

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 669.71:622.023

*ШЕПЕЛЕВ ИГОРЬ ИННОКЕНТЬЕВИЧ, докт. техн. наук, директор,  
ekoing@mail.ru*

*Научно-исследовательская организация ООО «ЭКО-Инжиниринг»,  
662150, г. Ачинск, ул. Южная Промзона, квартал XII, стр. 1*

*ЖИЖАЕВ АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ, канд. техн. наук,  
зав. лабораторией,*

*zhzhaev@icct.ru*

*Институт химии и химической технологии СО РАН,  
660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 24*

*БОЧКОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, исполнительный директор,  
nbochkov@yandex.ru*

*ООО «Дорожно-передвижная механизированная колонна Ачинская»,  
662153, г. Ачинск, ул. Южная Промзона, квартал V, стр. 12*

### **ПРИМЕНЕНИЕ ОТХОДОВ ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДОРОЖНЫХ СМЕСЕЙ**

Проведены исследования по подбору составов комплексного вяжущего на основе производственных отходов глиноземного производства. Исследованы прочностные характеристики дорожных смесей и структура минеральных продуктов. Испытана технология приготовления комплексного неорганического вяжущего для дорожных одежд на основе нефелинового шлама, гипсоангидритовых отходов и пыли газоочистных сооружений, обеспечивающая увеличение прочностных свойств и морозостойкость дорожных смесей.

**Ключевые слова:** нефелиновый шлам; гипсосодержащие отходы; предел прочности; пыль газоочистных сооружений; дорожные одежды; комплексное вяжущее.

*IGOR I. SHEPELEV, DSc, Director,  
ekoing@mail.ru*

ООО 'ECO-Engineering'

1, Yuzhnaya Promzona Str., 662150, Achinsk, Russia  
ANATOLII M. ZHIZHAEV, PhD, Head of Laboratory,  
zhyzhaev@icct.ru

Institute of Chemistry and Chemical Engineering SB RAS,  
50, Akademgorodok, 660036, Krasnoyarsk, Russia  
NIKOLAI N. BOCHKOV, Executive Officer,  
nbochkov@yandex.ru

ООО 'Achinsk Mobile Mechanical Department',  
12, Yuzhnaya Promzona Str., 662153, Achinsk, Russia

## ALUMINA PRODUCTION WASTE USED TO IMPROVE INORGANIC CEMENT SERVICE PROPERTIES

The paper presents the study of cement compounds based on alumina production waste. Strength properties of inorganic cements and the structure of cementitious materials for pavements are investigated. The production test is described for inorganic cement based on nepheline slime, gypsum plaster, and dust from gas treatment systems to enhance strength properties and frost resistance of inorganic cements.

**Keywords:** nepheline slime; gypsum-containing waste; ultimate tensile strength; dust from gas treatment systems; pavement; cement compounds.

В последние годы все чаще для укрепления оснований автодорог применяют неорганические вяжущие, приготовленные на основе производственных отходов. Одним из таких материалов является вяжущее, получаемое на основе нефелинового шлама – отхода производства ОАО «РУСАЛ Ачинск». Ранее в работах [1–4] были определены способы возможного использования нефелинового шлама в цементном производстве, производстве силикатного кирпича, дорожном строительстве.

Настоящие исследования были проведены с целью оценки возможности практической реализации разрабатываемых малоотходных технологий и увеличения использования нетоксичных промышленных отходов в дорожном строительстве.

Методика исследований предусматривала изучение свойств твердеющих составов дорожных смесей, их прочностных характеристик на основе новообразований в процессе гидратации. Рентгенофазовый анализ (РФА) состава компонентов и получаемых дорожных смесей проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 с использованием  $\text{Cu}_{K\alpha}$ -излучения ( $\lambda = 1,544$  нм), шаг сканирования 0,02 град, время накопления в точке 1 с. Микроструктуру и морфогеометрию минеральных продуктов исследовали на сканирующем электронном микроскопе ТМ-3000 (Hitachi, Япония) в обратно отраженных электронах (ускоряющее напряжение 15 кВ). Микрорентгеноспектральный анализ выполняли на встроенном энергодисперсионном спектрометре (Bruker) с помощью системы микроанализа Quantax-70. Порошковые минеральные образцы для электронной микроскопии пропитывали эпоксидной смолой EpoFix. После полимеризации полученные шашки шлифовали на шлифовально-полировальном станке TegraPol 15 (бумага на основе SiC, P200–P2000) и по-

лировали вручную на резиновом диске с использованием полировальных суспензий 3М на основе корунда. Определение прочности образцов проводилось в возрасте 7, 14, 28 сут на пресс-машине УМЭ-10ТМ.

В качестве исходных материалов при разработке технологии получения комплексного вяжущего и приготовления дорожных одежд исследовали нефелиновый шлам (НШ) и гипсосодержащие отходы и пыли газоочистных сооружений глиноземного производства ОАО «РУСАЛ Ачинск». Нефелиновый шлам ОАО «РУСАЛ Ачинск» является «хвостовым» продуктом переработки Кия-Шалтырских нефелинов совместно с известняком Мазульского карьера, получаемым после извлечения глинозема и содопродуктов. По данным РФА нефелиновый шлам представлен в основном ларнитом ( $\beta$ - $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,  $d = 2,78; 2,74; 2,19 \text{ \AA}$ , JCPDS, 24–37) с небольшой примесью ( $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ,  $d = 5,48; 3,82; 3,04 \text{ \AA}$ , JCPDS, 24–37) (рис. 1). Отмечено также присутствие слабых линий соды (термонатрит,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $d = 5,29; 4,12; 2,44 \text{ \AA}$ , JCPDS, 8–448) и карбонатов кальция (кальцит,  $\text{CaCO}_3$ ,  $d = 3,04; 3,86; 1,912 \text{ \AA}$ , JCPDS, 47–1743). Возможно наличие диопсида ( $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$ ,  $d = 3,34; 2,54; 2,215 \text{ \AA}$ , JCPDS, 19–239), но его основные пики перекрываются линиями других фаз. Химический состав нефелинового отвального шлама представлен в табл. 1.

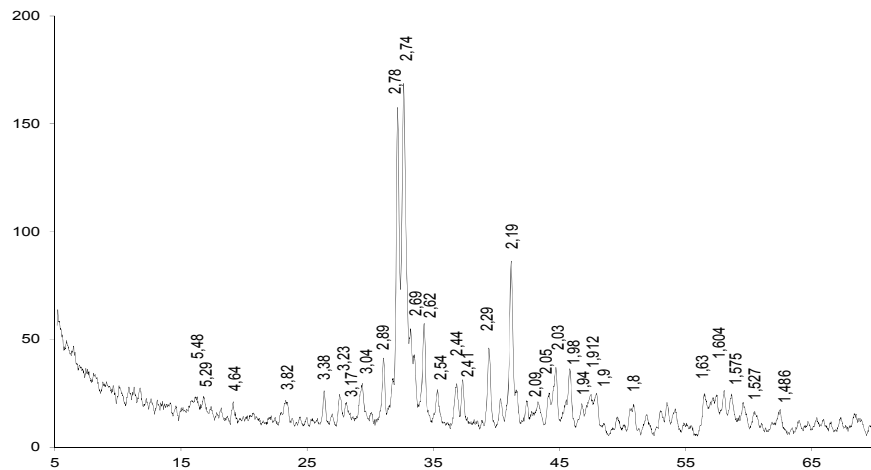


Рис. 1. Фрагмент дифрактограммы нефелинового шлама с указанием фазовой принадлежности основных пиков

Таблица 1

#### Химический состав нефелинового шлама

Компонент	Содержание, %
$\text{SiO}_2$	29,9
$\text{CaO}$	54,7
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,4

Окончание табл. 1

Компонент	Содержание, %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,8
Na <sub>2</sub> O	1,4
K <sub>2</sub> O	0,4
MgO	1,4
SO <sub>3</sub>	0,2
F	0,3
Прочее	4,5

Основной минеральный состав размещаемого на шламовом поле нефелинового шлама в пробах составляет двухкальциевый силикат (более 80 %), в качестве следов до 5 % в отвальном шламе присутствуют: алюминаты натрия Na<sub>2</sub>O·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, кальций-магниево-силикат CaO·MgO·SiO<sub>2</sub>, натрокальциевые силикаты Na<sub>2</sub>O·CaO·SiO<sub>2</sub>, гидрогранаты кальция 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, кальциевые алюминаты CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [5].

Важную роль при подборе компонентов вяжущих играет изучение гранулометрического состава, который показывает относительное содержание в них частиц с различными размерами. Гранулометрический состав нефелинового шлама представлен в табл. 2.

Таблица 2

## Гранулометрический состав нефелинового шлама

Размер фракции, мм	Менее 0,01	0,01–0,05	0,05–0,1	0,1–0,25	0,25–0,5	0,5–1,0	1,0–2,0	Более 2,0
Содержание фракции, %	1,2	5,7	8,1	20	26	26,6	11,1	1,3

Нефелиновый шлак является нетоксичным отходом и отнесен к 5-му классу опасности (неопасные отходы) для окружающей природной среды, что подтверждает заключение аккредитованной лаборатории АНО «Экспертно-аналитический центр по проблемам окружающей среды “ЭКОТЕРРА”», г. Москва, основанное на исследовании экспериментальным методом биотестирования компонентного состава отхода. Санитарно-эпидемиологической экспертизой нефелинового шлама по показателям радиационной безопасности, проведенной ФГУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Красноярском крае», сделано заключение, что удельная активность естественных радионуклидов, содержащихся в нефелиновом шламе, не превышает гигиенический норматив, установленный для отходов промышленного производства, используемых при изготовлении строительных материалов 1-го класса, и соответственно равна 66,9 Бк/кг при нормативе 370 Бк/кг.

В качестве другого возможного вяжущего компонента дорожных смесей нами был рассмотрен и исследован гипсоангидритовый отход (ГАО) про-

изводства фтористого алюминия ОАО «РУСАЛ Ачинск». Проведенными исследованиями установлено, что на образцах гипсоангидритовых отходов отмечены в основном характерные линии гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , JCPDS, 36–432) и бассанита ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , JCPDS, 41–224), присутствуют также линии кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ,  $d = 3,86; 3,03; 1,912 \text{ \AA}$ , JCPDS, 47–1743). Это подтверждается данными фазового состава этих отходов, которые на 90–95 % состоят из сульфата кальция, представленного смесью ангидрита и гипса (табл. 3).

Таблица 3

**Фазовый состав гипсо содержащих отходов ОАО «РУСАЛ Ачинск»**

Компонент	Содержание, %
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	36,6
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	5,4
$\text{CaSO}_4$	54,0
$\text{CaF}_2$	2,4
$(\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}) \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	0,6
Прочие соединения	1,0

Гипсоангидритовый отход размещен на гипсохранилище ОАО «РУСАЛ Ачинск» в количестве более 120 тыс. т и в настоящее время практически не используется. Ранее данный отход вовлекался во вторичную переработку в ограниченных объемах, необходимых для производства содопродуктов ОАО «РУСАЛ Ачинск» [6–8]. Вместе с тем по своим физико-химическим свойствам гипсоангидритовый отход может быть использован в качестве компонента комплексного вяжущего для дорожно-строительных смесей.

Для разработки оптимальных рецептур комплексного вяжущего компонента дорожных смесей на основе гипсоангидритовых отходов и нефелинового шлама ОАО «РУСАЛ Ачинск» были проведены исследования по изучению характеристик и подбору составов с добавками различного количества данных отходов и определению пределов прочности образцов по контрольным срокам твердения. В связи с длительным хранением гипсоангидрита на гипсохранилище для активации его поверхности он предварительно измельчался. Тонкость помола соответствовала 55–56%-й доле материала, измельченного до класса 0,08 мм. Активацию проводили в лабораторной шаровой мельнице МЛБ (мельница лабораторная барабанная) в периодическом режиме. Мелющие тела – сталь диаметром 1–3 см. Шаровая загрузка 40 кг. Загрузка материала 50 кг. Длительность измельчения составляла 30 мин. Нефелиновый шлам, который использовался во влажном состоянии, отбирался со шламохранилища ОАО «РУСАЛ Ачинск».

Для приготовления дорожной смеси использовали щебеночную смесь фракции 0–40 мм, которую смешивали с нефелиновым шламом с добавлением гипсоангидритовых отходов. По данным РФА щебень представлен в основном кальцитом ( $\text{CaCO}_3$ ,  $d = 3,86; 3,03; 1,912 \text{ \AA}$ , JCPDS, 47–1743). В подчиненных количествах (до 10 % от основной фазы) присутствуют кварц ( $\text{SiO}_2$ ,  $d = 4,26; 3,34; 1,818 \text{ \AA}$ , JCPDS, 5–490), доломит ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ,  $d = 2,89; 2,20;$

2,01 Å, JCPDS, 36–426) и каолин ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ,  $d = 7,19; 3,59; 1,47$  Å, JCPDS, 6–201). Возможно наличие небольших количеств клинохлора ( $(\text{Mg},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ , JCPDS, 16–351) и гриналита ( $\text{Fe}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ , JCPDS, 39–337).

При уплотнении во влажном состоянии нефелиновый шлам текущего производства и щебеночно-песчаная смесь обладают способностью преобразовываться в монолитный водостойкий материал с дальнейшим набором прочности во времени. Исследование прочностных свойств образцов, приготовленных из данных смесей, показали, что при использовании в качестве активатора нефелинового шлама измельченного гипсоангидрита в диапазоне от 5 до 30 % масс. прочность кубиков образцов по сравнению с использованием одного нефелинового шлама возрастает в 1,8–2,2 раза. Следует отметить, что даже при минимальных 3–5%-х дозировках гипсоангидрита в смеси с нефелиновым шламом обеспечивается высокая прочность образцов по срокам твердения: соответственно для 7 сут – 6,1 МПа, 14 сут – 9,8 МПа, 28 сут – 10,7 МПа (рис. 2). При введении добавки гипсоангидрита в исследуемые образцы из гипсо-нефелиново-известняковой смеси отмечается существенное возрастание прочности образцов при сжатии по сравнению с прочностью образцов на растяжение при изгибе. Так, при добавке 5%-го гипсоангидрита при 28-суточной выдержке образцов предел прочности при изгибе составил 6,2 МПа, а при 30%-й добавке гипсоангидрита соответственно 9,1 МПа, в то время как контрольные образцы нефелиново-щебеночной смеси без добавок гипсоангидрита имели прочность при изгибе 4,1 МПа.

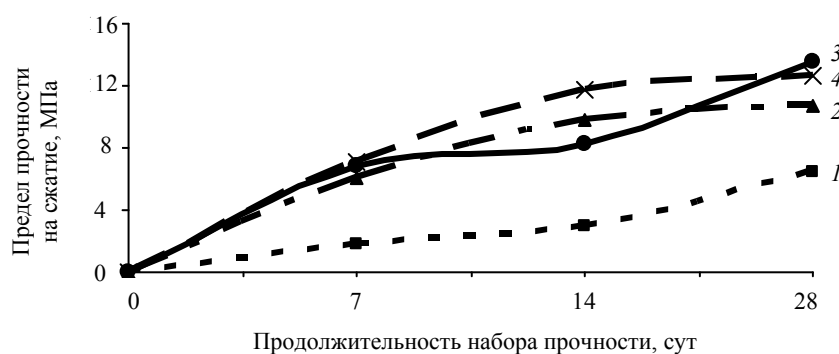


Рис. 2. Изменение предела прочности образцов нефелиново-известняковой смеси в процессе твердения в зависимости от добавок гипсоангидритовых отходов (ГАО): 1 – без добавки ГАО; 2 – добавка ГАО 5%; 3 – добавка ГАО 10%; 4 – добавка ГАО 30%

Характер динамики набора прочности (рис. 2) соответствует механизму гидратационного твердения нефелиново-щебеночной смеси с добавкой гипсоангидритовых отходов. Скорость набора прочности в ранние сроки обусловлена взаимодействием сульфата кальция с гидратирующимися двухкальциевым силикатом и кальций-магниевым силикатом. При больших (20–30 %

масс.) добавках гипсоангидритовых отходов в нефелиново-щебеночную смесь процесс гидратации силиката кальция становится замедленным, а кинетика ослабления мостиковых гипсовых связей вялотекущей.

На основе полученных данных по рецептурам комплексного вяжущего и с учетом опыта строительства слоев земляного полотна и дорожных одежд с применением отходов производства была разработана технология строительства слоев дорожных одежд с использованием комплексного вяжущего на основе нефелинового шлама и гипсосодержащего компонента. Для приготовления смеси в основание дорожной одежды использовали 65 % масс. щебеночной смеси фр. 0–40, в которую добавляли 30 % масс. нефелинового шлама с дополнительным вводом 5 % масс. гипсосодержащего компонента (гипсоангидрита ОАО «РУСАЛ Ачинск»). Приготовление дорожной смеси осуществляли на промплощадке ООО «ДПИМК Ачинская» путем тщательного перемешивания компонентов. Промышленные испытания по разработанной технологии проводились в летне-осенний период 2012 г. на выбранных опытных участках реконструируемой автодороги Красноярск – Железногорск. Приготовленную дорожную смесь транспортировали на опытные участки автодороги и производили укладку основания механизированным способом. По данным лабораторных исследований образцов дорожных смесей применение комплексного гипсо-нефелинового вяжущего технологически более эффективно с использованием измельченного гипсоангидрита, т. к. обеспечивается активация его поверхности и активность нефелинового шлама увеличивается при введении в его состав не менее 5 % масс. измельченной гипсосодержащей добавки, которая выполняет роль активатора твердения и увеличивает прочностные свойства дорожных смесей на основе нефелинового шлама [5, 9].

Одним из необходимых свойств дорожных смесей, особенно в Сибири, является их морозостойкость. В качестве минеральной добавки, повышающей морозостойкость, в составе гипсо-нефелиново-известняковой смеси были исследованы пыли газоочистных сооружений печей спекания ОАО «РУСАЛ Ачинск». Так как химический состав пыли по полям электрофильтров (ЭФ) печи спекания различный, для исследований были отобраны пробы пыли от каждого поля электрофильтра в отдельности. Результаты химического анализа пыли для полей 1–5 электрофильтров печи спекания № 9 ОАО «РУСАЛ Ачинск» приведены в табл. 4.

Как показал химический анализ состава пыли электрофильтров, распределение компонентов по полям электрофильтров разное. Наибольшая массовая доля хлоридов и соединений серы отмечается в пыли, отобранной с 4-го и 5-го полей электрофильтра, которая соответственно равна 22,5 и 27,6 % масс. Поэтому для состава, увеличивающего морозостойкость, целесообразно рассматривать пыль 4-го и 5-го полей электрофильтров печей спекания ОАО «РУСАЛ Ачинск», т. к. содержание хлоридов и оксидов серы в полях 1–3 недостаточно и не обеспечивает снижения температуры замерзания поровых растворов при принятой дозировке, необходимой для достижения высоких показателей по морозостойкости образцов. По данным РФА (рис. 3) пыль 4-го и 5-го полей электрофильтра представлена примерно равными количествами галита ( $\text{NaCl}$ ,  $d = 3,26; 2,83; 1,997 \text{ \AA}$ , JCPDS, 5–628), сильвинита ( $\text{KCl}$ ,  $d = 3,66; 3,15; 2,22 \text{ \AA}$ ,





структура смеси нефелинового шлама с добавками измельченных известняка и гипсоангидрита, в которой присутствуют частицы ларнита, кальцита и басанита, приведена на рис. 4, в, при этом видны также поры микронной крупности, что обусловлено образованием мостиковых гипсовых связей.

На рис. 5 приведены микрофотографии частиц пыли электрофильтров. Кальцит представлен неровными обломочными частицами (30–50 мкм). Прслеживаются массивные (до 100 мкм) частицы галита, вмещающие мелкие (1–10 мкм) кубики сильвинита (рис. 5, а). Присутствуют таблитчатые вытянутые по оси кристаллы афтиталита (3–5×10–20 мкм) (рис. 5, б). Кроме того, галит присутствует в виде мелкой пыли субмикронных размеров (рис. 5, а).

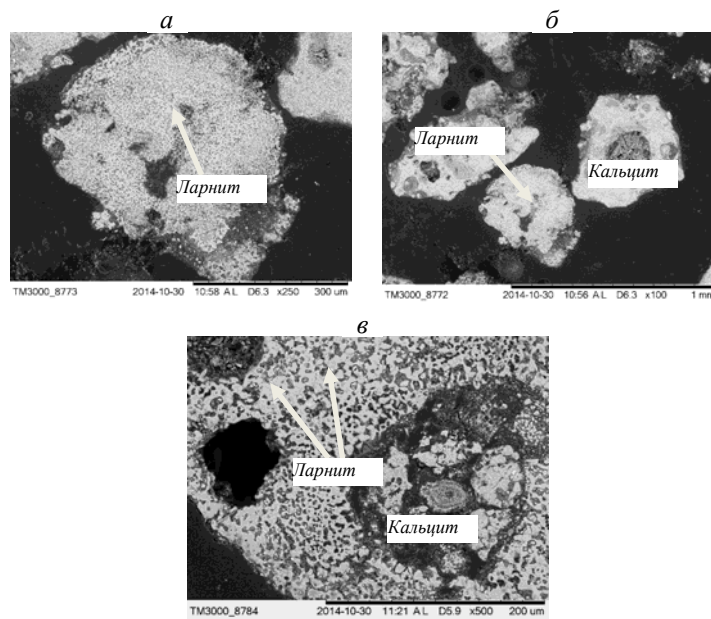


Рис. 4. Микроструктура изображения частиц нефелинового шлама (аншлиф, эпоксидная смола):

а – нефелиновый шлам; б – нефелиновый шлам с измельченным известняком; в – смесь нефелинового шлама с добавками измельченных известняка и гипсоангидрита

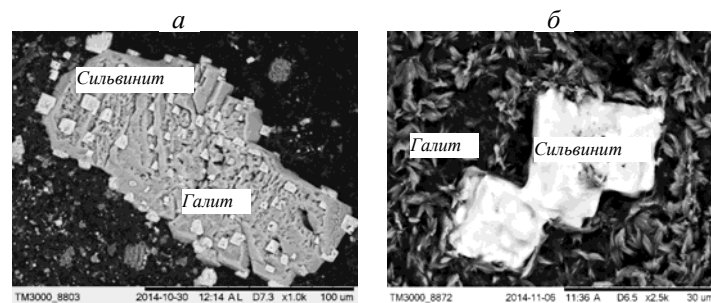


Рис. 5. Микроструктура частиц пыли электрофильтров печи спекания (аншлиф, эпоксидная смола)

Присутствие хлоридных соединений в гипсонефелиновом вяжущем оказывает положительное влияние на морозостойкость дорожной смеси. Так, при использовании состава вяжущего на основе одного нефелинового шлама морозостойкость образцов имела 62 цикла, в то время как применение состава вяжущего с добавками гипсоангидрита и пыли электрофильтров печей спекания приводило к увеличению морозостойкости до 88–92 циклов (рис. 6).

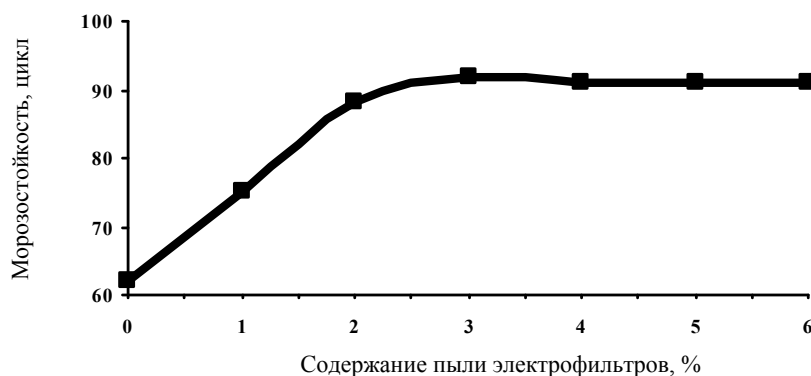


Рис. 6. Изменение морозостойкости образцов дорожных смесей в зависимости от добавок пыли электрофильтров печи спекания

Добавка пыли 4-го и 5-го полей электрофильтров менее 0,5 % масс. снижала морозостойкость испытуемых образцов до 75 циклов. Добавка пыли 4-го и 5-го полей электрофильтров более 5 % в состав вяжущего не снижала морозостойкость, но приводила к ухудшению кинетики набора прочности вследствие гидратации вяжущего образующимся соевым раствором. Добавка пыли, взятой с 1–3-го полей электрофильтра печей спекания, не обеспечивала значительного повышения морозостойкости образцов при принятой дозировке и находилась на уровне 65 циклов. Химические соединения, входящие в состав пылей электрофильтров печей спекания, способствуют повышению удобообрабатываемости (однородности) и удобоукладываемости (плотности) гидроизоляционных свойств дорожного покрытия и повышают его морозостойкость. Подтверждением этого служит большая стабильность нефелинового шлама с добавкой гипсоангидритовых отходов и пылей 4-го и 5-го полей электрофильтров печей спекания при перепадах температур, приобретенная с одной стороны, за счет гибких связей адсорбционного типа, образующихся благодаря высокой дисперсности гипсоангидритовых отходов и пыли электрофильтров, а с другой стороны – благодаря развитию смешанной коагуляционно-кристаллической структуры в связи с присутствием в шламе щелочных соединений.

Таким образом, на основании проведенных исследований и опытно-промышленных испытаний можно сделать следующие выводы:

1. С точки зрения улучшения технико-технологических показателей при использовании нефелинового шлама с добавкой в качестве активатора гипсо-

ангидрита обеспечивается сокращение времени набора прочности образцов и увеличение срока службы дорожного полотна за счет его способности повышать прочность уплотненного слоя в процессе эксплуатации дороги.

2. Ввод в гипсонефелиновое вяжущее пыли газоочистных сооружений печей спекания ОАО «РУСАЛ Ачинск» позволяет заменить применяемые активаторы и различные добавки на отходы промышленного производства и получить при этом новые технологические эффекты, обеспечивающие более высокую морозостойкость и улучшенные эксплуатационные свойства дорожного покрытия.

3. Применение предлагаемого комплексного гипсонефелинового вяжущего при укреплении основания дорог сможет в процессе эксплуатации повысить трещиностойкость и снизить колеяемость дорожного полотна.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Обзорная информация* о передовых отечественных и зарубежных технологиях и дорожно-строительных материалах / М-во трансп. Российской Федерации, Федер. дор. агентство (Росавтодор). – М., 2005. – 95 с.
2. *Бескровный, В.М.* Применение нефелинового шлама для строительства оснований автомобильных дорог в условиях Сибири: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 1983. – 122 с.
3. *Оптимизация* технологии получения цемента из отходов производства глинозема с помощью физико-химической модели / Н.В. Головных, В.А. Бычинский, А.А. Тупицын, К.В. Чудненко, И.И. Шепелев // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2010. – № 3. – С. 23–28.
4. *Опыт* и перспективы использования отходов промышленных предприятий на Ачинском глиноземном комбинате при комплексной переработке алюминиевого сырья / И.И. Шепелев, А.Г. Пихтовников, И.И. Ребрик, С.Н. Горбачев, Р.Я. Дашкевич // Сб. докладов Международного конгресса. Цветные металлы. – 2012. – Красноярск : Изд-во «Версо», 2012. – С. 325–328.
5. *Применение отходов* промышленных предприятий в дорожно-строительных технологиях / И.И. Шепелев, А.Н. Анушенков, Р.Я. Дашкевич, В.А. Кожевников // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. науч. тр. – Красноярск : СФУ, 2013. – Вып. 11. – С. 292–297.
6. *Термохимический способ* утилизации гипсоангидритовых полупродуктов в производство глинозема и попутной продукции / В.А. Бычинский, Н.В. Головных, А.Г. Пихтовников, К.В. Чудненко, И.И. Шепелев // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54. – № 10. – С. 89–93.
7. *Optimization of the Technology of Cement Production on the Basis of Alumina Process Waste Using a Physicochemical Model* / V.A. Bychinsky, A.A. Tupitsin, K.V. Chudnenko, I.I. Shepelev // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2010. – V. 51. – № 3. – P. 222–226.
8. *Шепелев, И.И.* Технологические аспекты вторичного использования гипсосодержащих отходов в качестве минерально-сырьевых добавок / И.И. Шепелев, Н.Н. Бочков, А.Ю. Сахачев // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: сб. науч. тр. – Красноярск : СФУ. – 2014. – Вып. 12. – С. 211–215.
9. *Внедрение* ресурсосберегающих технологий с вовлечением нетоксичных отходов металлургического производства / И.И. Шепелев, Н.Н. Бочков, А.Ю. Сахачев, Н.В. Головных // MetalRussia. – 2014. – № 11. – С. 60–63.

## REFERENCES

1. *Obzornaya informatsiya o peredovykh otechestvennykh i zarubezhnykh technologiakh i dorozhno-stroitel'nykh materialakh* [Review information on advanced national and international technologies and road materials]. Ministry of Transport of the Russian Federation, Federal Road Agency. Moscow, 2005. 95 p. (rus)
2. *Beskrovnyi V.M.* Primenenie nefelinovogo shlama dlya stroitel'stva osnovanii avtomobil'nykh dorog v usloviyakh Sibiri [Nepheline slime used in road construction in Siberia. PhD thesis]. Omsk, 1983. 122 p. (rus)
3. *Golovnykh N.V., Bychinskii V.A., Tupitsyn A.A., Chudnenko K.V., Shepelev I.I.* Optimizatsiya tekhnologii polucheniya tsementa iz otkhodov proizvodstva glinozema s pomostsh'yu fiziko-khimicheskoi modeli [Physicochemical model of optimization of cement technology using alumina production]. *Proceedings of Higher School. Nonferrous Metallurgy*, 2010. No. 3. Pp. 23–28. (rus)
4. *Shepelev I.I., Pikhtovnikov A.G., Rebrik I.I., Gorbachev S.N., Dashkevich R.Ya.* Opyt i perspektivy ispolzovaniya otkhodov promyshlennykh predpriyatii na Achinskom glinozomnom kombinat pri kompleksnoi pererabotke alyuminiyevogo syr'ya [Prospects of industrial waste use at Achinsk alumina production plant at complex processing of aluminum ores]. *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Cong. 'Non-Ferrous Metals'*. Krasnoyarsk : Verso Publ., 2012. Pp. 325–328. (rus)
5. *Shepelev I.I., Anushenkov A.N., Dashkevich R.Ya., Kozhevnikov V.A.* Primenenie otkhodov promyshlennykh predpriyatii v dorozhno-stroitel'nykh technologiakh [Industrial waste used in road construction technologies]. *Coll. Papers 'Modern technologies of mineral resource exploration'*. Krasnoyarsk : SibFU Publ., 2013. V. 11. Pp. 292–297. (rus)
6. *Bychinsky V.A., Golovnykh N.V., Pikhtovnikov A.G., Chudnenro K.V., Shepelev I.I.* Termokhimicheskii sposob utilizatsii gipsoangidrinnykh poluproduktov v proizvodstvo glinozroma i poputnoi produktsii [Thermochemical utilization of gypsum plaster waste in alumina production and by-products]. *Proceedings of Higher School. Nonferrous Metallurgy*, 2011. V. 54. No. 10. Pp. 89–93. (rus)
7. *Golovnykh N.V., Bychinskii V.A., Tupitsyn A.A., Chudnenro K.V., Shepelev I.I.* Optimization of the Technology of Cement Production on the Basis of Alumina Process Waste Using a Physicochemical Model. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2010. V. 51. No. 3. Pp. 222–226.
8. *Shepelev I.I., Bochkov N.N., Sakhachev A.Y.* Tekhnologicheskie aspekty vtorichnogo ispol'zovaniya gipsosoderzhashchikh otkhodov v kachestve mineral'no-syr'evykh dobavok [Technological aspects of using recycled gypsum-based waste as additives]. *Coll. Papers 'Modern technologies of mineral resource exploration'*. Krasnoyarsk : SibFU Publ., 2014. V. 11. Pp. 211–215. (rus)
9. *Shepelev I.I., Bochkov N.N., Sakhachev A.Y., Golovnykh N.V.* Vnedrenie resursosberegayushchikh tekhnologii s vovlecheniem netoksichnykh otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva [Resource-saving technology implementation using non-toxic waste of metallurgy industry]. Moscow : Metal Russia Publ., 2014. No. 11. Pp. 60–63. (rus)