

Грузинова В.Л., Романовский В.И., Лухавицкий В.В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА РЕАГЕНТНОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Введение. Одним из источников загрязнения природных вод органическими веществами являются недостаточно очищенные производственные сточные воды. Наиболее опасным для гидросферы загрязняющим веществом являются нефтепродукты, содержащиеся как в производственных сточных водах, так и поверхностном стоке. По составу присутствующих нефтепродуктов в сточных водах локомотивных депо они существенно отличаются от нефтесодержащих сточных вод других отраслей промышленности. Их особенностью является наличие компонентов дизельного топлива, моторных и трансмиссионных минеральных масел, топочного мазута, смазочно-охлаждающих жидкостей. Особенности состава нефтепродуктов в сточных водах локомотивных депо определяют выбор методов их очистки. Наиболее эффективным методом удаления эмульгированных и коллоидных нефтепродуктов из сточных вод является физико-химический, в связи с чем в составе очистных сооружений локомотивных депо в качестве основных элементов присутствуют коагуляционная обработка и фильтрование.

На стадии коагуляционной обработки используют сульфат алюминия. Однако данный коагулянт не обеспечивает эффективного удаления загрязняющих веществ вследствие низкой коагулирующей способности, и степень очистки с его использованием составляет до 48,5%. Это связано с тем, что данному коагулянту присущи следующие недостатки: образование значительного количества осадка, повышение мутности обрабатываемой воды, увеличение нагрузки по загрязняющим веществам на фильтры и необходимость дополнительного осветления сточных вод. При этом снижается время защитного действия фильтров, сокращается время между промывками, увеличивается число промывок, а следовательно, и расход воды на промывку фильтров. Дозы сульфата алюминия велики (35–100 мг/л), что приводит к его перерасходу и увеличению эксплуатационных расходов.

На стадии фильтрования семь из восьми обследованных локомотивных депо в Республике Беларусь в качестве фильтрующего материала используют опилки или древесную стружку, являющуюся отходом деревообрабатывающих производств. Однако в силу низкой сорбционной активности опилок требуемое качество очищенной воды не обеспечивается, что подтверждается низкой эффективностью очистки (по взвешенным веществам в среднем 24%, по нефтепродуктам – 29%).

Таким образом, на сегодняшний день в локомотивных депо существует проблема низкой эффективности работы узла физико-химической очистки нефтесодержащих сточных вод. Наличие этой проблемы определяет актуальность исследований по поиску и внедрению в технологию очистки новых материалов, обладающих высокой активностью по отношению к извлекаемым нефтепродуктам и позволяющих повысить эффективность работы очистных сооружений в целом. Одновременно необходимо учитывать, что внедрение новой технологии может вызывать увеличение стоимости очистки воды, в связи с чем работа была направлена на поиск не только эффективных, но и экономически обоснованных решений. В этом случае при решении проблемы повышения эффективности очистки нефтесодержащих сточных вод локомотивных депо наиболее целесообразным является замена коагулянта (сульфата алюминия) и фильтрующей загрузки (древесных опилок) без изменения технологической схемы.

В работе представлены результаты по анализу эффективности использования следующих коагулянтов:

- сульфатом алюминия ($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$) второго сорта по ГОСТ 12966-85, содержание оксида алюминия в продукте составляет 15%;

- гидроксохлорид алюминия торговой марки «ПОЛВАК» по ТУ 19155069.001-1999, основность коагулянта 68%, что соответствует формуле $Al(OH)_2Cl$; содержание оксида алюминия в продукте составляет не менее 10%.

Отдельный интерес представляет использование коагулянтов, полученных из промышленных отходов, содержащих синтетические полимеры, значительное количество которых в настоящее время подвергается захоронению на полигонах промышленных и твердых коммунальных отходов. В качестве такого отхода в работе были взяты предварительно диспергированные отработанные ионообменные смолы [1, 2], в наибольшем количестве образующиеся на стадиях водоподготовки объектов теплоэнергетики.

В последнее время в качестве фильтрующих материалов, обеспечивающих эффективное извлечение нефтепродуктов, используют синтетические волокна, чаще на основе полипропилена. С учетом развития ресурсосберегающей политики для исследований были взяты обрезки нити полипропиленовой.

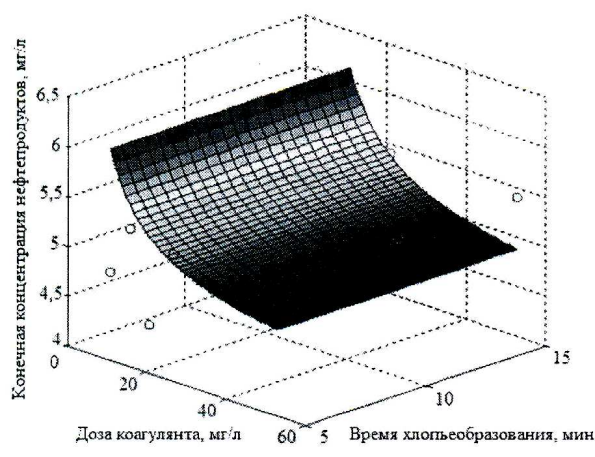
Нефтепродукты в сточных водах локомотивных депо содержатся в количестве 10–340 мг/л, механические примеси – 45–600 мг/л. Нефтепродукты в рассматриваемых сточных водах в зависимости от особенностей гидравлического режима потока могут содержаться в виде пленки, эмульсии, коллоидов и в растворенном виде.

В ходе выполнения работы определение содержания нефтепродуктов в воде проводили флуориметрическим методом, алюминия – методом атомно-адсорбционной спектроскопии.

Для достижения максимальной эффективности очистки воды определяли следующие технологические параметры реагентной обработки, в частности интенсивность смешения реагента с водой, время быстрого и медленного смешения, время отстаивания образовавшегося осадка, поскольку для обеспечения коагуляции требуется некоторый промежуток времени для уменьшения энергии отталкивания, слипания частиц и формирования крупных агрегатов.

При использовании в качестве коагулянта сульфата алюминия образуются хлопья малых размеров (0,5–1,5 мм) и массы, а также низкой гидравлической крупности (0,6–0,9 мм/с).

В ходе эксперимента использовались пробы сточных вод с начальной концентрацией нефтепродуктов от 6,4 до 9,5 мг/л. По данным результатов экспериментальных исследований построена зависимость, приведенная на рис. 1, а.

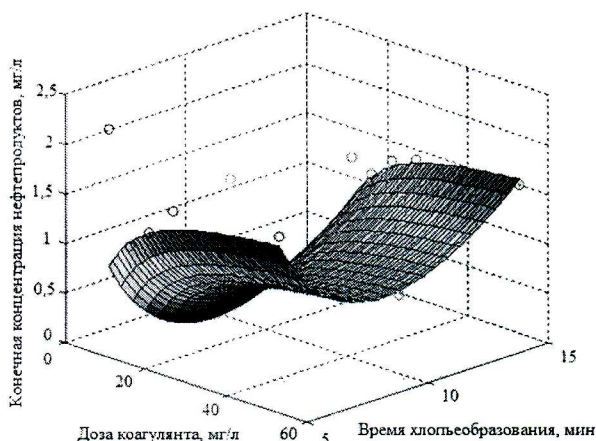


Грузинова В.Л., ст. преподаватель Белорусского государственного университета транспорта.

Романовский В.И., ассистент Белорусского государственного университета транспорта.

Лухавицкий В.В., ассистент Белорусского государственного университета транспорта.

Беларусь, БелГУТ, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34.



б) а) использование сульфата алюминия; б) использование гидроксохлорида алюминия

Рис. 1. Эффективность очистки сточных вод от нефтепродуктов с использованием коагулянтов

Анализ зависимости показал следующее:

а) с увеличением дозы реагента эффективность очистки воды в каждом опыте повышается и при дозе 40–50 мг/л достигает наибольших значений 43–47%, которые практически не изменяются. Это подтверждает целесообразность использования сульфата алюминия в производственных условиях в указанной дозе;

б) эффективность очистки воды повышается с увеличением времени отстаивания достигает максимума во всех опытах при продолжительности осаждения 60 минут. Это объясняется тем, что из-за низкой гидравлической крупности мелкие хлопья с адсорбированными нефтепродуктами при малом времени отстаивания не успевают осесть и находятся во взвешенном состоянии в зоне отбора проб;

в) эффективное время хлопьеобразования составляет 10 минут. При дальнейшем его увеличении эффективность очистки снижается, что можно объяснить дроблением хлопьев за счет длительного механического воздействия на них и, как следствие, десорбции нефтепродуктов;

г) режиму удаления нефтепродуктов из сточных вод сульфатом алюминия в лабораторных условиях, при котором обеспечивается максимальная эффективность очистки 47,4% соответствует доза реагента 53 мг/л, время хлопьеобразования 10 минут, время отстаивания 60 минут, критерий Кэмпбелла 12 000.

Регрессионные уравнения получены для установления зависимости результирующего показателя «конечная концентрация» (C_k) от таких факторов, как «доза коагулянта» (D), «время хлопьеобразования» (T_x), «время отстаивания» (T_o) и «начальная концентрация» (C_n).

При использовании сульфата алюминия было получено следующее уравнение:

$$C_k = 17,31 \cdot D^{-1} - 0,02 \cdot T_o + 0,6 \cdot C_n + 0,42. \quad (1)$$

Множественный коэффициент корреляции R равен 0,96, что свидетельствует о существенной связи всех факторов и результирующего показателя. В данном случае коэффициенты уравнения и коэффициент детерминации являются статистически значимыми на уровне 95%.

Соответствующий этому уравнению коэффициент детерминации говорит о том, что все факторы объясняют 91% изменчивости показателя «конечная концентрация». Уравнение статистически значимо на уровне 95%, следовательно, оно может применяться для прогнозирования показателя «конечная концентрация».

Для подтверждения адекватности уравнения приведен расчет конечной концентрации нефтепродуктов при обработке сточных вод сульфатом алюминия дозой 21 мг/л, при времени хлопьеобразования 15 минут и времени отстаивания 45 минут $C_k = 5,4$ мг/л. Фактическая концентрация нефтепродуктов в очищенной воде составляет 5,4 мг/л.

При использовании в качестве коагулянта гидроксохлорида алюминия в результате коагуляции образуются крупные хлопья

диаметром 1–4 мм. Гидравлическая крупность частиц уменьшается с увеличением времени отстаивания: в начале осаждения – 3–4 мм/с, в конце осаждения – 1,5 мм/с.

Начальные концентрации нефтепродуктов в исследуемой сточной воде находились в интервале от 6,3 до 9,1 мг/л. По результатам экспериментальных исследований построена зависимость, приведенная на рис. 1,б.

Анализ зависимости показал следующее:

а) с увеличением дозы гидроксохлорида алюминия эффективность очистки сточных вод возрастает, а при $D_k=16$ мг/л и более остается практически неизменной на уровне 80–93% в зависимости от времени смешения реагента с водой;

б) эффективность очистки воды при увеличении времени отстаивания практически не изменяется. Это можно объяснить тем, что при введении гидроксохлорида алюминия удаление нефтепродуктов осуществляется за счет их адсорбции на образующихся крупных, пористых хлопьях и происходит в начальный момент времени;

в) максимальная эффективность очистки (92–93%) наблюдается при времени хлопьеобразования 10 минут. При дальнейшем его увеличении эффективность очистки снижается. Как и в случае с сульфатом алюминия, это можно объяснить дроблением хлопьев за счет длительного механического воздействия на них и, как следствие, десорбции нефтепродуктов. С учетом того, что образовавшиеся в данном эксперименте хлопья имеют большие размеры и легче подвергаются измельчению, зависимость от времени смешения носит более яркий и выраженный характер. При этом, несмотря на дробление хлопьев, эффективность очистки сточной воды от нефтепродуктов высокая, что свидетельствует о значительной величине сорбционных сил, удерживающих загрязнения;

г) режиму удаления нефтепродуктов из сточных вод гидроксохлоридом алюминия в лабораторных условиях, при котором обеспечивается максимальная эффективность очистки 93,6%, соответствует доза реагента 21 мг/л, время хлопьеобразования 10 минут, время отстаивания 45, 60 минут, критерий Кэмпбелла 12 000.

При анализе построенной графической зависимости установлено, что значительная и в то же время постоянная эффективность очистки сточных вод от нефтепродуктов наблюдается при дозах гидроксохлорида алюминия 16–53 мг/л. При дозе 11 мг/л эффект очистки существенно снижается. С учетом этого при составлении уравнения регрессии, которое можно было бы использовать при расчетах конечной концентрации нефтепродуктов, из массива данных исключены те, которые соответствуют обработке сточных вод гидроксохлоридом алюминия дозой 11 мг/л. В результате получено следующее выражение:

$$C_k = -10,97 \cdot D^{-1} + 16,13 \cdot T_x^{-1} + 0,01 \cdot T_o^2 + 4,93 \cdot T_o^{-1} - 1,67. \quad (2)$$

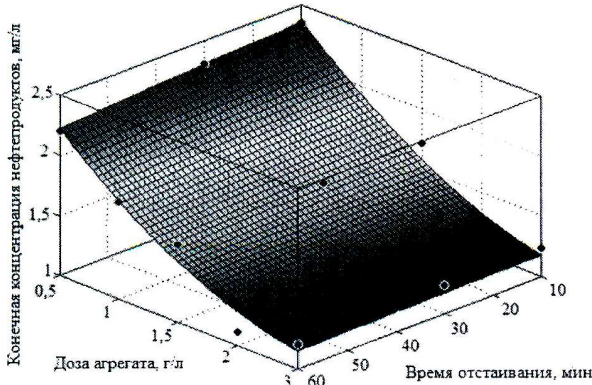
Для подтверждения адекватности уравнения приведен расчет конечной концентрации нефтепродуктов при обработке сточных вод гидроксохлоридом алюминия дозой 21 мг/л, при времени хлопьеобразования 15 минут и времени отстаивания 45 минут $C_k = 1,25$ мг/л. Фактическая концентрация нефтепродуктов в очищенной воде составляет 1,2 мг/л, т.е. полученное уравнение можно использовать для прогнозирования, так как величина расхождения находится в пределах погрешности измерения. Коэффициент детерминации составляет 95,2% и является статистически значимым на уровне 95%.

Увеличение концентрации алюминия в очищенной воде при введении гидроксохлорида алюминия составляет в среднем в 11 раз. Допустимые концентрации, установленные для выпуска в городскую канализационную сеть, не превышены.

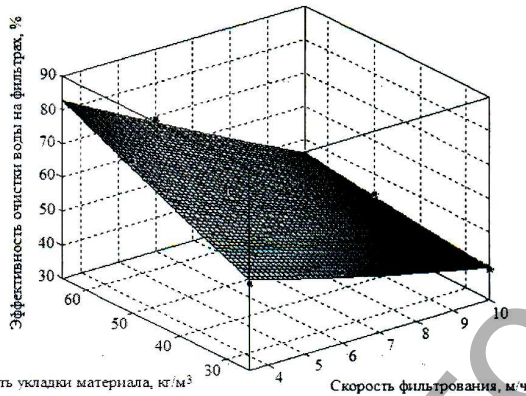
На основании полученных данных сделан вывод о том, что при увеличении дозы гидроксохлорида алюминия конечная величина рН снижается, но при этом находится в нормативных пределах и только при дозе 53 мг/л выходит за допустимую величину на выпуске очищенных сточных вод в городскую канализационную сеть.

При проведении исследований с использованием агрегата, полученного путем смешения предварительно измельченных отходов отработанных ионообменных смол АВ-17-8 и КУ-2-8, взятых в соотношении 1:1, с фракцией менее 150 мкм [1, 2], образовавшихся хлопьев составляет 2–4 мм, гидравлическая крупность хлопьев 4–6 мм/с.

Начальная концентрация нефтепродуктов в исследуемой сточной воде составляла 10,1 мг/л. Агрегат вводили в обрабатываемую воду в сухом виде и в виде суспензии. Доза агрегата принята равной 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0 г/л. Пробы воды для определения конечной концентрации нефтепродуктов отбиралась после 10, 30 и 60 минут отстаивания. Режиму удаления нефтепродуктов из сточных вод исследуемым агрегатом в лабораторных условиях, при котором обеспечивается эффективность очистки 88,5-89%, соответствует доза агрегата 2 г/л, время отстаивания 10–60 минут (рис. 2, а).



а)



б) **Плотность укладки материала, кг/м³**
 а) использование агрегата; б) использование обрезков нити полипропиленовой (при высоте загрузки 1,5 м)

Рис. 2. Эффективность очистки сточных вод от нефтепродуктов с использованием отходов синтетических материалов

Полимерные волокнистые материалы относятся к пористым телам, первичными морфологическими характеристиками которых являются форма и размер первичных частиц, способ и плотность их укладки.

Используемая в исследовании лабораторная установка позволяла изучить процесс фильтрации при различных параметрах процесса: плотности загрузки, высоте загрузки, скорости фильтрации. Для определения эффективности применения обрезков нити полипропиленовой в качестве фильтрующего материала при извлечении нефтепродуктов из сточных вод исследования в лабораторных условиях проводили при плотности укладки материала 25, 50, 75 кг/м³, высоте укладки 0,16 м и скорости фильтрации 1, 2, 5 м/ч. На протяжении эксперимента через определенный интервал времени производили отбор проб для определения остаточных концентраций нефтепродуктов. Исследования проводили на производственных сточных водах локомотивного депо Гомель, предварительно прошедших очистку в нефтеловушке.

С увеличением плотности укладки эффективность очистки сточных вод от нефтепродуктов повышается и достигает 87%. При каждой скорости фильтрации эффективность извлечения нефтепродуктов через некоторый промежуток времени устанавливается на определенном уровне (рис. 2, б).

При плотности укладки фильтрующего материала 25 кг/м³ наблюдается низкая эффективность очистки сточных вод от нефтепродуктов даже при малых скоростях фильтрации. При увеличе-

нии скорости фильтрации эффективность удаления нефтепродуктов продолжает снижаться. Это свидетельствует о том, что данная плотность укладки не может применяться в производственных условиях, поскольку в этом случае не обеспечивается соблюдение рекомендуемых скоростей 1–12 м/ч.

Таким образом, применение обрезков нити полипропиленовой для очистки нефтесодержащих сточных вод в лабораторных условиях обеспечивает достаточно высокую эффективность процесса, что было также подтверждено при проведении экспериментальных исследований в производственных условиях.

При проведении эксперимента древесную стружку в фильтрах заменяли обрезками нити полипропиленовой и изменяли скорость фильтрации, плотность укладки материала, высоту фильтрующей загрузки. Начальная концентрация нефтепродуктов в сточной воде составляла 13,5–14,3 мг/л. На основании результатов исследований построены графические зависимости, отражающие эффективность извлечения нефтепродуктов (рис. 2, б).

Анализ графических зависимостей показал следующее:

- при увеличении высоты загрузки и плотности укладки материала эффективность очистки сточных вод от нефтепродуктов возрастает;
- с увеличением скорости фильтрации остаточное содержание нефтепродуктов возрастает;
- максимальной эффективности очистки сточных вод от нефтепродуктов на уровне 82% можно достичь при плотности укладки материала 65 кг/м³, скорости фильтрации 3,5 м/ч, высоте загрузки 1,5 м;

При очистке сточных вод от нефтепродуктов эффективными параметрами процесса фильтрации являются:

- плотность укладки материала 65 кг/м³;
- скорость фильтрации 3,5 м/ч;
- высота загрузки 1,5 м.

На основании полученных результатов выполнена статистическая обработка данных, получены величины коэффициентов корреляции между различными факторами и составлены уравнения регрессии, отражающие зависимость результирующего показателя «конечная концентрация» загрязняющих веществ (C_k) от начальной концентрации (C_n), скорости фильтрации ($v_{ф}$), плотности укладки материала в кассету (ρ_y), высоты загрузки (H_3).

Корреляция между фактором «высота загрузки» и результирующим показателем «конечная концентрация» превышает 0,6, что говорит о существенной взаимосвязи между этими параметрами. При этом с увеличением высоты загрузки уменьшается конечная концентрация нефтепродуктов.

С увеличением плотности укладки материала уменьшается размер пор, что способствует задержанию более мелких частиц нефтепродуктов и снижению содержания нефтепродуктов в очищенной воде.

С увеличением скорости фильтрации остаточное содержание нефтепродуктов повышается. Это объясняется тем, что с повышением скорости сокращается время контакта частиц нефтепродуктов с фильтрующим материалом, необходимое для их адгезии. Кроме того, увеличивается энергия потока и повышается вероятность отрыва ранее задержанных нефтепродуктов с поверхности загрузки.

В результате статистической обработки данных для расчета конечной концентрации нефтепродуктов получено уравнение регрессии вида:

$$C_k = 13,4 - 3,8 \cdot H_3 - 0,15 \cdot C_n - 0,05 \cdot \rho_y + 0,4 \cdot v_{ф} \quad (3)$$

Множественный коэффициент корреляции R равен 0,96, что свидетельствует о существенной связи всех факторов. Коэффициент детерминации уравнения равен 0,91, в связи с чем уравнение можно использовать для расчетов. В данном случае уравнение, коэффициенты уравнения и коэффициент детерминации являются статистически значимыми на уровне 95%.

Для подтверждения адекватности уравнения приведен расчет конечной концентрации нефтепродуктов при фильтрации сточной воды со скоростью 6 м/ч через слой обрезков нити полипропиленовой высотой 1,5 м, уложенных в кассету с плотностью 65 кг/м³ $C_k = 4,7$ мг/л. Фактическая концентрация нефтепродуктов в очищен-

ной воде составляет 4,3 мг/л, т.е. полученное уравнение можно использовать для прогнозирования, так как величина расхождения находится в пределах погрешности измерения.

С учетом комплексного подхода к решению очистки сточных вод от нефтепродуктов было предложено использовать образующийся осадок при реагентной очистке с использованием агрегата из отработанных ионообменных смол, а также отработанной фильтрующей загрузки в качестве выгорающей добавки при производстве поризованной строительной керамики. Опытно-промышленные испытания подтвердили эту возможность.

Заключение. На основании результатов экспериментальных исследований установлены закономерности очистки сточных вод от нефтепродуктов, представленные в виде регрессионных уравнений, позволяющие в зависимости от требований к качеству очищенных

сточных вод определить параметры технологического режима реагентной обработки и фильтрования по предлагаемой технологии.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романовский, В.И. Водоудерживающие свойства агрегатов, полученных из отходов отработанных ионообменных смол / В.И. Романовский, В.Л. Грузинова // Вестник БрГТУ.. – 2013. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология – С. 101–103.
2. Романовский, В.И. Поверхностные свойства агрегатов, полученных из отходов отработанных ионообменных смол / В.И. Романовский, В.Л. Грузинова // Вестник БрГТУ. – 2013. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология – С. 103–106.

Материал поступил в редакцию 15.06.14

GRUZINOVA V.L., ROMANOVSKIY V.I., LIKHAVITSKY V.V. The mathematical description of process of reagent sewage treatment from oil products

In work as authors regularities of sewage treatment from oil products are received at reagent processing of sewage gidroksokhlорidy aluminum and the unit from the fulfilled ion-exchange pitches and filtering on loading from scraps of a thread polypropylene. The regression equations reflecting influence of key parameters of processing of water on residual concentration of polluting substances in cleared sewage, allowing to choose the most effective modes sedums, sewage from oil products are also received.

УДК 628.544

Романовский В.И.

АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ИСТОЧНИКОВ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Введение. Вода является важным элементом для жизни человека. Значительный прогресс и интенсивное водопользование привели к ухудшению качества природных вод. Поэтому постоянный мониторинг состояния водных объектов, т.е. наблюдение, оценка и прогноз изменения этого состояния является необходимым инструментом для эффективного управления водным хозяйством.

Целью работы является анализ состояния источников питьевого водоснабжения в Республике Беларусь.

Подземные воды являются основным источником водоснабжения в Беларуси. Рост их добычи в 2012 году составил 7 млн. м³ год. При этом уменьшение добычи воды из поверхностных водных объектов уменьшился на 4 млн. м³ [1]. Наиболее крупными водопотребителями практически в равных долях являются сфера жилищно-коммунального хозяйства, промышленность и сельское хозяйство (суммарно около 90%). Наглядно структура водопотребления представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура водопотребления в 2012 году

В республике имеется порядка 32 тыс. скважин (рис. 2), большинство которых находятся в неудовлетворительном состоянии и более трети – не работает (рис. 3).

Поверхностные воды представлены реками (21 тыс.), озерами (11 тыс.), водохранилищами (153) и 1500 прудами, водные ресурсы которых в составляют порядка 58 км³ в год [2].

Основной проблемой качества питьевых вод продолжает оставаться повышенное содержание железа в подземных водоисточни-

ках и их вторичное загрязнение в трубопроводах. Более 50% централизованных систем питьевого водоснабжения не имеют необходимых сооружений подготовки воды до нормативного качества, а 43% сельского населения республики потребляет воду из шахтных колодцев, большинство которых имеет загрязнения по нитратам и микробиологическим показателям.



Рис. 2. Количество артезианских скважин, единиц, в т.ч. на балансе водопользователей по секторам экономики (на начало 2013 года)

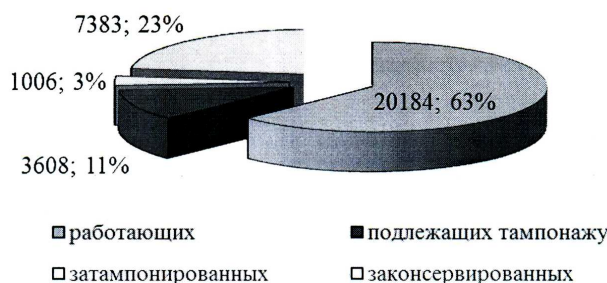


Рис. 3. Количество артезианских скважин (на начало 2013 года), единиц

20,3% из 16846 источников централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения в 2011 году [2] не соответствовало санитарным нормам и правилам по санитарно-техническому состоянию, главным образом из-за отсутствия должного благоустройства зон санитарной охраны. В целом по республике 35,6% исследованных проб воды из источников централизованного водоснабжения не соответствовали