



## ГЕОЭКОЛОГИЯ

Геоэкология / Geoeology  
Оригинальная статья / Original article  
УДК 628.316.12  
DOI: 10.18470/1992-1098-2017-2-147-158

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ «БИОПЛАТО» ДЛЯ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ШАХТНЫХ ВОД

<sup>1</sup>Феликс И. Ягодкин, <sup>2</sup>Елена В. Вильсон\*,

<sup>2</sup>Лидия А. Долженко, <sup>2</sup>Елена Ю. Романенко

<sup>1</sup>Научно-технический центр «Наука и техника»,  
Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Донской государственный технический университет,  
Ростов-на-Дону, Россия, elena\_v58@mail.ru

**Резюме. Цель.** Статья посвящена определению возможности использования биоплато с высшей водной растительностью с целью снижения концентраций железа шахтных вод перед выпуском их в поверхностный водоем. **Методы.** Использование результатов теоретических и эмпирических исследований, определенных в процессе анализа литературных данных, позволило оценить целесообразность применения высшей водной растительности для аккумуляции ионов железа в зависимости от температуры воды, а также способность формирования в водной системе соединений железа с последующим их осаждением. **Результаты.** Полученные в ходе исследований материалы позволили определить размеры и конструкцию биоплато – сооружений по очистке воды от ионов железа с учетом использования высшей водной растительности и минимизации площади использованных для устройства очистных сооружений земельных ресурсов. **Выводы.** Разработана технологическая схема очистки шахтных вод от железа, включающая фильтры с загрузкой из щебня для иммобилизации железобактерий и биоплато. Дно биоплато выполняется из водонепроницаемых глин. По дну в грунте производится высадка высших водных растений. Согласно вышеизложенному, целесообразно высаживать рогоз узколистый или тростник. Сооружения на основе фитотехнологий работают как саморегулируемая система.

**Ключевые слова:** фитотехнология, биоплато, высшая водная растительность, гидроксиды железа, осаждение, шахтные воды.

**Формат цитирования:** Ягодкин Ф.И., Вильсон Е.В., Долженко Л.А., Романенко Е.Ю. Теоретические исследования целесообразности использования «Биоплато» для обезжелезивания шахтных вод // Юг России: экология, развитие. 2017. Т.12, N2. С.147-158. DOI: 10.18470/1992-1098-2017-2-147-158

### THEORETICAL STUDIES FOR THE USE OF "BIOPATEAU" FOR DEFFERIZATION OF WATER TREATMENT

<sup>1</sup>Felix I. Yagodkin, <sup>2</sup>Elena V. Vilson\*,

<sup>2</sup>Lidia A. Dolzhenko, <sup>2</sup>Elena Yu. Romanenko

<sup>1</sup>Scientific and technical centre «The Science and practice»,  
Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup>Don State Technical University,  
Rostov-on-Don, Russia, elena\_v58@mail.ru



**Abstract.** The *aim* of the research is to determine the possibility of using bioplateau with higher aquatic vegetation in order to reduce the concentrations of iron in mine waters before releasing to the surface water body.

**Methods.** The use of the results of theoretical and empirical studies determined during the analysis of literature data made it possible to evaluate the feasibility of using higher aquatic vegetation to accumulate iron ions depending on the water temperature, as well as the ability to form iron compounds in the aqueous system as well as their further precipitation.

**Results.** The materials obtained during the research made it possible to determine the size and design of bioplate in order to purify the water from iron ions taking into account the use of higher aquatic vegetation and minimizing the area of land resources used for the device. **Conclusions.** A technological scheme for cleaning mine water from iron has been developed, including filters loaded with crushed stone for immobilization of iron bacteria and bioplateau. The bottom of the bioplateau is made of waterproof clay. At the bottom, hydrophytes are planted in the ground. According to the foregoing, it is advisable to plant narrow-leaved cattail or reed. The facilities, on the basis of phytotechnology, work as a self-regulating system.

**Keywords:** phytotechnology, bioplate, water vegetation, iron hydroxides, precipitation, mine waters.

**For citation:** Yagodkin F.I., Vilson E.V., Dolzhenko L.A., Romanenko E.Yu. Theoretical investigations of the feasibility of using "Bioplateau" for iron removal from mine waters. *South of Russia: ecology, development*. 2017, vol. 12, no. 2, pp. 147-158. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2017-2-147-158

## ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация шахт связана с необходимостью утилизации шахтных вод, поступающих на поверхность в результате разработки массивов материнских пород. В местах разработок устраивают очистные сооружения, эксплуатация которых является весьма затратной статьей угледобычи. Как правило, подземные воды являются высокоминерализованными и содержат в больших концентрациях растворенное двухвалентное железо.

Так, регулярные исследования качественного состава шахтных вод техногенного горизонта ОАО «Шахта «Бургустинская», проводящиеся с 2005 года специализированной лабораторией ООО «ЦСЭМ ВД» и с 2010 года ООО «Экологические технологии» и Шахтинским отделом анализа и мониторинга Филиала ФБУ «ЦЛАТИ по ЮФО» - «ЦЛАТИ по РО», позволяют установить, что шахтные воды по составу являются сульфатными кальциево-натриевые, по общей минерализации - сильносолоноватыми, активная реакция вод – слабощелочная  $pH = 7,70$ . Очистка шахтных вод на очистных сооружениях производилась с использованием реагентов и далее, через каскад прудов-отстойников сбрасывалась по балке Бугутка в реку Гнилуша. Очистные сооружения обеспечивали снижение концентрации железа в среднем с  $122 Fe_{об}, мг/дм^3$  до  $0,15 мг/дм^3$ , минерализация очищенных вод практически не изменялась относительно исходных – шахтных вод (в 2014 году сухой оста-

ток в исходной воде составил  $4659 мг/дм^3$ , а в очищенной  $4595$ ), общая жесткость в процессе очистки шахтных вод возрастала, в исходных водах жесткость воды составляла  $34,8^0 Ж$ , после очистки –  $36,1^0 Ж$ . В настоящее время очистные сооружения не работают, так как реализован процесс ликвидации шахты методом ее затопления. Были произведены различные режимы отвода шахтных вод, целью которых являлось предотвращение поступления шахтных вод с высокой концентрацией железа общего и сульфатов в природные водоемы.

Сопоставление качественных характеристик шахтных вод во времени определило выраженную позитивную динамику их состава. За период с 2005 по 2014 годы произошли следующие изменения качественного состава откачиваемых на поверхность шахтных вод:

- минерализация понизилась с  $7630 мг/дм^3$  в 2005 году до  $4659 мг/дм^3$  в 2014 году или на 39%. В 2014 году эта тенденция сохранилась - минерализация сократилась от  $5005 мг/дм^3$  на конец 2013 года до  $4659 мг/дм^3$  или на 7%;

- содержание сульфатов за период эксплуатации водоотливного комплекса понизилось от  $4700 мг/дм^3$  до  $2697 мг/дм^3$  или на 43%;

- величина водородного показателя  $pH$  сместилась за анализируемый период в сторону нейтральной ( $pH = 7,0$ ) - от  $5,88$  до  $6,28$ ;



- содержание железа общего сократилось более чем в 2,8 раза - от 346 до 122 мг/дм<sup>3</sup>;

- жесткость общая шахтных вод уменьшилась на 33% - от 52 мг-экв/дм<sup>3</sup> до 34,8 мг-экв/дм<sup>3</sup>.

Постепенное улучшение качества шахтных вод - это закономерное следствие продолжающегося истощения геохимического потенциала углевмещающего, а после затопления горных выработок - водовмещающего горного массива.

В настоящее время, согласно исследованиям, представленным в отчете Северокавказского представительства ОАО «Научно – исследовательского института горной геомеханики и маркшейдерского дела» (СКП ОАО «ВНИМИ»), минерализация шахтных вод составляет 4659 мг/дм<sup>3</sup>; величина водородного показателя рН - 6,28; содержание железа общего - 122 мг/дм<sup>3</sup>; жесткость 34,8 Ж.

После прекращения эксплуатации водоотливного комплекса ОАО «Шахта «Бургустинская» сотрудниками СКП ОАО «ВНИМИ» была выполнена детальная проработка двух вариантов выпуска шахтных вод на поверхность. Первый вариант - организация естественного выхода шахтных вод на поверхность через породный массив. Второй вариант - организация выпуска шахтных вод на поверхность через водовыпускные скважины. Технически оба варианта могут быть реализованы, однако, как показали расчеты, в случае использования водовыпускных скважин общего притока шахтных вод только незначительная часть будет фильтроваться через породный массив, что создаст загрязненную зону на сопряжении склона и поймы реки Гнилуша. Главным фактором загрязнения будет являться выход на поверхность через водовыпускные скважины шахтных вод с содержанием железа не менее 120 мг/дм<sup>3</sup>. В случае реализации варианта выхода шахтных вод ОАО «Шахта «Бургустинская» на поверхность через породный массив содержание железа в шахтной воде составит 4 мг/дм<sup>3</sup>. Именно значительное снижение концентрации железа в шахтных водах, профильтрованных через породный массив, явилось определяющим фактором к рекомендации СКП ОАО «ВНИМИ» первого из рассматриваемых вариантов. Однако так как вышед-

шие на поверхность шахтные воды должны поступать в реку «Гнилуша», концентрация железа должна быть снижена до 0,3 мг/дм<sup>3</sup>, что и явилось предметом исследований настоящей работы.

Традиционные методы обезжелезивания воды основаны на окислении двухвалентного железа, присутствующего в шахтных водах, кислородом воздуха (аэрация) или более сильными окислителями (хлор, перманганат калия, пероксид водорода, озон) до трехвалентного состояния, с образованием нерастворимого гидроксида железа (III), который впоследствии удаляется отстаиванием с добавлением или без добавления коагулянтов и флокулянтов и (или) фильтрованием. Удаление двухвалентного железа из воды достаточно эффективно может протекать в случае использования метода фильтрования воды через каталитическую загрузку, на поверхности которой также осуществляется окисление железа двухвалентного до трехвалентного с последующим задержанием последнего в слое загрузки. Для удаления двухвалентного железа используют также метод ионного обмена – в данном случае применяются катиониты, как природные – цеолиты, так и синтетические. В последнее время популярными становятся мембранные технологии. Микрофильтрационные мембраны пригодны для удаления коллоидных частиц гидроксида железа (III), ультрафильтрационные и нанофильтрационные мембраны способны удалять кроме этого коллоидное и бактериальное органическое железо, а метод обратного осмоса позволяет удалять до 98% растворенного в воде двухвалентного железа. Однако мембранные методы дорогостоящи и, как правило, не предназначены конкретно для обезжелезивания. Достаточно известным является метод биологического обезжелезивания, подразумевающий использование железобактерий, окисляющих двухвалентное растворенное железо до трехвалентного с последующим удалением коллоидов и бактериальных пленок в отстойниках и на фильтрах. Основным представителем железобактерий с энергетическим метаболизмом хемолитотрофного типа является *Thiobacillus ferrooxidans*, использующий энергию окисления железа для ассимиляции CO<sub>2</sub>, служащей основным или единственным источником углерода. Бактерии способны накапливать окислы железа на поверхности бактериальных клеток, что является результатом двух взаимосвя-



занных процессов: аккумуляции (поглощения) клетками этих металлов из раствора и окисления, сопровождающегося обильным отложением нерастворимых окислов на поверхности бактерий. Коэффициент накопления железа (отношение содержания вещества в бактериях к концентрации его в воде) может достигать величины 105 – 106 [1].

В последнее время в литературе прослеживается информация о возможности использовать для очистки воды от различных поллютантов биопруды, биоплато, ботанические площадки и др. подобные сооружения. В мировой практике «биоплато» получило название "Constructed wetland". В общем случае Биоплато – это сооружение, использующее естественные условия для седиментации дисперсной фазы загрязняющих веществ, а также свойства высшей водной растительности (ВВР), и бактерий способных разлагать, поглощать и преобразовывать органические и неорганические загрязнители, обеспечивая тем самым доочистку воды. Различают русловое и инфильтрационное биоплато [2]. Русловое биоплато представляет собой водоток или участок водотока, на котором создается определенный гидравлический режим, благоприятный для жизнедеятельности ВВР [2]. К русловым биоплато можно отнести поверхностные биоплато, которые при подаче на них сточных вод, похожи на естественный "заболоченный" ландшафт, с тем отличием, что это искусственное сооружение, имеющее системы управления, в результате чего достигается высокая эффективность очистки. К достоинствам сооружения относят низкие экономические затраты при строительстве, удобство в управлении и низкие энергетические затраты при эксплуатации. Поступление кислорода в систему очистки осуществляется, в основном за счет диффузионных процессов из атмосферы через корневые органы растения [3-6]. Например, в Америке довольно широко используются системы очистки шахтных вод на плантациях камыша и тростника [7]. В России нет опыта использования организованных ландшафтных систем для обезжелезивания шахтных вод.

Предпочтительность использования того или ионного метода очистки железосодержащих вод определяется многочисленными факторами, наиболее значимыми являются: расход сточных вод, цели водоподготовки, вид железа, содержащегося в воде, рН очищаемых вод, температура обрабатываемой воды. В каждом конкретном случае целесообразный вариант должен обеспечивать высокое качество очистки подземных вод от железа, простоту и надежность эксплуатации.

Реализация варианта выхода шахтных вод ОАО «Шахта «Бургустинская» на поверхность через породный массив делает практически невозможным устройство очистных сооружений, работа которых требует постоянного контроля, обслуживающего персонала, наличия реагентного хозяйства, и других взаимосвязанных систем, обеспечивающих отлаженный режим работы очистных сооружений. Кроме этого, как показывают результаты анализов шахтных вод до и после очистки, очистные сооружения, направленные на окисление железа и его последующего осаждения, практически не обеспечивают снижение содержания. Эффективность использования водных пространств, поросших ВВР для обезжелезивания подземных вод, была отмечена сотрудниками СКП ОАО «ВНИМИ» в процессе исследования ими в пойме реки Бургуста участка выпуска шахтных вод затопленной шахты. Было установлено, что при глубине слоя воды 0,2-0,5 м в естественных природных условиях, вода практически полностью очищается от железа, при его исходной концентрации 19 мг/дм<sup>3</sup>. Результаты химических анализов проб воды, отобранных из русла реки ниже участка полного смешивания шахтных вод с водным потоком реки, показывают, что концентрация железа здесь, как правило, не превышает фоновых значений. На заболоченной площади поймы реки Бургуста отмечается бурное развитие густых зарослей камыша, что свидетельствует о безвредности для болотной растительности выпавшего гидроксида железа.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения оптимальной технологии снижения концентрации железа в шахтных водах, поступающих в поверхностные водоемы, был произведен литературный обзор,

в том числе использованы результаты оригинальных исследований по определению поглотительной способности различных водных растений по отношению к железу. Расчет



гидравлической крупности частиц гидроксида железа выполнен с использованием стандартных формул для определения молекулярно-кинетических свойств коллоидных систем.

Результаты литературного обзора и исследований СКП ОАО «ВНИМИ», а также наличие возможности по течению реки Гнилуша устроить биоплато с глубиной воды до 0,5 -1,0 м, определили цель настоящей работы

- проведение теоретических исследований, позволяющих оценить возможность использовать «биоплато» для обезжелезивания профильтрованных через природный массив шахтных вод ОАО «Шахта «Бургустинская», оценить вклад процессов, протекающих в этом сооружении на степень обезжелезивания, а также разработать рекомендации к расчету и конструированию «биоплато».

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно данным современного воззрения в биоплато могут быть реализованы следующие процессы, приводящие к удалению железа из шахтных вод при доочистке:

- окисление двухвалентного железа в трехвалентное кислородом, растворенным в воде, при этом дополнительно обогащение воды кислородом происходит в результате жизнедеятельности ВВР, например, тростника, губчатая структура стеблей которого способствует доставке кислорода к прикорневым участкам, заодно обогащая почву дна и воду [8; 9];

- окисление двухвалентного железа в трехвалентное в результате метаболизма железобактерий хемолитоавтотрофов, развивающихся на поверхности ВВР и (или) загрузки [1]. В природных условиях железобактерии живут в застоявшейся и проточной воде при pH = 4 - 10 и температурах от 5 до 40<sup>0</sup>С;

- адсорбция соединений железа на поверхности биомассы микроорганизмов. Научные данные показывают, что микроорганизмам присуща большая удельная поверхность. Поэтому они выступают отличным сорбентом для тяжелых металлов [1];

- седиментация гидроксидов железа, которая становится возможной в результате медленного течения воды. Гидроксиокомплексы осаждаются, так как продолжительность пребывания воды в биоплато значительная и частицы будут способны к потере кинетической устойчивости. При фильтровании воды через ВВР процесс седиментации интенсифицируется, так как ВВР оказывают механическое сопротивление движению воды и тем самым способствует осаждению взвешенных в воде веществ и их накоплению [8];

- адгезия соединений железа на поверхности ВВР [8];

- поглощение, преобразование и накопление железа ВВР. Существует особая группа растений, получившая название «рас-

тения гипераккумуляторы», и характеризующаяся наилучшей способностью к поглощению ионов тяжелых металлов. В соответствие с исследованиями В.Д. Казмирука с сотрудниками было установлено, что растительность накапливает различные вещества в листьях и стеблях, а также поглощает их в процессе обмена с внешней средой [8]. Количество накапливаемых растительностью биогенных элементов, металлов и других загрязняющих веществ может исчисляться десятками и сотнями тысяч тонн.

Наиболее значимыми процессами с точки зрения удобства эксплуатации систем очистки шахтных вод являются поглощение ВВР соединений железа и седиментация нерастворимых гидроксокомплексов железа из воды в процессе ее медленного движения.

Рассмотрим вклад в процесс обезжелезивания ВВР.

Анализ литературных данных позволил определить виды растений, в частях которых преимущественно накапливается железо. Так в тростнике, произрастающем на участках, которые подвергаются воздействию загрязненных вод, накапливается к концу вегетации примерно в 4 раза больше железа, чем в растениях, не подвергающихся влиянию сточных вод. В.Д. Казмирук с сотрудниками исследовал накопление тяжелых металлов высшей водной растительностью различных биотопов устьевой области Волги [8]. Было установлено, что поглощение зависит от вида ВВР (экологических и физиологических ее особенностей), сезона года, состава самого вещества. Тростник обыкновенный накапливает 76 мг/кг сухого веса растения, Водокрас -1041 мг/кг сухого веса. Сальвиния- 4510 мг/кг сухого веса, Рогоз узколистный - 56 - 6240 мг/кг сухого веса [8-11]. Наблюдается значительная дифференциация накопления тяжелых металлов различными органами растений. Так, особенностью онтогенетической специализации ло-



тоса орехоносного в устьевой области Волги является активное накопление железа и марганца в листьях. Для остальных органов содержание железа значительно ниже, так как они не испытывают в данной обстановке дефицита этого элемента [10-11]. На основании изложенного, можно сделать вывод, что концентрации накопленного растениями железа могут изменяться в широком диапазоне. Кроме этого принципиальным является вопрос о равномерности поглощения железа ВВР в течение всего вегетационного периода.

Особый интерес представляют результаты лабораторных исследований, проведенных в Самарском государственном университете, целью которых являлось изучение процесса фитоочистки сточных вод по извлечению ионов железа Урути мутовчатой [12].

Для изучения процесса водоочистки были использованы модельные растворы с различной концентрацией железа (1, 2, 4, 6, 10 мг/дм<sup>3</sup>). Для обеспечения достоверности прохождения процесса очистки за счет работы растения параллельно использовались искусственные модели Урути, которые представляют собой волокнистый материал, закрепленный на носителе (провода, пластик). Данные исследований позволили установить, что микроорганизмы, обитающие на поверхности Урути мутовчатой, поглощают загрязнитель, но не в таком большом количестве как само растение [12]. В среднем эффективность извлечения железа с использованием Урути мутовчатой составляет 70 – 75 %, использование моделей, определяющих вклад микроорганизмов, позволяет снизить концентрацию железа максимально лишь на 27 %. Результаты исследований сотрудников Самарского государственного университета можно использовать для определения потребности в ВВР для обезжелезивания шахтных вод с концентрацией железа в воде 4 мг/дм<sup>3</sup>. С учетом эффективности очистки по растворенному железу до 70 % количество растений составит 20000 (для расчета принята масса одного растения 400 г). Если учесть рекомендации нормативной литературы по плотности посадки в соответствие с выбранным биоценозом до 9 шт. на 1 м<sup>2</sup>, то площадь посадки должна составить 2222 м<sup>2</sup> [2]. Следовательно, если предположить равномерность поглощения железа в течение всего года, без учета насыщения тканей растения железом, длину биоплато можно определить по формуле, приведенной в ТП-АПК

1.30.03.01-06 «Нормы технологического проектирования оросительных систем с использованием животноводческих стоков» [2]. В случае необходимости удаления железа указанная формула примет вид:

$$L = V / f_{Fe} (C_{Fe}^0 - C_{Fe}^L),$$

где  $L$  - длина биоплато, км;  $V$  - скорость воды на биоплато, м/с; принимаем в соответствие с рекомендациями [4] - 0,01 м/с;  $f_{Fe}$  коэффициент очистительной способности биоплато, г Fe/(м<sup>3</sup> с). Коэффициент  $f_{Fe}$  для загрязненных шахтных вод, рассчитанный на основе литературных данных (график рис. 1 [12]), составит: 0,00033 г/м<sup>3</sup>с.;  $C_{Fe}^0$  и  $C_{Fe}^L$  - концентрация Fe на входе и выходе биоплато соответственно 4 и 0,1 г Fe<sub>общ</sub>/дм<sup>3</sup>.

Длина биоплато  $L$  составит 120 м., ширина - 18,5 м.

Накопление большинства тяжелых металлов (ТМ) в органах растений происходит, скорее всего, в результате осмотических явлений, и накапливаются т.м. по-видимому, только в растворенном виде, поэтому мы считаем, что полученные расчеты не могут быть использованы без прогнозирования снижения скорости и прекращения накопления после достижения максимально-возможного количества металла в растении.

Авторы предлагают ввести дополнительную «коэффициента поправки», который учитывает конечное накопление растением железа. Так, согласно литературным источникам, максимальное потребление железа за вегетационный период составляет 4,6 г на 1 кг растения [11; рис 1]. Согласно данным исследований А.Ю. Копниной и А.Г. Колесникова за 2 часа 5 г растения потребляет 0,48 мг Fe [12; рис. 9]. Количество железа за вегетационный период (примем 240 дней) таким образом, составляет 3225600 г ( $G_{Fe} = 160 \times 4 \times 24 \times 210$ ), следовательно, необходимая масса растений составит 175304 кг, если учесть, что масса растения составляет до 0,5 кг, то необходимое количество растений составит 350608 шт., с учетом рекомендуемой нормы высадки 12 растений на м<sup>2</sup>, необходимая площадь составит 29217 м<sup>2</sup>. Таким образом, с учетом возможности предельного насыщения ВВР растворенного железа, необходимая площадь биоплато увеличится в 13 раз. Следует также отметить, что эффективность работы откры-



тых биоплато снижается в осенне-зимний период до 70% [3].

В шахтных водах, поступающих на биоплато, прогнозируются следующие концентрации катионов и анионов, обуславливающих солесодержание:  $\text{SO}_4^{2-} = 2650$  мг/дм<sup>3</sup>;  $\text{Cl}^- = 170$  мг/дм<sup>3</sup>;  $\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 850$  мг/дм<sup>3</sup>;  $\text{Ca}^{2+} = 400$  мг/дм<sup>3</sup>;  $\text{Mg}^{2+} = 220$  мг/дм<sup>3</sup>;  $\text{HCO}_3^- = 15,1$  мг-экв/дм<sup>3</sup>. Наибольшая интенсивность поглощения макрофитами минеральных веществ наблюдается в период развития и усиленного роста. Накопление минеральных веществ в соответствии с литературными данными в % на сухое вещество составляет:

- Тростник обыкновенный: - Азот - 2,17; Фосфор - 0,35; Калий - 1,70; Кальций - 0,38; Марганец - 0,10; Натрий - 0,14; Хлорид-ион - 1,36.

- Рогоз узколистый: - Азот - 2,52; Фосфор - 0,41; Калий - 1,19; Кальций - 1,07; Марганец - 0,15; Натрий - 0,51; Хлорид-ион - 1,2.

- Камыш озерный: - Азот - 2,34; Фосфор - 0,39; Калий - 2,37; Кальций - 0,89; Марганец - 0,12; Натрий - 0,4; Хлорид-ион - 1,56.

В соответствие с данными расчетов плотность посадки принимаем 7 растений на 1 м<sup>2</sup>, тогда количество растений составит 62300 шт. Ориентировочно масса растений по сухому веществу составит 30000 кг.

Количество минеральных веществ, находящихся в сточных водах и поглощенных растениями за вегетационный период для камыша озерного составит:

- Калий – 702 кг;
- Натрий – 120 кг;
- Кальций – 267 кг;
- Хлор-ион – 468 кг.

Количество минеральных веществ, поступающих в очищаемых водах в вегетационный период за вегетационный период (примем 240 дн.) составит, кг:

- $\text{Cl}^-$ :  $160 \cdot 24 \cdot 240 \cdot 0,17 = 156672$
- $\text{Ca}^{2+}$ :  $160 \cdot 24 \cdot 240 \cdot 0,40 = 368640$
- $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ :  $160 \cdot 24 \cdot 240 \cdot 0,85 = 783360$

Концентрация минеральных веществ в очищенной воде составит:

- Натрий + Калий – 849 мг/дм<sup>3</sup>
- Кальций – 399 мг/дм<sup>3</sup>
- Хлор-ион – 169 мг/л

С учетом концентрации минеральных веществ в воде, поступающей на поля аэра-

ции изменение фактически наблюдаться не будет.

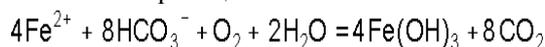
Таким образом, считаем не целесообразным определять параметры биоплато из условия поглотительной способности растений как доминирующего фактора обезжелезивания воды.

Рассмотрим вклад в процесс обезжелезивания ВВР седиментацию гидроксокомплексов железа.

В шахтных водах железо содержится в основном в виде двухвалентного. При взаимодействии с компонентами внешней среды (кислородом, растворенным в воде, микроорганизмами) железо двухвалентное окисляется до трехвалентного, растворимость которого незначительна в диапазоне значений pH шахтных вод. Для определения достаточности кислорода системы для окисления двухвалентного железа в трехвалентное произведем соответствующие расчеты.

Поступление кислорода в водоем происходит путем растворения его при контакте с воздухом (абсорбции), а также в результате фотосинтеза водными растениями. Содержание растворенного кислорода зависит от температуры, атмосферного давления, степени турбулизации воды, минерализации воды и др. В поверхностных водах содержание растворенного кислорода может колебаться от 5 до 14 мг/дм<sup>3</sup>.

Образование гидроксида железа происходит в соответствии с реакцией взаимодействия ионов железа с кислородом, растворенным в воде при достаточной концентрации гидрокарбонат ионов. Необходимые концентрации кислорода и гидрокарбонат ионов могут быть определены по стехиометрическим коэффициентам в следующей химической реакции:



Для окисления одного грамма железа потребуется 0,14 г железа и 2,18 г  $\text{HCO}_3^-$ . Следовательно, для окисления 3,7 мг/дм<sup>3</sup> двухвалентного железа (содержание железа в шахтных водах при использовании естественного выхода шахтных вод на поверхность через породный массив) потребуется 0,52 мг/дм<sup>3</sup>  $\text{O}_2$  и 8,1 мг/дм<sup>3</sup>  $\text{HCO}_3^-$ .

Согласно данным анализа шахтных вод содержание  $\text{HCO}_3^- = 15,1$  мг-экв/дм<sup>3</sup> или 966 мг/л, при pH = 7,3, в соответствии с углекислотным равновесием содержание гид-



покарбонатов составляет около 80%. Таким образом, концентрация гидрокарбонатов достаточна.

С учетом того, что давление над поверхностью воды в биоплато атмосферное, температура воды в летнее время может подниматься до 26<sup>0</sup>С и с учетом содержания солей в шахтных водах растворимость кислорода составит 6,5 мг/дм<sup>3</sup>, что также является достаточным для обеспечения процесса окисления двухвалентного железа в трехвалентное.

Агрегативная устойчивость золя гидроксида железа обеспечивается, прежде всего, наличием на его поверхности двойного электрического слоя. Элементарная частица такого золя называется мицеллой. В основе мицеллы лежит нерастворимый в данной дисперсионной среде агрегат, состоящий из множества молекул: [Fe(OH)<sub>3</sub>]<sub>n</sub>, где n – число молекул, входящих в агрегат. Потенциалопределяющие ионы адсорбируются на поверхности ядра и обуславливают заряд частиц. Наличие одинакового заряда приводит к отталкиванию частиц. Однако в присутствии электролита двойной электрический слой сжимается и частица утрачивает заряд, то есть агрегативную устойчивость, что приводит и к потере кинетической устойчивости. В данном случае шахтные воды минерализованные, и, следовательно, коагуляция соединений железа в рассматриваемом диапазоне рН в достаточной степени можно считать вероятной. Радиус агломератов гидроксида железа в растворе изучали в Институте импульсных процессов [13]. В соответствии с данными исследований для расчета длины биоплато примем среднюю величину радиуса частиц,  $r = 14,7 \times 10^{-6}$  м.

Для определения конструктивных параметров биоплато использованы общие принципы его устройства и эксплуатации с учетом сохранения приемлемых скоростей потока воды, соблюдения необходимого времени пребывания подземных вод, доминирующих методов очистки воды от загрязнителя в зависимости от времени года, вида растений и их количества на кв. м. площади биоплато, а также глубины воды в нем. Основные расчетные показатели приняты по опытным данным, определенным в процессе литературного обзора и рекомендациям нормативной литературы [2].

В данном случае длину сооружения L, м для седиментации гидрокомплексов железа предлагаем определять по формуле, используемой для расчета сооружений отстойного типа:

$$L = \frac{H \cdot V}{u}, \text{ м}$$

где L – длина сооружения, м; H – рабочая глубина сооружения, принимаем в соответствии с рекомендациями по биоплато – 0,5 – 0,6 м; V – скорость движения воды, мм/с, принимаем 5 мм/с; u – гидравлическая крупность частиц, мм/с.

Гидравлическая крупность агрегатов гидроксида железа, рассчитывают по формуле:

$$u_0 = 2r^2(d - \rho)g/9\mu, \text{ м/с},$$

где  $\rho_n = 990 \text{ кг/м}^3$  – плотность агломератов гидрокомплексов;  $d = 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды;  $\mu$  – вязкость воды, принимается по справочным данным в зависимости от температуры обрабатываемой воды, кг/с·м принимаем температуру 10<sup>0</sup>С, тогда  $\mu = 1,31 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с·м}$ ;  $r = 40 \times 10^{-6} \text{ м}$  – радиус агломератов гидроксида железа принимаем по данным исследований [13].

$$u_0 = 2 \cdot 14,7^2 \cdot 10^{-12} (1015 - 1000)9,8 / (9 \cdot 1,31 \cdot 10^{-3}) = 0,000005388 \text{ м/с}.$$

$$\frac{0,55 \cdot 0,005}{0,000005388}$$

$$L = 0,000005388 = 510 \text{ м}.$$

Ширина канала (B) в этом случае может быть определена с помощью формул:

$$B = F/H, \text{ м}; F = Q/V, \text{ м}^2$$

где H = 0,5 - 0,6 м – глубина канала, в которой происходит седиментация; V = 0,005 м/с – скорость потока воды в канале (скорость потока рекомендуется принимать в пределах 36 - 15 м/ч [2], для расчетов принимаем 15 м/ч, что составляет 0,005 м/с)

$$F = 160/15 = 10,7 \text{ м}^2 \text{ к расчету принимаем } 11 \text{ м}^2$$

$$B = F/H = 11/0,55 = 20 \text{ м}.$$

$$\text{Объем биоплато составит: } W = 20 \times 510 \times 0,55 = 5610 \text{ м}^3$$

Продолжительность пребывания очищаемых вод в сооружении составит:  $5610/(160 \times 24) = 1,5 \text{ сут}.$

Конструирование биоплато проводим с учетом природных ландшафтов и имеющегося участка земли размером 60x400 м. Считаю целесообразным устроить биоплато с каналами коридорного типа. Ширина коридора-канала принимается в соответствии с



расчетами – 20 м., длина канала в одном коридоре – 60 м. Количество коридоров N, шт, составит:

$$N = L_{\text{общ}} / L_1 \\ N = 510/60 = 8,5 \text{ шт.}$$

Для дальнейших расчетов принимаем 9 коридоров. Каналы-коридоры формируются за счет устройства валов перегородчатого типа из водонепроницаемых глин. По конструктивным соображениям ширину основания вала принимаем 10 м. Таким образом, Количество валов – 8 шт. Длина биоплато составит  $13 \times 20 = 180$  м. Увеличение длины биоплато за счет устройства валов составит 80 м. Длина вала составляет 50 м. Определим скорость течения воды в месте поворота коридора, так как ширина вместе поворота составляет 10 м, а высота воды – 0,5 м, площадь поперечного сечения составит  $5 \text{ м}^2$ .  $V = Q/F$ , м/ч  $= 160/5 = 32$  м/ч  $= 0,009$  м/с, что допустимо нормами технологического проектирования оросительных систем с использованием животноводческих стоков ТП-АПК 1.30.03.01-06 [2].

Данные анализа литературы по очистке шахтных вод в естественных условиях показывают, что целесообразно устройство префильтров с загрузкой из щебня, на поверхности которого развиваются железобактерии, трансформирующие железо двухвалентное в трехвалентное. По аналогии с префильтром, описанным в специальной литературе, принимаем загрузку из щебня крупностью 50 - 100 мм. Согласно литературным данным скорость фильтрации, V, м/ч не должна превышать 3 м/ч [14].

В соответствии с исходными данными площадь фильтрации префильтра F,  $\text{м}^2$  составит:

$$F = Q/V, \\ F = 160/3 = 53 \text{ м}^2$$

Проектируем подачу воды сверху, площадь распределения поступающих для очистки вод составит:  $60 \times 1 = 60 \text{ м}^2$ . Высота слоя щебня соответствует слою воды и составит 0,55 м. Продолжительность пребывания в префильтре по факту составит 12 мин.

Очищенная вода перед выпуском в реку также проходит через слой фильтрующей загрузки. Цель постфильтрации - очистка воды от взвешенных веществ, в этом случае скорость фильтрации может быть принята 10

– 20 м/ч. По конструктивным соображениям вода проходит через загрузку из щебня площадью  $20 \times 0,55 \text{ м} = 11 \text{ м}^2$ . Скорость при этом составит 14,5 м/ч. Длина фильтрующего слоя (из условия продолжительности пребывания 10 мин и соответственно объема загрузки -  $27 \text{ м}^3$ ) составит 2,5 м.

За счет устройства префильтра и постфильтрации длина биоплато увеличиться на 22,5 м ( $20 + 2,5$ ).

Общая длина биоплато составит:  $180 + 22,5 + 80 = 282,5$  м.

Дно биоплато выполняется из водонепроницаемых глин. По дну в грунте производится высадка ВВР. Для предотвращения заиливания и процессов гниения отмирающих растений в узких местах, образующихся в результате формирования валов, ВВР рекомендуется не высаживать. В последнем коридоре так же рекомендуется для образования отстойной зоны перед постфильтрацией не высаживать ВВР. Таким образом, посадка ВВР будет производиться в 8 коридорах, площадь посадки составит  $8900 \text{ м}^2$  ( $60 \times 20 \times 80 - 100 \times 7$ ). Плотность посадки принимаем 7 растений на  $1 \text{ м}^2$ , тогда количество растений составит 62300 шт. Согласно вышеизложенному целесообразно высаживать рогоз узколистый или тростник.

Отсутствие металлических частей, которые подвержены коррозии, а также насосного оборудования, благодаря самотечному движению очищаемой воды обеспечивает очистным сооружениям на основе фитотехнологии почти неограниченный период эксплуатации, о чем свидетельствует опыт многих государств. Сооружения на основе фитотехнологий работают как саморегулируемая система.

Для эффективного использования ВВР в качестве биофильтров и для удаления из водоема накопленного железа, а также для предотвращения загнивания отмерших растений и вторичного загрязнения очищенной воды необходимо убирать фитомассу. Если ее оставлять в водоеме после отмирания и разложения, то будет происходить обогащение воды органическими и биогенными веществами, также накопившиеся за вегетационный период тяжелые металлы на поверхности и в тканях растений, после отмирания последних поступают в донные отложения.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных теоретических исследований установлена целесообразность использования биоплато для очистки шахтных вод от железа перед их поступлением в водоем. Показана целесообразность выполнения расчетов параметров биоплато исходя из седиментационной способности гидроксидов железа. Использование высшей водной растительности, высаженной по дну

биоплато, будет способствовать агрегации гидроксокомплексов железа, а также снижению концентрации растворенного железа в результате его поглощения корневой системой растений. С целью увеличения вклада поглотительной способности рекомендуется высаживать рогоз узколистый или тростник. Плотность посадки принимаем 7 растений на 1 м<sup>2</sup>.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев М.В., Минеева Л.А. Микробиология: Учебник для студентов биологических специальностей вузов. 4-е изд., стер. Москва: Академия, 2003. 464 с.
2. ТП-АПК 1.30.03.01-06: Нормы технологического проектирования оросительных систем с использованием животноводческих стоков. Актуализированная редакция ВНТП 01-98. [Текст] // ФГУП "НИИССВ "Прогресс", 2007, 36 с.
3. Ладыженский В.Н., Саратов И.Е. Защита водных объектов от загрязнения поверхностным стоком с территории полигонов ТБО // 1-я конференция с международным участием «Сотрудничество для решения проблемы отходов», Харьков, 5-6 февраля 2004 г. С. 76-85.
4. Диренко А.А., КНУСА, Коцарь Е.М. Использование высших водных растений в практике очистки сточных вод и поверхностного стока // «Потенциал-4». URL: <http://www.c-ok.com.ua/content/view/374/> (дата обращения 20.12.2016).
5. Журба М.Г., Квартенко А.Н. Биотехнология предварительной очистки поверхностных вод // Экология и промышленность России, апрель 2007 г. С. 27-31.
6. Богомолова А.В., Копнина А.Ю., Чуркина А.Ю. Исследование процесса фитоочистки для доочистки сточных вод // Экология и безопасность жизнедеятельности: Сборник статей VII Международной научно-практической конференции. Пенза: РИО ПГСХА, 2007. С. 99-101.
7. Dunbabin J.S., Bowner K.H. Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals // Sci. Total. Environ. 1992. vol. 111, N 2/3. P. 56-60.
8. Казмирук В.Д. Накопление тяжелых металлов высшей водной растительностью различных биотопов устьевой области Волги. URL: [kazm@pochta.ru](mailto:kazm@pochta.ru) (дата обращения 20.12.2016).
9. Коцарь Е.М. Инженерные сооружения типа «биоплато» как блок доочистки и водоотведения с неканализованных территорий: // Тезисы докладов международной конференции «AQUATERRA». URL: [ieek.timacad.ru/science/1/sb-09/II/103-2.doc](http://ieek.timacad.ru/science/1/sb-09/II/103-2.doc) (дата обращения 25.12.2016).
10. Гришанцева Е.С., Сафронова Н.С., Кирпичникова Н.В., Федорова Л.П. Распределение микроэлементов в высшей водной растительности Ивановского водохранилища // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2010, N 3. С. 223-231.
11. Пучков М.Ю., Зволинский В.П., Новиков В.В., Кочеткова А.И., Локтионова Е.Г. Особенности накопления тяжелых металлов высшей водной растительностью Волгоградского водохранилища // Fundamental Research. 2013. N 6, С. 25-28.
12. Копнина А.Ю., Колесников А.Г. Использование процесса фитоочистки воды, загрязненной ионами металлов, с использованием урути мутовчатой (*Myriophyllum verticillatum*) // Сборник научных трудов IV Всероссийской научно-практической конференции «Экологические проблемы промышленных городов». Саратов: РИО СГТУ, 2009. С. 35-37.
13. Ющишина А.Н., Зубенко А.А., Петриченко Л.А., Малюшевская А.П., Смалько А.А., Хайнакий С.А. Седиментационные характеристики электроразрядных гидроксидов алюминия и железа // Институт импульсных процессов. URL: [eom.phys.asm.md/en/journal/download/915](http://eom.phys.asm.md/en/journal/download/915) (дата обращения 21.12.2016).
14. Стольберг В.Ф., Ладыженский В.Н., Спирин А.И. Биоплато - эффективная малозатратная экотехнология очистки сточных вод // Экологія довкілля та безпека життєдіяльності. 2003. N 3. С. 32-34.



## REFERENCES

1. Gusev M.V., Mineeva L.A. *Mikrobiologiya: Uchebnyk dlya studentov biologicheskikh spetsial'nostei vuzov* [Microbiology: Textbook for students of biological specialties of universities]. Moscow, Academy Publ., 4th ed., 2003. 464 p.
2. TP-APK 1.30.03.01-06: *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya orositel'nykh sistem s ispol'zovaniem zhivotnovodcheskikh stokov. Aktualizirovannaya redaktsiya VNTP 01-98*. [Norms of technological designing of irrigating systems with use of cattle-breeding drains. Staticized edition VNTP 01-98]. FGYP "NIICCB "Progress" Publ., 2007, 36 p.
3. Ladyzhensky V.N., Saratov I.E. Zashchita vodnykh ob"ektov ot zagryazneniya poverkhnostnym stokom s territorii poligonov TBO [Protection of water objects from pollution by a superficial drain from territory of ranges TBO]. *1-ya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem «Sotrudnichestvo dlya resheniya problemy otkhodov», Khar'kov, 5-6 fevralya 2004 g.* [Protection of water objects from pollution by a superficial drain from territory of ranges TBO. 1st conference with the international participation «Cooperation for the decision of a problem of a waste», Kharkov, 5-6 February 2004]. Kharkov, 2004, pp. 76-85. (In Russian)
4. Drenko A.A., KNUSA, Kotsar' E.M. *Ispol'zovanie vysshikh vodnykh rastenii v praktike ochistki stochnykh vod i poverkhnostnogo stoka*. [Use of the higher water plants in practice of sewage treatment and a superficial drain]. Potensial-4". Available at: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/374> (accessed 20.12.2016). (In Russian)
5. Zhurba M.G., Kvarthenko A.N. *Biotehnologiya predvaritel'noi ochistki poverkhnostnykh vod*. [Biotechnology of preliminary clearing of surface water]. Ecology and the industry of Russia, April, 2007 pp. 27-31. (In Russian)
6. Bogomolova A.V., Kopnina A.Yu., Churkina A.Yu. *Issledovanie protsessov fitoochistki dlya doochistki stochnykh vod* [Research of process of phytoclearing for additional cleaning of sewage]. In: Collection of articles of VII International scientifically-practical conference "Ecology and safety of ability to live". Penza, RIO PGCHA Publ., 2007, pp. 99-101. (In Russian)
7. Dunbabin J.S., Bowner K.H. Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals. *Sci. Total. Environ.* 1992. Vol. 111, no. 2/3. pp. 56-60.
8. Kazmiruk V.D. *Nakoplenie tyazhelykh metallov vysshei vodnoi rastitel'nost'yu razlichnykh biotopov ust'evoi oblasti Volgi* [Accumulation of heavy metals by higher aquatic vegetation of various biotopes in the estuary region of the Volga]. Available at: [kazm@pochta.ru](mailto:kazm@pochta.ru). (In Russian). (accessed 20.12.2016)
9. Kotsar' E. M. *Inzhenernyye sooruzheniya tipa «bioplato» kak blok doochistki i vodootvedeniya s nekanalizovannykh territorii* [Engineering structures such as "bioplato" as a unit for post-treatment and wastewater removal from uncooked areas]. Theses of the reports of the international conference "AQUA-TERRA". Available at: [ieek.timacad.ru/science/1/sb-09/III/103-2.doc](http://ieek.timacad.ru/science/1/sb-09/III/103-2.doc). (accessed 20.12.2016).
10. Grishantseva E. S., Safronova N. S., Kirpichnikova N. V., Fedorova L. P. Distribution of microcells in the higher water vegetation of the Ivankovsky water basin. *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya* [Geoecology, engineering geology, hydrogeology, geokriologiy]. 2010, no. 3. pp. 223-231. (In Russian)
11. Puchkov M.Yu., Zvolinskii V.P., Novikov V.V., Kochetkova A.I., Loktionova E.G. Features of accumulation of heavy metals the higher water vegetation of the Volgograd water basin. [Fundamental research]. 2013, no. 6. pp. 25-28. (In Russian)
12. Kopnina A.Yu., Kolesnikov A.G. *Ispol'zovanie protsessov fitoochistki vody, zagryaznennoi ionami metallov, s ispol'zovaniem uruti mutovchatoi (Myriophyllum verticillatum)* [The use of the process of phyto-purification of water contaminated with metal ions, using uruti whorled (Myriophyllum verticillatum)]. In: Collection of proceedings of IV All-Russia scientifically-practical conference "Environmental problems of industrial cities". Saratov: RIO SSTU Publ., 2009. pp. 35-37. (In Russian)
13. Yushchishina A.N., Zubenko A.A., Petrichenko L.A., Malyushevskaya A.P., Smal'ko A.A., Khainakii S.A. *Sedimentatsionnye kharakteristiki elektrorazryadnykh gidroksidov alyuminiya i zheleza* [Sedimentation characteristics of electric-discharge aluminum and iron hydroxides]. Available at: [eom.phys.asm.md/en/journal/download/915](http://eom.phys.asm.md/en/journal/download/915). (accessed 21.12.2016). (In Russian)
14. Stol'berg V.F., Ladyzhenskii V.N., Spirin A.I. Bioplato is an effective low-cost eco-technology for wastewater treatment. *Ekologiya dokilliya ta bezpeka zhittediya'nosti* [Ecology of environment and life safety]. 2003. no. 3. pp. 32-34. (In Russian)



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### Принадлежность к организации

**Феликс И. Ягодкин** – д.т.н., профессор, действительный член академии горных наук РФ, член корреспондент РАЕН Директор, Научно-технический центр «Наука и практика» 8(863) 267-35-50, 267-01-38, 246-79-28, г. Ростов-на-Дону, Россия.

**Елена В. Вильсон\*** – к.т.н., доцент, заведующая кафедрой «Водоснабжение и водоотведение», Донской государственный технический университет, площадь Гагарина 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия, e-mail: elena\_V58@mail.ru

**Лидия А. Долженко** – к.т.н., доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: lidiydoljenko@gmail.com

**Елена Ю. Романенко** – к.т.н., доцент кафедры «Технологии вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики», Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: romanenko-RGSU@mail.ru

### Критерии авторства

Все авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.02.2017

Принята в печать 23.03.2017

## AUTHORS INFORMATION

### Affiliations

**Felix I. Yagodkin** – Dr. Sci. Tech., professor, full member of academy of mountain sciences of the Russian Federation, member the correspondent of the Russian Academy of Natural Sciences, Director the Scientific and technical centre «The Science and practice», phone: 8(863) 267-35-50, 267-01-38, 246-79-28, Rostov-on-Don, Russia.

**Elena V. Vilson\*** – Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor Head of Department Managing chair «Water supply and water drainage», Don State Technical University, Gagarin Square 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia, e-mail: elena\_V58@mail.ru

**Lidia A. Dolzhenko** – Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor of Department «Water supply and water drainage», Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: lidiydoljenko@gmail.com

**Elena Yu. Romanenko** – Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor of Department «Technology binders, concrete and construction ceramics», Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: romanenko-RGSU@mail.ru

### Contribution

All authors equally participated in writing the manuscript and are responsible for avoiding the plagiarism or other unethical issues.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 18.02.2017

Accepted for publication 23.03.2017