

УДК 628.162

И. В. Войтов, П. М. Гудинович, В. Л. Еловик

Белорусский государственный технологический университет

**БИОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ АРТЕЗИАНСКИХ ВОД
ДЛЯ НУЖД ПРОМЫШЛЕННОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Выполнен анализ необходимости учета не только капитальных затрат при выборе технологии удаления железа и марганца из подземных источников, но и эксплуатационных затрат за расчетный период жизненного цикла станцией водоподготовки. Сравниваются наиболее часто используемые технологии водоподготовки, и дается сравнительная характеристика с перечислением достоинств и недостатков каждой из них. Приведен анализ биологического метода обезжелезивания и деманганации. Отмечаются основные преимущества и недостатки в сравнении с традиционными методами. Выполнен анализ двух станций водоподготовки, расположенных в разных регионах, но с похожим составом исходной воды, и выявлены различия в технологических режимах.

На основании выявленных особенностей при эксплуатации двух станций водоподготовки с применением биологического метода обезжелезивания и деманганации выявлена необходимость детального исследования факторов, возможных технологических режимов и предельных концентраций железа и марганца влияющих, на выбор технологии.

Ключевые слова: энергоэффективность, эксплуатационные затраты, станции водоподготовки, обезжелезивание, деманганация, биохимический метод, обработка сложных по составу вод.

Для цитирования: И. В. Войтов, П. М. Гудинович, В. Л. Еловик. Биохимические технологии очистки артезианских вод для нужд промышленного водоснабжения // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 1 (241). С. 205–210.

I. V. Voitau, P. M. Hudzinovich, V. L. Yalovik

Belarusian State Technological University

**BIOCHEMICAL TECHNOLOGIES OF ARTESIAN WATER TREATMENT
FOR INDUSTRIAL WATER SUPPLY NEEDS**

The analysis of the need to take into account not only the capital costs when choosing a technology for removing iron and manganese from underground sources, but also the operating costs for the estimated life cycle of the water treatment plant. The most frequently used water treatment technologies are compared, and a comparative characteristic is given with a list of advantages and disadvantages of each of them. The analysis of the biological method of de-ironizing and demanganation is given. The main advantages and disadvantages in comparison with traditional methods are noted. The analysis of two water treatment plants located in different regions, but with a similar composition of the source water, was carried out and differences in technological modes were revealed.

Based on the identified features in the operation of two water treatment plants using the biological method of de-ironizing and demanganation, the need for a detailed study of the factors, possible technological modes and maximum concentrations of iron and manganese that affect the choice of technology is revealed.

Key words: energy efficiency, operating costs, water treatment plants, deferrization, demanganation, biochemical method, treatment of complex waters.

For citation: I. V. Voitov, P. M. Hudzinovich, V. L. Yalovik. Biochemical technologies of artesian water treatment for industrial water supply needs. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 1 (241), pp. 205–210 (In Russian).

Введение. В современном мире складывается устойчивая тенденция внедрения различных энергоэффективных технологий во многих отраслях промышленности. Их применение позволяет не только снизить эксплуатационные затраты и издержки, но и повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции. Исключением не является и внедрение энергоэф-

фективных технологий водоподготовки с низкими эксплуатационными затратами на собственные нужды. Ежегодно растет спрос на обеспечение промышленных предприятий качественной водой с различной степенью очистки независимо от сферы деятельности, будь то пищевая, химическая, фармацевтическая, легкая, тяжелая промышленность и др.

Актуальность вопросов, связанных с обеспечением промышленных предприятий чистой водой с низкой себестоимостью, не исчезнет никогда, а с учетом ухудшающейся всеобщей экологической обстановки будет только повышаться. Сегодня, к сожалению, негативное антропогенное воздействие фиксируется не только на слабозащищенные поверхностные, но и защищенные подземные источники. И выражается это не только в ухудшении качества подземных вод верхних водоносных горизонтов, но и в уменьшении располагаемых запасов воды в них.

Получение качественной чистой воды по минимально возможной стоимости – это та задача, которая сегодня должна решаться при реализации объектов водоподготовки. При этом стоит учитывать тот факт, что минимально возможная стоимость водоснабжения обеспечивается не только минимизацией капитальных затрат на строительство объектов водоснабжения. Эксплуатационные затраты зачастую дают намного более высокую нагрузку на стоимость 1 м³ очищенной воды, нежели все прочие вместе взятые.

Основная часть. Выбор приоритетной технологии обезжелезивания и соответствующего оборудования должен основываться не только на сравнении единоразовых затрат на строительство объекта – самое дешевое оборудование далеко не обязательно будет самым дешевым в эксплуатации. В идеале сравнение конкурирующих технологий необходимо производить на оценке стоимости владения за расчетный период эксплуатации (порядка 10–15 лет). Притом эксплуатационные расходы желательнее оценивать на реальном опыте длительной эксплуатации выбираемой технологии и оборудования. В Республике Беларусь с 1999 года действует программа «Чистая вода», в рамках которой построены и запущены в эксплуатацию не одна сотня объектов с использованием различных технологий водоподготовки и конструктивного исполнения технологического оборудования. Фактических статистических данных накоплено много, и их можно и нужно использовать при реализации новых проектов.

При наличии большого разнообразия возможных вариантов реализации технологии подготовки питьевой воды для корректного подбора оборудования, соответствующего рассматриваемому объекту, необходимо выполнить ряд мероприятий:

1) изучить опыт эксплуатации аналогичных объектов с использованием различных методов очистки артезианской воды с оценкой стоимости капитальных затрат на возведение объектов и затрат на его эксплуатацию за длительный период;

2) провести технологические изыскания у источника водоснабжения с целью подтверждения расчетных показателей: качество очистки, энергоемкость, потребность в воде на собственные нужды, затраты на химические реагенты и прочие расходные материалы;

3) на основании полученных данных произвести оценку стоимости эксплуатации объекта по приоритетным технологическим решениям за расчетный период (10–15 лет);

4) сопоставляя размер капитальных и эксплуатационных затрат по рассматриваемым вариантам, не сложно определить наиболее оптимальный вариант, который обеспечит действительную минимизацию затрат на нужды водоснабжения.

Ввиду особенностей химического состава подземных вод на территории нашей республики основными показателями, требующими снижения, являются повышенное содержание растворенных железа и марганца. Даже в случаях необходимости получения воды с низким содержанием солей жесткости или и вовсе деионизированной воды предварительное удаление из воды железа и марганца позволяет значительно сократить эксплуатационные затраты на использование в качестве доочистки ионообменных или мембранных технологий, а также повысить надежность и эффективность работы всей установки в целом.

Существует множество технологий удаления железа и марганца, применяемых в водоподготовке как промышленных, так и коммунальных предприятий. Все технологии обладают своими конструктивными особенностями, наличием вспомогательного оборудования и технологическими режимами, которые напрямую влияют на капитальные и эксплуатационные затраты. Наиболее распространенными на данный момент являются следующие [1, 2]:

- фильтрация на специализированных каталитических фильтрующих материалах;
- применение окислителей (гипохлорит, перманганат калия, озон);
- применение мембранных технологий (ультрафильтрация, нанофильтрация, обратный осмос);
- ионообменный метод;
- метод упрощенной аэрации с фильтрацией на инертной загрузке;
- биологический метод.

Довольно широко распространены технологии окисления железа и марганца на специализированных каталитических загрузках [1, 2], таких как МЖФ, Birm, Greensand, Pyrolox и многих других. Суть метода заключается в том, что реакции окисления железа и марганца происходят на поверхности гранул специальной

фильтрующей среды, обладающей свойствами катализатора (ускорителя химической реакции окисления). Все фильтрующие загрузки отличаются между собой своими физическими характеристиками, и поэтому эффективно работают в разных диапазонах значений характеризующих воду параметров. Принцип работы каталитических загрузок одинаков, железо и марганец в присутствии катализатора быстро окисляются и оседают на поверхности гранул фильтрующей среды. Загрузки могут эффективно работать при высоких скоростях фильтрации, однако со временем на поверхности гранул образуется органическая пленка или пленка из оксидов железа, которая изолирует катализатор, что сводит к минимуму каталитические свойства загрузки. В связи с этим необходимо предусматривать различные технологические решения для исключения данного фактора, а именно дозирование гипохлорита натрия в качестве окислителя или, как один из вариантов, дозирование его во время регенерации для отмывки накопившихся отложений и снижения негативного фактора образования биологических отложений. Эти факторы негативно сказываются на эксплуатационных затратах и вдобавок срок эксплуатации данных загрузок не превышает 3–5 лет, а в большинстве случаев из-за вышеперечисленных факторов – 1–2 года, что ниже по сравнению с кварцевым песком. К вышеперечисленным недостаткам можно добавить высокую стоимость фильтрующих загрузок и низкую эффективность при высоких концентрациях железа и марганца в обрабатываемой воде. Учитывая заявленные характеристики заводами – изготовителями каталитических фильтрующих материалов, можно предположить, что станции водоподготовки с применением этих технологий будут с наименьшими капитальными затратами, однако с учетом частоты замены дорогостоящих загрузок и возможного применения реагентов будут иметь высокие эксплуатационные затраты.

Применение окислителей с последующей фильтрацией [3] при своей высокой эффективности очистки имеет ряд общих существенных недостатков: 1) высокая стоимость самих реагентов, возможная дорогостоящая логистика в случае с поставкой на удаленные объекты; 2) необходимо наличие складских помещений и дорогостоящего оборудования для применения данных реагентов; 3) короткий фильтроцикл применяемых фильтров, который составляет от 12 ч до 2–3 сут в зависимости от состава исходной воды, что влияет на потребление воды на собственные нужды, которое может составлять от 5 до 30%. Все вышеперечисленное приводит к высоким эксплуатационным затратам.

Применение окислителей может быть обосновано только после того, как другие менее затратные методы оказались менее эффективны, или после предварительной очистки исходной воды для окисления специфических загрязнений, которые не удалось извлечь безреагентными методами.

Ионообменные и мембранные методы могут использоваться при обезжелезивании и деманганизации, однако не являются стандартными решениями, так как имеют специфические требования к исходной воде. Существуют значительно менее затратные технологии, и их применение предпочтительно как раз после предварительного извлечения из воды железа и марганца.

Метод упрощенной аэрации с последующей фильтрацией [4] на данный момент является самым распространенным способом удаления железа, который применяется уже много десятилетий. Суть метода заключается в предварительном насыщении исходной воды кислородом воздуха и окислении двухвалентного железа до трехвалентного с последующим осаждением на фильтрующих загрузках.

Применяется как в напорных, так и безнапорных установках в зависимости от производительности.

Данный метод хорошо себя зарекомендовал при обработке не сложных по составу вод и преимущественно при удалении железа в небольших концентрациях. Для обработки сложных по составу подземных вод с высоким содержанием железа и марганца требовалась предварительная аэрация воды в аэраторах с добавлением в нее необходимых реагентов (хлор, гипохлорит натрия, перманганат калия и др.)

Основным преимуществом данной технологии являются низкие эксплуатационные затраты в случае, если не требуется предварительная реагентная обработка.

Одним из приоритетных направлений по очистке подземных вод являются биохимические технологии удаления железа и марганца [5, 6]. Как показывает многолетний опыт, технология биохимической очистки подземных вод позволяет достичь беспрецедентно низких эксплуатационных затрат за счет малой потребности в воде на собственные нужды, низкого удельного энергопотребления и полной автоматизации технологического процесса.

Данные ряда исследований и опыт эксплуатации станций обезжелезивания показывает, что скорость и эффективность биологического окисления железа при правильной организации технологического процесса значительно превышают эти показатели физико-химических процессов.

В сравнении с физико-химическим удалением железа и марганца выявлены следующие преимущества [5–10]:

– быстрое протекание реакций окисления железа и марганца;

– для окисления не требуется таких реагентов, как хлор, озон, перманганат калия, реагентов для корректировки рН;

– окисленное железо и марганец задерживается в более компактной форме в сравнении с физико-химическими окислами, что более чем в 5 раз увеличивает грязеемкость фильтра;

– низкие затраты воды на собственные нужды;

– упрощенная обработка осадка. Высококонцентрированные воды хорошо сгущаются и обезжелезиваются.

Железобактерии способны окислять и концентрировать железо и марганец при условиях, когда их химическое окисление невозможно. Скорость биологических процессов окисления железа и особенно марганца во много раз превышает химическое окисление.

Активная реакция воды не оказывает существенного влияния на развитие железобактерий в широком диапазоне рН (от слабокислой до слабощелочной).

Большинство железобактерий активно развиваются при температуре 4–8°C. Наблюдается активный рост и при температуре 1–3°C.

Биологический метод лишен недостатков, которые сопровождают вышеперечисленные методы, имеет высокую эффективность и самые низкие эксплуатационные затраты.

В большинстве подземных вод марганец встречается как элемент, сопутствующий наличию железа. Его концентрация обычно ниже концентрации железа, но может превышать допустимые нормы в 5, 10 и более раз. В отличие от железа двухвалентный марганец устойчив к химическому окислению кислородом при рН < 8,5. Но подавляющее число железобактерий способно окислять и марганец [5–12]. В основе этих процессов лежит перекисный механизм, который объясняет возможность биологического окисления марганца при рН, близкой к нейтральной, соответствующей большинству подземных вод.

В связи с особенностями механизмов биологического окисления железа и марганца при их совместном присутствии их удаление происходит последовательно. Окисление марганца не может начаться, пока не закончится окисление железа. Поэтому в большинстве случаев рекомендуются двухступенчатые схемы удаления этих соединений [6, 10].

Опытом эксплуатации данные положения полностью подтвердились. Но при определенных условиях и соотношении концентраций железо/марганец возможно обеспечить удаление этих соединений в одном сооружении.

В связи с тем что окисление железа и марганца осуществляется одними и теми же вида-

ми микроорганизмов, для их удаления используются технологические и конструктивные схемы, аналогичные удалению железа. При этом необходимо учитывать то обстоятельство, что если период выхода на рабочий режим станции обезжелезивания составляет от одного до 10 дней, то для достаточного развития марганцеокисляющих бактерий может потребоваться от одного до шести месяцев. Можно сократить этот срок, используя фильтрующую загрузку, заселенную такими бактериями с других подобных станций. Весьма важным условием эффективного удаления как железа, так и особенно марганца является предварительная аэрационно-дегазационная подготовка воды, существенно повышающая рН и окислительно-восстановительный потенциал [8].

Анализируя опыт реализации станций водоподготовки с применением биологического метода при обработке сложных по составу вод с высоким содержанием железа и марганца, наблюдают определенные различия в технологических режимах, хотя составы обрабатываемой воды на первый взгляд схожи. Для анализа выбраны объекты, реализованные на территории Российской Федерации в п. Седью Ухтинского района Республика Коми и п. Сорум в Белоярском районе Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Состав воды на обоих водозаборах характеризуется высоким содержанием железа (8–15 мг/л), марганца (0,6–1,2 мг/л), низким уровнем рН (6,0–6,3) и низкой температурой даже в летний период (от +0,5 до +3°C).

В п. Седью реализована станция с применением напорных фильтров в одну ступень. В качестве фильтрующего материала применяется кварцевый песок. Для аэрации исходной воды используется эжекторная схема. Уже на протяжении 9 лет эксплуатации станция успешно справляется с высоким содержанием железа и марганца в условиях низкой температуры исходной воды и слабокислой среды, обеспечивая население водой, соответствующей нормам СанПиН. В процессе эксплуатации станции наблюдается «феномен роста загрузки», характеризующийся увеличением толщины слоя фильтрующего материала. Он проявляется при длительной эксплуатации фильтра за счет роста биомассы железобактерий на поверхности гранул загрузки и зародышевых зерен переизмельченного фильтрующего материала. При этом образуются достаточно прочные гранулы с плотностью, меньше плотности песка, которые представляют собой гранулированный слой биологически активной загрузки (БАЗ) (рисунок).



Биологически активная загрузка

В п. Сорум реализована станция на напорных фильтрах с песчаной загрузкой в 2 ступени очистки с предварительной дегазацией исходной воды. На фильтрах первой ступени за длительный срок эксплуатации не наблюдались такие же процессы, как на станции водоподготовки в г. Ухта. Феномена роста загрузки не наблюдалось, образующаяся биомасса находилась в гелеобразной форме. Процесс извлечения марганца на первой ступени фильтров так и не начался даже после года эксплуатации, также не начался процесс извлечения марганца на второй ступени в условиях полного отсутствия железа в воде после первой ступени очистки. Изменения скоростей фильтрации, устройство дополнительной аэрации перед второй ступенью не влияли на процессы удаления марганца. Исправить ситуацию получилось, только подняв уровень рН воды перед подачей на вторую ступень до значений 8,5–9,0. Созданные условия после подщелачивания на второй ступени близки к условиям физико-химического окисления марганца.

После анализа исходных данных и технологических режимов на данных станциях водоподготовки выявлено, что при схожем составе исходной воды значительно отличаются условия протекания биохимических процессов извлечения железа и марганца. Анализируя био-

логически активные загрузки из фильтров, можно предположить, что имеет место различный видовой состав железобактерий или не выявлены другие условия, влияющие на биоценоз железобактерий. Не выявлена причина, при которой не начался процесс извлечения марганца биохимическим методом на второй ступени очистки в п. Сорум, хотя были созданы условия, при которых отсутствовало железо в обрабатываемой воде и имелось достаточное содержание растворенного кислорода для жизнедеятельности железобактерий.

Заключение. Анализируя опыт реализации станций водоподготовки с применением биологического метода обезжелезивания и деманганизации, была неоднократно доказана положительная роль железобактерий в технологиях водоподготовки [13]. Однако несмотря на доказанность эффективности метода, в целом все же имеется ряд нерешенных вопросов:

- состав исходной воды и предельные концентрации железа и марганца для применения биологического метода;
- влияние и предельные значения уровня рН и окислительно-восстановительного потенциала при выборе биологического метода удаления железа и марганца;
- вещества в воде, угнетающе действующие на биоценоз железобактерий;
- факторы, влияющие на биологические процессы при удалении железа и марганца;
- оптимальные технологические режимы и предельные скорости фильтрации при обезжелезивании и при одновременном удалении железа и марганца.

Для решения данных вопросов необходимы теоретические и экспериментальные исследования технологических режимов при обработке сложных по составу вод и одновременном удалении железа и марганца из подземных источников.

Список литературы

1. Рябчиков Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. М.: ДеЛи, 2004. 328 с.
2. Михневич Э. И. Пропольский Д. Э. Анализ методов обезжелезивания воды и условия их применения // Мелиорация. 2017. № 2. С. 59–65.
3. Кульский Л. А., Строкач П. П. Технология очистки природных вод. Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1986. 352 с.
4. Николадзе Г. И. Обезжелезивание природных и оборотных вод. М.: Стройиздат, 1978. 160 с.
5. Седлуха С. П., Софинская О. С. Биологический метод очистки подземных вод от железа // Вода и экология: проблемы и решения. 2001. № 1. С. 13–21.
6. Degremont. Технический справочник по обработке воды. В 2 т. СПб.: Новый журнал. 2007. 2 т.
7. Седлухо Ю. П., Иванов С. А., Еловик В. Л. Биологическая очистка подземных вод от железа, марганца и сероводорода – опыт Беларуси // Вода. 2016. № 7 (107). С. 10–15.
8. Седлухо Ю. П. Влияние аэрационно-дегазационных процессов на свойства подземных вод и технологии их биологического обезжелезивания и деманганизации // Вода. 2012. № 7–8 (181). С. 2–6.
9. Терентьев В. И., Павловец Н. М. Биотехнология очистки воды: в 2-х ч. Ч. 1. СПб.: Гумманистика, 2003. 272 с.

10. Биохимическое обезжелезивание и деманганация подземных вод / М. Г. Журба [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 9. С. 17–23.

11. Виноградский С. Н. Микробиология почвы: проблемы и методы. Пятьдесят лет исследований. М.: Изд-во АН СССР, 1952. 792 с.

12. Холодный Н. Г. Железобактерии. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 224 с.

13. Биологические процессы в технологиях обезжелезивания подземных вод [Электронный ресурс] / Сайт УП «Полимерконструкция». URL: <https://polymercon.com/publications/survey/biologicheskie-protssesy-v-tekhnologiyakh-obezzhelezivaniya-podzemnykh-vod/> (дата обращения: 14.01.2021).

References

1. Ryabchikov B. E. *Sovremennyye metody podgotovki vody dlya promyshlennogo i bytovogo ispol'zovaniya* [Modern methods of water preparation for industrial and domestic use]. Moscow, DeLi Publ., 2004. 328 p.

2. Mikhnevich E. I., Propol'skiy D. E. Analysis of water deferrization methods and conditions of their application. *Melioratsiya* [Melioration], 2017, no. 2, pp. 59–65 (In Russian).

3. Kul'skiy L. A., Strokach P. P. *Tekhnologiya ochistki prirodnykh vod* [The technology of water purification]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1986. 352 p.

4. Nikoladze G. I. *Obezhelezivaniye prirodnykh i oborotnykh vod* [Iron removal of natural and recycled waters]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 160 p.

5. Sedlukha S. P., Sofinskaya O. S. Biological method of purification of underground waters from iron. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and ecology: problems and solutions], 2001, no. 1, pp. 13–21 (In Russian).

6. *Degremont. Tekhnicheskiy spravochnik po obrabotke vody* [Degremont. Technical reference for water treatment]. St. Petersburg, Novyy zhurnal Publ., 2007. 2 vol.

7. Sedlukho Yu. P., Ivanov S. A., Yelovik V. L. Biological purification of groundwater from iron, manganese and hydrogen sulfide – the experience of Belarus. *Voda* [Water], 2016, no. 7 (107), pp. 10–15 (In Russian).

8. Sedlukho Yu. P. Influence of aeration and degassing processes on the properties of groundwater and the technology of their biological deferrization and demanganation. *Voda* [Water], 2012, no. 7–8 (181), pp. 2–6 (In Russian).

9. Terent'yev V. I., Pavlovets N. M. *Biotekhnologiya ochistki vody* [Biotechnology of water purification]. Part 1. St. Petersburg, Gummanistika Publ., 2003. 272 p.

10. Zhurba M. G., Govorova Zh. M., Kvarthenko A. N., Govorov O. B. Biochemical deferrization and demanganation of groundwater. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika* [Water supply and sanitary engineering], 2006, no. 9, pp. 17–23 (In Russian).

11. Vinogradskiy S. N. *Mikrobiologiya pochvy: problemy i metody* [Soil microbiology: problems and methods]. Moscow, Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1952. 792 p.

12. Kholodnyy N. G. *Zhelezobakterii* [Iron bacteria]. Moscow, Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1953. 224 p.

13. *Biologicheskiye protsessy v tekhnologiyakh obezhelezivaniya podzemnykh vod* [Biological processes in groundwater deferrization technologies]. Available at: <https://polymercon.com/publications/survey/biologicheskie-protssesy-v-tekhnologiyakh-obezhelezivaniya-podzemnykh-vod/> (accessed: 14.01.2021).

Информация об авторах

Войтов Игорь Витальевич – доктор технических наук, профессор, ректор. Белорусский государственный технологический университет, (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: voitov@belstu.by

Гудинович Павел Михайлович – аспирант, кафедра промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: g.pavel@tut.by

Еловик Валерий Леонидович – аспирант, кафедра промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: valery.yalovik@outlook.com

Information about the authors

Voitau Ihar Vitalievich – DSc (Engineering), Professor, Rector. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: voitov@belstu.by

Hudzinovich Pavel Mikhailovich – PhD student, the Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: g.pavel@tut.by

Yalovik Valery Leanidovich – PhD student, the Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: valery.yalovik@outlook.com

Поступила 15.01.2021