

УДК 628.161.2

А.В. Корьяйкина – аспирант

Р.И. Аюкаев – доктор технических наук, профессор

E-mail: anna0@drevlanka.ru

Петрозаводский государственный университет

ПРИМЕНЕНИЕ БИОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВЫСОКОЦВЕТНЫХ ПРИРОДНЫХ ВОД ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

АННОТАЦИЯ

Традиционные методы очистки высокоцветных маломутных вод из природных водоисточников в ряде случаев не обеспечивают получение питьевой воды надлежащего качества или способствуют значительному увеличению стоимости строительства и эксплуатации водоочистных комплексов.

В статье рассматриваются возможности использования альтернативных методов (биологических методов: медленная фильтрация, биосорбция) для обесцвечивания природных вод. Приводятся некоторые результаты комплекса фильтрационных исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: очистка высокоцветных природных вод, биологические методы очистки, медленная фильтрация, биосорбция.

A.V. Koryaykina – post-graduate student

R.I. Ayukaev – doctor of technical sciences, professor

Petrozavodsk State University

APPLICATION OF BIOTECHNOLOGIES FOR CLEARING OF COLOUR NATURAL WATERS FROM SUPERFICIAL SOURCES IN THE CONDITIONS OF THE NORTH

ABSTRACT

Traditional methods of clearing of colour natural waters in some cases do not ensure reception of qualitative potable water. In article possibilities of use of alternative methods for decolouration of natural waters are considered. Some results of laboratory researches are also presented in given article.

KEYWORDS: clearing of colour natural waters, biological methods of clearing.

В настоящее время в республике Карелия для целей питьевого водоснабжения используется вода, главным образом, из поверхностных источников. Основными источниками водоснабжения в республике являются Онежское озеро, озера Среднее Куйто, Исо-Пюхярви, Паново, Пряжинское, Сязозеро, Ведлозеро, реки Суна, Муезерка, Лендерка. Согласно данным исследований, проведенных сотрудниками Карельского научного центра [1], для 55 % территории республики характерны воды со значительным содержанием гумусовых веществ, достаточно высокой цветностью (до 160 градусов платино-кобальтовой шкалы (εПКШ)) и перманганатной окисляемостью (8-30 мгО/л).

Гумусовые вещества, обуславливающие высокую цветность природных вод Карелии, представляют собой сложную смесь высокомолекулярных биохимически устойчивых соединений.

В поверхностных водах гумусовые вещества могут находиться в растворенном, взвешенном и коллоидном состояниях. Соотношение между ними, как правило, определяется химическим составом воды, ее pH. В кислых водах возможно существование свободных форм гуминовых и фульвокислот. В низкощелочных карельских водах гумусовые вещества в результате взаимодействия с двухвалентными ионами кальция и магния образуют нерастворимые соединения, что способствует еще большему увеличению цветности воды.

Для очистки высокоцветных маломутных поверхностных вод Карелии используют реагентные методы очистки только на водопроводных очистных сооружениях (ВОС) самых крупных водопотребителей: г. Петрозаводска и сравнительно молодого города горняков Костомукши, в подавляющем большинстве населенных пунктов (г. Беломорск, пос. Калевала, г. Кондопога, пос. Надвоицы) проводится только механическая очистка питьевой воды. ВОС отсутствуют вообще в г. Суоярви, Сортавала, Медвежьегорск, многих крупных поселках и практически во всех малых населенных

пунктах республики. В условиях Карелии реагентный способ обесцвечивания воды достаточно трудоемкий. Природные воды Карелии содержат устойчивые органические комплексы, коллоидные примеси, характеризуются недостаточным щелочным резервом, длительным периодом низких температур. В этих условиях коагуляция протекает неудовлетворительно, требует подщелачивания. Образующиеся хлопья гидроксида алюминия (железа) рыхлые, плохо оседают, в холодный период времени процессы хлопьеобразования и осаждения замедляются. Все это ведет к перерасходу реагентов, повышению гидравлической нагрузки на очистные сооружения, увеличению концентрации остаточного алюминия в обработанной воде (гуминовые и фульвокислоты устойчивы по отношению к электролитам из-за высокой гидрофильности).

В этом контексте представляют интерес альтернативные биологические методы, основанные на использовании микроорганизмов-деструкторов загрязняющих веществ, иммобилизованных на носителях [3].

Исследования в этом направлении проводятся в Петрозаводском государственном университете. На начальном этапе исследований ставилась задача оценить принципиальную возможность применения биологических методов очистки для обработки природных высокоцветных вод. В этом смысле особый интерес представляла технология медленного фильтрования – относительно простая, недорогая и достаточно эффективная в конструктивном оформлении водоочистных сооружений.

В результате первого этапа экспериментов выяснилось, что при малых скоростях фильтрации (до 0.2 м/ч) имеет место устойчивый эффект снижения цветности, который может быть востребован на сооружениях небольшой производительности.

Наиболее крупные загрязнения задерживаются на мелкозернистой фильтрующей загрузке, заклиниваясь в порах, и сужают их сечение. Благодаря этому на поверхности и в порах первых по потоку жидкости слоев загрузки задерживаются все более и более мелкие загрязнения, коллоиды и бактерии. На поверхности загрузки фильтра образуется тонкая фильтрующая пленка. Задержанные пленкой бактерии и органические вещества обуславливают возникновение в ней биологических процессов, в том числе и развитие низших микроорганизмов, поглощающих бактерии. Зерна песка обрастают студенистой массой, которая является хорошим сорбентом.

Массоперенос вещества у поверхности биопленки носит сорбционно-адгезионный характер, определяемый биологическими особенностями системы, а также силами, связанными с электрическим зарядом взаимодействующих частиц. В этом смысле проявляется некоторое сходство между медленным фильтрованием и обработкой воды в полноценном биосорбционном реакторе. В обоих случаях имеет место сорбция растворенных органических загрязнений на поверхности биопленки с последующим их окислением. Различие заключается в масштабах протекающих процессов и, соответственно, в возможностях их интенсификации.

В биопленке с сорбированным веществом процесс очистки лимитируется скоростью гидролиза, а также пористостью среды. При этом имеет место эффект биологического саморегулирования – бактерии перемещаются в зону высоких концентраций субстрата. Это приводит к возникновению активного верхнего слоя биопленки. Как следствие, степень очистки возрастает быстрее при увеличении числа небольших по высоте секций, нежели при увеличении высоты слоя загрузки в одной большой секции.

Особый интерес представляет возможность развития на биологической пленке сообщества микроорганизмов – деструкторов гуминовых веществ. Биологическая фильтрующая пленка, которая является основным механизмом обесцвечивания и осветления воды на медленных фильтрах, была изучена Оводовым В.С. [4]. Им, в частности, были установлены основные закономерности образования и развития биопленки. При фильтровании воды через песчаную загрузку с малыми скоростями первоначально образуется нижняя песчано-грязевая часть фильтрующей пленки. Ниже этого слоя частицы взвеси способны проникать на 8-10 см. После образования песчано-грязевого слоя загрязнения задерживаются на поверхности загрузки фильтра, образуя верхнюю рыхлую часть фильтрующей биологической пленки толщиной 4-10 мм. При дальнейшем фильтровании происходит уплотнение нижележащих слоев рыхлой части и образование уплотненной части пленки. И, наконец, формируется видимая биологическая пленка, в составе которой имеются минеральные и органические вещества, задержанные верхними слоями фильтра. Эта видимая часть, названная Оводовым В.С. «упругим ковром» [4], имеет мелкопористую структуру, в ней развиваются микроскопические водоросли и многочисленные бактерии различных видов.

Понятно, что образование фильтрующей пленки – достаточно сложный и длительный процесс. Период осветлительного созревания фильтра принято считать законченным, когда мутность фильтрата перестает превышать 1.5 мг/л. В условиях фильтрования маломутных высокоцветных Карельских вод продолжительность этого периода не превышала 15-20 минут.

Продолжительность периода бактерицидного созревания также зависит от мутности поступающей воды и, согласно исследованиям, проведенным Оводовым В.С. [4] и Аюкаевым Р.Р. [5], может составлять от 3 до 40 ч (рис. 1).

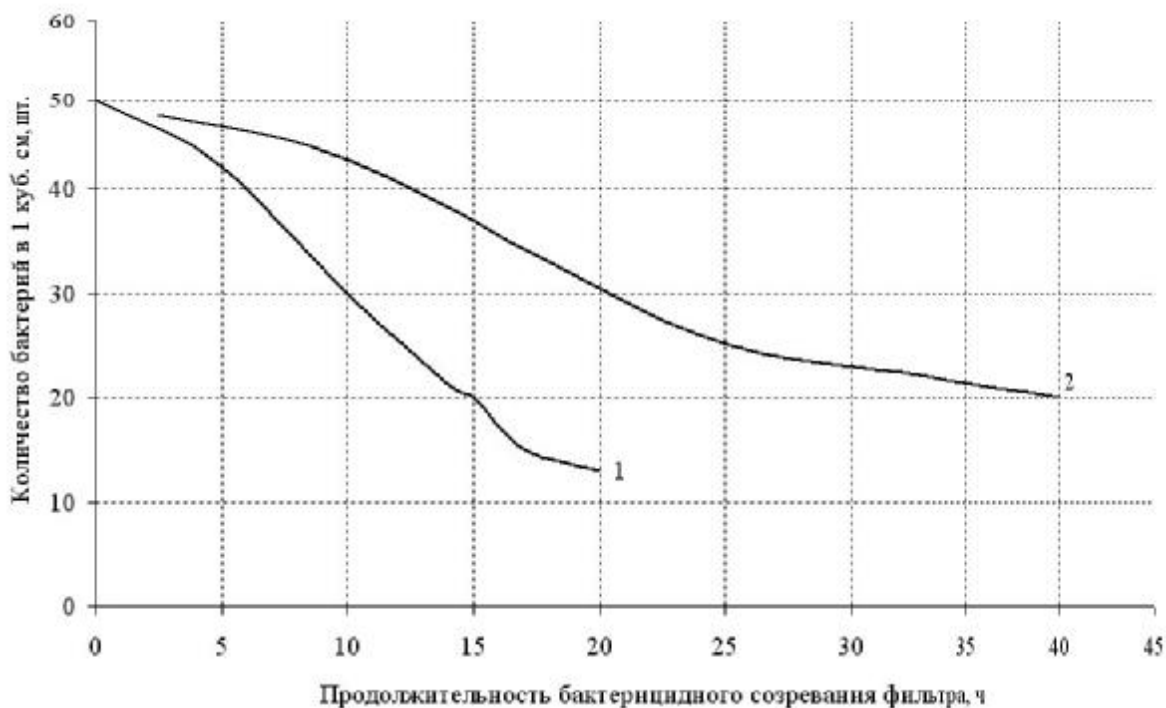


Рис. 1. 1 – данные исследований Оводова В.С., 2 – данные исследований Аюкаева Р.Р. (вода оз. Укшозеро, республика Карелия)

Перспектива использования медленного фильтрования для обесцвечивания природных вод исследована нами на секционной модификации медленного фильтра (рис. 2): слои песчаной загрузки небольшой толщины (1.5-4 см) разделены воздушными прослойками.



Рис. 2

Исходная вода из бака (1) подается в распределительное устройство первой секции фильтра (2), после чего последовательно проходит все три секции фильтрационной установки и подается в сборную емкость (12), откуда перекачивается в бак исходной воды циркуляционным насосом (10).

Продолжительность осветлительной и бактерицидной фаз созревания фильтра составляла около 12 ч. После созревания изучались возможности медленного фильтра в обесцвечивании воды. Пробы воды отбирались ежедневно, продолжительность одной группы экспериментов составляла 15 сут. Скорость фильтрации варьировалась в интервале 0.1-0.2 м/ч. Цветность исходной воды составляла 120-140 еПКШ. Регулированием гидравлического сопротивления системы обеспечивался режим фильтрации, при котором слой воды над загрузкой в каждой секции составлял не менее 5 см. Температура исходной воды варьировалась от 5 до 20 °С.

Эксперименты показали высокую эффективность медленных фильтров в обесцвечивании природной воды. Максимальная эффективность очистки достигала 70 % при цветности исходной воды 140 °ПКШ.

Возможности медленного фильтрования ограничены низкой удельной скоростью окисления и производительностью. На втором этапе исследований рассмотрены возможности одной из разновидностей «чистых» биосорбционных аппаратов.

В лабораторных условиях нами использовался простейший вариант установки, представляющей собой колонну с загрузкой из активированного угля, аэратор и распределительное устройство (рис. 3). Из сборной емкости циркуляционным насосом (5) исходная вода подавалась в аэрационную колонну (7), где насыщалась кислородом воздуха. Из емкости (1) вода поступала в фильтрационную колонну с активированным углем – биосорбер (2).

Механизм биосорбционного эффекта описан в работе [3]: при подаче воды активированный уголь начинает адсорбировать органические вещества, некоторые из которых служат субстратом для развития микроорганизмов; в течение некоторого времени эти микроорганизмы берут на себя основную роль в процессе очистки, увеличивая срок службы сорбента.

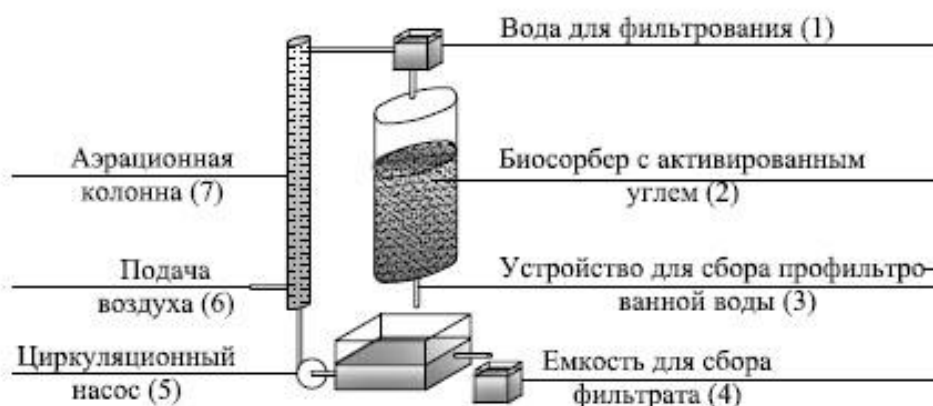


Рис. 3

Эксперименты на лабораторном биосорбере колонного типа (фильтрационной колонне) показали высокую эффективность очистки природной воды от трудноокисляемых органических загрязнений, обуславливающих ее цветность. По сравнению с технологией медленного фильтрования при примерно равных скоростях фильтрации удельная скорость окисления биосорбционной установки по показателю цветности увеличилась на порядок.

Для интенсификации процесса могут быть использованы модернизированные установки с прикрепленной биомассой, например, по типу дисковых биофильтров, отличающихся простотой изготовления, низкой энергоемкостью, простотой эксплуатации. На поверхности биодисков образуется слой, адсорбирующий поступающие загрязнения, при этом адсорбированные вещества хорошо удерживаются на этой поверхности, благодаря высокомолекулярным соединениям, синтезируемым микроорганизмами. С другой стороны, новый слой питательных веществ (адсорбированных загрязнений) притягивает к себе бактерии различных видов, находящихся во взвешенном состоянии. Кроме того, конструкция дисковых биофильтров позволяет реализовать такую модель существования биологических видов, как хищник-жертва, т.к. на каждой ступени очистки образуется свой биоценоз. Благодаря этому, возможно поедание микроорганизмов

предыдущей ступени, выполняющих роль жертвы, микроорганизмами следующей ступени очистки, являющимися хищниками. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению количества отмирающей биопленки и, следовательно, к упрощению эксплуатации установки.

Лабораторные исследования продемонстрировали потенциальную возможность использования технологии медленного фильтрования и фильтрования на сорбенте для активизации биологических процессов обесцвечивания природных вод. Для количественной оценки процессов биологической очистки природных вод нами была использована обобщенная модель В.А. Вавилина [6]. В рамках модели удельная скорость биологической очистки описывается уравнением:

$$u = \frac{L_0 - L_e}{X \times T} = p(L_e) = \frac{p_m \times L_e^n}{K_L^{n-p} \times L_0^p + L_e^n}, \quad (1)$$

где L_0 – обобщенная характеристика загрязнения воды на входе, L_e – обобщенная характеристика загрязнения воды на выходе, X – средняя концентрация микроорганизмов, T – продолжительность обработки воды в реакторе, p_m – максимальная удельная скорость очистки, n , p , K_L – положительные константы.

Значения коэффициентов n , p_m , K_L зависят от типа очищаемой воды. Для многокомпонентных загрязнителей хорошим приближением является $p = n - 1$. В этом случае имеем:

$$u = \frac{L_0 - L_e}{X \times T} = p(L_e) = \frac{p_m \times L_e^n}{K_L \times L_0^{n-1} + L_e^n}. \quad (2)$$

Для трудноокисляемых многокомпонентных загрязнителей, обуславливающих цветность воды, удельная скорость биологической очистки неплохо описывается соотношением (2) при $n = 2$:

$$u = \frac{L_0 - L_e}{X \times T} = p(L_e) = \frac{p_m \times L_e^2}{K_L \times L_0 + L_e^2}. \quad (3)$$

Для математического описания процессов, протекающих в многосекционном медленном фильтре или биосорбционном реакторе колонного типа, органическую нагрузку будем выражать в $\left[\frac{L_0}{X \times T} \right] = \frac{{}^0 \text{ПКШ} \times \text{л}}{\text{г} \times \text{сут}}$. Здесь $[X] = \frac{\text{г}}{\text{л}}$ – коэффициент нагрузки на единицу массы загрузки медленного фильтра или биосорбера.

По экспериментальным данным может быть построена зависимость $p = p(L_e)$ при фиксировании L_0 как параметра. Методами идентификации математических моделей определяются коэффициенты в модельном уравнении $p(L_e) = \frac{p_m \times L_e^n}{K_L^{n-p} \times L_0^p + L_e^n}$.

Графическая зависимость $p = p(L_e)$ для секционного медленного фильтра (скорость фильтрования 0.1-0.2 м/ч), обрабатывающего высокоцветные воды реки Шуя (республика Карелия) при $L_0 = 140({}^0 \text{ПКШ})$ и температуре 15°C, представлена на рис. 4.

Максимальная скорость обесцвечивания воды в секционном медленном фильтре составила $p_m = 1.1 \left(\frac{{}^0 \text{ПКШ} \times \text{л}}{\text{г} \times \text{сут}} \right)$. Методом Гаусса определено значение коэффициента $K_L = 34.6({}^0 \text{ПКШ})$ для уравнения (3).

Максимальная скорость процесса обесцвечивания p_m при медленном фильтровании, как показали лабораторные исследования, является функцией температуры (рис. 5). Для описания температурного эффекта рядом автором [3, 4, 6] предлагается использовать уравнение Аррениуса, из которого, в частности, следует:

$$p_m = p_{0m} \times k^{t-t_0}, \quad (4)$$

где k – температурная поправка, p_{0m} – скорость процесса при некоторой фиксированной температуре t_0 .

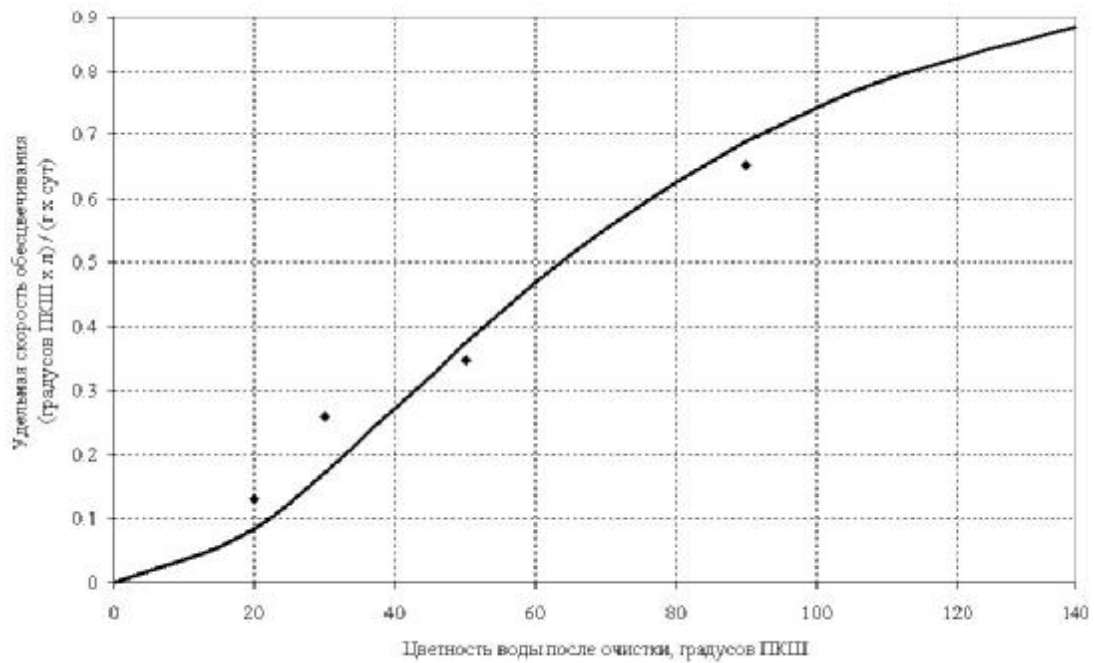


Рис. 4

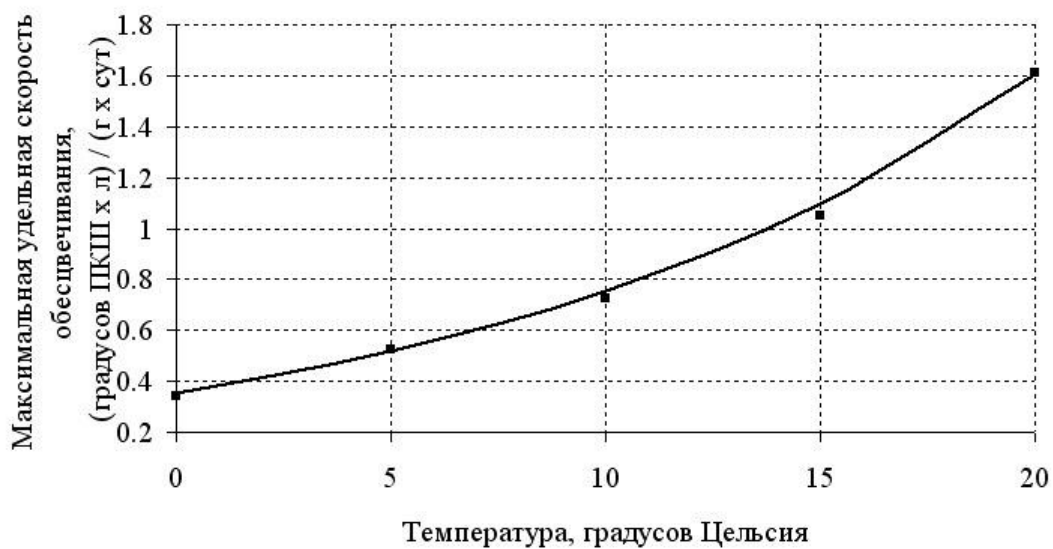


Рис. 5

Методом наименьших квадратов для условий эксперимента (медленное фильтрование) нами установлено, что $k = 1.035$.

Технологический расчет аппарата биологического обезвреживания природной высокоцветной воды может быть построен на зависимости для определения требуемого количества загрузки на базе экспериментально определенной скорости обезвреживания [3]. Масса загрузки M может быть определена по формуле

$$M = \frac{(L_0 - L_e) \times Q}{p(L_e)}, \quad (5)$$

где Q – производительность установки.

Располагая информацией о допустимой скорости потока в установке, можно определить конструктивные параметры устройства (диаметр сечения секции, количество секций и т.д.).

Информация о параметрах K_L и p_m в уравнении (2) для определения удельной скорости обесцвечивания в условиях медленного фильтрования и биосорбции приведена в таблице.

Таблица

Исходная вода	Начальная цветность, еПКШ	Тип устройства и условия	Параметры уравнения (2)
р. Шуя, цветность обусловлена гуминовыми кислотами	140	Многосекционный медленный фильтр с песчаной загрузкой, активная высота загрузки секции – 5 см, температура воды – 15°С	$p_m = 1.1 \left(\frac{{}^0 \text{ПКШ} \times l}{z \times \text{сут}} \right)$ $K_L = 34.6({}^0 \text{ПКШ})$
р. Шуя, цветность обусловлена гуминовыми кислотами	140	Биосорбер, уголь марки АГ-5, температура воды – 15°С	$p_m = 11.0 \left(\frac{{}^0 \text{ПКШ} \times l}{z \times \text{сут}} \right)$ $K_L = 12({}^0 \text{ПКШ})$

Выводы:

1. Экспериментальные исследования, проведенные в лабораторных условиях, продемонстрировали высокий потенциал биологических методов очистки высокоцветных природных вод, содержащих трудноокисляемые органические вещества.

2. Механизм сорбции растворенных органических загрязнений, обуславливающих цветность воды, на поверхности биопленки с последующим их окислением может быть реализован в условиях медленного фильтрования через песчаную загрузку. Биосорбер колонного типа с загрузкой активированным углем позволяет значительно интенсифицировать процесс за счет увеличения общего объема биопленки и скорости ее образования.

3. Процесс обесцвечивания природных вод неплохо описывается обобщенными нелинейными моделями биологической очистки. Удельная скорость окисления в условиях медленного фильтрования и очистки в биосорбере колонного типа значительно зависит от температуры среды и в интервале температур температур 0-20 °С удовлетворительно описывается уравнением Аррениуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвиненко А.В., Лозовик П.А., Карпечко В.А. Водные ресурсы Карелии как эколого-экономический фактор / Изучение водных объектов и природно-территориальных комплексов Карелии. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – С. 29-36.
2. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Очистка природных вод. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. – 579 с.
3. Пушников М.Ю. Очистка природных вод биосорбционным методом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: защищена 06.12.2000; утв. 2000. – М., 2000. – 24 с.
4. Оводов В.С. Сельскохозяйственное водоснабжение и обводнение. – М.: Колос, 1984. – 480 с.
5. Аюкаев Р.Р. Технология медленного фильтрования на сооружениях малой и средней производительности: дис. ... канд. техн. наук: защищена 30.06.2005; утв. 2005. – Петрозаводск, 2004. – 193 с.
6. Вавилин В.А. Нелинейные модели биологической очистки и процессов самоочищения в реках. – М.: Наука, 1983. – 160 с.

УДК 628.179

М.Д. Черноsvитов – магистр, инженер

E-mail: mihail_che@mail.ru

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОТЕРЬ ВОДЫ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ЧАСОВОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ

АННОТАЦИЯ

Представлены формулы (с выводом) для определения размеров потерь питьевой воды, как из зоны подачи насосной станции, так и в отдельных домах, по коэффициентам часовой неравномерности с выделением ночного периода. Приведено описание существующих методик определения размера утечек воды. Определен размер утечек воды для ряда реальных объектов известными методами и по предложенным формулам. Произведено сравнение полученных результатов. Предложена методика определения расчетного ночного коэффициента часовой неравномерности характерного для жилых домов с выбранной степенью благоустройства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: потери воды, водопотребление, коэффициент часовой неравномерности.

M.D. Chernosvitov – magistrate, engineer

Samara State University of Architecture and Engineering

TECHNIQUE OF THE ESTIMATION OF LOSSES OF WATER ON FACTOR OF HOUR NON-UNIFORMITY

ABSTRACT

Formulas (with a conclusion) for definition of the sizes of losses of potable water, both from a zone of submission of pump station, and in separate houses, on factors of hour non-uniformity with allocation of the night period are presented. The description of existing techniques of definition of the size of outflow of water is resulted. The size of outflow of water for of some real objects by known methods and under the offered formulas is certain. Comparison of the received results is made. The technique of definition of settlement night factor of hour non-uniformity characteristic for apartment houses with the chosen degree of an accomplishment is offered.

KEYWORDS: losses of water, water consumption, factor of hour non-uniformity.

Описанные в литературе [1-8] методы оценки объема скрытых утечек можно разделить на три группы:

1. «Открытый» зональный метод. Участок зональных измерений на время производства замеров изолируется от остальной части водопроводной сети закрытием задвижек. Вода может поступать в зону сети через один или несколько питающих водоводов, оборудованных расходомерами. Объем скрытых утечек из наружной сети определяется как разность показаний расходомеров, установленных на питающих вводах зоны, и расходомеров, установленных на абонентских вводах, за один и тот же промежуток времени.

2. «Закрытый» зональный метод. Отличается от предыдущего метода тем, что на период измерений от сети отключаются все потребители воды в выбранной «закрытой» зоне. Величина скрытых утечек определяется по показаниям расходомеров, установленных на питающих вводах. Для определения потерь во внутридомовой сети при отсутствии водоразбора использование водомера можно заменить применением прибора инженера Панкевича [1] и соответствующей методикой определения объема воды, поступившей в сеть.

3. Определение объемов скрытых утечек на основании измерений ночных расходов. Этим методом определяют потери воды в отдельных районах (зонах водоснабжения) и утечки в зданиях.

При первом способе требуется наличие водосчетчиков на вводах потребителей, что не везде имеет место. Также необходимы монтажные работы по установке дополнительного оборудования, исправная работа задвижек на сети и т.д.

При втором способе требуется прекращение подачи воды потребителям, поэтому работы рекомендуется проводить в ночное время. Также необходимы монтажные работы по установке дополнительного оборудования, исправная работа задвижек на сети и т.д.

Третий метод основывается на замерах ночных расходов по результатам показаний водосчетчиков, установленных на повысительных насосных станциях или водопроводных вводах в домах. В методике [2] говорится о необходимости укомплектовки водосчетчиков узлом импульсного выхода, соединенного с приборами накопления информации.

Согласно Инструкции по оценке и нормированию неучтенных расходов воды в системах коммунального водоснабжения [3] величина скрытых утечек воды $q_{\text{скр}}$, из водопроводной сети микрорайона:

$$q_{\text{скр}} = [\sum Q - (\sum Q_{\text{аб}} + \sum q_{\text{н}})] \frac{24}{t}, \text{ м}^3/\text{сут} \quad (1)$$

где $\sum Q$ – объем поданной в сеть микрорайона воды в куб. м за t ч;

$\sum q_{\text{н}}$ – объем воды, не учитываемый средствами измерений;

$\sum Q_{\text{аб}}$ – объем воды, потребленный абонентами за тот же период.

Объем воды, не зарегистрированный средствами измерений, определяется по формуле:

$$W_{\text{св}} = \sum_1^m q_i^{\text{пор}} \cdot n_i \cdot t_i, \text{ м}^3$$

где $q_i^{\text{пор}}$ – порог чувствительности средства измерения, куб. м/ч;

n_i – число средств измерения данного калибра;

t_i – число часов работы средства измерения с расходами в пределах порога чувствительности;

m – число калибров средств измерения.

Если средствами измерений охвачены единичные жилые дома в каждой группе однотипных домов, то результаты должны быть увеличены пропорционально числу домов в каждой группе.

В работе [4] была предложена формула:

$$Q_{\text{ут}}^{\text{сут}} = 24q_{\text{н}}^{\text{мин}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{ут}}^{\text{сут}}$ – суточная величина утечки, $\text{м}^3/\text{сут}$;

$q_{\text{н}}^{\text{мин}}$ – минимальный часовой ночной расход, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Согласно Методике определения неучтенных расходов и потерь воды в системах коммунального водоснабжения [5] величина потерь (утечек) воды в здании $q_{\text{ут}}$ определяется по минимальному (мгновенному) ночному расходу воды и данным о напорах в дневное и ночное время, по формуле:

$$q_{\text{ут}} = q_{\text{ноч}} \left(4 + K \cdot 20 \cdot \sqrt[4]{\frac{H_{\text{эф дн}}}{H_{\text{эф н}}}} \right), \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (3)$$

где: $q_{\text{ноч}}$ – минимальный (мгновенный) ночной расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$;

K – эмпирический коэффициент, равный 0,85;

$H_{\text{эф дн}}$ – эффективный напор в дневное время, м вод. ст.;

$H_{\text{эф н}}$ – эффективный напор в ночное время (с 1 до 5 ч), м вод. ст.

Для жилых домов вычисляется удельная величина ночного расхода и утечки на одного жителя $q_{\text{ж ноч}}$ и $q_{\text{ж ут}}$.

Также по Методике [5] определяют скрытые утечки в отдельных районах (зонах водоснабжения) по формуле (3), в которой вместо ночной утечки здания $q_{\text{ут ноч}}$ (скорее всего имеется ввиду минимальный (мгновенный) ночной расход $q_{\text{ноч}}$) используется скрытая утечка в ночное время по всей зоне водоснабжения $\sum q_{\text{ут ноч}}$:

$$q_{\text{ут}} = \sum q_{\text{ут ноч}} \left(4 + K \cdot 20 \cdot \sqrt[4]{\frac{H_{\text{эф дн}}}{H_{\text{эф н}}}} \right), \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (4)$$

$$\sum q_{\text{ут ноч}} = q_{\text{з ноч}} - \sum q_{\text{ж ут}} - \sum q_{\text{па ноч}},$$

где: $q_{\text{з ноч}}$ – мгновенный ночной расход зоны водоснабжения;

$\sum q_{\text{ж ноч}}$ (видимо, подразумевается $\sum q_{\text{ж ут}}$) – общие ночные утечки в жилых домах:

$$\sum q_{\text{ж ноч}} = q_{\text{ж ноч}} \cdot N_{\text{ж}},$$

$N_{\text{ж}}$ – количество жителей в зоне водоснабжения.

Величина $q_{\text{ж ноч}}$ устанавливается по статистически достоверной выборке домов, принятой для системы коммунального водоснабжения.

$\sum q_{\text{па ноч}}$ – ночные расходы прочих абонентов, полученные на основе замеров или обработки статистических данных о водопотреблении;

Определение суточной скрытой утечки

Получение приведенной выше формулы (3) описано в работах [2, 6]. Там же приводится приближенная формула, не учитывающая колебание напора на вводе в здание, для определения величины утечки:

$$Q_{\text{ут}}^{\text{сут}} = 21(q_{\text{н}}^{\text{факт}} - q_{\text{н пол}})N, \text{ л/сут}, \quad (5)$$

где: $q_{\text{н}}^{\text{факт}}$ – фактический удельный ночной (с 1 до 5 ч) расход, л/(ч·чел);

$q_{\text{н пол}} = 0,2$ – величина полезного водопотребления в ночные часы, л/(ч·чел);

N – число жителей в жилом здании (районе), чел.

В работе [7] величина утечки определяется по формуле:

$$Q_y = (14,4 \times 15,1) \cdot q_4 - 0,001 \cdot U, \text{ м}^3/\text{сут},$$

где q_4 – расход между тремя и четырьмя часами, м³/ч;

U – число жителей.

В скобках указан интервал, значение коэффициента зависит от числа квартир. При числе квартир более 250 формула определения утечки имеет вид:

$$Q_y = 14,4 \cdot q_4 - 0,001 \cdot U, \text{ м}^3/\text{сут}, \quad (6)$$

В работах [8, 9] оценка суточной величины утечек воды в жилом доме современного благоустройства производится по следующим формулам:

при переменном давлении на вводе:

$$q_{\text{ут}}^{\text{сут}} = K \left[\sum_{i=1}^4 (q_{\text{фи}}^{\text{н}} - q_{\text{п}}^{\text{н}}) + \sum_{i=5}^{24} (4,02 \cdot H_i^2 + 0,29 \cdot H_i) \frac{N}{U} \right], \quad (7)$$

при наличии регуляторов давления на вводе:

$$q_{\text{ут}}^{\text{сут}} = K \left[4(q_{\text{сп}}^{\text{н}} - q_{\text{п}}^{\text{н}}) + 20(4,02 \cdot H_{\text{сп}}^2 + 0,29 \cdot H_{\text{сп}}) \frac{N}{U} \right], \quad (8)$$

где K – коэффициент, ограничивающий возможное завышение величин утечек воды:

$$K = \frac{q_{\text{сп}}^{\text{н}} - q_{\text{п}}^{\text{н}}}{q_{\text{сп}}^{\text{н}}},$$

$q_{\text{фи}}^{\text{н}}$ – фактический удельный расход воды в ночные часы суток от 1 до 5 ч, л/(ч·чел);

$q_{\text{п}}^{\text{н}}$ – полезный расход воды в ночные часы суток, л/(ч·чел);

H_i – давление на вводе, МПа;

$H_{\text{сп}}$ – среднее значение давления, МПа;

N – количество квартир в доме;

U – количество жителей в доме.

Следует заметить, что в методиках определения утечек воды по ночному минимальному расходу [5, 6], период минимального расхода считается с 0⁰⁰ до 5⁰⁰. При замерах средний расход с 0⁰⁰ до 5⁰⁰ составил 2,17 л/(ч·чел), а с 2⁰⁰ до 5⁰⁰ – 1,35 л/(ч·чел). Разница составляет 0,82 л/(ч·чел) (или 61 %), что при определении размера утечки по этим методикам даст значительное завышение результата. В

методиках полезный ночной расход считается 0,2 л/(ч·чел), что в 10,9 раза меньше среднего ночного расхода, полученного при замерах.

Для вывода формулы для определения размера утечки рассмотрен случай, когда повысительная насосная станция подает воду в жилой дом. Наиболее характерными периодами водопотребления считаются два периода: ночной (с 1 до 5 часов ночи) и дневной (остальные 20 часов). Ночной период характеризуется наименьшим полезным водопотреблением и максимальными избыточными напорами в сети. Для дневного периода характерны большие часовые расходы и меньшее избыточное давление.

Размер утечки изменяется пропорционально изменению квадратного корня из давления в месте утечки [5, 10].

$$q^{yt} = M \cdot \sum \text{ш} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H},$$

где M – коэффициент расхода,

$\sum \text{ш}$ – сумма площадей поперечного сечения отверстий,

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ,

H – напор в месте утечки.

Выразим ночной коэффициент часовой неравномерности утечки через давление в сети:

$$K_n^{yt} = \frac{q_n^{yt}}{q_{cp}^{yt}} = \frac{M \cdot \sum \text{ш} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n}}{M \cdot \sum \text{ш} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{cp}}} = \sqrt{\frac{H_n}{H_{cp}}},$$

где q_n^{yt} – ночная (с 1 до 5 часов) утечка, $\text{м}^3/\text{ч}$;

q_{cp}^{yt} – среднечасовая суточная утечка, $\text{м}^3/\text{ч}$;

H_n – средний напор в сети в ночное время (с 1 до 5 часов), м ;

H_{cp} – средний в течение суток напор, м .

Подачу насосной станции в ночное время q_n^{HC} , $\text{м}^3/\text{ч}$, запишем как сумму ночного водопотребления и ночной утечки:

$$q_n^{HC} = q_n^{\text{дом}} + q_n^{yt} \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

где $q_n^{\text{дом}}$ – среднечасовое ночное (с 1 до 5 часов) потребление дома, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Выразим ночные расходы через среднечасовые расходы и ночные коэффициенты часовой неравномерности:

$$K_n^{HC} \cdot q_{cp}^{HC} = K_n^{\text{дом}} \cdot q_{cp}^{\text{дом}} + K_n^{yt} \cdot q_{cp}^{yt},$$

где K_n^{HC} – средний ночной коэффициент часовой неравномерности подачи насосной станции;

$K_n^{\text{дом}}$ – средний ночной коэффициент часовой неравномерности потребления дома;

K_n^{yt} – средний ночной коэффициент часовой неравномерности утечки.

Представим среднее водопотребление как разность средней подачи насосной станции и средней утечки:

$$K_n^{HC} \cdot q_{cp}^{HC} = K_n^{\text{дом}} \cdot (q_{cp}^{HC} - q_{cp}^{yt}) + K_n^{yt} \cdot q_{cp}^{yt}.$$

Выразим величину среднечасовой утечки:

$$q_{cp}^{yt} = q_{cp}^{HC} \frac{K_n^{HC} - K_n^{\text{дом}}}{K_n^{yt} - K_n^{\text{дом}}}.$$

Подставим ночной коэффициент часовой неравномерности утечки выраженный через давление:

$$q_{cp}^{yt} = q_{cp}^{HC} \frac{K_n^{HC} - K_n^{\text{дом}}}{\sqrt{H_n/H_{cp}} - K_n^{\text{дом}}}$$

Умножая обе стороны равенства на 24, получим формулу для определения размера суточной утечки:

$$Q^{ут} = Q^{НС} \frac{K_n^{НС} - K_n^{дом}}{\sqrt{H_n/H_{ср}} - K_n^{дом}}, \quad (9)$$

где $Q^{ут}$ – суточная утечка из водопроводной сети, м³/сут;

$Q^{НС}$ – суточная подача насосной станции, м³/сут.

Если насосная станция подает воду в группу однотипных жилых домов, то в формуле вместо среднечасового ночного потребления дома нужно подставить сумму ночного потребления всех домов, что не влияет на конечный результат (9).

Для насосных станций с частотно регулируемым приводом насосов давление в сети остается постоянным, а формула (9) имеет вид:

$$Q^{ут} = Q^{НС} \frac{K_n^{НС} - K_n^{дом}}{1 - K_n^{дом}}, \quad (10)$$

В качестве ночного коэффициента часовой неравномерности для жилых домов рекомендуется использовать величину, характерную для жилых домов с данной степенью благоустройства, определенную на основании статистической обработки ряда натуральных измерений.

Если уравнения (9) и (10) составить относительно ввода в дом, т.е. определять размер утечек, сравнивая динамику прохождения воды через ввод и потреблением воды, характерным для дома без утечек, вместо напора нужно использовать эффективный напор:

$$H_{эф} = H_{вв} - 0,5H_{зд}$$

где $H_{вв}$ – напор на вводе в здание, м;

$H_{зд}$ – высота здания, м.

Формулы для определения утечек в доме имеют вид:

$$Q^{ут} = Q^{дом} \frac{K_n^{дом} - K_n^{мин}}{\sqrt{H_{эфн}/H_{эфср}} - K_n^{мин}}, \quad (11)$$

$$Q^{ут} = Q^{дом} \frac{K_n^{дом} - K_n^{мин}}{1 - K_n^{мин}}, \quad (12)$$

где $K_n^{мин}$ – ночной коэффициент часовой неравномерности, характерный для жилых домов с данной степенью благоустройства при отсутствии утечек;

$H_{эфн}$, $H_{эфср}$ – средние эффективные напоры в ночное время и в течение суток соответственно.

Для применения представленных формул (11) и (12) является важным определение $K_n^{мин}$. При натуральных замерах в четыре домах с одинаковой степенью благоустройства в разных районах города ночной коэффициент часовой неравномерности изменялся от 0,25 до 0,40 (табл. 1). С другой стороны, принимая по литературным данным полезный ночной расход 0,2 л/(ч·чел) при полезном удельном суточном водопотреблении $Q^{мин} = 200$ л/(ч·чел), коэффициент $K_n^{мин}$ составит 0,024, при $Q^{мин} = 250$ л/(ч·чел) $K_n^{мин} = 0,019$, $Q^{мин} = 300$ л/(ч·чел) $K_n^{мин} = 0,016$.

В [11] говорится, что ночной расход при отсутствии утечек меньше 1 % $Q_{сут}$. Следовательно, коэффициент часовой неравномерности меньше 0,24.

Определить размер коэффициента $K_n^{мин}$, а также размер полезного суточного водопотребления $Q^{мин}$ можно способом которым определены коэффициенты для формулы (3). Согласно [2] значения эмпирических коэффициентов, которые не могут быть непосредственно измерены, могут быть рассчитаны на основе результатов экспериментов. Методически расчет $K_n^{мин}$ базируется на гипотезе, что в однотипных многоквартирных жилых зданиях, расположенных в одной климатической зоне, удельное суточное водопотребление должно быть примерно равным. Разница в суточном водопотреблении объясняется главным образом утечками воды.

Как следует из выражения (11), рассчитываемая величина утечки воды $Q^{УТ}$ будет изменяться при варьировании значения $K_n^{мин}$. Правильность выбора этого значения оценивается по приведенным расходам воды $Q_{пр}$, которые представляют собой разность между фактическим водопотреблением в здании (измеренный суточный расход) и рассчитанной по выражению (11) величиной утечки воды:

$$Q_{пр} = Q^{дом} - Q^{УТ}.$$

Разброс значений вычисленных таким образом приведенных расходов воды для достаточно широкой выборки жилых зданий будет тем меньше, чем правильнее будет выбрано численное значение $K_n^{мин}$. Критерием правильности выбора значений $K_n^{мин}$ следует принять минимум коэффициента вариации приведенных расходов воды для соответствующих выборок зданий $V[S(Q_{пр})/M(Q_{пр})]$. Принятый критерий является одновременно функцией как среднего значения $M(Q_{пр})$, так и дисперсии (среднеквадратичного отклонения) $S(Q_{пр})$ этой величины. Использование этого критерия позволяет обоснованно наложить ограничения на снижение среднего по выборке значения приведенного удельного суточного расхода, чего не удастся сделать, если за критерий правильности выбора величины $K_n^{мин}$ принять минимальное значение дисперсии приведенных расходов воды.

В городе Самара в 2008-09 гг. были выполнены замеры расходов холодной воды в ряде жилых домов. Все дома имеют одинаковую степень благоустройства. В таблице 1 приведены результаты определения размера утечки по предложенной формуле при разных коэффициентах $K_n^{мин}$.

Таблица 1

Зависимость величины утечки от $K_n^{мин}$

Объект	$K_n^{дом}$	$Q^{УТ}$ в процентах от $Q^{дом}$ при $K_n^{мин}$					
		0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25
Дом 1	0,40	25,0	24,1	23,1	22,1	21,1	20,0
Дом 2	0,27	8,8	7,6	6,4	5,2	3,9	2,7
Дом 3	0,25	6,3	5,1	3,8	2,6	1,3	0,0
Среднее значение	0,31						

Также были выполнены замеры расходов и напоров на нескольких повысительных насосных станциях, подающих воду в группы однотипных жилых домов.

Для сравнения представленных методик определения размера утечек воды были использованы графики подачи воды и изменения давления 11-и повысительных насосных станций и 3-х жилых домов. Результаты представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Потеря воды во внутриквартальных сетях (в числителе в л/(сут·чел) в знаменателе в % от суточной подачи насосной станции)

Объект	$q_{сут}$, л/(сут·чел)	$K_n^{НС}$	Формула расчета		
			(1)	(2)	(9, 10)
НС 1	341,7	0,53	179,5	164,3	106,5
			52,4	48,1	31,2
НС 2	259,1	0,62	126,3	117,0	114,2
			48,7	45,1	44,1
НС 3	363,1	0,58	-	188,9	141,8
				52,0	39,1
НС 4	383,3	0,62	-	203,6	172,5
				53,1	45,0
НС 5	349,4	0,53	-	154,2	110,7
				44,1	31,7
НС 6	338,4	0,54	-	158,2	112,7
				46,8	33,3
НС 7	337,4	0,66	-	70,7	171,8
				21,0	50,9
НС 8	345,3	0,62	-	147,8	143,5
				42,8	41,6

НС 9	364,6	0,54	-	171,9 47,1	118,4 32,5
НС 10	311,9	0,50	-	78,1 25,0	83,5 26,8
НС 11	299,1	0,58	-	159,2 53,2	116,9 39,1

Таблица 3

**Потеря воды в зданиях (в числителе в л/(сут·чел)
в знаменателе в % от суточного потребления дома)**

Объект	Q _{сут} , л/(сут·чел)	Формула расчета					
		(2)	(3)	(5)	(6)	(7, 8)	(11, 12)
Дом 1	162,5	-	-	52,1 32,0	17,0 10,5	27,7 13,4	34,2 21,1
Дом 2	222,1	32,8 14,8	28,7 12,9	46,8 21,1	26,6 12,0	21,5 9,7	5,2 3,9
Дом 3	224,9	11,8 5,2	10,3 4,6	45,1 20,0	30,9 13,7	17,7 7,9	2,9 1,3

Для формул (9) и (10) принято $K_n^{дом} = 0,31$, для формул (11) и (12) принято $K_n^{мин} = 0,24$.

Дом 1 получает воду от НС 1.

Для расчетов по формулам (7), (8) заселенность квартир принята равной 3 чел/кв.

Предложенная в статье методика имеет ряд преимущественных отличий от других методов.

Во-первых, использование ночного расхода (с 1 до 5 часов) для определения размера утечки предпочтительнее минимального часового и, тем более, минимального мгновенного расхода. Это объясняется тем, что на практике возможны случаи, при которых счетчики, установленные в домах, работают в условиях, значительно отличающихся от тех, при которых допускают минимальную погрешность [12, 13]. Для определения минимального мгновенного расхода требуется наличие соответствующего оборудования.

Во-вторых, не используется такая величина, как полезное ночное водопотребление, значение которой (0,2 л/(ч·чел)) было определено более сорока лет назад и требует уточнения в современных условиях. Помимо этого, в разных методиках с этой величиной сравниваются разные величины: средний ночной расход, минимальный часовой расход и минимальный мгновенный расход. Фактический ночной расход, помимо полезного потребления и утечек, содержит непроизводительные потери, которые согласно этим методикам относятся к утечкам. Не требуется информация о числе жителей в районе, обслуживаемом насосной станцией, и в каждом доме.

В-третьих, для определения коэффициентов неравномерности возможно использование накладных расходомеров, применение которых на действующих сетях для измерения расхода воды затруднено изменением живого сечения труб.

Выводы

Предложена методика определения размера утечек воды по коэффициентам часовой неравномерности с выделением ночного периода.

Возможно определение потери воды, как из зоны подачи повысительной насосной станции, так и в отдельных домах.

Описанная методика имеет ряд принципиальных отличий от общеизвестных.

Определение размера утечки из зоны подачи повысительной насосной станции возможно на основании замеров только на насосной станции и ночного коэффициента часовой неравномерности, характерного для жилых домов с данной степенью благоустройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по борьбе с утечками и потерями воды на городских водопроводах. – М.: Стройиздат, 1973. – 80 с.

2. Кожин И.В., Добровольский Р.Г. Устранение потерь воды при эксплуатации систем водоснабжения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1988. – 348 с.: ил.
3. Инструкция по оценке и нормированию неучтенных расходов воды в системах коммунального водоснабжения. Утверждена Постановлением Госстроя России от 31 марта 2000 г.
4. Сапожников М.М. Борьба с утечкой воды из водопроводов. – М.: МКХ РСФСР, 1958.
5. Методика определения неучтенных расходов и потерь воды в системах коммунального водоснабжения. Утверждена Приказом Минпромэнерго России от 20 декабря 2004 г. № 172.
6. Майзель М.П., Кожин И.В., Добровольский Р.Г. и др. Оценка величины утечек воды в жилых зданиях // Водоснабжение и санитарная техника, 1977, № 8. – С. 6-9.
7. Гейнц В.Г., Обельченко И.О. Об определении размеров утечек в водопроводах жилых зданий // Сб. трудов НИИ санитарной техники «Отопительное оборудование, санитарно-технические приборы и арматура». – М., 1974, № 43. – С. 129-138.
8. Свинцов А.П. Гидравлические и технологические основы водосбережения в жилищном фонде. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – М., 2003. – 36 с.
9. Свинцов А.П., Скотников Ю.А. Пути устранения потерь воды в жилых зданиях // Водоснабжение и санитарная техника, 1988, № 1. – С. 22-23.
10. Курганов А.М., Федоров Н.Ф. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и канализации. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1978. – 424 с., ил.
11. Лобачев П.В., Шевелев Ф.А. Водомеры для водопроводов и канализации. Изд. 3-е, исправ. и доп. – М.: Стройиздат, 1964. – 150 с.
12. Свинцов А.П. Приборный учет количества использованной водопроводно-канализационной продукции в жилых зданиях // Сантехника, 2006, № 4.
13. Свинцов А.П. Реализация продукции водопроводно-канализационных предприятий на рынке жилищного фонда: Монография. – М., 2007. – 269 с.: ил.