

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ФОРМОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФИБРОБЕТОНА

© ^{1,2}М. Р. Нахаев, ²А. Х. Аласханов

¹ЧГУ им. А. А. Кадырова, Грозный, Россия,

²ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

На производство одной тонны цемента расходуется в разных странах от 700 до 1100 кВт·ч энергии. Добыча миллионов тонн сырья и работа цементных заводов сопровождается вредными выбросами, которые наносят большой ущерб окружающей среде. Поэтому разработка новых энерго- и ресурсосберегающих строительных технологий особенно важна. Для экономии цемента в строительстве разработана новая технология. Предлагается метод послойного электростатического нанесения сухих порошковых компонентов бетонной смеси и волокон на формообразующий арматурно-сеточный каркас изделия. Нанесенные слои периодически увлажняют тонкораспыленной водой. Процесс повторяют до получения фибробетона нужной толщины. В новой технологии водоцементное отношение может быть равным теоретической величине для данного состава бетона. Это должно давать экономию цемента без снижения прочности фибробетона. Необходимо учитывать особенности, диктуемые электростатической технологией. Например, в узкие и глубокие каналы электрическое поле почти не проникает. Рассматриваются электрофизические особенности метода. Например, за какое время происходит зарядка частиц сухой бетонной смеси. От чего зависит производительность процесса нанесения покрытия, какова оптимальная скорость воздушного потока из электростатического распылителя и др.

Ключевые слова: фибробетон, электростатический распылитель, сухая бетонная смесь, увлажнение, водоцементное отношение, экономия цемента.

Производство цемента в России в 2015 году достигло 68,5 млн. тонн. Более половины из этого количества цемента производилось по так называемому «мокрому» способу. По удельному потреблению энергии это самый неэкономичный способ [1, 2]. Для наглядности представим затраты энергии в едином эквиваленте – в кВт·часах на одну тонну цемента [3]: а) приготовление сырьевой смеси (дробление, грубый помол, усреднение состава) – 20 кВт·ч; б) обжиг сырьевой смеси (получение клинкера при мокром способе подготовки сырья) – около 1000 кВт·ч; в) помол клинкера в тонкий порошок – 40 кВт·ч. Всего для производства 1 т цемента расходуется примерно 1060 кВт·ч энергии. В некоторых странах этот показатель удалось снизить до 700...800 кВт·ч/т. Добыча миллионов тонн сырья и работа цементных заводов сопровождается вредными выбросами, которые наносят большой ущерб окружающей среде. Поэтому разработ-

ка новых энерго- и ресурсосберегающих строительных технологий особенно важна.

Большой удельный расход бетона часто связан с необходимостью изготовления деталей увеличенного сечения не по соображениям прочности, а в силу технологических причин. Теоретически для твердения основных типов цементов требуется 12...20% воды от массы вяжущего. Однако для повышения удобоукладываемости бетона водоцементное отношение (В/Ц) часто увеличивают до 0,5...0,6 [4]. Это снижает прочность готового бетона, либо, при равной прочности, повышает расход цемента. Если же для экономии цемента снижают величину В/Ц, то возрастающую при этом жесткость бетонной смеси уменьшают введением в состав различных добавок, понижающих жесткость бетона пластификаторов и суперпластификаторов, поверхностно-активных веществ (ПАВ) и др. Укладку жестких смесей и формование изделий проводят с использова-

нием интенсивного уплотнения: вибрирования с пригрузом, двойного вибрирования и т. д. Однако для смесей на основе обычных портланд-цементов чаще всего применяют В/Ц, равным 0,30...0,35.

В новой технологии для изготовления тонкостенных изделий и сооружений предлагается использовать метод послойного электростатического нанесения сухих порошковых гидрофильных компонентов бетонной смеси и волокон на формообразующий арматурно-сеточный каркас изделия с периодическим увлажнением наносимых слоев тонко распыленной водой, содержащей ПАВ [5,6]. Как видим, в данной технологии вода вносится отдельно, и ее количество может быть сколь угодно близким теоретическому значению. Конечно, в новой технологии надо учитывать особенности конфигурации изделия, диктуемые электростатикой. Например, в узкие и глубокие каналы электрическое поле почти не проникает. Соответственно, там слой бетона будет тоньше.

Вообще практическое применение электростатической технологии в различных производствах известно с середины 20 века. Например, использование оборудования для электростатического нанесения сухих порошков силикатной эмали на металлические заготовки изделий показано в работе А. Петцольда с сотрудниками [7]. Физические основы процесса осаждения заряженных частиц силикатной эмали рассмотрены также в работе [8]. Важно отметить, что по электрофизическим свойствам и по плотности порошки силикатной эмали весьма близки к порошкам бетонной смеси. Принципиальная возможность осаждения цемента и других минеральных частиц на электропроводящие тела под действием сил Кулона доказана и в других отраслях – этот процесс давно и широко используется в электрофильтрах системы газоочистки цементных заводов и тепловых электростанций, работающих на угле и мазуте [9-11, 14]. Большинство видов зольных частиц, улавливаемых электростатическими фильтрами тепловых электростанций, по электрофизическим свойствам, фракционному составу и массе, так же как и порошки силикатных эмалей, близки по свойствам к частицам сухой бетонной смеси. Поэтому многие физические процессы, связанные с движением заряженных минеральных частиц

в электрическом поле в электрофильтрах и в технологии электростатического формования изделий из фибробетона, подобны.

Первый этап в процессе электростатического нанесения цемента и тонких минеральных частиц на проводящий формообразующий каркас – это зарядка частиц сухой бетонной смеси. Поскольку электростатические силы пропорциональны величине заряда частиц, то желательно, чтобы сообщение им электрического заряда происходило возможно быстрее. В рабочем пространстве электростатических устройств (распылителей) при напряжении 50-60 кВ создается концентрация ионов, равная примерно $10^{14} \dots 10^{15} \text{ 1/м}^3$, то есть $10^8 \dots 10^9 \text{ 1/см}^3$. Как установлено практикой, в поле высокого напряжения стационарный режим образования ионов в воздухе устанавливается за время менее 0,1 с. Таким образом, зарядка частиц происходит за малые доли секунды. Поэтому производительность процесса нанесения покрытия не лимитируется скоростью электрических явлений, если мощность высоковольтного блока питания достаточна.

Процесс зарядки частиц можно рассматривать для двух предельных случаев: а) для проводящих частиц; б) для частиц из диэлектрического материала. Для рассматриваемой технологии важен второй случай, так как частицы цемента и тонкого песка имеют высокое удельное электрическое сопротивление. Установлено, что область оптимальной электропроводности частиц для их электростатического осаждения имеет широкий интервал – от 10^3 до $10^9 \text{ Ом} \times \text{м}$. У всех компонентов сухой бетонной смеси удельное сопротивление лежит в интервале $10^7 \dots 10^9 \text{ Ом} \times \text{м}$.

Только у растительных волокон, которые могут применяться при строительстве малоэтажного жилья, легко подвергаемого рециклингу, сопротивление значительно ниже. Это сопротивление сильно зависит от относительной влажности воздуха. Удельное сопротивление цемента и других минеральных частиц тоже зависит от влажности воздуха, но в значительно меньшей степени, чем у растительных волокон.

Если удельное электрическое сопротивление частиц превышает $2 \times 10^9 \text{ Ом} \times \text{м}$, условия их осаждения ухудшаются. На элементах формообразующего каркаса частицы сухой бетонной

смеси образуют плотный слой плохо проводящего материала, который накапливает электрические заряды, и тем самым способствует снижению напряжения результирующего поля в рабочем пространстве между распылителем и покрываемой бетонной смесью поверхностью. Это замедляет процесс осаждения новых частиц. Поэтому толщина слоя сухой бетонной смеси ограничивается уменьшающейся напряженностью результирующего поля. Иначе говоря, толщина одного слоя ограничивается проводимостью осажденного слоя. При увлажнении осажденного слоя в поровом пространстве между частицами появляется жидкая среда, обычно с щелочной реакцией. В результате восстанавливается хорошая проводимость осажденного слоя, и процесс осаждения следующих слоев сухой бетонной смеси можно продолжить.

Сила F , действующая на заряженную частицу, определяется по закону Кулона, если размерности брать в системе СИ [12]:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r_{12}^2}, \quad (1)$$

где q_1 и q_2 – величина взаимодействующих зарядов, ϵ_0 – электрическая постоянная (ранее называлась диэлектрической постоянной, в системе СИ она равна $8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м); r – расстояние между зарядами. Электрическая постоянная ϵ_0 в формуле (1) устанавливает пропорциональность произведения заряда q и напряженности электрического поля E_0 , установившегося между заземленным арматурно-сеточным каркасом и распылителем:

$$F = qE_0 = neE_0, \quad (2)$$

где e – элементарный заряд, равный заряду электрона ($1,602 \times 10^{-19}$ Кулона);

n – число зарядов на частице.

При определении электрического заряда форму частиц условно считаем сферической. Число n ионов, захваченных частицей радиусом a , и ее заряд q равны:

$$n = 4\pi\epsilon_0 \frac{3E_0 a^2}{e} \text{ и } q = 4\pi\epsilon_0 (3E_0 a^2). \quad (3)$$

где E_0 – напряженность электрического поля, В/м.

Для диэлектрических частиц расчет заряжения в ионизированном поле должен учи-

тывать также поляризационные заряды. Тогда предельный заряд частицы равен:

$$Q_0 = 4\pi\epsilon_0 (pE_0 a^2), \text{ где } p = 1 + 2 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2}. \quad (4)$$

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость материала частицы.

Чем выше диэлектрические свойства материала частицы, тем более величина p приближается к 1. При высокой электропроводности поверхности частицы величина p стремится к 3,0.

Число электрических зарядов n , которые могут быть захвачены частицей:

$$n = 4\pi\epsilon_0 \left[1 + 2 \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right] \frac{E_0 a^2}{e}. \quad (5)$$

Частицы сухого цементного порошка, тонкого песка и волокна заряжаются, проходя через центральный канал пистолета (распылителя), в котором коаксиально расположен электрод. Между покрываемым объектом и распыляющей насадкой пистолета создается электростатическое поле. Частицы порошка, получившие электрический заряд, перемещаются к заземленному электроду, которым является заземленный арматурно-сеточный каркас. Формообразующая основа изделия или сооружения может быть сделана из металлической сварной или тканой сетки. Сетка с большой ячейкой может быть дублирована с внешней стороны прореженной мешковиной из джута или других гидрофильных волокон. Перед покрытием бетонной смесью мешковину увлажняют.

На частицы цемента в рассматриваемом процессе действуют три силы: сила тяжести, электростатическая сила, действующая на заряды в электрическом поле, и аэродинамическая, обусловленная действием на частицу воздушного потока, с помощью которого в распылитель подают сухую бетонную смесь. Силу тяжести, действующую на частицу, можно не учитывать, так как частицы цемента размером 50 мкм имеют массу меньше 1 мкг. Даже масса стеклянных волокон и частиц тонкого песка настолько мала, что скорость витания их в воздухе много меньше скорости воздушного потока из распылителя. Тормозящее действие воздуха на движение частиц отмечено ниже.

Существенная особенность движения частиц к покрываемой поверхности связана с

тем, что по выходе их из распыляющего сопла действующая на них электростатическая сила возрастает по гиперболическому закону по мере их приближения к покрываемой поверхности, а аэродинамическая сила убывает, поскольку воздушный поток расширяется. Кроме того, у самой поверхности воздушный поток меняет направление своего движения, он начинает двигаться вдоль покрываемой поверхности, если она сплошная, либо становится вихревым, если встречается с выступами или отверстиями.

При электростатическом осаждении сухой смеси на формообразующую основу из сетки задают режим нанесения порошка. На процесс осаждения влияют: скорость подачи смеси, скорость воздуха из распылителя, расстояние между распылителем и изделием, величина напряжения между электростатическим распылителем и заземленным изделием и др. Компоненты сухой смеси, проходя через канал электростатического распылителя, получают электрический заряд. Правильно подобранное расстояние между распылителем и изделием улучшает осаждение сухой смеси на тыльную сторону изделия. Лицевая сторона при этом покрывается хорошо в любом случае.

Как происходит физически покрытие тыльной стороны сетки частицами бетонной смеси? При оптимальной скорости воздушного потока и напряженности электрического поля значительное количество частиц пролетает через отверстия в сетке. Под оптимальной скоростью воздушного потока здесь понимается такая скорость, которая достаточна для выноса из распылителя нужного количества порошка, но не слишком большая, чтобы не мешать осаждению частиц под действием электрического поля. Ускорение частиц происходит под действием двух сил: аэродинамической силы попутной струи воздуха и силы электрического поля, действующей на заряженную частицу. Затем частица, пролетевшая через отверстие в сетке, полем тормозится и далее ускоряется в обратном направлении, чтобы осесть на сетке с тыльной стороны.

После стекания электрического заряда через сетку осажденный слой порошка удерживается силами Ван-дер-Ваальса, которые не так малы – межмолекулярное взаимодей-

ствие происходит с энергией 10-20 кДж/моль. А затем, при дозированном увлажнении сухой смеси тонкораспыленной водой с поверхностно-активными веществами (ПАВ), к этим силам добавляются силы смачивания и капиллярного эффекта.

Силовые линии поля распределяются таким образом, что они достигают поверхности объекта, и заряженные частицы порошка равномерно осаждаются на каркасе или на ранее уже осажденном и влажном слое бетона. Противодействующая им аэродинамическая сила F_a , когда частица, пролетевшая отверстие в сетке, движется в обратном направлении, чтобы сесть на сетку с обратной стороны. Сила F_a обусловлена вязкостью среды и может быть найдена с помощью закона Стокса [13, 15]:

$$F_a = 6 \pi a \eta v, \quad (6)$$

здесь a – радиус частицы, η – динамическая вязкость воздуха ($0,18 \times 10^{-4}$ Па·с),
 v – скорость движения частиц.

Движение частицы, взвешенной в газе и находящейся в электрическом поле, может быть рассчитано при помощи второго закона механики:

$$m \frac{dv}{dt} = qE_p - 6\pi a \eta v, \quad (7)$$

где m – масса частицы,
 q – заряд частицы,
 E_p – электрическая напряженность поля осаждения.

Интегрирование (7) дает:

$$v = \frac{qE_o}{6\pi\eta a} \left[1 - \exp\left(-\frac{6\pi\eta a}{m}\right) \right]. \quad (8)$$

Для большинства марок цемента размер частиц не превышает 50 мкм. Как показывают расчеты, для таких минеральных частиц, движущихся в воздухе, экспонентой в (8) можно пренебречь. Например, для частицы диаметром 10 мкм в среде с вязкостью $\eta = 0,18 \cdot 10^{-4}$ Па·с (воздух в нормальных условиях) экспонента в (8) приближается к нулю (e^{-3240}). Тогда скорость v равна:

$$v = \frac{qE_o}{6\pi\eta a} = \frac{(4\pi\epsilon_0) \cdot 3E_o a^2 E_p}{6\pi\eta a} = \frac{2\epsilon_0 E_o E_p}{\eta} a, \quad (9)$$

где E_o – напряженность поля в месте заряжения частицы,

E_p – напряженность поля осаждения, то есть напряженность возле осадительного электрода, где частица бетонной смеси разряжается, отдав заряд через каркас земле.

Во многих случаях можно считать $E_0 \approx E_p$. В выражении (9) величина q имеет несколько иное значение, чем в (3):

$$q = 4\pi\epsilon_0(3E_0a^2), \quad (10)$$

напомним, где E_0 – напряженность электрического поля в той точке, где частица приобретает заряд.

Из (9) следует, что скорость перемещения частиц к электроду есть функция напряженностей E_0 . Тогда скорость частицы есть функция квадрата E_0 , радиуса частицы a и обратно пропорциональна вязкости среды η . Так, для частиц цемента размером 50 мкм установившаяся скорость их перемещения равна 12-13 м/с (в спокойном воздухе). Следовательно, при обычно применяемых расстояниях между распылителем и покрываемой поверхностью время движения частицы не превышает 0,02-0,03 с. С учетом известной скорости несущего воздушного потока это время еще меньше. Расчет сделан для электрического поля напряженностью 60 кВ. Величина вязкости воздушной среды соответствует нормальным температуре и давлению.

Для сообщения всем осаждаемым частицам цемента электрического заряда блок высоковольтного питания должен иметь соответствующую мощность. Высоковольтные блоки питания на современной элементной базе довольно компактны. Кроме того, производительность процесса зависит от площади осаждения, которую захватывают распылители при нанесении порошков смеси. Для увеличения производительности возможно одновременное использование пакета из нескольких электростатических распылителей цемента и

увлажняющих устройств, расположенных на манипуляторе.

Поскольку нанесение сухих компонентов бетона на каркас производится одновременно с периодическим увлажнением нанесенных слоев, то большая толщина слоя не создает препятствия для свободного стока заряда в заземленный каркас. В цементном слое даже с небольшой влажностью образуется щелочной электролит, который обеспечивает достаточную электропроводность бетонного слоя при любой его толщине, что благоприятно для электроосаждения.

Добыча миллионов тонн сырья и топлива для производства цемента, а также работа многих цементных заводов сопровождается вредными выбросами, которые наносят большой ущерб окружающей среде. Поэтому разработка энерго- и ресурсосберегающих новых строительных технологий особенно важна. Для экономии цемента в строительстве предложен метод послойного электростатического нанесения сухих порошковых компонентов бетонной смеси и волокон на формообразующую основу изделия. В новой технологии водцементное отношение может быть равным теоретической величине. Это должно давать экономию цемента без снижения прочности фибробетона, так как избыточная вода после образования цементного камня оставляет поры и капилляры в бетоне. В технологии электростатического формования изделий из фибробетона необходимо учитывать особенности, диктуемые электростатической технологией. Техническое сходство метода электростатического осаждения сухой смеси бетона на формообразующую основу изделий из фибробетона позволяет во многом использовать теорию и многолетний опыт эксплуатации электрофильтров тепловых электростанций для исследования и развития нового метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство цемента // Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. № 6. 2015. 293 с.
2. *Высоцкий Е. В.* Оценка энергоэффективности российских цементных производств. Перспективы отрасли: вывод из эксплуатации мощностей в 1990-2014, ввод новых мощностей в 2008-2014 гг. // Доклад на конференции CemEnergy-2014. С. 6-8.
3. *Голиков В. М., Ретин С. В., Сапожников А. И.* Снижение энергозатрат при производстве цемента с применением вибрационных машин // ВЕСТНИК Тувинского государственного

- го университета. Технические и физико-математические науки. № 3. 2016. С. 106-113.
4. *Баженов Ю. М., Комар А. Г.* Технология бетонных и железобетонных изделий. М.: Стройиздат, 1984. 672 с.
5. *Кокоев М. Н., Федоров В. Т.* Электростатическое формование изделий из армированного бетона // Бетон и железобетон. 1997. № 6. С. 17-19.
6. *Кокоев М., Федоров В.* Электростатический армированный бетон // Строительные материалы. 2000. № 6. С. 29-31.
7. *Murtazayev S-A. Yu., Salamanova M. Sh., Mintshev M. Sh., Bisultanov R. G.* Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging // Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H. I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 500-503. <https://www.atlantispress.com/proceedings/isees-19/125914231>
8. *Faust W. D., Evele H. F.* Ceram Eng. and Sci. Proc. 1981. № 3/4. P. 256. [Технология керамики и научные труды. 1981.]
9. *Lagarias J.* Discharges electrodes and electrostatic precipitators // Journal of the Air Pollution Control Association. 1960. Vol. 10. № 4. P. 271-274. [Лагариас Дж. Разрядные электроды и электрофильтры // Журнал ассоциации по контролю за загрязнением воздуха. 1960. Т. 10. № 4. С. 271-274].
10. *Санаев Ю. И.* Обеспыливание газов электрофильтрами. Семибратово: Кондор-Эко, 2009. 163 с.
11. *German W.* Ueber die Koronastromung in den Elektrofiltern/ + Physikalische Zeitschrift. Bd. 34. S. 661-663. [В. Герман О коронирующем токе утечки в электрофильтрах // Физический журнал. Т. 34. Pp. 661-663.]
12. *Tanasescu Fl.* Ein neues Teilentladungseichmass zur Eichung von Messkreisen // Archiv fuer Technisches Messen. 1969. Blatt V, 3361. S. 221-224. [Ф. Тэнэсэску. Новый калибратор разрядов частиц для калибровки измерительных цепей // Архив технических измерений. 1969. Лист V, 3361. С. 221-224.]
13. *Тэнэсэску Ф., Крамарюк Р.* Электростатика в технике. М.: Энергия, 1980. 296 с.
14. *Батаев Д. К. С., Гойтемиров У., Апкаров Ш. И., Эдилсултанова М. В.* К вопросу разработки полимерных композиционных материалов для накопительных конвейеров с регламентированным диапазоном фрикционных свойств / Д. К. С. Батаев, У. Гойтемиров, Ш. И. Апкаров, М. В. Эдилсултанова // Грозненский естественнонаучный бюллетень. 2018. Т. 3. № 6 (14). С. 76-81.
15. *Муртазаев С. А. Ю., Саламанова М. Ш., Узаева А. А., Бисултанов Р. Г.* Получение мелкозернистых бетонов на щелочных цементах из алюмосиликатных добавок / С. А. Ю. Муртазаев, М. Ш. Саламанова, А. А. Узаева, Р. Г. Бисултанов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. № 4 (26). С. 63-72.

PHYSICAL PROCESSES IN ELECTROSTATIC MOLDING OF FIBER-REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

© ^{1,2}M. R. Nakhaev, ²A. Kh. Alaskhanov

¹CSU named after A. A. Kadyrov, Grozny, Russia

²GSTOU named after acad. M. D. Millionshchikov, Grozny, Russia

The production of cement in different countries is consuming 700-1100 kWh of energy per 1 ton. The extraction of millions of tons of raw materials and the operation of cement plants are accompanied by harmful emissions that cause great harm to the environment. Therefore, the development of energy and resource saving new building technologies is especially important. A new technology has been developed to save cement in construction. A method of layer-by-layer electrostatic deposition of dry powder components of a concrete mixture and fibers on the forming reinforcing-mesh frame of the product is proposed. The applied layers are periodically moistened with water mist. The process is repeated until the desired thickness of fiber-reinforced concrete is obtained. With the new technology, the water-cement ratio can be equal to the theoretical value for a given concrete composition. This should result in cement savings without compromising the strength of the fiber-reinforced concrete. It is necessary to account for the issues associated with the electrostatic technology. For instance, the electric field hardly propagates into narrow and deep channels. The electrophysical features of the method are considered. For example, how long does it take to charge particles of a dry concrete mixture? What determines the productivity of the coating process, what is the optimal air flow rate from an electrostatic spray gun, etc.

Keywords: fiber-reinforced concrete, electrostatic sprayer, dry concrete mix, moistening, water-cement ratio, cement saving.

REFERENCES

1. (2015) 'Proizvodstvo tsementa'. *Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii*. [Cement production. Federal Agency for Technical Regulation and Metrology]. №6. 293 p.
2. Vysotsky, E. V. Otsenka energoeffektivnosti rossiiskikh tsementnykh proizvodstv. Perspektivy otrasli: vyvod iz ekspluatatsii moshchnostei v 1990-2014, vvod novykh moshchnostei v 2008-2014 gg. Doklad na konferentsii CemEnergy-2014. [Evaluation of the Russian cement production energy efficiency. Industry prospects: decommissioning of capacities in 1990-2014, commissioning of new capacities in 2008-2014. Report at the CemEnergy-2014 conference], pp. 6-8.
3. Golikov, V. M., Repin, S. V. and Sapozhnikov, A. I. (2016) 'Reduction of energy consumption in the production of cement using vibration machines'. *Bulletin of the Tuva State University. Technical and physical and mathematical sciences*. №3. Pp. 106-113.
4. Bazhenov, Yu. M. and Komar, A. G. (1984) *Tekhnologiya betonnykh i zhelezobetonnykh izdelii*. [Technology of concrete and reinforced concrete products]. Stroyizdat. Moscow, 672 p.
5. Kokoev, M. N. and Fedorov, V. T. (1997) 'Elektrostaticheskoe formovanie izdelii iz armirovannogo betona'. *Beton i zhelezobeton*. [Electrostatic molding of products from reinforced concrete. Concrete and reinforced concrete]. №6. Pp. 17-19.
6. Kokoev, M. and Fedorov, V. (2004) 'Elektrostaticheskii armirovannyi beton'. *Stroitel'nye materialy*. [Electrostatic reinforced concrete. Building materials]. №6. C. 29-31.
7. Murtazayev, S. A. Yu., Salamanova, M. Sh., Mintsayev, M. Sh. and Bisultanov, R. G. (2019) 'Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging'. *Proceedings of the International Symposium „Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental*

- Research“ dedicated to the 85th anniversary of H. I. Ibragimov (ISES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. pp. 500-503, available at: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/isees-19/125914231>*
8. Faust, W. D. and Evele H. F. (1981) *Ceram Eng. and Sci. Proc.* №3/4. P. 256. [Tekhnologiya keramiki i nauchnye trudy].
 9. Lagarias, J. (1960) ‚Discharges electrodes and electrostatic precipitators‘. *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 10, No. 4. p. 271-274. [Razryadnye elektrody i elektrofil‘try. Zhurnal assotsiatsii po kontrolyu za zagryazneniem vozdukha, vol. 10. №4. P. 271-274]
 10. Sanaev, Yu. I. (2009) Obespylivanie gazov elektrofil‘trami [Dedusting of gases by electrostatic precipitators]. Condor-Eco, Semibratovo, 163 p.
 11. German, W. ‚Ueber die Koronastroemung in den Elektrofiltern‘*Physikalische Zeitschrift*, Bd 34, Pp. 661-663. [O koroniruyushchem toke utechki v elektrofil‘trakh. Fizicheskii zhurnal. T. 34, pp. 661-663.]
 12. Tanasescu, Fl. (1969) Ein neues Teilentladungseichmass zur Eichung von Messkreisen. *Archiv fuer Technisches Messen*, 1969, blatt V, 3361, Pp. 221-224. [Novyi kalibrator razryadov chastits dlya kalibrovki izmeritel‘nykh tsepei. Arkhiv tekhnicheskikh izmerenii, list V, 3361, pp. 221-224.]
 13. Tenesescu, F. and Kramaryuk, R. (1980) *Elektrostatika v tekhnike*. [Electrostatics in engineering]. Energy, Moscow. 296 p.
 14. Bataev, D.K. S., Goitemirov, U., Apkarov, Sh. I. and Edilsultanova, M. V. (2018) ‚K voprosu razrabotki polimernykh kompozitsionnykh materialov dlja nakopitel‘nykh konvejerov s reglamentirovannym diapazonom friktsionnykh svoystv‘. *Groznenskij estestvennonauchnyj byulleten‘*. [On the issue of developing polymer composite materials for storage conveyors with a regulated range of friction properties. Grozny Natural Science Bulletin]. V. 3. №6 (14). Pp. 76-81.
 15. Murtazaev, S.A. Yu., Salamanova, M. Sh., Uzaeva, A. A. and Bisultanov, R. G. (2021) ‚Poluchenie melkozernistykh betonov na shhelochnykh cementah iz aljunosilikatnykh dobavok‘. *Vestnik GGNTU. Tehnicheskie nauki*. [Obtaining fine-grained concretes on alkaline cements from aluminosilicate additives. Herald of GSTOU. Technical sciences]. V. 17. №4 (26). Pp. 63-72.