

С. В. КОСТЮЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук, директор; С. В. ВОЛКОВ, зам. директора; А. В. ЯКИМЕНКО, рук. группы (НПО ЛИТ); С. Ю. ШИШОВ, директор МП «Волгоградводоканал»; В. Н. ПЛЯТНЕР, директор МП «Самараводоканал»; А. Н. СТРЕЛКОВ, д-р техн. наук (ГАСА, г. Самара); А. Д. СМИРНОВ, д-р техн. наук (ГНЦ РФ НИИ ВОДГЕО)

УФ-излучение для обеззараживания питьевой воды из поверхностных источников

В системах коммунального водоснабжения на протяжении более столетия применяются различные методы обеззараживания воды. Однако и в настоящее время сохраняется риск возникновения заболеваний, связанных с употреблением населением питьевой воды, содержащей вирусы и простейшие. Попытки повышения надежности обеззараживания воды в отношении этих микроорганизмов посредством увеличения доз хлора приводит к образованию опасных для здоровья человека хлорорганических соединений.

Анализ зарубежной научной литературы и нормативных докумен-

тов показывает, что совершенствованию схем обеззараживания воды сейчас уделяется большое внимание. Во многих странах на государственном уровне ведутся исследования с целью определения возможности использования различных методов и технологий (программы Агентства по защите окружающей среды в США, Министерства образования, науки, исследований и технологий в Германии, ЕААР в Италии и др.).

Реальными практическими методами, обладающими необходимым потенциалом обеззараживания воды и прошедшими проверку на действующих крупномасштабных

сооружениях водоподготовки, являются хлорирование, озонирование, обработка диоксидом хлора и УФ-облучение. Существует ряд критериев, по которым оценивается приемлемость того или иного метода: обеспечение удаления патогенных и снижения концентрации индикаторных микроорганизмов до значений, установленных соответствующими санитарными нормативами; минимальное влияние колебаний физико-химического качества воды на эффективность обеззараживания; применяемый метод обеззараживания не должен приводить к возникновению вредных побочных продуктов в концентрациях выше

ПДК; метод должен органически вписываться в общую технологическую схему очистки и быть приемлемым с экономической точки зрения.

Выбор конкретного метода в каждом случае основывается на комплексном анализе предлагаемого решения с технико-эксплуатационной и экономической точек зрения. Основное внимание при этом уделяется обеспечению надежного и непрерывного обеззараживания воды. Целью данной статьи является рассмотрение особенностей и перспектив применения обеззараживания воды УФ-излучением.

УФ-облучение обладает высокой эффективностью по отношению к патогенным микроорганизмам. Действие УФ на разные типы микроорганизмов имеет одинаковую природу, основной механизм заключается в прямом воздействии излучения на нуклеиновые кислоты. Входящие в состав ДНК пиримидиновые основания – тимин и цитозин, отличающиеся высокой фотохимической активностью в области 250–280 нм, образуют под воздействием облучения сшивки (димеры). Этот фотопродукт обнаружен при использовании коротковолнового УФ-излучения в биологических дозах у самых различных объектов. Многочисленные факты свидетельствуют об определяющей роли димеров в летальном, мутагенном и других эффектах УФ-излучения, при этом внешняя структура микроорганизма оказывает минимальное влияние на эффективность УФ-излучения.

Анализ более 40 опубликованных работ, в которых имеются данные о действии УФ-излучения, показывает, что дозы, необходимые для инактивации различных патогенных микроорганизмов, включая вирусы, отличаются незначительно. Несмотря на некоторые различия в приведенных данных, связанных с методикой проведения экспериментов, дозы УФ-облучения для обеззараживания на один порядок имеют в среднем следующие значения: бактерии – от 1,5 мДж/см² для некоторых штаммов *Shigella dysenteriae* до 10 мДж/см² для энтеро-

кокков и фекальных стрептококков; энтеровирусы – от 4,5 мДж/см² для полиовирусов (Mahoney) до 11 мДж/см² для ротавирусов. Из приведенных данных видно, что дозы УФ для бактерий и вирусов отличаются незначительно, в то время как при обеззараживании хлором требуемые дозы имеют различие до 50 раз. Для снижения на один порядок содержания цист лямблий необходимы дозы 40–80 мДж/см². До последнего времени считалось, что для удаления криптоспоридий необходимы дозы более 200–300 мДж/см², однако в 1997–1999 гг. был проведен цикл исследовательских работ, показавших, что УФ-облучения дозами 40–120 мДж/см² достаточно для инактивации ооцист на 4 порядка [1]. Результаты были подтверждены при эксплуатации промышленных УФ-систем [2]. Исходя из полученных данных, в этом году в США готовятся официальные рекомендации по применению УФ для обеззараживания воды поверхностных источников водоснабжения, а ведущими американскими фирмами разрабатывается новый типовой ряд УФ-установок для этих целей.

Выбор УФ-оборудования для обеззараживания воды определяется по необходимой степени снижения концентрации патогенных и индикаторных микроорганизмов. В таблице приведена зависимость степени обеззараживания от различных доз облучения [степень обеззараживания – это десятичный логарифм или количество порядков отношения исходной и конечной концентрации микроорганизмов $\log_{10}(N_0/N)$]. Доза облучения 16 мДж/см² – это минимальная доза, установленная нормативами для применения УФ при обеззараживании питьевой воды [3], которая обеспечивает не менее 5 порядков снижения для патогенных бактерий и 1,6–6 порядков по индикаторным бактериям. Для вирусов доза облучения 16 мДж/см² обеспечивает снижение на 1,8–2,9 порядка, достижение более значительной степени обеззараживания обеспечивается дозой 40 мДж/см² (более 4 порядков). Доза облучения 80 мДж/см² инактивирует цисты на 1–4 порядка.

Поскольку в отличие от химических реагентов при применении УФ-обеззараживания отсутствует необходимость в ограничении верхнего предела дозы облучения, ее всегда можно выбрать достаточной для конкретных условий. Обеспечение в промышленных условиях доз УФ-облучения 40 и 80 мДж/см² является вполне реальным с технической и экономической точек зрения.

Диапазон физико-химических показателей качества воды, приемлемых для применения метода УФ-обеззараживания, является достаточно широким. Фотохимические процессы практически не зависят от pH и температуры воды, поэтому в отличие от хлорирования изменение этих параметров качества воды оказывает минимальное влияние на инактивацию микроорганизмов УФ-облучением. Присутствие в воде ряда органических и неорганических веществ, поглощающих УФ-излучение, приводит к снижению фактической дозы облучения, обеспечиваемой УФ-установками. Влияние качества воды на пропуска-

Микроорганизм	Степень обеззараживания при дозе УФ-облучения, мДж/см ²		
	16	40	80
Бактерии			
<i>Aeromonas hydrophila</i>	> 6	> 6	> 6
<i>Campylobacter jejuni</i>	> 6	> 6	> 6
<i>Clostridium tetani</i>	1,8	4,4	> 6
<i>Escherichia coli</i>	6	> 6	> 6
<i>Enterococcus</i>	1,6	4	8
Fecal Coliform	> 6	> 6	> 6
Fecal Streptococcus	1,6	4	8
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	> 6	> 6	> 6
<i>Salmonella paratyphi</i>	5	> 6	> 6
<i>Salmonella typhi</i>	> 6	> 6	> 6
<i>Shigella dysenteriae</i>	> 6	> 6	> 6
<i>Shigella flexneri</i>	> 6	> 6	> 6
<i>Vibrio cholerae</i>	> 6	> 6	> 6
Вирусы			
Hepatitis A	2,9	> 4	> 4
Coliphage	4,4	> 4	> 4
Coliphage MS-2	0,7	1,7	3,5
Coxsackie	2,7	> 4	> 4
Poliovirus	2,1	> 4	> 4
Rotavirus	1,8	> 4	> 4
Простейшие			
<i>Giardia lamblia</i>	0,19	0,49	1,5
<i>Cryptosporidium parvum</i>		4 (0,1*)	

* Различные методы анализа.

ние водой излучения должно быть учтено при выборе УФ-оборудования.

В 1995–1997 гг. специалистами НИИ гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана проведен цикл работ по определению влияния обобщенных показателей качества воды (цветность, мутность, окисляемость, ХПК, БПК) на эффективность УФ-обеззараживания. Облучению подвергалась речная вода с цветностью в пределах 20–50 град, мутностью 1–30 мг/л, БПК₅ 5–10 мг/л и ХПК 29–63 мг/л, перманганатной окисляемостью 6–14 мг/л. В результате исследований выявлено, что изменение показателей в указанных пределах не влияет на дозу облучения, необходимую для достижения нормативных показателей по колииндексу и ОМЧ.

Аналогичные данные получены в процессе модельных испытаний на работающих УФ-станциях. Обеззараживание воды до нормативных показателей достигалось при модельном облучении воды р. Волги в г. Твери при цветности 80 град и р. Камы в г. Перми при цветности до 48 град. УФ-станция в г. Тольятти в течение более четырех лет стабильно обеспечивает нормативное обеззараживание при цветности воды 20–35 град, перманганатной окисляемости 4–10 мг/л.

Наличие в воде взвешенных веществ может привести к снижению эффективности обеззараживания при любом его методе [4]. При УФ-облучении присутствие взвеси может экранировать микроорганизмы от воздействия излучения, однако при правильно выбранной дозе необходимая степень обеззараживания может быть достигнута и при значительном содержании взвешенных веществ. Так, мутность воды, поступающей на УФ-станцию в г. Тольятти, достигала 10 мг/л; при эксплуатации УФ-установок в период паводка 1998–1999 гг. в г. Отрадном при мутности исходной воды до 145 мг/л и колииндексе до 30000 после УФ-облучения достигалось отсутствие общих колиформ в 100 мл.

Обработка воды УФ-излучением не приводит к образованию вредных побочных химических соединений. Определению изменения химического состава воды после облучения различными дозами и различными источниками УФ-излучения посвящено большое количество

научных работ. Как правило, в этих работах присутствие органических соединений анализировалось методами газовой и жидкостной хроматографии и масс-спектрологии, проводилось также биотестирование на различных организмах и водорослях. Единственным побочным продуктом, повышение концентрации которого было обнаружено при облучении природных вод, оказался формальдегид. Наибольшие концентрации формальдегида в этих исследованиях не превысили 3 % его ПДК в питьевой воде при облучении дозами более 100 мДж/см² неочищенной воды из поверхностного источника [5]. Работы по исследованию образования побочных продуктов при УФ-облучении проводились в 1998 г. в НИИ ЭЧиГОС им. А. Н. Сысина: установлено, что УФ-облучение не приводит к сколько-нибудь значительному образованию вредных побочных продуктов. Многие зарубежные исследователи также изучали мутагенные и токсические свойства воды. Так, после УФ-облучения воды из рек Рейна и Мааса в Нидерландах [6] заметных изменений обнаружено не было, в то время как хлорирование приводило к значительному росту мутагенного действия воды.

Высокая эффективность действия на различные типы микроорганизмов, незначительное влияние внешних факторов на эффективность обеззараживания и отсутствие вредных побочных продуктов позволяют рассматривать УФ-облучение как реальный практический метод обеззараживания в системах водоподготовки.

Внедрение нового регламента обеззараживания воды на очистных сооружениях требует его совмещения с существующими этапами очистки воды. Внедрение систем УФ-обеззараживания возможно в существующие, реконструируемые и новые очистные сооружения, имеющие различную технологическую схему водоподготовки. В настоящее время наиболее распространенной является схема водоподготовки, состоящая из обработки воды коагулянтами и флокулянтами, отстаивания и фильтрации. Правильная организация процессов физико-химической очистки позволяет значительно снизить требования к степени обеззараживания, которую должно обеспечить УФ-об-

лучение или другой специальный метод обеззараживания. При коагуляции, осаждении и фильтрации хорошо удаляются простейшие, имеющие размер более 1 мкм, и водоросли [7]. Физико-химическая очистка позволяет снизить концентрации простейших на 99–99,9 % [8], обеспечивает 90–99%-ную эффективность уничтожения бактерий и вирусов [7]. Роль осаждения и фильтрации также очень важна для удаления микроорганизмов, находящихся внутри и на поверхности взвешенных частиц, так как именно эти фракции трудно доступны при обеззараживании воды дезинфектантами.

Особого внимания требует задача предотвращения биообрастания и повторного роста микроорганизмов в распределительных сетях. В настоящее время в практике водоподготовки существуют два основных подхода для решения этой задачи – удаление из воды в процессе очистки органических «питательных» веществ и добавление химических реагентов, обеспечивающих «консервирующий» эффект перед подачей воды в разводящую сеть. Первый подход широко распространен в европейских странах, например, применяется в таких крупных городах, как Амстердам и Берлин. В этих городах проблемы биообрастания решаются высокой степенью удаления органического углерода и комплексом мер по поддержанию санитарного состояния сетей.

В качестве консервирующих химических веществ обычно применяется хлор и хлорсодержащие соединения. При решении задачи защиты сетей от биообрастания обеспечение остаточной концентрации дезинфектантов не несет нагрузки по обеззараживанию воды. Концентрации содержания реагентов в воде должны быть значительно ниже, чем для удаления патогенных микроорганизмов, однако важна длительность их наличия. Более того, если в процессе водоподготовки обеспечено нормативное обеззараживание, то нет строгих требований и к непрерывности подачи реагентов в сеть. Для обеспечения эффекта последствия наиболее оптимальным считается применение хлораминов. Хлорамины чрезвычайно слабо действуют на вирусы и, как правило, не рекомендуются для основного обеззараживания воды. Однако вследст-

вие более длительного сохранения в сетях и более активного, чем хлор, действия на био пленки в трубах [9] хлорамины находят все большее применение в практике водоподготовки.

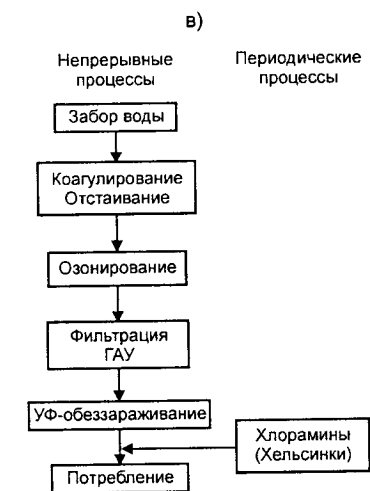
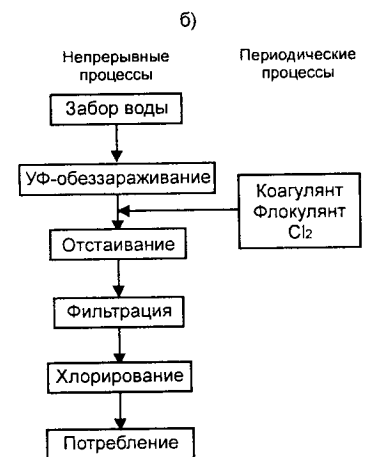
Наиболее распространенной является схема, в которой УФ-облучение в качестве основного метода обеззараживания применяется совместно с традиционными этапами физико-химической очистки и подачи небольших доз хлорреагентов перед сетями. Исходя главным образом из экономических соображений, предпочтительным является размещение УФ-оборудования в конце очистных сооружений, чтобы облучению подвергалась вода, имеющая наиболее высокий коэффициент пропускания УФ-излучения. Применение УФ-оборудования на заключительном этапе обработки воды не является единственным возможным техническим решением. В ряде случаев исходя из реальных условий очистных сооружений может быть выбрано другое место расположения УФ-установок. На практике выбор места должен осуществляться по результатам технологических обследований на конкретных очистных сооружениях (рисунок, а, б, в).

По схеме с расположением УФ-оборудования в конце очистки работают сооружения в Форте Бентон (США) [10], использующие в качестве источника воду р. Миссури. УФ-станция смонтирована при реконструкции очистных сооружений в 1987 г. Доза облучения в УФ-установках 25–40 мДж/см², перед поступлением воды в сеть подается хлор дозами до 1 мг/л. В течение всего срока эксплуатации система обеззараживания в Форте Бентон стабильно обеспечивает американские нормативы по микробиологии и побочным продуктам. УФ-комплекс на р. Темзе (Англия) успешно эксплуатируется с 1987 г. [11]. Комплекс состоит из 16 УФ-установок суммарной производительностью до 55000 м³/сут и дозой не менее 20 мДж/см². Установки расположены в конце очистных сооружений. Для предотвращения биообрастания разводящих сетей применяется хлор. Очистные сооружения для подготовки питьевой воды из Волчихинского водохранилища в г. Среднеуральске имеют производительность 3600 м³/ч. В новой схеме вода будет

последовательно обрабатываться в микрофильтрах, контактных осветлителях, напорных фильтрах и УФ-установках. В качестве вторичного обеззараживания предусмотрен ввод гипохлорита натрия.

УФ-комплекс на очистных сооружениях Автозаводского района г. Тольятти производительностью 400 тыс. м³/сут и дозой облучения 35–55 мДж/см² расположен на начальном этапе очистки воды, облучению подвергается вода из Куйбышевского водохранилища. Комплекс эксплуатируется с марта 1997 г., за весь период эксплуатации после облучения стабильно обеспечивалось питьевое качество воды по микробиологическим показателям. В период с апреля по октябрь для консервации воды при ее движении по очистным сооружениям перед смесителями периодически подается хлор дозами 0,5–1,5 мг/л (до внедрения УФ дозами до 9 мг/л). Вследствие наличия в исходной воде аммиака весь подаваемый хлор присутствует в воде в виде хлораминов, т. е. не приводит к образованию хлорорганических соединений. В качестве вторичного обеззараживания перед резервуарами чистой воды подается хлор. Для снижения хлорпоглощаемости и удаления органических предшественников образования хлорорганических соединений перед подачей вторичного хлора в 1999 г. на очистных сооружениях были проведены работы по оптимизации процесса коагуляционной обработки воды.

Комплекс УФ-обеззараживания воды на НФС г. Отрадного производительностью до 75 тыс. м³/сут эксплуатируется с октября 1997 г. и обеспечивает дозу облучения до 80 мДж/см². Источником водоснабжения служит р. Кинель, вода которой имеет чрезвычайно высокое значение колииндекса (до 300000), практически не зависящее от времени года. Вследствие высокого микробного загрязнения применение одной технологии хлорирования не всегда обеспечивало необходимую эффективность обеззараживания, до 9 % проб на выходе НФС не соответствовало норме даже при концентрации свободного остаточного хлора на выходе НФС 1,5–2 мг/л. Применение УФ-технологии обеспечило стабильное снижение колииндекса на этапе первичного обеззараживания на 4–6 порядков. УФ-



Возможные схемы оптимизации обеззараживания воды с использованием УФ-облучения

а – схема очистных сооружений в Лондоне (Англия), Форте Бентоне (США), Среднеуральске (Россия); б – то же, в городах Тольятти и Отрадном (Россия); в – то же, в Роттердаме (Нидерланды), Хельсинки (Финляндия)

обеззараживание эффективно в течение всех периодов года, в том числе в паводок и особенно зимой, когда эффективность хлорирования заметно снижалась. После внедрения УФ-обеззараживания дозы остаточ-

ного хлора перед подачей в сеть не превышали нормативных значений.

Важным преимуществом метода УФ-обеззараживания является возможность его внедрения в существующие традиционные технологические схемы без их значительного переустройства. В то же время применение УФ-обеззараживания не противоречит возможности дальнейшего развития очистных сооружений. Существуют примеры, когда УФ-облучение используется совместно с такими технологиями, как инфильтрация через почву, активированные угли, озонирование.

С 1998 г. УФ-облучение применяется как последняя ступень очистки на сооружениях подготовки питьевой воды г. Хельсинки. Производительность двух работающих станций составляет до 300 тыс. м³/сут. В технологической цепочке УФ-установки расположены после фильтров с гранулированными активными углями. В качестве вторичного обеззараживания возможно использование хлораминов. УФ-обеззараживание на сооружениях Бернплат в г. Роттердаме (Нидерланды) служит последним этапом после озонирования и фильтрации на ГАУ [12]. Целью применения УФ на этой станции является снижение микробного числа после фильтров. Высокая степень удаления органических соединений, которые могли бы стать питательными веществами при размножении микроорганизмов в сетях, позволила полностью исключить консервирующие реагенты.

Выводы

Задача оптимизации систем обеззараживания при водоподготовке является для водных хозяйств одной из наиболее актуальных. Применение традиционной и наиболее распространенной схемы двухступенчатого хлорирования не всегда может обеспечить выполнение современных нормативных требований по микробиологическим показателям и хлорорганическим соединениям.

В настоящее время УФ-облучение – это один из наиболее перспективных методов обеззараживания воды, обладающий высокой эффективностью по отношению к патогенным микроорганизмам, не приводящий к образованию вредных побочных продуктов. Основной задачей УФ-облучения является обеспечение обеззараживания воды до нормативного качества по микробиологическим показателям, необходимые дозы выбираются на основании требуемого снижения концентрации патогенных и индикаторных микроорганизмов.

Преимуществом метода УФ-обеззараживания является то, что УФ-оборудование легко вписывается в типовые технологические схемы и не требует значительных строительных работ на существующих сооружениях.

Метод УФ-облучения может рассматриваться как реальный элемент решения задачи обеззараживания при подготовке питьевой воды из поверхностных источников водоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hargy T. Ultraviolet light found to be effective against *Cryptosporidium* // *Water Technology*. 1999. Sept.
2. Environmental Technology Verification Program // EPA/600/R-98/160VS. 1999. May.
3. МУ 2.1.4.7.19.98. Методические указания по санитарному надзору за применением ультрафиолетового излучения в технологии подготовки питьевой воды. – М.: Минздрав России, 1998.
4. Holf J. C. The relationship of turbidity to disinfection of potable water // EPA-570/9-78-002. – 1978.
5. Malley Jr. Evaluation of by-products by treatment of groundwater with ultraviolet radiation // AWWARF and AWWA, Denver, US. – 1995.
6. Kruijthof J. C., Leer R. C. Practical Experience with UV-Disinfection in the Netherlands // Proc. AWWA Seminar on Emerging Technologies in Practice: Annual Conf., Cincinnati, Ohio. – 1990. 17–21 June.
7. Гончарук В. В., Потапенко Н. Г. Современное состояние проблемы обеззараживания воды // *Химия и технология воды*. 1998. Т. 20. № 2.
8. Methods for investigation and prevention of waterborne disease outbreaks // EPA/600/1-9/005. – 1990.
9. Biofouling and Biocorrosion in industrial water systems. – 1993. p. 91–106.
10. UV Light Disinfection Technology in Drinking Water Application: US EPA. – 1996, p. 4.11–4.16.
11. World's largest potable water UV plant for Tames water // *Water Services*. 1987. № 1096.
12. Kruijthof J. C. Ozonation and biological activated carbon filtration in Dutch drinking water treatment: Regional Conf. on Ozone, Ultraviolet Light, Advanced Oxidation Processes in Water Treatment. – Amsterdam, 1996.