M., Hadidoun M.S. Enhancing concrete strength and thermal insulation using thermoset plastic waste. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. – 2008. – Vol. 57, № 7. – Pp.635–656. DOI: 10.1080/00914030701551089.
40. Каримов И.Ш. Прочность сцепления цементного камня с заполнителями в бетоне и факторы влияющие на нее // Технологии бетонов. – 2013. – №4. – С.28-31.
41. Несветаев Г.В., Ву Л.К. Модель для оценки сцепления цементного камня с заполнителем по величине предела прочности бетона при осевом растяжении // Интерне-журнал НАУКОВЕДЕНИЕ. – 2017. – Т. 9, № 3.
42. Структура и свойства цементных бетонов // А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. - М.: Стройиздат, 1979. - 344 с.
43. Технология заполнителей бетона // С.М. Ицкович, Л.Д. Чумаков, Ю.М. Баженов. – М.: Высш. шк., 1991. – 272 с.
40. Karimov I.Sh. The adhesion strength of cement stone to aggregates in concrete and the factors affecting it // *Tekhnologii betonov*. – 2013. – No.4. – Pp.28-31. (In Russian)
41. Nesvetaev G.V., Vu L.K. A model for evaluating the adhesion of cement stone to aggregate by the magnitude of the tensile strength of concrete under axial tension // *Internezhurnal NAUKOVEDENIE*. – 2017. – Vol. 9, No.3 (In Russian)
42. Structure and properties of cement concretes // А.Е. Shejkin, Yu.V. Chekhovskij, M.I. Brusser. Moscow. - 1979. - 344 p. (In Russian)
43. Technology of concrete aggregates // S.M. Ickovich, L.D. Chumakov, Yu.M. Bazhenov. Moscow. – 1991. – 272 p. (In Russian)

*Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение №075-03-2024-112 от 17 января 2024 года).*

*The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2024-0004, state assignment of VISU). The study was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary center for the collective usage of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (Agreement No. 075-03-2024-112 of January 17, 2024).*

**Баруздин Александр Андреевич** – аспирант кафедры «Строительное производство», ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ),  
E-mail: [baruzdin98@bk.ru](mailto:baruzdin98@bk.ru) (автор для связи)

**Закревская Любовь Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), E-mail: [lvzak@mail.ru](mailto:lvzak@mail.ru)

**Вклад авторов:** Закревская Л.В. – научное руководство, научное редактирование статьи; Баруздин А.А. – идея, обработка материала, написание статьи.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Baruzdin Aleksandr Andreevich** – Postgraduate student of «Construction production» department, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (VISU),  
E-mail: [baruzdin98@bk.ru](mailto:baruzdin98@bk.ru) (author for contact)

**Zakrevskaya Lyubov Vladimirovna** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (VISU), E-mail: [lvzak@mail.ru](mailto:lvzak@mail.ru)

**Contribution of the author:** Zakrevskaya L.V. – scientific guidance, scientific editing of the article; Baruzdin A.A. – idea, processing of material, writing of the article.

*The authors declare that there is no conflict of interest.*