

НОВЫЕ ДОЛГОВЕЧНЫЕ РАСТВОРЫ И БЕТОНЫ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ И КОНСЕРВАЦИИ ОТХОДОВ

В предлагаемой статье приводятся новые данные о свойствах растворов и бетонов на основе наноцементов, позволяющих эффективно применять их для решения проблем экологии — одной из важнейших современных проблем Российской Федерации — двумя способами: путем микрокапсуляции токсичных дисперсных отходов мусоросжигательных заводов для их обезвреживания и превращения в полезный продукт, а также строительства саркофагов с высокими показателями прочности, водонепроницаемости и морозостойкости для полной изоляции от окружающей среды различных химических и радиоактивных отходов.

Сегодня в мировой строительной индустрии прослеживается тенденция к применению высококачественных бетонов нового поколения, получивших название High Performance Concrete (HPC). Благодаря исключительным строительно-техническим свойствам они должны обеспечивать срок службы изделий и конструкций не менее двухсот, а в перспективе и все пятьсот лет. В настоящее время бетоны такого типа с высокими эксплуатационными характеристиками производятся с применением тщательно подобранных компонентов смесей при условии минимального их загрязнения глинистыми, с ограничениями по гранулометрии и морфологии мелких и крупных заполнителей, использованием дорогих химических добавок и микрокремнезема.

Наиболее активной твердой составляющей современных бетонов является дисперсный портландцемент, определяющий все строительно-технические и эксплуатационные свойства бетонных изделий и конструкций. Портландцемент был изобретен в начале XIX века, и уже на протяжении двух столетий



М. Я. Бикбаев,

*д. х. н., генеральный директор
ОАО «Московский ИМЭТ»,
академик РАН,
Нью-Йоркской академии и др.*

цементные заводы всего мира производят практически тот же самый по составу продукт классов прочности 32,5; 42,5 и 52,5, дисперсностью от 300 до 400 м²/кг.

Российскими учеными реализована наномодификация портландцемента — *механохимическая активация вяжущего в сочетании с микрокапсуляцией его зерен в процессе измельчения* (новые материалы названы *наноцементами*).



А. И. Леваев,

*генеральный директор
ООО «Геосфера»*

Разработанная технология производства наноцементов с удельной поверхностью до 900 м²/кг позволяет значительно (до классов 72,5–92,5) повысить марочность наномодифицированных портландцементов, а также организовать переход промышленности стройматериалов на производство малоклинкерных цементов (со снижением массового содержания клинкера в таких цементах

Таблица 1. Применение наноцементов промышленного выпуска (под первым названием ВНВ) для производства высокопрочных бетонов специального назначения в 1989–1992 гг. (Н. Ф. Башлыков, Ш. Т. Бабаев, В. М. Несветайло, Б. Э. Юдович и др.)

Вид наноцемента, завод-производитель	Объем производства, т (год выпуска)	Наименование бетона, ведомство — потребитель цемента	Марка (класс) бетона	Сооружения, годы строительства
ВНВ100 (наноцемент 90), Здолбуновский цементно-шиферный комбинат	450 000 (1990)	Монолитный высокоармированный железобетон Спецстрой Центрального и Уральского военных округов	800–1000 (В60–В75)	Пусковые шахты для межконтинентальных баллистических ракет, 1989 (опытные шахты) 1990–1992 (массовое строительство)
	550 000 (1991)		800–900 (В60–В65)	
	150 000 (1992)			
ВНВ100 (наноцемент 90), Белгородский цементный завод	300 000 (1991)	Монолит, высокоармированный железобетон, расход стали более 100 кг/м ³ Спецстрой Минобороны	800–1000 (В60–В75)	Пусковые шахты для межконтинентальных баллистических ракет, 1991–1992 (массовое строительство)
	120 000 (1992)		800–900 (В60–В65)	

до 30 %) с сохранением высоких строительно-технических свойств материалов [1–3]. Новые цементы, ранее получившие наименование «вяжущие низкой водопотребности» (ВНВ), показали блестящие результаты при испытаниях в США еще в 1989 году [4], в то же время в нашей стране был сформирован и утвержден государственный заказ на масштабное освоение их промышленного производства.

Научная основа радикального улучшения строительно-технических характеристик портландцемента в результате его наномодификации отражена в открытии № 450 [1], мировой технический уровень признан патентами России,

США, Евразии, Европы и Японии, а практическое значение доказано производством более трех миллионов тонн наноцементов, нашедших эффективное применение в специальном (табл. 1) и гражданском строительстве при изготовлении высококлассных водо- и газонепроницаемых бетонов (рис. 1, 2). Внедрение в производство технологии наноцементов и бетонов на их основе в Российской Федерации рекомендовано «Стратегией развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года», утвержденной распоряжением Правительства РФ от 10 мая 2016 г. № 868-р.

В работе [5] нами были показаны составы обычных, литых и самоуплотняющихся бетонных смесей на основе наноцементов, обладающих высокими реологическими свойствами и подвижностью, несмотря на исключение из их состава суперпластификаторов и высокодисперсных наполнителей (что обеспечивает значительно более низкую себестоимость таких бетонов).

Опыт работы с наноцементами и их предшественниками в специальном строительстве позволил обобщить требования к бетонным смесям, а также характеристики бетонов для оценки эффективности применения портландцементов



Рис. 1. Яхта с корпусом из наноцемента:
а — корпус яхты в экспериментальном цехе (толщина абсолютно водонепроницаемой стенки бортов 12 мм);
б — на Клязьминском водохранилище (Московская область, 2009 год)

и наноцементов в технологии бетонов (табл. 2). Изобретение наноцементов вооружает строителей новой технологической основой, базирующейся на процессе наномодифицирования портландцемента, — скоростной технологией укладки бетонных смесей, позволяющей существенно повысить темпы твердения бетонных растворов при нормальных и низких температурах, в значительной мере улучшить показатели водонепроницаемости, прочности и долговечности бетона при снижении стоимости его производства.

Именно высокодисперсная реологическая матрица бетонных смесей с повышенной плотностью (за счет содержания в ее объеме частиц наноцемента и высокодисперсных частиц кварцевого песка) при минимальном водосодержании, *даже без суперпластифицирующих добавок*, дает возможность свободного перемещения в растворе частиц песка



Рис. 2. Храм Всех Святых в г. Дубне Московской области. Купола церкви толщиной 40 мм выполнены из наноцемента. 2005 год

и щебня и обеспечивает требуемую подвижность (текучесть) бетонной смеси [6]. При этом появляется возможность значительно снизить количество воды в литых

и самоуплотняющихся бетонных смесях на основе наноцементов и благодаря этому уменьшить расслаиваемость, усадочные явления, трещинообразование, обеспечить

Таблица 2. Требования к бетонным смесям и сравнительные характеристики высокопрочных и долговечных бетонов (High Performance Concrete) на основе портландцемента и наноцемента по В. М. Несветайло [6]

Материалы и свойства бетонной смеси и бетона	Портландцемент	Наноцемент	Эффективность технологии производства наноцемента
Цемент	M600	Наноцементы всех классов	Доступность нерудных материалов Снижение себестоимости бетона
Песок	Три фракции с содержанием пыли до 0,5 %	Одна фракция. Не мытый, содержание пыли до 10 %	
Щебень	Две фракции с содержанием пыли до 0,5 % Лещадность до 10 %	Одна фракция, содержание пыли до 5 % Лещадность до 30 %	
Химические добавки	Нужны	Не нужны	Снижение себестоимости бетона
Микрокремнезем	Нужен	Не нужен	Снижение себестоимости бетона
Расплав конуса, см Осадка конуса, см	От 1 до 2 От 2 до 5	От 60 до 75 От 22 до 25	Заполнение густоармированных конструкций
Водоотделение бетонной смеси, %	От 1 до 2	От 0,01 до 0,02	Стойкость в воде
Прочность на сжатие в возрасте 1 сут., МПа	30	70	Ускорение строительства
Водонепроницаемость, ати	25	50	Служба в морской воде до 100 лет
Газопроницаемость, г/(м·ч·Па)	0,01	0,001	Захоронение высокотоксичных отходов
Морозостойкость, циклы	1000	2000	Увеличение срока службы до 200 лет

Характерной особенностью наноцемента по сравнению с портландцементом является формирование цементного камня с более высокой плотностью, а также способностью к обеспечению полной водо-, газонепроницаемости бетонных массивов на основе наноцемента, включающего высокодисперсные (в несколько десятков нанометров) частички нанокапсулированного портландцемента и кварцевого песка.

заданные эксплуатационные свойства бетонов.

С использованием таких бетонов значительно ускоряются и упрощаются работы по бетонированию как монолитных конструкций, в том числе массивных, так и сборных изделий из железобетона необходимого качества и максимальной долговечности. В этой связи весьма привлекательным представляется применение наноцементов с выдающимися свойствами для решения одной из ключевых проблем Российской Федерации в настоящее время — обезвреживания, эффективной переработки, утилизации и захоронения различных отходов.

Особо следует подчеркнуть два перспективных направления применения растворов и бетонов на основе наноцементов:

- микрокапсуляцию токсичных дисперсий для их обезвреживания и предотвращения их массообмена

с окружающей средой (на примере высокотоксичных зол и шлаков мусоросжигания);

- полную изоляцию различных отходов, в том числе ядерных, возведением бетонных хранилищ (саркофагов) с полной водо- и газонепроницаемостью для исключения массообмена токсичных и радиоактивных веществ с окружающей средой.

Микрокапсуляция золошлаковых отходов мусоросжигания с помощью наноцемента

Учитывая весьма значительное количество функционирующих во всем мире мусоросжигательных заводов, одной из наиболее важных проблем сохранения окружающей среды в мире видится обезвреживание и утилизация золошлаковых отходов мусоросжигания.

В качестве примера в табл. 3 приведен характерный химический состав золошлаковых отходов мусоросжигательного завода — Спецпредприятия № 2 (МСЗ № 2) ГУП «Экотехпром». Этот состав отличается значительным количеством тяжелых металлов, определяющих токсичность отходов. Особенно опасным является содержание в таких отходах диоксинов, в 300–400 раз превышающих допустимые нормы и к тому же, по заключению медиков, являющихся коканцерогенными. Самой большой опасностью диоксинов является их аккумуляция в окружающей среде: если даже боевые отравляющие вещества — табун,

зарин, хлор и другие — со временем в природе нейтрализуются, то диоксины обладают исключительной стабильностью, к тому же в настоящее время наблюдается постоянное повышение их концентрации в почве вокруг крупных городов всего мира.

К сожалению, в России дилетантами от науки предложен очень распространенный в наименее развитых странах способ решения проблемы обращения с твердыми бытовыми (ТБО) и другими отходами путем их закапывания на полигонах. В этом случае захороненные в землю отходы с течением небольшого времени начинают разогреваться, гореть и выделять вредные вещества, в том числе наиболее опасные для человека диоксины. По сути, полигоны ТБО являются сегодня главным источником диоксинов и тяжелых металлов, интенсивно загрязняющих среду обитания. При этом Российская Федерация в 1996 году подписала европейскую конвенцию о запрещении полигонного хранения отходов...

Между тем до настоящего времени глобальная проблема обезвреживания высокотоксичных зол и шлаков мусоросжигания не решена. Даже в таких экономически развитых странах, как Япония и ФРГ, золы и шлаки мусоросжигания складировывают в многослойные мешки и помещают в металлические контейнеры, консервируемые в специальных шахтах до появления новых технологий, которые позволят дезактивировать золошлаковые отходы мусоросжигания.

Таблица 3. Химический состав золы и шлака Московского мусоросжигательного завода № 2, % (масс.)

Наименование материала	П.п.п.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Суммарное количество
Зола*	20,29	15,39	7,11	1,20	32,13	2,70	8,32	1,11	5,31	6,09	99,70
Шлак	2,84	60,01	5,49	3,99	12,39	3,69	1,31	0,41	8,33	1,07	99,53

* Зола включает материал пылеуборки и газоочистки, содержание в ней диоксинов в 300–400 раз превышает предельно допустимые концентрации.

Не случайно люди во всем мире протестуют против строительства мусоросжигательных заводов.

Острота этой проблемы для российской столицы вызвала необходимость объявления правительством города тендера «Об организации утилизации летучей золы и твердого остатка газоочистки заводов термической переработки ТБО в г. Москве» согласно Постановлению Правительства Москвы от 15 февраля 2000 г. № 120. Выигравшим указанный тендер институтом «Московский ИМЭТ» для Спецпредприятия № 2 (МСЗ № 2) ГУП «Экотехпром» была выполнена технологическая часть проекта, в рамках которого не только решалась проблема нейтрализации

токсичных зол и шлаков, но и была создана технология переработки этих отходов в безвредные, экологически чистые материалы и изделия для дорожного строительства и благоустройства. Производство было успешно пущено в эксплуатацию в 2005 году.

Цех включает две линии, оборудованные шаровыми мельницами СН 1456А: механохимической активации токсичной золы и производства наноцемента (производительностью 3 т/ч). Согласно новой технологии, защищенной восемью патентами Российской Федерации, токсичные золы и шлаки непосредственно на первой линии мусоросжигательного завода подвергаются механохимической обработке,

при которой осуществляется химическая нейтрализация вредных веществ. Далее материалы омоноличиваются в грануляторе наноцементом в агломерат — искусственный гранулят с размером гранул 10–25 мм, который капсулируется специальным цементно-песчаным раствором на основе наноцемента, и затем гранулы поступают на закрытый транспортер термовлажностной обработки для ускоренного набора ими прочности. Гранулят применяется как готовый продукт в дорожном строительстве или в виде крупного заполнителя при изготовлении бетонных изделий. Для этого в цехе предусмотрен узел производства высокопрочных бетонных изделий

Таблица 4. Степень выделения тяжелых металлов из образцов изделий, полученных по технологии ОАО «Московский ИМЭТ» с использованием токсичных отходов мусоросжигания

Наименование элемента	Содержание тяжелых металлов в золе мусоросжигательного завода, мг/кг	Содержание тяжелых металлов в одной вытяжке (рН — 4,8) из готовых изделий, мг/л*		ПДК в почве, мг/кг
		искусственный гранулят	изделия из бетона	
Цинк (Zn)	3873,0	62,2	96,0	100,0
Свинец (Pb)	5407,0	7,28	0,02	32,0
Хром (Cr)	103,0	4,23	< 0,001	6,0
Никель (Ni)	46,0	1,63	0,06	24,0
Кадмий (Cd)	23,0	0,02	< 0,001	0,5
Мышьяк (As)	9,4	0,10	< 0,001	2,0
Кобальт (Co)	6,0	0,33	0,05	5,0
Ртуть (Hg)	Не более 0,1	—	< 0,0001	2,1

* Результаты испытаний испытательного центра ГСЭН.RU.ЦОА.021.

Таблица 5. Степень выделения диоксинов из образцов изделий, полученных по технологии ОАО «Московский ИМЭТ» с использованием токсичных отходов мусоросжигания

Тип пробы	Модельная среда миграции диоксинов	Время выдержки пробы в модельной среде, сут.	Концентрация диоксинов (ДЭ) в модельных средах, Пг/л
Капсулированный гранулят	Дистиллированная вода	10	0,45
Капсулированный гранулят	Аммонийно-ацетатный буферный раствор	3	1,12
Капсулированный гранулят	Аммонийно-ацетатный буферный раствор	7	2,44
Изделие из бетона с гранулятом	Аммонийно-ацетатный буферный раствор	7	0,81
Измельченный капсулированный гранулят	Толуол	1	18,42*

* ПДК в воздухе 0,5 Пг/м³; ПДК в воде 20,0 Пг/л.

Проведенные исследования продемонстрировали, что при 300–400-кратном превышении ПДК диоксинов в исходной золе мусоросжигания новая технология позволяет перерабатывать ее в гранулят и бетонные изделия, содержание диоксинов в которых меньше, чем в питьевой воде.

из наноцемента с применением получаемого гранулята.

Исследования измельченного гранулята, в том числе его капсулированной формы, на содержание диоксинов показали, что и гранулят, и изделия из бетона на его основе экологически чисты и могут использоваться в дорожном строительстве и благоустройстве (табл. 4, 5). Результаты многократно повторенных, начиная с 2006 года, химических и биологических анализов гранулята и изделий из бетона убедительно доказывают отнесение их к четвертому классу опасности по уровню токсичности, то есть к категории, присущей всем видам бетонных изделий. На гранулят и изделия из бетона на его основе получены гигиенические сертификаты.

Цех по переработке золошлаковых отходов мусоросжигательного завода был оснащен разработанным нами оборудованием, позволяющим осуществлять обезвреживание и нейтрализацию токсичных зол и шлаков с помощью наноцементов. Производительность активатора-нейтрализатора по материалу составляет до 6 т/ч, ориентировочное время пребывания в нем компонентов 15–20 мин. Характеристики смеси после прохождения через нейтрализатор: средняя плотность материала — 2,0–2,1 т/м³; насыпная плотность — 1,0–1,2 т/м³.

В технологической линии мощностью 60 тыс. т гранулята в год,

позволяющей ежегодно обезвреживать и утилизировать 30 тыс. т золы и шлака, предусмотрен и узел дополнительной обработки гранул капсулированием оболочкой из наноцемента для полного исключения миграции токсичных компонентов из гранулята в водную среду при его использовании в качестве строительного материала. Следует отметить, что надежное программное обеспечение, а также оснащение оборудования средствами автоматизации предполагают проведение процесса силами всего трех человек — диспетчера, дистанционно управляющего процессом из операторской, и двух операторов, находящихся на рабочем месте у гранулятора.

Следует отметить, что работа Московского мусоросжигательного завода № 2 с практической реализацией новой технологии ОАО «Московский ИМЭТ» стала полностью безотходной, иллюстрируя концепцию возможности полной переработки твердых бытовых отходов в полезные материалы и изделия [7].

В процессе разработки новой технологии и освоения производства в цехе по обезвреживанию и переработке токсичных отходов мусоросжигания составлены и утверждены нормативные документы:

1. Технические условия:

- ТУ 5745–067–05442286–99 «Смеси сухие механоактивированные»;
- ТУ 5745–065–05442286–01 «Смеси сухие для капсулирования»;
- ТУ 5712–071–05442286–01 «Искусственный крупный наполнитель («Гранулят»)»;
- ТУ 5745–074–05442286–01 «Смеси цветные бетонные»;
- ТУ 5715–073–05442286–01 «Камни бортовые цветные»;
- ТУ 5715–048–05442286–01 «Плиты тротуарные цветные».

2. Санитарно-эпидемиологические сертификаты:

- № 50.99.16.571.П.10659.06.2 от 27.06.02 г. «Гранулят на основе омоноличенных зол и шлаков МСЗ № 2»;
- № 50.99.16.571.П.10658.06.2 от 27.06.02 г. «Бортовой камень для дорожного строительства и благоустройства с крупным искусственным наполнителем — гранулятом на основе зол и шлаков МСЗ № 2»;
- № 50.99.16.574.П.13663.06.4 от 03.06.04 г. «Смеси механоактивированные сухие»;
- № 50.99.16.571.П.18153.07.4 от 26.07.04 г. «Плиты тротуарные цветные»;
- № 50.99.16.574.П.18154.07.4 от 26.07.04 г. «Смеси сухие для капсулирования»;
- № 50.99.16.571.П.18155.07.4 от 26.07.04 г. «Изделия архитектурно-строительные для благоустройства городской среды из сухих механоактивированных смесей».

Предлагаемая технология переработки золы и шлака позволяет получить целый ряд изделий, которые находят широкое применение в дорожном и промышленном строительстве, а также при благоустройстве: искусственный гравий, плиты, лотки, бортовой камень, блоки ограждения и другую продукцию из бетона.

Полная реализация новой технологии на мусоросжигательных заводах позволит отказаться от вывоза и захоронения не только ТБО, но и токсичных зол и шлаков, исключит затраты муниципальных бюджетов на вывоз отходов и содержание свалок, улучшит экологическую обстановку в стране, освободит земли для более рационального использования. Решение проблемы утилизации золошлаковых отходов мусоросжигания даст возможность практического применения полного цикла переработки твердых бытовых отходов в электро- и теплотенергию, а также получения широкого ассортимента материалов и изделий. Впервые разработанная отечественными учеными и внедренная в г. Москве

технология обезвреживания и переработки токсичных зол мусоросжигания пока не имеет мировых аналогов.

Указанная работа вошла в инновационную программу «ЛИК города» как лучшая технология, за реализацию которой в 2000–2005 годах ОАО «Московский ИМЭТ» был награжден Золотой медалью мэрии г. Москвы.

Прочные непроницаемые нанобетоны

С целью развития второго направления — получения бетонов для строительства хранилищ (саркофагов) с наиболее высокой

водонепроницаемостью, обеспечивающей способность к долговечной консервации отходов различных видов, нами были разработаны оптимальные составы бетонных смесей на основе наноцементов. Смесей готовили в экспериментальном цехе ООО «Международный ИМЭТ» (г. Москва) на одновальном лопастном бетоносмесителе БС-1 (производства 268 Механического завода г. Иваново) емкостью 1 м³.

Компоненты бетонной смеси в требуемых пропорциях загружали в бетоносмеситель и перемешивали в течение одной минуты, затем в сухой состав подавали необходимый объем воды, и смесь перемешивали еще три минуты.

Подвижность бетонных смесей определяли по расплыву смеси по ГОСТ Р 58002–2017, часть 8 (соответствующего EN 12350–8:2010), плотность бетонных смесей — по ГОСТ 10181.2–81, прочностные показатели и плотность бетонов — по стандартным методикам ГОСТ 10180–90, водонепроницаемость образцов бетона — по ГОСТ 12730.5–84, морозостойкость — по базовому методу определения морозостойкости по ГОСТ 10060.2–95 (ускоренные методы определения морозостойкости в солях, способы 2 и 3).

В табл. 6 приведены подобранные составы бетонных смесей на основе наноцементов и основные

Таблица 6. Результаты подбора составов прочных водонепроницаемых бетонов на основе наноцементов с повышенной долговечностью

Компоненты бетонных смесей и характеристики бетонов	Показатели для бетонной смеси							
	№ 1	№ 6	№ 4	№ 3	№ 7	№ 2	№ 5	№ 8
Состав бетонной смеси, кг на 1 м³, и показатели бетонных смесей								
Наноцемент 90	395	384	—	—	—	—	—	—
Наноцемент 75	—	—	355	410	—	—	—	—
Наноцемент 55	—	—	—	—	333	—	—	—
Наноцемент 45	—	—	—	—	—	370	380	—
Наноцемент 35	—	—	—	—	—	—	—	513
Щебень	921 ¹	897 ¹	1039 ⁴	956 ⁴	466 ⁵	864 ⁵	887 ¹	900 ⁶
Песок строительный	920 ²	897 ³	889 ²	956 ²	800 ³	864 ³	887 ²	890 ³
Вода	145	193	112	123	93	135	165	171
Водотвердое отношение	0,36	0,50	0,32	0,30	0,28	0,36	0,43	0,28
Осадка конуса, см	3	5	9	8	5	3	7	11
Характеристики бетона								
Плотность, кг/м ³	2415	2370	2400	2480	2405	2255	2350	2435
Прочность на сжатие, МПа, в возрасте не менее 3 сут./28 сут.	57,6/72,4	—/53,3	—/58,9	67,1/73,4	35,0/73,0	32,9/45,3	35,6/43,5	54,0/61,0
Марка бетона по водонепроницаемости	W16	W20	W20	W20	W20	W20	W20	W18
Морозостойкость	Более 300 циклов	—	Более 300 циклов	Более 300 циклов	—	Более 300 циклов	—	—
¹ Щебень фракции 5–20 мм из породы тоннельной выработки карьера «Южный портал», М300, F25. ² Песок Раменского карьера, M _{кр.} =2,63. ³ Песок карьера ООО «Волжское ГПП № 1», M _{кр.} =2,61. ⁴ Щебень горной выработки «ТО № 12 БАМтоннельстрой», М1400, F300. ⁵ Щебень карьера «Каменский», М600, F25. ⁶ Щебень карьера «Майский», М600, F25.								

характеристики бетонов, изготовленных с использованием щебня и песка различных месторождений при твердении в нормальных условиях. Как видно, результаты испытаний, проведенных в ГУП «НИИМосстрой», свидетельствуют, что на основе практически всех типов наноцементов возможен подбор составов водонепроницаемых и морозостойких, а следовательно, долговечных бетонов согласно ПНСТ 19–2014 «Портландцемент наномодифицированный. Технические условия».

Предлагаемый вариант решения проблемы сохранения экологии Байкала

Одним из наиболее масштабных по распространению в России видов накопленного экологического ущерба являются загрязненные земли промышленных площадок и сопредельные территории действовавших в прошлом химических, металлургических, деревоперерабатывающих и других производств, а также места свалок опасных промышленных отходов, шламонакопители, мазутохранилища и нефтешламные амбары. Объемы вредных, токсичных веществ, занимающих значительные площади в разных регионах страны, измеряются сотнями миллионов тонн, а переработка таких отходов весьма дорога и нецелесообразна. При этом не вызывает сомнений эффективность применения разработанных бетонов на основе наноцементов для строительства долговечных хранилищ различных отходов (в том числе радиоактивных), бетонных саркофагов с обеспечением их полной водо- и газонепроницаемости, а также стойкости к воздействию агрессивных сред.

Россия — богатейшая страна, владеющая неисчерпаемыми природными ресурсами, и в частности

миллиардами кубометров пресной воды. Пятая часть мирового ее объема (или более 80 % российских запасов) содержится в озере Байкал, и сегодня сохранности этой редкой по чистоте природной воды угрожают миллионы кубометров токсичных отходов, аккумулированных на берегу озера в результате полувековой деятельности Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. Более того, проведенные в 2018–2019 годах инженерные изыскания выявили существенное увеличение за последние годы объемов отходов на территории бывшего БЦБК: и в шламонакопителях, и в гидротехнических емкостях комбината, и в резервуарах цеха очистных сооружений, состояние которых к тому же оценивается как аварийное. Ситуация усугубляется потенциальным риском непрогнозируемого схода селевых потоков, последствия которого могут стать губительными для экосистемы озера.

В 2019 году над Байкалом в очередной раз нависла угроза экологической катастрофы, когда уровень паводковых вод реки Слюдянки достиг критического значения и при дальнейшем небольшом его повышении потоки воды могли смыть значительную часть отходов Байкальского ЦБК в озеро.

Государственные и общественные деятели, а также ведущие российские ученые и крупные специалисты, неравнодушные к судьбе Байкала, продолжают поиск возможных решений этой острой проблемы. В конце января 2020 года состоялось очередное заседание Экспертного совета по актуальным социально-экономическим и научно-техническим проблемам фракции ЛДПР Государственной Думы ФС РФ, посвященное обсуждению вопросов спасения уникальной экосистемы озера Байкал (в котором приняли участие и сотрудники редакции журнала «Технологии Интеллектуального

Строительства») [8]. Президентом и правительством нашей страны был издан ряд постановлений и распоряжений, согласно которым проблема спасения экологии Байкала должна быть полностью решена уже в 2020 году, однако практические работы по их реализации до сих пор не начаты...

До недавнего времени не было эффективного, экономически приемлемого технического решения проблемы обезвреживания и утилизации токсичных отходов, содержащихся в картах-накопителях полигонов БЦБК, что может объяснять отсутствие действенных шагов, направленных на ликвидацию накопленного экологического ущерба.

В заявляемом нами изобретении проблему обезвреживания шлам-лигнинов, золошлаковых и промышленных отходов предлагается решить при помощи вяжущих веществ непосредственно в районе расположения карт-шламонакопителей Байкальского ЦБК, не затрачивая чрезмерных усилий и финансовых средств на извлечение, переработку или транспортировку весьма разнородных по составу, морфологии, подвижности и токсичности отходов.

Как отмечалось выше, бетоны на основе наноцементов могут эффективно применяться для решения проблем в области обращения с промышленными и бытовыми отходами, и в частности для ликвидации ущерба экологии озера Байкал. На применение в этих целях наноцементов нами совместно с ООО «Геосфера» (г. Москва) получен патент РФ № 2705112 «Способ и устройство для обеззараживания и рекультивации карт-накопителей отходов», что подтверждает высокий технический уровень и новизну предлагаемой технологии.

Подлежащие рекультивации карты шламохранилищ Байкальского ЦБК вырыты в грунте и имеют

близкую к прямоугольной форму: ширина — до 150 м, длина — до 1000 м, глубина — до 5–7 м. Дно карт покрыто водонепроницаемым экраном, боковые стенки — железобетонными плитами или металлическими листами и изолированы слоем асфальта. Уровень шлам-лигнина и его смесей с золой в картах колеблется в пределах от 3,5 до 7,0 м. Сейсмостойчивость карт рассчитана на 9 баллов при нормативно установленной в районе г. Байкальска зоне сейсмичности в 10 баллов.

Сущность предлагаемого нами технического решения для обезвреживания и рекультивации карт-шламонакопителей состоит в следующем. Карты шламохранилищ с отходами покрываются сверху водо- и газонепроницаемой герметичной железобетонной плитой с армирующим каркасом, которая опирается на трубобетонные колонны [9]. Использование высокоэффективного наноцемента взамен традиционного портландцемента для изготовления монолитного бетонного укрытия позволит предупредить попадание в окружающую среду составляющих отходов карт, а также обеспечит прочность и долговечность железобетонной конструкции, стойкость ее к сейсмическим воздействиям, водным

и селевым потокам со склонов гор, окружающих озеро. Наноцементы предполагается также использовать и для кольматации (омоноличивания) грунтов участков боковых поверхностей и дна карт-шламонакопителей в случае фильтрации ими веществ из карт по технологии нагнетания водных растворов наноцемента в грунт под давлением.

Реализацию рассматриваемого метода обезвреживания отходов, содержащихся в картах-шламонакопителей, и рекультивации полигонов БЦБК осуществляют путем непрерывного бетонирования изолирующей железобетонной плиты толщиной от 150 до 300 мм по всей площади каждой карты. Плиты монтируют на трубобетонных колоннах диаметром от 159 до 325 мм, которые устанавливают до бетонирования на дно шламовой карты, по всей ее площади, равномерно с шагом от 6,0 до 6,5 м между осями труб и высотой по вертикали на 10–30 см выше уровня отходов в карте. Опорные трубы заполняют бетоном и затем осуществляют омоноличивание стального каркаса плит бетоном на основе наноцемента одного из типов — 45 или 55, применяя в качестве крупного заполнителя щебень фракции 5–20 мм, а в качестве мелкого

заполнителя — строительный песок при следующем массовом соотношении ингредиентов:

- наноцемент — от 15 до 20 %;
- песок строительный — от 30 до 35 %;
- щебень — от 40 до 45 %;
- вода — остальное.

Кроме того, для обеспечения полного предотвращения массообмена между отходами, содержащимися в картах-шламонакопителях, и окружающей средой при возможном дренировании жидких сред через участки дна или боковых поверхностей карт, осуществляют подачу цементного раствора под давлением от 1 до 5 атм в дренирующие участки под дно и боковые поверхности карт-накопителей отходов, причем в качестве вяжущего в растворе применяют наноцемент одного из типов — 30 или 35, при следующем массовом соотношении ингредиентов растворной смеси:

- наноцемент — от 25 до 40 %;
- вода — от 75 до 60 %.

Высокая дисперсность наноцементов (удельная поверхность которых согласно патенту РФ № 2544355 составляет до 900 м²/кг) позволяет растворам на их основе глубоко проникать под указанным выше давлением в грунт для его омоноличивания.

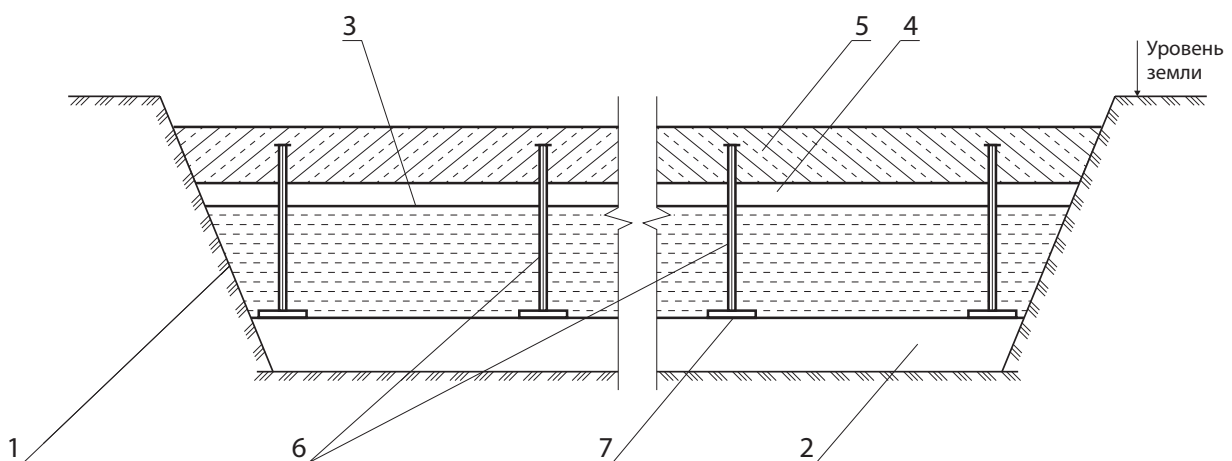


Рис. 3. Разрез карты-шламонакопителя с укрытием отходов железобетонной плитой на основе наноцемента:

1 — борта карты; 2 — глиняный замок; 3 — уровень расположения отходов в карте; 4 — опалубка; 5 — железобетонная плита на основе наноцемента; 6 — трубобетонные колонны; 7 — основания колонн

Использование наноцемента в трубобетонных колоннах в несколько раз повышает несущую способность таких опор и благодаря этому позволяет им выдерживать экстремальные нагрузки (например, при сейсмических воздействиях), в то время как любые другие виды железобетонных колонн, используемых в известных технических решениях при таких же условиях, очень быстро теряют несущую способность [10].

На установленные трубобетонные колонны монтируют армирующий каркас в виде стальных ригелей (прямоугольного профиля) между осями колонн, которыми соединяют трубобетонные колонны в плане по осям сторон квадратов и по одной диагонали квадратов и опирающейся на них арматуры, например, в виде дорожной сетки сверху и снизу стальных прямоугольных профилей. После установки армирующего каркаса и опалубки производят подачу и распределение бетонной смеси в трубобетонные колонны и железобетонную плиту по всей площади карты (рис. 3).

Опалубкой монолитной железобетонной плиты снизу в летнее время может служить твердая поверхность отходов в карте-шламонакопителе. Зимой в качестве опалубки можно использовать твердую

ледяную поверхность карт, утепленную, например, плитным экструдированным пенополистиролом. В теплый период надшламовую воду над отходами с поверхности рекультивируемой карты откачивают перед выполнением работ по изготовлению армирующего каркаса, нижней опалубки и заливке бетона плиты. Бетонирование плиты целесообразно производить без остановок в течение нескольких суток для каждой карты с установкой по ее толщине герметичных упругих прокладок для учета температурных эффектов сжатия и расширения бетона в зависимости от температуры окружающей среды.

Экономически выгодной представляется возможность применения цементов и нерудных материалов Иркутской области. Так, на действующих помольных линиях Ангарского цементного завода можно производить наноцементы требуемых типов в необходимом объеме путем наномодификации заводского портландцемента. При этом щебня и песка в регионе более чем достаточно. Приготовление бетонных смесей возможно на БСУ г. Байкальска, расположенного в нескольких километрах от карт-шламонакопителей, или с использованием передвижных комплектных бетоносмесительных узлов типа «Флагман 60» или «Флагман 90».

Для проведения бетонных работ устанавливают раздатчик с бункером для подачи и распределения бетона по всей поверхности каждой карты. После полной укладки в опалубку бетонная смесь при необходимости выравнивается и уплотняется, в зимнее время включается подогрев бетона массива плиты армирующей нагревательной проволокой. Отлитая железобетонная плита в холодный период года накрывается сверху утеплителем по всей поверхности.

После затвердевания бетонной смеси на поверхность готовой железобетонной плиты отсыпают грунт и на него укладывают слой почвогрунта с высеванием трав и посадкой деревьев (рис. 4). Железобетонная поверхность плит может использоваться и как основание для строительства различных объектов отдыха и соцкультбыта, а также применяться в качестве автомобильных стоянок или взлетных полос малой авиации.

Предлагаемое техническое решение по обезвреживанию и рекультивации карт-шламонакопителей Байкальского ЦБК отличается следующими особенностями:

- обеспечивает омоноличивание и полную изоляцию от внешней среды разнородных отходов различного происхождения;

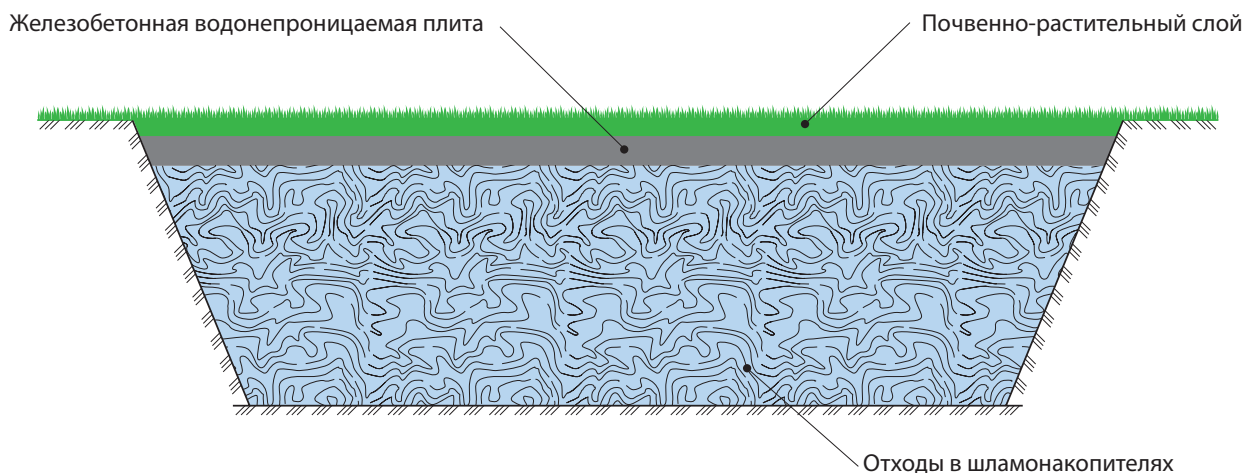



Рис. 4. Разрез карты-шламонакопителя после рекультивации

Список литературы

1. Бикбау М. Я. Открытие явления нанокapsуляции дисперсных веществ // Вестник Российской академии естественных наук, серия «Физика». — 2012. — № 3. — С. 27–35.
2. Бикбау М. Я. Нанотехнологии в производстве цемента. — М.: ОАО «Московский ИМЭТ», 2008. — 768 с.
3. Бикбау М. Я. Свойства и структура бетонов на наноцементных // В сб. «Бетон и железобетон в будущее». Науч. тр. III Всероссийской (II Международной) конф. по бетону и железобетону (Москва, 12–16 мая 2014 г.), том 6, с. 158–170.
4. Бабаев Ш. Т., Башлыков Н. Ф., Бикбау М. Я., Трамбовецкий В. П. Аттестация вяжущих низкой водопотребности в США // Бетон и железобетон. — 1990. — № 6. — С. 29–31.
5. Бикбау М. Я., Хуснутдинов А. М. Бетонные смеси и бетоны нового поколения на основе наноцементов // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. Технологии бетонов. — 2019. — № 9–10. — С. 24–33.
6. Несветайло В. М. Многофункциональные бетоны нового поколения // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. Технологии бетонов. — 2018. — № 11–12. — С. 12–15.
7. Бикбау М. Я. Новые технологии переработки бытовых и промышленных отходов // Экологические системы и приборы. — 2018. — № 7. — С. 26–49.
8. Спасти священный Байкал // Технологии Интеллектуального Строительства. — 2020. — № 1. — С. 4–13.
9. СТО 36554501–025–2011 «Трубобетонные колонны» // ОАО НИЦ «Строительство», ЗАО «ИМЭТ». — М., 2011. — 43 с.
10. Гареев М. Ш. Прочность сжатых сталетрубобетонных элементов с предварительно обжатым ядром: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Магнитогорск, 2004. — 20 с. 

- предоставляет возможность круглогодичной работы и достижения большой скорости заливки монолитной плиты (например, для карты № 1 Байкальского ЦБК время заливки составит около семи суток);

- работы по омоноличиванию могут проводиться одновременно на нескольких картах-шламонакопителях;

- эффективность реализации предлагаемой технологии не зависит от состава и физико-химических свойств отходов;

- отсутствует необходимость в сооружении заводской инфраструктуры и объектов капитального строительства, а также новых объектов для утилизации;

- реализуется возможность использования территории, занятой в настоящее время полигонами отходов, под курортную, туристическую застройку или устройство объектов сельскохозяйственного назначения (например, теплиц) на отдельных плитах карт-шламонакопителей;

- достигается необходимая устойчивость высокопрочного и долговечного бетонного покрытия карт-шламонакопителей к любым катаклизмам, в том числе землетрясениям и селевым потокам;

- очевидность реализации, простота и преимущества предложенной технологии обуславливают практическую возможность ее претворения в жизнь в самые короткие сроки — в течение 2021–2022 годов;

- обеспечивается максимальное использование местных материалов — цемента, щебня и песка Иркутской области;

- данное решение имеет высокую экономическую эффективность: суммарная расчетная стоимость всех работ по ликвидации накопленного экологического ущерба в результате деятельности Байкальского ЦБК составит около 5,8 млрд рублей.

В заключение необходимо подчеркнуть, что рассмотренные разработки имеют важное практическое значение. На основе наноцементов получают высококачественные долговечные бетоны High Performance Concrete с уникальными свойствами. Применение наноцементов в технологии производства бетонов значительно снижает существующие требования к качеству нерудного сырья — крупным и мелким заполнителям, исключает необходимость использования микрокремнезема и дорогих химических добавок, позволяет отказаться от тепловой обработки бетонных смесей и существенно снижает себестоимость бетонов.

Кроме того, благодаря достижению практически абсолютной газонепроницаемости, растворы и бетоны на основе наноцементов рекомендуются для эффективного применения при решении проблемы утилизации и переработки отходов в двух актуальных направлениях с полным исключением массообмена вредных веществ с окружающей средой:

- микрокапсуляции высокотоксичных дисперсий отходов мусоросжигания;

- полной изоляции отходов различных видов, в том числе ядерных, возведением бетонных хранилищ (саркофагов).

В частности, монолитные бетоны на основе наномодифицированного цемента Ангарского цементного завода и местных нерудных сырьевых материалов позволят полностью в течение двух лет изолировать разнородные отходы, накопленные на полигонах Байкальского ЦБК, и в рамках выделенных бюджетных средств решить проблему ликвидации ущерба озеру Байкал. Неоднократно просроченные мероприятия по спасению Байкала от токсичных отходов карт-шламонакопителей уже не трепят отлагательств.