

УДК 666.11

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 81.09.00

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

EDN vkzibd

DOI 10.62980/2076-0655-2024-237-246

ОТХОДЫ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР КАК ПОТЕНЦИАЛЬНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Трофимов А.Н.¹, Белов В.В.², Вологин Н.А.¹, Косолапов А.Ф.¹, Шишаев Д.С.²

¹АО «НПО Стеклопластик»

²Тверской государственной технической университет

АННОТАЦИЯ

Рациональному использованию вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) в настоящее время уделяется особое внимание. В этом плане перспективной и активно развивающейся технологией утилизации промышленных отходов является технология депонирования, заключающаяся в добавлении строительных отходов в состав новых материалов. В результате получают совершенно новые модификации материалов с улучшенными характеристиками. Острой проблемой является дефицит на рынке сырьевых облегченных компонентов строительных смесей, которые необходимы для получения материалов с высокими теплоизоляционными свойствами. Эти материалы не только повышают уровень комфорта проживания в зданиях, но и благодаря меньшей плотности, создают меньшую нагрузку на несущие конструкции зданий, что очень важно для экономии материальных и энергетических ресурсов. С этой точки зрения выигрышными легкими наполнителями сырьевых смесей строительных материалов являются полые стеклянные микросферы. В статье рассмотрены физико-химические свойства отходов производства стеклянных микросфер с целью их использования в качестве микронаполнителей для легких бетонов и других строительных материалов. Показано, что указанные отходы, плотность и удельная поверхность которых сопоставима или даже значительно ниже плотности традиционных дисперсных наполнителей, могут служить отличным сырьем для производства легкого бетона и способствовать снижению затрат на добычу природных ресурсов и энергии для их переработки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отходы производства стеклянных микросфер, плотность, удельная поверхность, свойства

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трофимов А.Н., Белов В.В., Вологин Н.А., Косолапов А.Ф., Шишаев Д.С. Отходы стеклянных микросфер как потенциальное сырье для получения строительных материалов // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 237-246, DOI 10.62980/2076-0655-2024-237-246, EDN vkzibd

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

EDN vkzibd

DOI 10.62980/2076-0655-2024-237-246

GLASS MICROSPHERE PRODUCTION WASTES AS POTENTIAL RAW MATERIALS FOR PRODUCTION OF CONSTRUCTION MATERIALS

Trofimov A.N.¹, Belov V.V.², Vologin N.A.¹, Kosolapov A.F.¹, Shishaev D.S.²

¹JSC «NPO Stekloplastic»

²Tver State Technical University

ABSTRACT

Rational use of secondary energy resources (SER) is currently given special attention. In this regard, a promising and actively developing technology of industrial waste utilization is the deposition technology. This technology consists in adding construction waste to the composition of new materials. As a result, completely new modifications of materials with improved characteristics are obtained. An acute problem is the shortage of raw lightweight components of construction mixtures on the market. Such mixtures are necessary to produce materials with high thermal insulation properties. These materials not only increase the level of comfort of living in buildings, but also due to lower density, create less load on the load-bearing structures of buildings. The use of such materials is very important for saving material and energy resources. Hollow glass microspheres are widely used as light fillers of raw material mixtures of building materials. The paper considers the physical and chemical properties of glass microsphere production wastes for the purpose of their use as micro fillers for lightweight concrete and other building materials. It is shown that these wastes have density and specific surface area comparable and even much lower than the density of traditional disperse fillers. It is established that glass microspheres production wastes can serve as an excellent raw material for lightweight concrete production. Their introduction into the composition of raw material mixtures will contribute to the reduction of costs for the extraction of natural resources and energy for their processing.

KEY WORDS: glass microsphere production wastes, density, specific surface area, properties

FOR CITATION: Trofimov A.N., Belov V.V., Vologin N.A., Kosolapov A.F., Shishaev D.S. Glass microsphere production wastes as potential raw materials for production of construction materials // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No3. – Pp. 237 – 246, DOI 10.62980/2076-0655-2024-237-246, EDN vkzibd

ВВЕДЕНИЕ

В рамках экономического развития России существует программа, направленная на совершенствование топливно-энергетического комплекса и экономию энергоресурсов. В частности, планируется перейти на энергосберегающие технологии производства, сократить все виды энергетических потерь и повысить уровень использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). В последние годы использованию ВЭР уделяется особое внимание [1-8]. Вместе с тем вопросы рационального использования ВЭР освещены недостаточно.

Можно выделить новую, перспективную и активно развивающуюся технологию утилизации промышленных отходов, которые более правильно называть вторичными техногенными ресурсами. Эта технология называется депонированием. Суть метода заключается в добавлении строительных отходов в состав новых материалов. В результате получают совершенно новые модификации материалов с улучшенными характеристиками. Депонирование является вытекающим методом из метода рециклинга с использованием уже отсортированного или переработанного сырья [9,10].

Применение в строительстве и отделке домов экологически чистых материалов, созданных на основе промышленных отходов, не представляющих опасности для здоровья людей и окружающей среды, играет ключевую роль в обеспечении экологической безопасности зданий и сооружений, а также в повышении эффективности строительства с точки зрения экономики и техники [2,3]. Лучше использовать местные материалы и промышленные отходы (целлюлозу, войлок, стружку, опилки, хлопок, пробку, базальт). Из них можно производить цементно-стружечные, фибролитовые и базальтовые плиты, блоки, панели, стекломагниевого листа и другие конструкционные и изоляционные материалы [11-13]. Технологии производства должны быть доступными, а материалы можно изготавливать прямо на строительной площадке, в соответствии с необходимыми экологическими и санитарными требованиями [4,14].

В целом, использование промышленных отходов может обеспечить до 40 % потребности строительства в сырьевых материалах. Применение промышленных отходов позволяет снизить затраты на производство строительных материалов на 10–30 % по сравнению с использованием природного сырья. Это позволяет создавать новые строительные материалы с высокими технико-экономическими показателями, а также уменьшать загрязнение окружающей среды. В то же время, чтобы правильно использовать эти ресурсы, необходимо внедрить систему управления отходами с применением методов экономико-математического моделирования. Это поможет оптимизировать потоки отходов. Если эти условия будут выполнены, то вторичное сырьё и материалы, которые перерабатываются или повторно используются, принесут доход бюджетам разных уровней и станут дополнительным источником дохода для бизнеса. [8, 15,16].

Острой проблемой является дефицит на рынке сырьевых облегчённых компонентов строительных смесей, которые необходимы для получения материалов с высокими теплоизоляционными свойствами. Эти материалы не только повышают уровень комфорта проживания в

INTRODUCTION

As part of the economic development of Russia, there is a program aimed at improving the fuel and energy complex and saving energy resources. In particular, it is planned to switch to energy-saving production technologies, reduce all types of energy losses, and increase the level of use of secondary energy resources (SER). In recent years, the use of SER has received special attention [1-8]. At the same time, the issues of rational use of SER are not sufficiently covered.

A new, promising and actively developing technology for the utilization of industrial waste, which is more correctly called secondary technogenic resources, can be distinguished. This technology is called deposition. The essence of the method is to add construction waste to the composition of new materials. As a result, completely new material modifications with improved characteristics are obtained. Deposition is a derivative method from the recycling method using already sorted or processed raw materials [9,10].

The use of environmentally friendly materials created on the basis of industrial waste that do not pose a danger to human health and the environment in construction and finishing of houses plays a key role in ensuring the environmental safety of buildings and structures, as well as in increasing the efficiency of construction in terms of economics and technology [2,3]. It is better to use local materials and industrial waste (cellulose, felt, chips, sawdust, cotton, cork, basalt). From them it is possible to produce cement-chip, fibrolite and basalt plates, blocks, panels, glass-magnesium sheet and other structural and insulation materials [11-13]. Production technologies should be accessible, and materials can be manufactured directly at the construction site, in accordance with the necessary environmental and sanitary requirements [4,14].

In general, the use of industrial waste can provide up to 40% of the construction's need for raw materials. The use of industrial waste can reduce the cost of production of building materials by 10-30% compared to the use of natural raw materials. This allows the creation of new building materials with high technical and economic indicators, as well as reducing environmental pollution. At the same time, in order to properly use these resources, it is necessary to introduce a waste management system using methods of economic and mathematical modeling. This will help optimize waste flows. If these conditions are met, then secondary raw materials and materials that are recycled or reused will bring income to budgets at different levels and become an additional source of income for businesses. [8, 15,16].

An acute problem is the shortage in the market of lightweight raw components for construction mixes, which are necessary to obtain materials with high thermal insulation properties. These materials not only increase the level of comfort in buildings, but also, due to their lower density, create a lower load on the load-bearing structures of buildings, which is very important in terms of saving material and energy resources [17-19].

зданиях, но и благодаря меньшей плотности, создают меньшую нагрузку на несущие конструкции зданий, что очень важно с точки зрения экономии материальных и энергетических ресурсов [17-19].

С этой точки зрения выигрышными легкими наполнителями сырьевых смесей строительных материалов являются полые стеклянные микросферы, используемые, как правило, в качестве наполнителей композиционных полимерных материалов конструкционного назначения [17]. Характерные области их использования – нефтегазовая (буровые растворы и тампонажные цементы низкой плотности и высокой прочности) и лакокрасочная промышленность (наполнители и добавки), строительная отрасль (звукоизоляционные и композиционные материалы), судостроение (облегченные конструктивные материалы). Микросферы могут использоваться как самостоятельный материал для хранения различных веществ, например, газов или медикаментов. Их характерные диаметры зависят от конкретных приложений и обычно составляют от 10 до 200 мкм, толщина стенки оболочек – 0,5–2,0 мкм. Насыпная плотность варьируется в пределах 80–700 кг/м³, прочность зависит от способа их получения, толщины стенок и плотности, наибольшая достигается при размере порядка 30–40 мкм. Применение материала обусловлено уникальным сочетанием физических свойств: сферическая форма, маленькая толщина стенок, низкая плотность, относительно высокая прочность на всестороннее сжатие, хорошие тепло- и звукоизоляционные, а также диэлектрические свойства [17, 20].

Наиболее распространенный способ получения микросфер – их формование из предварительно подготовленного сырья в виде микропорошка в высокотемпературных условиях – в потоке плазменной или газовой горелки либо при их свободном падении в рабочем пространстве высокотемпературной шахтной или трубчатой печи. Микропорошок получают помолом и рассевом синтезированного стекла. Принципиальный момент этих методов – создание условий для предварительного растворения определенного количества газов при изготовлении полупродукта и выделения газа в процессе термической диссоциации. Высокая температура нагрева порошка, приводящая к размягчению стекла, и выделение газа способствуют росту пузырей внутри частицы и формированию микросферы, а обеспечение условий для быстрого охлаждения – фиксации размеров сформировавшейся структуры [20].

Химическая стойкость стеклянных микросфер делает их совместимыми с большинством полимеров. Идеальная сферическая форма позволяет легко смешивать их с другими веществами, что приводит к снижению вязкости и уменьшению усадки. Это свойство обуславливает применение в технологиях литья, экструзии и распыления. Наибольший интерес представляет использование стеклянных микросфер в строительной отрасли, в качестве наполнителя в теплоизоляционных покрытиях или в облегченных материалах [18, 20, 21].

В работе [22] рассматриваются вопросы получения облегченных гипсовых композитов, отвечающих современным запросам рынка строительных материалов. Использование высокопрочной гипсовой матрицы, представленной кристаллами дигидрата и гидросульфалюмината кальция, в сочетании с пористым наполнителем способствует формированию облегченного и одновременно упрочненного гипсового камня. Показано, что фракционированные

From this point of view, hollow glass microspheres used as fillers for composite polymer materials for structural purposes are advantageous lightweight fillers for raw construction material mixes [17]. Their typical areas of use are the oil and gas (low-density and high-strength drilling fluids and grouting cements), paint and varnish (fillers and additives), construction (sound-insulating and composite materials), shipbuilding and aircraft construction (lightweight structural materials) industries. Microspheres can be used as a standalone material for storing various substances, such as gases or medicines. Their characteristic diameters depend on specific applications and are usually in the range of 10 to 200 μm , with a shell wall thickness of 0.5-2.0 μm . The bulk density varies within the range of 80-700 kg/m^3 , and the strength depends on the method of their production, wall thickness and density, with the highest being achieved at a size of about 30-40 μm . The application of the material is due to the unique combination of physical properties: spherical shape, thin walls, low density, relatively high compressive strength, good thermal and sound insulation, as well as dielectric properties [17,20].

The most common method for producing microspheres is their shaping from a pre-prepared raw material in the form of a micropowder under high-temperature conditions - in the flow of a plasma or gas burner, or during their free fall in the working space of a high-temperature shaft or tubular furnace. The micropowder is obtained by grinding and sieving of synthesized glass. The fundamental point of these methods is the creation of conditions for the preliminary dissolution of a certain amount of gases during the manufacture of the semi-finished product and the release of gas during the thermal dissociation process. The high temperature heating of the powder, leading to the softening of the glass, and the release of gas contribute to the growth of bubbles inside the particle and the formation of a microsphere, while providing conditions for rapid cooling ensures the fixation of the dimensions of the formed structure [20].

The chemical resistance of glass microspheres makes them compatible with most polymers. The ideal spherical shape allows them to be easily mixed with other substances, which leads to a decrease in viscosity and a reduction in shrinkage. This property determines their application in casting, extrusion, and spraying technologies. The most interesting use of glass microspheres is in the construction industry, as a filler in thermal insulation coatings or in lightweight materials [18, 20, 21].

The paper [22] deals with the issues of obtaining lightweight gypsum composites that meet the modern demands of the building materials market. The use of high-strength gypsum matrix represented by crystals of calcium dihydrate and hydrosulfoaluminate in combination with porous filler promotes the formation of lightweight and simultaneously strengthened gypsum stone. It is shown that fractionated fillers in the composition of gypsum self-reinforced composite form a compacted structure of gypsum matrix with the formation of a contact zone between calcium sulfate dihydrate and additives, contributing to the weight reduction of the resulting material.

наполнители в составе гипсового самоармированного композита образуют уплотненную структуру гипсовой матрицы с образованием контактной зоны между дигидратом сульфата кальция и добавками, способствующими снижению веса получаемого материала.

В работе [23] приведены результаты разработки облегченных и сверхлегких цементных растворов, обладающих низкой плотностью при достаточной прочности, достигнутых благодаря оптимизации структуры с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов. В качестве наполнителя было предложено использовать полые стеклянные микросферы.

Минимальная средняя плотность раствора может быть достигнута путем получения максимальной плотности упаковки частиц тонкодисперсного наполнителя с соответствующим уменьшением объемной доли цементного камня. При разработке составов существующих строительных растворов комплексно не учитываются геометрические и физико-механические характеристики компонентов, что не позволяет максимально снизить среднюю плотность при обеспечении их требуемой прочности. Авторами работы [23] предложена разработка оптимальной структуры облегченного цементного раствора с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов.

В то же время основным ограничением применения полых стеклянных микросфер в производстве широко распространенных строительных материалов является высокая стоимость кондиционных микросфер. Поэтому представляет интерес изучения отхода производства микросфер как потенциального сырьевого компонента легких бетонов, строительных растворов и других общестроительных материалов. Эти вторичные техногенные ресурсы, плотность и удельная поверхность которых сопоставима или даже значительно ниже плотности традиционных дисперсных наполнителей, как будет показано ниже, могут служить отличным сырьем для производства строительных материалов и при этом способствовать снижению затрат и энергии на добычу и переработку природных ресурсов.

Цель исследования: изучить свойства отходов производства стеклянных микросфер с целью их использования в качестве микронаполнителей для легких бетонов и других строительных материалов.

Материалы и методы исследования

В данной работе представлены свойства* осадка, полученного в результате флотации микросфер МС-ВП-А9 Ф3 из стекла натриевоборосиликатного состава, изготовленных из фракционированной фритты размером не более 30 мкм. Отходы отбирались в процессе 4-х этапной флотации микросфер в смеси артезианской воды и Волана 702. Отбор осадка осуществлялся после каждого этапа флотации. Сушка предоставленного для анализа осадка производилась в НПК «Композит» при температуре 80° С в течении 8 часов.

* Примечание: Фактические данные по свойствам отходов получены в условиях АО «НПО Стеклопластик» (подразделение «НИК СКМ»).

The work [23] presents the results of the development of lightweight and ultra-lightweight cement mortars with low density and sufficient strength, achieved through the optimization of the structure taking into account the geometric and the physical and chemical characteristics of the components. Hollow glass microspheres were proposed as a filler.

The minimum average density of the mortar can be achieved by obtaining the maximum packing density of the particles of the fine-dispersed filler with a corresponding decrease in the volume fraction of the cement stone. In the development of compositions of existing construction mortars, the geometric and physico-mechanical characteristics of the components are not comprehensively taken into account, which does not allow to maximize the reduction of the average density while ensuring their required strength. The authors of the work [23] proposed the development of an optimal structure of a lightweight cement mortar, taking into account the geometric and the physical and chemical characteristics of the components.

At the same time, the main limitation of the use of hollow glass microspheres in the production of widely used building materials is the high cost of conditioned microspheres. Therefore, it is of interest to study the waste from the production of microspheres as a potential raw material component for lightweight concretes, construction mortars and other general construction materials. These secondary technogenic resources, the density and specific surface area of which are comparable or even significantly lower than the density of traditional dispersed fillers, as will be shown below, can serve as an excellent raw material for the production of building materials and at the same time contribute to reducing the costs and energy for the extraction and processing of natural resources.

The purpose of the study: Study properties of glass microspheres production wastes are considered for their use as micro fillers for lightweight concretes and other construction materials.

Materials and methods of research

This paper presents the properties* of the sediment obtained as a result of the flotation of MS-VP-A9 F3 microspheres from a sodium-borosilicate glass composition, made from fractionated frit with a size of no more than 30 μm. The waste was taken during the 4-stage flotation of microspheres in a mixture of artesian water and Volan 702. The sediment was collected after each stage of flotation. The drying of the sediment provided for analysis was carried out at the NPK "Kompozit" at a temperature of 80°C for 8 hours.

* Note: Actual data on the properties of waste were obtained under the conditions of JSC "NPO Stekloplastic" (division "NIK SKM").

Эксперименты и обсуждение результатов

Experiments and discussion

Гранулометрический состав отхода производства микросфер, представлен в виде таблицы 1 и на рис. 1.

Плотность представленного осадочного материала, определенная гидростатическим взвешиванием, составила $0,818 \text{ г/см}^3$.

The particle size distribution of the microsphere production waste is presented in the form of table 1 and fig. 1.

The density of the presented sedimentary material, determined by hydrostatic weighing, was 0.818 g/cm^3 .

ТАБЛИЦА 1. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОСАДКА, ПОЛУЧЕННОГО В РЕЗУЛЬТАТЕ ФЛОТАЦИИ МИКРОСФЕР МС-ВП-А9 Ф3

Table 1. Particle size distribution of the sediment obtained as a result of flotation of MS-VP-A9 F3 microspheres

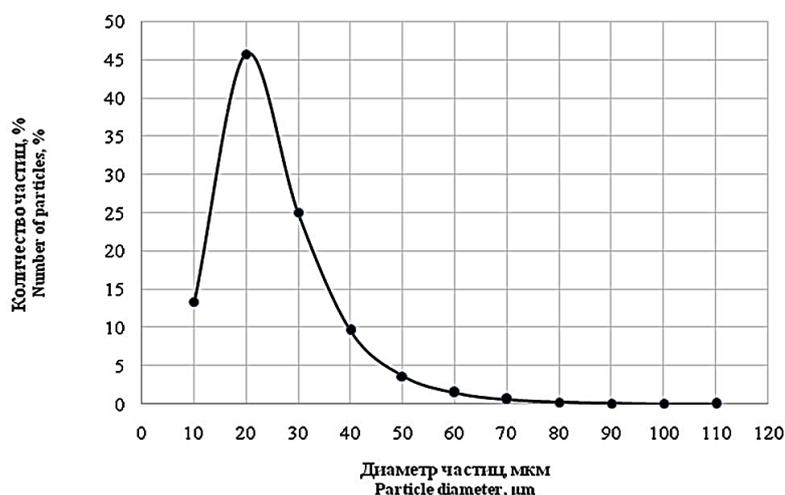
Размер частиц, мкм Particle size, μm	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	250
Среднее содержание частиц данного размера, % Average content of particles of this size, %	12,86	45,26	25,41	9,87	3,85	1,57	0,66	0,29	0,14	0,07	0,03

РИСУНОК 1

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОТХОДОВ ФЛОТАЦИИ МС-ВП-А9 Ф3

Figure 1

Particle size distribution of flotation waste MS-VP-A9 F3



На рис. 2 представлена электронная микрофотография исходного осадка, которая показывает наличие в данных отходах в основном частиц шарообразной формы, которые за счет сил межчастичного взаимодействия образуют агрегаты различных размеров в виде арочных и мостиковых структур.

Плотность осадочного материала, определенная на порометре, оказалась равной $0,788 \text{ г/см}^3$, что достаточно близко к полученному гидростатическим взвешиванием результату и подтверждает достоверность этих данных.

Представляет интерес более подробный анализ состава исходного осадка, полученного в результате флотации микросфер МС-ВП-А9 Ф3. Для этого в НИК СКМ проведена дополнительная флотация исходного осадка в течение 20 часов, в результате которой выделены верхний слой из всплывших микрочастиц и финишный осадок (рис. 3).

Микрофотографии полученных образцов материала после повторной флотации представлены на рис. 4 и 5.

The electron micrograph of the initial sediment shown in fig. 2 shows the presence of predominantly spherical particles in this waste, which, due to the forces of interparticle interaction, form aggregates of various sizes in the form of arched and bridge-like structures.

The density of the sedimentary material, determined on a porometer, was 0.788 g/cm^3 , which is quite close to the result obtained by hydrostatic weighing and confirms the reliability of these data.

A more detailed analysis of the composition of the original precipitate obtained as a result of the flotation of microspheres MS-VP-A9 F3 is of interest. For this purpose, additional flotation of the initial sediment was carried out at NIK SKM for 20 hours, as a result of which the upper layer of the floated microparticles and the final sediment were separated (Fig. 3).

Micrographs of the obtained material samples after repeated flotation are presented in figs. 4 and 5.

РИСУНОК 2

**ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОФОТОГРАФИЯ
ИСХОДНОГО ОСАДКА, ПОЛУЧЕННОГО
В РЕЗУЛЬТАТЕ ФЛОТАЦИИ
МИКРОСФЕР MS-VP-A9 F3**

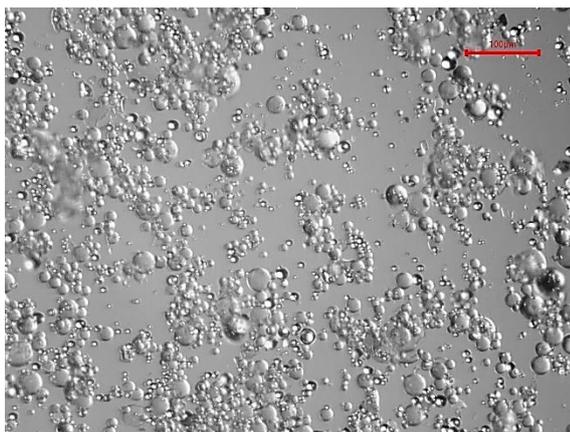


Figure 2

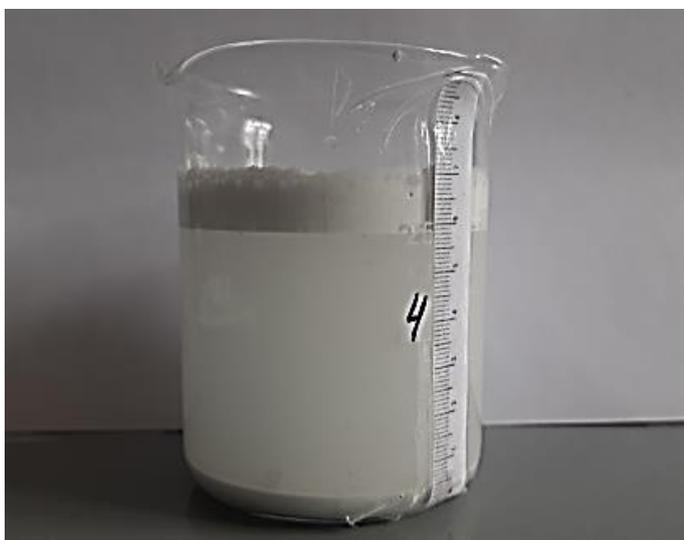
Optical micrograph of the initial sediment obtained as a result of flotation of MS-VP-A9 F3 microspheres

РИСУНОК 3

**РЕЗУЛЬТАТ ПОВТОРНОЙ ФЛОТАЦИИ
ОТХОДОВ**

Figure 3

The result of repeated flotation of waste



Всплывшие микрочастицы и образовавшийся осадок после повторной флотации были высушены при температуре 80 °С в сушильном шкафу и также проанализированы (табл. 2).

Выше было указано, что основным недостатком облегченных цементных растворов являются низкие прочностные показатели как результат снижения плотности. Однако при использовании наполнителей, имеющих низкую среднюю плотность и относительно высокую прочность, к которым можно с уверенностью отнести отход производства полых стеклянных микросфер, можно добиться значимого снижения плотности цементных растворов, обеспечивая при этом их достаточную прочность.

The floated microparticles and the formed sediment after repeated flotation were dried at a temperature of 80 °C in a drying oven and also analyzed (table 2).

It was mentioned above that the main disadvantage of lightweight cement mortars is the low strength characteristics as a result of a decrease in density. However, when using fillers with a low average density and relatively high strength, to which the waste from the production of hollow glass microspheres can be confidently attributed, it is possible to achieve a significant reduction in the density of cement mortars, while ensuring their sufficient strength.

РИСУНОК 4

ВЕРХНИЙ СЛОЙ ОТХОДОВ ПОСЛЕ ПОВТОРНОЙ ФЛОТАЦИИ И СУШКИ

Figure 4

The upper layer of waste after repeated flotation and drying

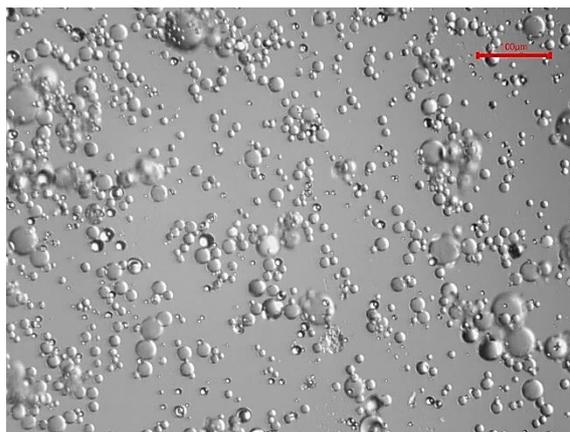


РИСУНОК 5

ОСАДОК ОТ ОТХОДОВ ПОСЛЕ ПОВТОРНОЙ ФЛОТАЦИИ И СУШКИ

Figure 5

Sediment from waste after repeated flotation and drying

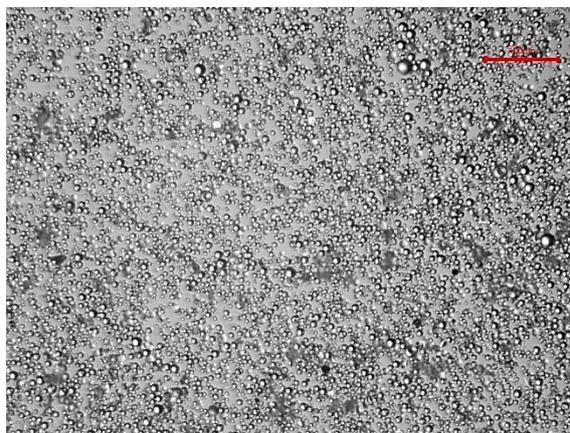


ТАБЛИЦА 2. СВОЙСТВА ВЕРХНЕГО СЛОЯ И ОСАДКА ПОСЛЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ФЛОТАЦИИ ИСХОДНОГО ОТХОДА ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР

Table 2. Properties of the upper layer and sediment after additional flotation of the initial waste from the production of glass microspheres

Наименование образца Sample name	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Прочность при 10 % разрушении, кгс/см ² Strength at 10% destruction, kgf/cm ²	Массовое содержание в исходных отходах, % Mass content in the initial waste, %	Расчетное объемное содержание в исходных отходах, % Estimated volumetric content in the initial waste, %
Верхний слой Upper layer	0,504	122,5	38,35	16,63
Осадок Sediment	1,853	-	45,55	72,59
Неизвестная часть, взвесь в воде Unknown part, suspension in water	Расчетная плотность 1,2	-	16,10	10,78

Заключение

При использовании в качестве наполнителя этого отхода и вяжущего различной дисперсности можно получить оптимальную структуру, при которой частицы микросфер будут характеризоваться плотной упаковкой, их доля в объеме будет максимальной, а цементный камень, выполняя роль связующей прослойки, будет скреплять их в прочный материал конгломератного типа строения.

Conclusions

When using this waste as a filler and binders of various dispersion, an optimal structure can be obtained, in which the microsphere particles will be characterized by dense packing, their share in the volume will be maximum, and the cement stone, acting as a binder layer, will bind them into a strong conglomerate-type material. An optimal structure can be considered a low-defect solution structure, where the

Оптимальной можно считать мало дефектную структуру раствора, где компоненты (фазы, поры и другие составляющие) равномерно распределены по всему объёму. В такой структуре имеется непрерывная прослойка вяжущего вещества, которая выполняет роль пространственной матрицы. Водоцементное отношение при этом минимально, а связь между гидратными фазами и частицами наполнителя очень прочная.

Ещё одним важным признаком оптимальной структуры лёгкого материала является наибольшее насыщение упаковки легкими прочными частицами твердой фазы. Очевидно, что чем меньше расстояние между частицами заполняющего компонента, тем больше их можно поместить в структуру. Но для более лёгких цементных растворов с мелкодисперсным наполнителем лучше использовать высокодисперсное вяжущее со средним размером частиц, равным или значимо меньшим размера частиц наполнителя, при этом согласованным с ним по гранулометрическому составу.

Литература:

1. Хмелевский Н.А. Эффективность переработки строительных отходов //Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». – № 3. – 2020. – С.161–166.
2. Усов Б.А., Окольников Г.Э., Акимов С.Ю. Экология и производство строительных материалов // Системные технологии. 2015. № 4 (17). С. 84-105.
3. Евграфова И.М., Шубина Е.В., Лаврусевич А.А. Эколого-экономическая оценка хозяйственной деятельности. практика и перспективы //Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 7 (667). С. 83-87.
4. Орешкин Д.В., Ткач С.А., Пахратдинов А.А. Получение эффективных экологически безопасных строительных материалов на основе утилизации промышленных отходов и вторичного сырья // Современные тенденции развития науки и технологий. 2015. № 9-3. С. 99-101.
5. Потапова Е.Н. Снижение негативного воздействия на окружающую среду при производстве цемента // Техника и технология силикатов. 2014. Т. 21. № 3. С. 2-8.
6. Скороход М.А., Потапова Е.Н. Перспективы внедрения наилучших доступных технологий и перехода к комплексным экологическим разрешениям при производстве цемента // Цемент и его применение. 2015. № 5. С. 22-26.
7. Сулейманова Л.А. Высококачественные энергосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы, изделия и конструкции // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 1. С. 9-16.
8. Кравцова М.В., Васильев А.В., Кравцов А.В., Носарев Н.С. Анализ методов утилизации отходов строительства с последующим вовлечением их во вторичный оборот // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2015, т. 17, №4(4), С. 804-809.
9. Хмелевской Н.А. Эффективность переработки строительных отходов методом рециклинга //

components (phases, pores and other parts) are evenly distributed throughout the volume. In such a structure, there is a continuous binder layer that acts as a spatial matrix. The water-cement ratio in this case is minimal, and the bond between the hydrated phases and the filler particles is very strong.

Another important feature of the optimal structure of a lightweight material is the maximum saturation of the packing with light, strong solid phase particles. It is obvious that the smaller the distance between the particles of the filler component, the more of them can be placed in the structure. But for lighter cement mortars with a fine-dispersed filler, it is better to use a highly dispersed binder with an average particle size equal to or significantly less than the particle size of the filler, while being coordinated with it in terms of particle size distribution.

References:

1. Hmelevskiy N.A. Effektivnost' pererabotki stroitel'nyh othodov //Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnyh nauk i tehnologiy «Integral». – № 3. – 2020. – S.161–166.
2. Usov B.A., Okol'nikova G.E., Akimov S.Yu. Ekologiya i proizvodstvo stroitel'nyh materialov // Sistemnye tehnologii. 2015. № 4 (17). S. 84-105.
3. Evgrafova I.M., Shubina E.V., Lavrusevich A.A. Ekologo-ekonomicheskaya ocenka hozyaystvennoy deyatel'nosti. praktika i perspektivy //Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy. Stroitel'stvo. 2014. № 7 (667). S. 83-87.
4. Oreshkin D.V., Tkach S.A., Pahratdinov A.A. Poluchenie effektivnyh ekologicheski bezopasnyh stroitel'nyh materialov na osnove utilizacii promyshlennyh othodov i vtorichnogo syr'ya // Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tehnologiy. 2015. № 9-3. S. 99-101.
5. Potapova E.N. Snizhenie negativnogo vozdeystviya na okruzhayuschuyu sredu pri proizvodstve cementa // Tehnika i tehnologiya silikatov. 2014. T. 21. № 3. S. 2-8.
6. Skorohod M.A., Potapova E.N. Perspektivy vnedreniya nailuchshih dostupnyh tehnologiy i perehoda k kompleksnym ekologicheskim razresheniyam pri proizvodstve cementa // Cement i ego primenenie. 2015. № 5. S. 22-26.
7. Suleymanova L.A. Vysokokachestvennyye energosberegayushchie i konkurentosposobnyye stroitel'nye materialy, izdeliya i konstrukcii // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo univer-siteta im. V.G. Shuhova. 2017. № 1. S. 9-16.
8. Kravcova M.V., Vasil'ev A.V., Kravcov A.V., Nosarev N.S. Analiz metodov utilizacii othodov stroitel'stva s posleduyuschim вовлечением их во vtorichnyy оборот // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk, 2015, t. 17, №4(4), S. 804-809.
9. Hmelevskoy N.A. Effektivnost' pererabotki stroitel'nyh othodov metodom reciklinga // Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnyh nauk i tehnologiy «Integral». 2020, №3, S. 108-116.

Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2020, №3, С. 108-116.

10. Самченко, С.В. Особенности повторного использования цементных суспензий при реализации технологии рециклинга бетонных смесей / С.В. Самченко, Е.С. Егоров, М.А. Абрамов // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16, № 12. – С. 1573-1581. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.12.1573-1581. – EDN MNTVKM.

11. Хеирбеков, Р.А. Некоторые физико-химические аспекты формирования структуры композиционного шлакосиликатного поризованного арболитового материала / Р.А. Хеирбеков, С.В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 379-390. – EDN JKBDQD.

12. Зайцева, А.А. Перспективные теплоизоляционные материалы на основе стеклобоя и жидкого стекла / А.А. Зайцева, Е.И. Зайцева, С.В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 17-20. – EDN KFVCDK.

13. Samchenko, S.V. Formation of Cellular Concrete Structures Based on Waste Glass and Liquid Glass / S.V. Samchenko, A.V. Korshunov // Buildings. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 17. – DOI 10.3390/buildings14010017. – EDN WLXSWL.

14. Величко Е.Г., Цховребов Э.С. Экологическая безопасность строительных материалов: основные исторические этапы // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – Вып. 1 (100). – С. 26–35.

15. Цховребов Э.С., Величко Е.Г. Научно-методологические подходы к созданию модели комплексной системы управления потоками строительных отходов // Вестник МГСУ. – 2015. – № 9. – С. 95–110.

16. Петров В.В., Мурашкин В.Г. О необходимости создания единой базы данных перспективных инновационных исследований в строительной отрасли // Эксперт: теория и практика. – 2021. – № 1. – С. 11–12.

17. Иноземцев, А.С. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 10. – С. 80-83. – EDN PPSLRX.

18. Иноземцев, А.С. Высокопрочные лёгкие бетоны / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-9227-1265-1. – EDN UCJRAZ.

19. Иноземцев, А.С. Средняя плотность и пористость высокопрочных легких бетонов / А.С. Иноземцев // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 7(51). – С. 31-37. – DOI 10.5862/MCE.51.4. – EDN SYSMUH.

20. Гринчук П.С., Акулич А.В., Шевцов В.Ф., Степюкевич Н.И., Чернухо Е.В. Покрытия с добавками полых стеклянных микросфер // Наука и инновации. – 2017. – № 11. – С. 16–20.

21. Орешкин, Д.В. Свойства кладочных растворов на основе экструдированных растворных смесей / Д.В. Орешкин, В.С. Семенов, П.В. Капцов // Строительные материалы. – 2012. – № 9. – С. 58-60. – EDN NSYYEZ.

22. Облегченные самоармированные гипсовые композиты / К.С. Петропавловский, А.Ф. Бурьянов, В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова // Строительные материалы. – 2019. – № 10. – С. 40-45. – DOI

10. Samchenko, S.V. Osobennosti povtornogo ispol'zovaniya cementnykh suspenziy pri realizacii tehnologii reciklinga betonnykh smesey / S.V. Samchenko, E.S. Egorov, M.A. Abramov // Vestnik MGSU. – 2021. – Т. 16, № 12. – С. 1573-1581. – DOI 10.22227/1997-0935.2021.12.1573-1581. – EDN MNTVKM.

11. Heirbekov, R.A. Nekotorye fiziko-himicheskie aspekty formirovaniya struktury kompozicionnogo shlakosilikatnogo porizovannogo arbolitovogo materiala / R.A. Heirbekov, S.V. Samchenko // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 379-390. – EDN JKBDQD.

12. Zayceva, A.A. Perspektivnye teploizolyacionnye materialy na osnove stekloboya i zhidkogo stekla / A.A. Zayceva, E.I. Zayceva, S.V. Samchenko // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2021. – Т. 28, № 1. – С. 17-20. – EDN KFVCDK.

13. Samchenko, S.V. Formation of Cellular Concrete Structures Based on Waste Glass and Liquid Glass / S.V. Samchenko, A.V. Korshunov // Buildings. – 2024. – Vol. 14, No. 1. – P. 17. – DOI 10.3390/buildings14010017. – EDN WLXSWL.

14. Velichko E.G., Chovrebov E.S. Ekologicheskaya bezopasnost' stroitel'nykh materialov: osnovnye istoricheskie etapy // Vestnik MGSU. – 2017. – Т. 12. – Вып. 1 (100). – С. 26–35.

15. Chovrebov E.S., Velichko E.G. Nauchno-metodologicheskie podhody k sozdaniyu modeli kompleksnoy sistemy upravleniya potokami stroitel'nykh othodov // Vestnik MGSU. – 2015. – № 9. – С. 95–110.

16. Petrov V.V., Murashkin V.G. O neobходимosti sozdaniya edinoj bazy dannykh perspektivnykh innovacionnykh issledovaniy v stroitel'noy otrasli // Ekspert: teoriya i praktika. – 2021. – № 1. – С. 11–12.

17. Inozemcev, A.S. Polye mikrosfery – effektivnyy zapolnitel' dlya vysokoprochnykh legkih betonov / A.S. Inozemcev, E.V. Korolev // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2013. – № 10. – С. 80-83. – EDN PPSLRX.

18. Inozemcev, A.S. Vysokoprochnye legkie betony / A.S. Inozemcev, E.V. Korolev. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy arhitekturno-stroitel'nyy universitet, 2022. – 192 s. – ISBN 978-5-9227-1265-1. – EDN UCJRAZ.

19. Inozemcev, A.S. Srednyaya plotnost' i poristost' vysokoprochnykh legkih betonov / A.S. Inozemcev // Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. – 2014. – № 7(51). – С. 31-37. – DOI 10.5862/MCE.51.4. – EDN SYSMUH.

20. Grinchuk P.S., Akulich A.V., Shevcov V.F., Stepyukovich N.I., Chernuho E.V. Pokrytiya s dobavkami polykh steklyannykh mikrosfer // Nauka i innovacii. – 2017. – № 11. – С. 16–20.

21. Oreshkin, D.V. Svoystva kladochnykh rastvorov na osnove ekstrudirovannykh rastvornykh smesey / D.V. Oreshkin, V.S. Semenov, P.V. Kapcov // Stroitel'nye materialy. – 2012. – № 9. – С. 58-60. – EDN NSYYEZ.

22. Oblegchennyye samoarmirovannyye gipsovye kompozity / K.S. Petropavlovskiy, A.F. Bur'yanov, V.B. Petropavlovskaya, T.B. Novichenkova // Stroitel'nye materialy. – 2019. – № 10. – С. 40-45. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-775-10-40-45. – EDN CWERNN.

10.31659/0585-430X-2019-775-10-40-45. – EDN CWERNN.

23. Исаева Ю.В., Величко Е.Г., Касумов А.Ш. Оптимизация структуры сверхлегкого цементного раствора с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов // Строительные материалы. – 2015. – № 8. – С. 84–87.

23. Isaeva Yu.V., Velichko E.G., Kasumov A.Sh. Optimizaciya struktury sverhlegkogo cementnogo rastvora s uchetom geometricheskikh i fiziko-mehaniicheskikh harakteristik komponentov // Stroitel'nye materialy. – 2015. – № 8. – S. 84–87.

Трофимов Александр Николаевич – генеральный директор АО «НПО Стеклопластик», E-mail: a.trofimov@npo.stek

Белов Владимир Владимирович – заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», E-mail: vladim-bel@yandex.ru (автор для связи)

Вологин Николай Александрович – научный сотрудник НИК СКМ «АО НПО Стеклопластик», E-mail: kolya.vologin@mail.ru

Косолапов Алексей Федорович – директор НПК «Композит» АО «НПО Стеклопластик», E-mail: nppkompozit@yandex.ru

Шишаев Денис Сергеевич – аспирант ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», E-mail: shishaevden69@gmail.com

Вклад авторов: Трофимов А.Н., Белов В.В., Вологин Н.А., Косолапов А.Ф. – идея, научное руководство, научное редактирование статьи; Шишаев Д.С. – разработка методик, обработка материала, написание статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Trofimov Alexandr Nikolaevich – General director of JSC «NPO Stekloplastic», E-mail: a.trofimov@npo.stek

Belov Vladimir Vladimirovich – Head of Chair of Building Products and Structures Manufacture, Tver State Technical University, E-mail: vladim-bel@yandex.ru (author for contact)

Vologin Nikolay Alexandrovich – Research associate NIK SKMJSC «NPO Stekloplastic », E-mail: kolya.vologin@mail.ru

Kosolapov Alexey Fedorovich – Director of NPK "Kompozit" JSC «NPO Stekloplastic », E-mail: nppkompozit@yandex.ru

Shishaev Denis Sergeevich – postgraduate student Tver State Technical University, E-mail: shishaevden69@gmail.com

Contribution of the author: Trofimov A.N., Belov V.V., Vologin N.A., Kosolapov A.F. – idea, scientific guidance, scientific editing of the article; Shishaev D.S. – development of methods, material processing, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.