

# Технология производства строительных материалов с использованием отходов бытовой техники

**Е.Л. Зими́на**

кандидат технических наук

**Н.В. Улья́нова**

кандидат технических наук

Витебский государственный  
технологический университет,  
г. Витебск, Беларусь



Предложена технологическая схема производства бетона с добавлением стеклянной крошки, полученной из бытовых приборов, для строительства взлётно-посадочной эстакады общепланетарного транспортного средства (ОТС), охватывающего Землю в плоскости экватора. Рециклинг утилизации пришедших в негодность стеклянных приборов, которые содержат ионы тяжёлых металлов, проведён на основе анализа стёкол, составляющих покрытие кинескопа телевизора, и определении их химического состава. Представлен технологический процесс подготовки отходов стекла от кинескопов для производства строительных материалов, а также разработано устройство для помола стекла в мелкодисперсную фракцию, необходимую для обеспечения оптимального состава бетонной смеси.

**Ключевые слова:**

вторичное сырьё, инновационные материалы, кинескопы, отходы бытовой техники, стекло, строительные материалы, экваториальная эстакада.

# Technology of the Construction Material Production Using Household Appliances Waste

**E. Zimina**

Ph.D. in Technical Sciences

**N. Ulyanova**

Ph.D. in Technical Sciences

Vitebsk State  
Technological University,  
Vitebsk, Belarus



The article includes a technological scheme for concrete production with added glass crumbs obtained from household appliances. This concrete is planned to be used for construction of the General Planetary Vehicle (GPV) takeoff and landing overpass encircling the Earth in the equatorial plane. Recycling of failed glass appliances containing heavy metal ions is performed considering analysis of glasses from the TV kinescopes and identification of their chemical composition. The authors offer a technological process to prepare kinescope glass waste for production of construction materials, as well as a device for grinding glass into small size fraction that is necessary to provide optimal composition of concrete mix.

**Keywords:**

*construction materials, equatorial overpass, glass, household appliances waste, innovative materials, kinescopes, recyclable materials.*

## Введение

Одно из основополагающих направлений глобальной геокосмической программы *uSpace*, посвящённой безракетной индустриализации ближнего космоса, – строительство такого широкомасштабного объекта, как эстакада общепланетарного транспортного средства (ОТС), которая представляет собой взлётно-посадочный, энергетический и коммуникационный комплекс эстакадного типа для геокосмических перевозок, размещённый вдоль экватора и имеющий протяжённость 40 076 км [1, 2]. Возведение данного сооружения требует значительных материальных затрат, большую часть которых составляют расходы на строительные материалы. Для того чтобы решить вопрос о создании экономичных и экологичных инновационных материалов, предлагается применение технологии замкнутого цикла (рециклинга) для переработки бытовых отходов, накапливаемых современным обществом.

Электронные отходы – один из основных источников загрязнения окружающей среды, но они могут рассматриваться в качестве вторичного ресурса, так как содержат ценные компоненты. Следовательно, повторное их использование не только является важным элементом в общей структуре управления отходами, но и представляет интерес с точки зрения материального и ресурсного потенциала.

Утилизация старой техники предотвращает возникновение проблемы, связанной с покупкой более современной и усовершенствованной модели или заменой пришедшей в негодность. Люди часто не знают, как поступить в этом случае со старыми бытовыми приборами. Правильная организация данного процесса позволяет решить множество вопросов, в том числе экономических и экологических. С точки зрения экономики утилизация бытовой техники выгодна тем, что предоставляет возможность вторично использовать материалы в промышленном производстве, к тому же некоторые виды приборов содержат определённое количество драгоценных металлов. Кроме того, в состав кинескопов типа плюмбикон и других стеклянных устройств входят ионы тяжёлых металлов: свинца, бария, стронция [3].

Главные задачи утилизационного производства – сбор, хранение, транспортировка, сортировка, обезвреживание, вторичная переработка или ликвидация материала. Установлено, что процессы распада и окисления металлов приводят к крайне негативному влиянию на все живые организмы и состояние почвы; при изготовлении электронных схем часто используются материалы низкого качества, при их разложении в землю попадает огромное количество

ядовитых отравляющих веществ; период распада пластика может составлять до 50 лет, в зависимости от размеров приборов.

## Проблемы переработки отходов бытовой техники

Рост объёмов электронных отходов обусловлен увеличением масштабов использования электронного оборудования, сокращением сроков его службы и малочисленностью вариантов ремонта. По данным отчёта Глобального мониторинга электронных отходов ООН можно отметить, что в 2019 г. объём электронных отходов в мире составил 53,6 млн тонн (без учёта солнечных батарей), или около 7 кг на душу населения [4].

Эксперт В. Форти из Университета Организации Объединённых Наций сообщает, что наибольший объём отходов произвела Азия – 24,9 млн тонн. Далее идут Северная и Южная Америка (13,1 млн тонн), Европа (12 млн тонн). Заключают список Африка и Океания (2,9 и 0,7 млн тонн соответственно). При пересчёте на душу населения данные следующие: лидирующее положение – Европа (16,2 кг) и Океания (16,1 кг). Азия (5,6 кг) занимает предпоследнее место [4, 5]. Объёмы производства электронных отходов в разные годы представлены на рисунке 1.

Сегодня глобальный рост количества электронных отходов превышает темпы их сбора и переработки. Статистика показывает, что наивысший показатель по сбору отходов наблюдается в Европе (45–48 %), где действует директива 2012/19/ЕС Европейского парламента и Совета ЕС «Об отходах электрического и электронного оборудования (ОЭЭО)», определяющая нормативы переработки и восстановления ОЭЭО [4].

В Республике Беларусь принят правовой акт общего действия – закон от 20 июля 2007 г. № 271-З «Об обращении с отходами». При этом сектор сбора и переработки электронных отходов развит значительно лучше, чем в других европейских государствах. На территории страны открыты пункты сдачи и приёма вторсырья, работают частные сборщики. Кроме того, электронные отходы принимаются в ремонтных мастерских и сервисных центрах. В 2019 г. в Республике Беларусь собрано 23 000 тонн электронных отходов [6].

В рамках международного форума по обращению с отходами (The WEEE Forum) учёные отметили, что объёмы отходов от гаджетов по всему миру стремительно растут. К 2030 г. данный показатель достигнет 74,7 млн тонн. Согласно прогнозам уже к 2050 г. он может составить 120 млн тонн, что объясняется постоянно увеличивающимся количеством людей, покупающих электронную продукцию [5].

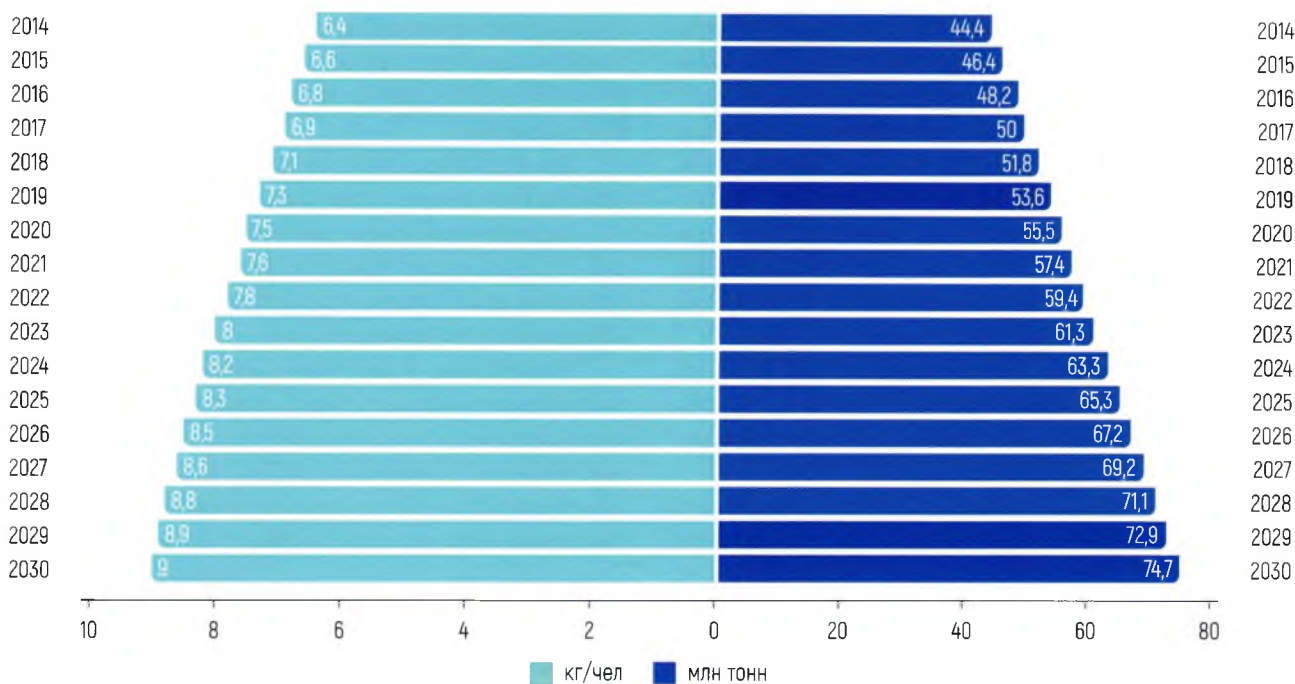


Рисунок 1 – Объёмы электронных отходов в 2014–2030 гг. (прогнозы на будущее не учитывают последствия кризиса COVID-19)

По данным специалистов, ламповые и кинескопные модели телевизионных приёмников население продолжит выбрасывать до 2025 г. [7]. Среди электронных отходов в последние десятилетия повсеместное распространение получили телевизоры (кинескопные, плазменные и жидкокристаллические), персональные компьютеры и др. Накопление такого лома связано с тем, что на сегодняшний день техника быстро устаревает.

Основную опасность для окружающей среды представляет оксид свинца, который входит в состав стёкол кинескопов. Его количество в одном кинескопе зависит от размера прибора и может варьироваться от 0,5 до 2,9 кг. Особенностью исследуемых стёкол является то, что ионы свинца относительно легко выщелачиваются из массы и попадают в окружающую среду. Например, при ненадлежащей переработке стёкол, содержащих тяжёлые металлы, выщелачивание ионов свинца может происходить под действием органических кислот, которые образуются на полигоне для бытового мусора. Из всех свинецсодержащих компонентов кинескопа наиболее легко выщелачивание происходит из стеклоцемента. Свинец, как и его соединения, – токсикант с выраженным кумулятивным действием, вызывающий изменения в нервной системе, крови и сосудах. Данное обстоятельство предполагает необходимость должной обработки подобных стёкол.

Таким образом, перед исследователями поставлена задача разработать технологический процесс подготовки стекла с целью его дальнейшего использования. В качестве объекта выбраны телевизионные кинескопы, которые в настоящее время не находят применения вследствие их сложного состава, что для утилизирующих предприятий является острой проблемой.

Рассмотрим комплектующие кинескопа (рисунок 2). В среднем 87 % его массы – это стекло трёх сортов, в состав которых входят стронций, барий, свинец.

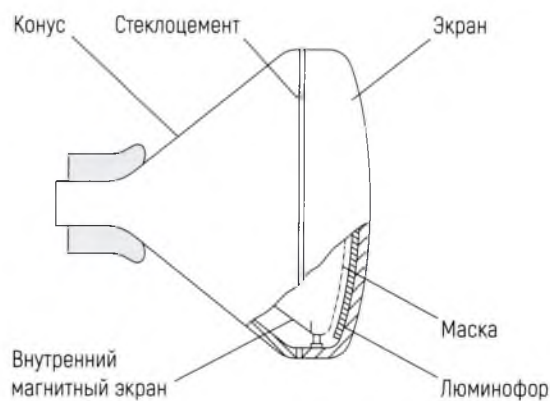


Рисунок 2 – Комплектующие, входящие в состав кинескопа

На внутреннюю поверхность экрана нанесено четыре слоя. Первый представляет собой углеродное покрытие с различными добавками поверхностно-активных веществ. Вторым образует покрытие из люминофоров, на который нанесён третий слой – воскоподобный – для выравнивания и защиты поверхности. Покрытие из алюминия – четвёртый слой, необходимый для повышения яркости. Внутренняя сторона конуса кинескопа имеет слой оксида железа, а внешняя – графита. Экран и конус кинескопа соединены между собой с помощью стеклоцемента.

После утилизации других частей остаётся лишь кинескоп, который требуется разделить на конус и экран ввиду их различного химического состава, что важно при последующей утилизации.

Для определения химического состава стекла авторами проведён анализ образцов, взятых из покрытия стекла кинескопа. Методика определения содержания основных химических компонентов изложена в ГОСТ 32362-2013 «Стекло неорганическое и стеклокристаллические материалы. Определение химического состава. Общие требования к методам определения содержания основных химических компонентов». Результаты исследования представлены в таблице 1.

В таблице 2 указан усреднённый химический состав стёкол кинескопа (в зависимости от изготовителя телевизоров состав может меняться).

Анализируя данные таблиц 1 и 2, можно сделать вывод: представленные образцы не соответствуют на 100 %

какому-либо химическому составу стекла, указанному в литературных источниках. Это может быть обусловлено неточным разделением стекла кинескопов по его видам на предприятии.

При разделении стекла можно получить два его вида – бариево-стронциевое и свинцовое.

Бариево-стронциевое стекло применяется в производстве строительных материалов в связи с низкой выщелачиваемостью ионов бария и стронция, концентрация которых не превышает допустимые нормы.

Единственный и наиболее распространённый метод переработки свинцового стекла – использование его в качестве вторсырья для получения свинца (в металлургических плавильных печах флюс частично замещается свинцовым стеклом). Предлагаются также альтернативные способы утилизации, которые в целом сводятся к идее использования стекла для изготовления строительных материалов или в качестве добавки в кирпич, бетон, цемент, декоративную плитку и др. Такие материалы с повышенным содержанием свинцового стекла могут быть пригодны для защиты от рентгеновского излучения. Свинцовое стекло также необходимо в керамической промышленности для создания стойкой к выщелачиванию глазури.

Основной недостаток строительных материалов с добавками неочищенного свинцового стекла – снижение их механических свойств. Кроме того, установлено, что концентрация ионов свинца в большинстве случаев превышает допустимые нормы.

Таблица 1 – Результаты определения химического состава стекла лабораторным путём, %

Вещество	Химическая формула	Образец № 1	Образец № 2
Оксид кремния (кремнезём)	SiO <sub>2</sub>	61,9	26,3
Оксид алюминия	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6	1,3
Оксид свинца	PbO	6,6	38
Оксид цинка	ZnO	0,1	0,5
Оксид натрия	Na <sub>2</sub> O	5,5	6
Оксид калия	K <sub>2</sub> O	7	8
Оксид кальция	CaO	0,5	1,9
Оксид железа	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,1
Оксид стронция	SrO	6	8,1
Оксид бария	BaO	9	9
Остальные оксиды	-	0,7	0,8

Таблица 2 – Усреднённый химический состав стёкол кинескопа, %

Вещество	Химическая формула	Экран и конус (ч/б ТВ)	Свинцоводержащий экран	Экран	Конус	Стекло ЭЛТ	Стеклоцемент
Оксид кремния	SiO <sub>2</sub>	65	44,2	62	52	33,7	2
Оксид алюминия	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	1,5	2,2	4	1,8	–
Оксид свинца	PbO	4	4,2	–	22	39,4	75
Оксид цинка	ZnO	0,1	0,5	0,3	–	–	11
Оксид натрия	Na <sub>2</sub> O	7	6	8	6,8	5,6	–
Оксид калия	K <sub>2</sub> O	7	11,5	7	7,8	8,6	–
Оксид кальция	CaO	0,5	2,5	0,5	3,8	4,3	–
Оксид магния	MgO	–	0,2	0,2	1,8	1,4	–
Оксид железа	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	0,1	0,08	0,1	1	–
Оксид стронция	SrO	1	16,8	8	0,5	0,2	–
Оксид бария	BaO	11	10,9	10	1	–	2
Оксид бора	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	–	3,5	9
Остальные оксиды	–	1,3	1,6	1,72	0,2	0,5	1

В Республике Беларусь отходы стекла применяются как заменитель кварцевого песка в производстве строительных материалов, керамической плитки и др.

Таким образом, допускается вторичное использование кинескопов, однако существует необходимость в их разделении, очистке и переработке, что возможно только при наличии специального оборудования на предприятиях по их утилизации. Именно поэтому для дальнейшей переработки и применения предлагается стекло измельчать и подвергать очистке от вредных веществ.

### Технологический процесс измельчения стекла

Стекло после рассортировки от пластика поступает на участок дробления для разделения на крупные фракции с помощью молотковых дробилок.

Размеры кусков стеклобоя первого сорта должны быть 10–50 мм. Допускается содержание в партии стеклобоя кусков размером свыше 50 мм – не более 5 %; размером менее 10 мм – не более 1 %. Размер кусков стеклобоя второго сорта не нормируется, масса кусков – не более 2 кг.

В связи с тем, что в партии фракция кусков после первого дробления разнородная, необходимо последующее измельчение до однородности – помол. Для этого предлагается использовать роторную дробилку (собственная разработка авторов), схема которой дана на рисунке 3.

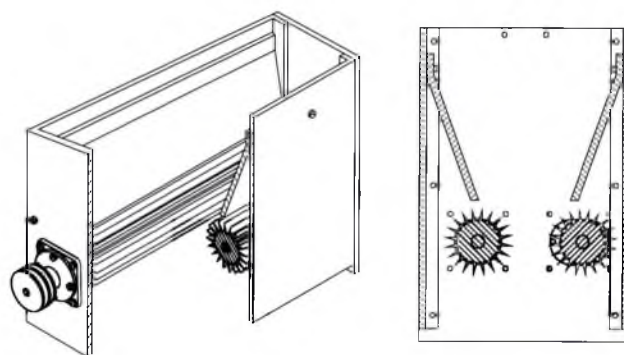


Рисунок 3 – Роторная дробилка

Роторы представляют собой шестерни, вращающиеся навстречу друг другу с одинаковой скоростью.

Стеклообразная масса по наклонному желобу подается на роторы и силой трения, возникающей от контакта с поверхностью вращающихся роторов, направляется в зазор между ними. За счет сил трения и ударных нагрузок происходит дробление стекла до однородной фракции.

Рассмотрим условие затягивания стекла в зазор (рисунок 4). На материал действуют следующие силы:  $G$  – сила тяжести материала,  $N_1, N_2$  – силы реакции роторов,  $H$ ;  $T_1, T_2$  – силы трения материала о поверхность роторов,  $H$ . Величины  $\alpha_1, \alpha_2$  – углы захвата массы роторами – зависят от угла наклона стенок шахты и расстояния между пластинами;  $v$  – линейная скорость вращения.

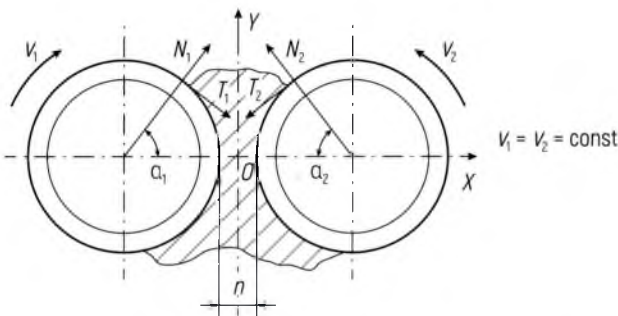


Рисунок 4 – Схема затягивания материала валиками

Материал в постепенно сужающемся пространстве претерпевает все увеличивающуюся деформацию, испытывает растягивающие и сжимающие напряжения, которые увеличиваются за счет вращения роторов.

Силы трения определяются из следующих зависимостей:

$$T_1 = T_2 = N_1 f_1 = N_2 f_2 = N_1 \operatorname{tg} \beta_1 = N_2 \operatorname{tg} \beta_2, \quad (1)$$

где  $f_1, f_2$  – коэффициенты трения материала о поверхность роторов;

$\beta_1, \beta_2$  – углы трения материала о поверхность роторов, °.

Величины  $\beta_1, \beta_2$  зависят от вязкости стеклянной массы.

Составим уравнение равновесия величины проекций сил на ось  $OX$ ; при этом примем, что центр координат находится в середине зазора:

$$F = G - N_1 \sin \alpha_1 + N_2 \sin \alpha_2 + T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2, \quad (2)$$

где  $F$  – сила затягивания материала в зазор,  $H$ .

Подставляя значения  $T_1, T_2$ , получим:

$$F = G - N_1 [\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \operatorname{tg} \beta_1] - N_2 [\sin \alpha_2 + \cos \alpha_2 \operatorname{tg} \beta_2]. \quad (3)$$

Если принять, что

$$\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 \text{ и } \beta = \beta_1 = \beta_2, \quad (4)$$

то сила затягивания материала в зазор между роторами равна:

$$F = G - 2N [\sin \alpha + \cos \alpha \operatorname{tg} \beta]. \quad (5)$$

Тогда масса стекла, затягиваемая роторами, при  $G = mg$  составляет:

$$m = \frac{F + 2N [\sin \alpha + \cos \alpha \operatorname{tg} \beta]}{g}, \text{ кг.} \quad (6)$$

Производительность устройства и размер частиц на выходе зависят от расстояния  $l$  между распределяющими роторами:

$$P = \frac{60}{1000} \rho S_{\text{щ}} V_{\text{вал}}, \text{ кг/с,} \quad (7)$$

где  $\rho$  – плотность продукта,  $\text{кг/м}^3$ ;

$S_{\text{щ}}$  – площадь щели между распределяющими роторами,  $\text{м}^2$ ;

$V_{\text{вал}}$  – скорость вращения распределяющих роторов,  $\text{м/с}$ .

$$S_{\text{щ}} = bn, \quad (8)$$

где  $b$  – длина распределительных роторов,  $\text{м}$ .

В результате помола образуется крошка однородной фракции 0,4–5 мм, которую затем необходимо подвергнуть химической обработке.

## Технологический процесс очистки стекла от вредных примесей

### Очистка от люминофора

После разделения фракций полученный стеклянный порошок подвергают в течение 10–30 мин обработке моющим раствором, в качестве которого используют водный раствор соляной кислоты (концентрация 0,01–0,9 от общей массы). Осевший на дне ёмкости люминофор промывают, сушат, просеивают и направляют для повторного применения. В результате обработки стеклобоя водным раствором кислоты происходит отделение люминофора от стеклянной поверхности; утилизированный люминофор не отличается по гранулометрическому составу и светотехническим свойствам от впервые использованного люминофора. Затем осуществляется промывка стеклобоя водой – очистка

стекла от следов люминофора и минеральной кислоты. Таким образом, на выходе получается смесь двух видов стёкол – свинцового и бариево-стронциевого.

### **Очистка от свинца**

На сегодняшний день единственным и наиболее широко распространённым методом переработки свинцового стекла является применение его в качестве вторсырья для получения свинца. Для этого используют металлургические плавильные печи, в которых флюс частично замещается свинцовым стеклом. Нагрев печи осуществляется с помощью электричества, а в качестве сырья задействуется предварительно измельчённое и смешанное с расплавом оксисульфатной пасты свинцовое стекло (крошка размером до 3 мм). После процесса восстановления при 1200 °С на выходе образуются гранулы свинца и стекло.

Второй способ очистки стекла от свинцовых частиц – его специальная химическая обработка, суть которой заключается в предварительном выщелачивании данного вещества. Процесс выделения, как правило, проводят с помощью азотной кислоты в течение 1 ч, затем осуществляют промывку и сушку измельчённого стекла. Далее продукты выщелачивания отправляют на химический завод для последующей переработки, а полученная стеклянная крошка может быть использована в строительных материалах.

### **Изготовление бетона с использованием очищенного стеклобоя**

Бетон, содержащий наполнители в виде стеклянной крошки, превосходит традиционную строительную смесь. Главные преимущества стеклобетона:

- уменьшенная масса (основные наполнители – цемент, стекловолокно (стекло), песок);
- увеличенная прочность (стеклонаполненный композит отличается устойчивостью к деформациям, а параметры ударной стойкости в 15 раз превышают характеристики бетонного раствора);
- расширенная область применения и широкая номенклатура изготавливаемых изделий;
- значительное количество возможных добавок, разносторонне влияющих на характеристики получаемых строительных материалов.

Однако неверные пропорции компонентов существенно снижают прочность стеклобетона.

### **Дозирование составляющих бетонной смеси**

Степень однородности смеси – показатель эффективности смешивания. Согласно ранее принятому в отечественной литературе определению интенсивность действия смешивающего устройства (она же интенсивность смешивания) характеризуется следующими величинами:

- временем достижения конкретного технологического результата при постоянной частоте вращения или частотой вращения (окружной скоростью смешивающих лопастей) смешивающего механизма при постоянной продолжительности процесса;
- мощностью, расходуемой на смешивание, приведённой к единице объёма или массы смешиваемого материала.

Для производства бетонных конструкций необходимо технологическое оборудование, гарантирующее получение бетонных смесей с требуемыми свойствами и бетона с заданными проектными характеристиками.

При выборе технологического оборудования в соответствии с конкретными видами бетона и особенностями используемой технологии нужно руководствоваться нижеследующими положениями.

В технологии, реализуемой методом предварительного перемешивания, применяются:

- серийное смесительное оборудование отечественного производства;
- спирально-вихревые смесители марок ССВ-0,01 и ССВ-0,3;
- прутково-шнековые смесители марок СПШ;
- импортные смесители предварительного перемешивания, например марки «Экономи-2», в виде базового модуля.

Для виброуплотнения бетонных смесей, в том числе с пригрузом и вакуумированием, может быть использовано серийное технологическое оборудование, применяемое для изготовления обычных железобетонных конструкций.

Технология предварительного перемешивания смесей (премиксинг) с последующим уплотнением посредством различных технологических приёмов рекомендуется для массового выпуска сборных бетонных конструкций в заводских условиях при относительно небольшой номенклатуре изделий и значительных объёмах производства.

При реализации технологии изготовления бетонных конструкций методом премиксинга следует учитывать особенности устройства в них закладных деталей.



Технологическая схема опытно-промышленной линии по производству бетонных листовых элементов с добавлением стеклянной крошки представлена на рисунке 5.

С целью определения оптимального состава смеси с использованием отходов стекла кинескопа проведён эксперимент.

Первоначальный объёмный состав бетонной смеси: одна часть – цемент, 2,6 части – песок, 4,5 части – щебень. В нашем случае дополнительно в состав смеси вводилась стеклянная крошка – 0,4–1,2 части от полученной массы раствора. Соотношение вводимого песка и стеклянной крошки пропорционально, но не более 2,6 части.

Состав смесей, изготовленных для исследования, представлен в таблице 3.

Согласно государственному стандарту бетонные смеси характеризуются следующими технологическими показателями качества: удобоукладываемость, средняя плотность, расслаиваемость, пористость, температура, сохраняемость свойств во времени, объём вовлечённого воздуха. При проведении испытаний качество смеси определяется по её усадке и содержанию воздушных пор, тогда как качество затвердевшей смеси оценивается значениями предела прочности при сжатии через 28 дней. Кроме того, измеряется масса образцов после отлёжки. Готовый материал должен приобрести проектную прочность к определённому сроку и обладать необходимыми свойствами согласно назначению изготавливаемой конструкции: водостойкостью, морозостойкостью, плотностью и др.

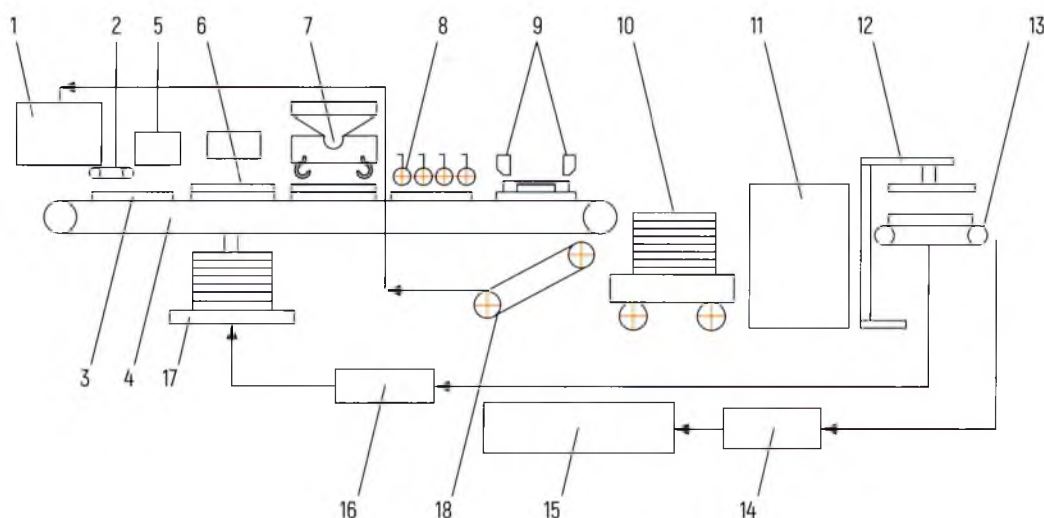


Рисунок 5 – Технологическая схема опытно-промышленной линии по производству стеклосланцевых элементов:

- 1 – смесительная установка; 2 – питатель-дозатор; 3 – поддон укладки смеси; 4 – конвейер формовки изделий; 5 – разравниватель; 6 – поддон формовки изделий; 7 – опрокидыватель-перебросчик; 8 – виброролики; 9 – ножницы; 10 – тележка; 11 – камера предварительного твердения; 12 – распалубщик; 13 – конвейер; 14 – конвейер влажного твердения; 15 – склад готовой продукции; 16 – пост чистки и смазки поддонов; 17 – перебросчик; 18 – передвижной конвейер подачи исходных материалов

Таблица 3 – Состав смесей для исследования

Образец	Состав, части			
	Цемент	Щебень	Песок	Стеклянная крошка
№ 1	1	4,5	2,6	–
№ 2	1	4,5	2,2	0,4
№ 3	1	4,5	1,8	0,8
№ 4	1	4,5	1,4	1,2

Для получения высококачественных изделий нужно, чтобы бетонная смесь имела консистенцию, соответствующую методам её укладки и уплотнения. Консистенцию смеси оценивают показателями её подвижности или жёсткости. Подвижность смеси – способность растекаться под собственной массой. Для определения данного параметра используют конус, который послойно в три приёма заполняют смесью, уплотняя её штыкованием [рисунок 6][8].

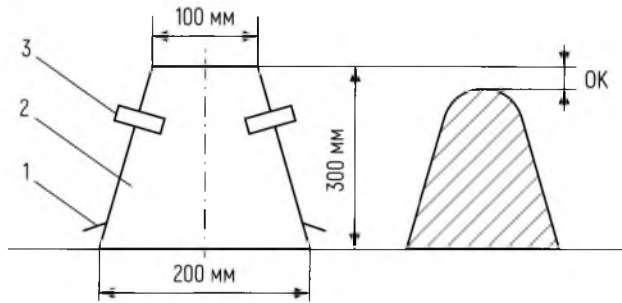


Рисунок 6 – Определение удобоукладываемости смеси по осадке конуса:

1 – опоры; 2 – конус; 3 – ручки; ОК – осадка конуса

В таблице 4 представлены нормативные и экспериментальные значения осадки конуса и марка смеси, отвечающей этим значениям. Марка указывает на подвижность смеси при укладывании: П1, П2, П3 – малоподвижные; П4, П5 – с высокой подвижностью.

Согласно полученным данным экспериментальные смеси соответствуют П3. Значит, все образцы относятся к малоподвижным, т. е. их консистенция густая. Смеси таких марок следует использовать для сооружения монолитных конструкций. При их заливке обязательно применяют вибраторы.

Класс (марка) бетона характеризуется его прочностью, которая определяется при сжатии образцов с ребром 150 мм, изготовленных из рабочей смеси после твердения их в течение 28 суток в нормальных условиях. Нормальными условиями твердения материала считаются относительная влажность воздуха 90–100 % и температура  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Высокая влажность воздуха необходима, чтобы избежать испарения воды из смеси, что может привести к прекращению твердения. Твердение материала ускоряется с повышением температуры и замедляется с её понижением. Экспериментальные показатели образцов представлены в таблице 5.

Таблица 4 – Нормативные и экспериментальные значения осадки конуса

Образец	Осадка конуса образцов, см	Нормативный показатель осадки конуса для разных марок, см				
		П1	П2	П3	П4	П5
		1–4	5–9	10–15	16–20	Более 20
№ 1	10			+		
№ 2	10			+		
№ 3	11			+		
№ 4	12			+		

Таблица 5 – Экспериментальные показатели образцов

Образец	Масса, г		Разрушающая нагрузка, кН	
	до отлёжки	после отлёжки	до отлёжки	после отлёжки
№ 1	2360	2300	112	158
№ 2	2340	2280	124	164
№ 3	2335	2214	118	160
№ 4	2320	2200	108	142

Следует отметить, что образцы при введении стеклянной крошки незначительно уменьшили массу, но увеличили свою прочность. Однако при добавлении крошки в соотношении с песком почти 50/50 прочность снизилась.

Экономический эффект рассматриваемой технологии заключается в увеличении прочности бетонных смесей и расширении области использования отходов стекла кинескопов.

Результаты испытаний (таблица 6) показали, что образцы с добавлением отходов стекла по прочности соответствуют бетону класса  $C^{9/10}$  согласно СТБ 1544-2005 «Бетоны конструкционные тяжёлые. Технические условия». Прочность образцов увеличилась на 0,6–2,7 МПа (4,8–21,6 %).

Таким образом, применение отходов стекла в изделиях из бетона позволит повысить прочность бетона при сжатии, что даст возможность экономии цемента и песка (при тех же прочностных показателях конструкции). Кроме того, благодаря предлагаемой технологии увеличится срок безремонтного периода, что особенно важно при строительстве такого масштабного объекта, как экваториальная стартовая эстакада ОТС.

## Заключение

Переработка электронных отходов является не только значимым элементом в общей структуре управления отходами, но и представляет интерес с точки зрения материального и ресурсного потенциала. Отмечено, что электронные отходы – существенный источник загрязнения окружающей среды, однако они могут рассматриваться в качестве вторичного ресурса, так как содержат ценные компоненты. Один из таких компонентов – стекло, используемые для оптического применения, кинескопы телевизоров, экраны мониторов, имеющие сложный состав для их дальнейшей утилизации.

В данной работе представлен технологический процесс подготовки отходов стекла от кинескопов для производства армированных строительных материалов – способом перемешивания и вибрации. Предложено устройство для помола стекла в мелкодисперсную фракцию, обеспечивающее равномерное его смешивание с раствором бетона, и определён оптимальный состав бетонной смеси.

Установлено, что бетонные конструкции, произведённые из смесей новых рецептур, обладают преимуществом

Таблица 6 – Результаты испытаний образцов

Нормируемые характеристики прочности и плотности бетона			Характеристика образца			Результаты испытания			
Класс бетона по прочности	Требуемая прочность при испытании образца, МПа	Отпускная прочность, МПа	Масса, г	Размеры, см	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность образца, МПа	Отклонение прочности образца	
								МПа	%
$C^{9/10}$	12,9	9	2360	10 × 10 × 10	2 360 000	112	10,7	-2,2	-17,3
			2300		2 300 000	158	15	+2,1	+16,6
			2340		2 340 000	124	11,8	-1,1	-8,5
			2280		2 280 000	164	15,6	+2,7	+21,6
			2335		2 335 000	118	11,2	-1,7	-12,9
			2214		2 214 000	160	15,2	+2,3	+18,1
			2320		2 320 000	108	10,3	-2,6	-20,3
			2200		2 200 000	142	13,5	+0,6	+4,8

по сравнению с обычными – увеличивается прочность на сжатие на 0,6–2,7 МПа (4,8–21,6 %).

Использование рассмотренной технологии, предполагающей внесение стабилизирующей добавки в бетоны, позволит сократить материальные затраты на изготовление стартовой эстакады ОТС и при этом улучшить прочностные характеристики сооружаемого объекта.

### Список основных источников

1. Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты: материалы V междунар. науч.-техн. конф., Марьино Горка, 23–24 сент. 2022 г. / ООО «Астроинженерные технологии», ЗАО «Струнные технологии»; под общ. ред. А.Э. Юницкого. – Минск: СтройМедиаПроект, 2023. – 320 с.
2. Юницкий, А.Э. Инженер: автобиография / Анатолий Юницкий. – Минск: Белпринт, 2021. – 400 с.: ил.
3. Ельяшкевич, С.А. Телевизоры 3 УСЦТ, 4 УСЦТ, 5 УСЦТ. Устройство, регулировка, ремонт / С.А. Ельяшкевич, А.Е. Пескин. – М.: Символ-Р, 1993. – 223 с.
4. *The Global E-Waste Monitor 2020. Quantities, Flows and the Circular Economy Potential [Electronic resource]* / V. Forti [et al.]. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/342783104\\_The\\_Global\\_E-waste\\_Monitor\\_2020\\_Quantities\\_flows\\_and\\_the\\_circular\\_economy\\_potential](https://www.researchgate.net/publication/342783104_The_Global_E-waste_Monitor_2020_Quantities_flows_and_the_circular_economy_potential). – Date of access: 08.04.2023.
5. 10 фактов об электронном мусоре [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://plus-one.ru/ecology/2021/04/20/10-faktov-ob-elektronnom-musore>. – Дата доступа: 08.04.2023.
6. «Относительно прогрессивно». Вышел доклад ООН по электронному мусору, там есть и про Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wasteinfo.by/news/otnositelno-progressivno-vyshel-doklad-oon-po-elektronnomu-musoru-tam-est-i-pro-belarus>. – Дата доступа: 08.04.2023.
7. Утилизация телевизоров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://musor.moscow/%20blog/utilizacija-televizorov/>. – Дата доступа: 08.04.2023.
8. Зими́на, Е.Л. Анализ возможности использования отходов лёгкой промышленности в производстве материалов строительного назначения / Е.Л. Зими́на // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2016. – Вып. 31. – С. 39–46.

