

Н. Н. КУДРЯВЦЕВ, д-р физ.-мат. наук, ректор МФТИ, чл.-корр. РАН; С. В. КОСТЮЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук, генеральный директор; С. Г. ЗАЙЦЕВА, начальник технологического отдела (НПО «ЛИТ»)

Схемы применения ультрафиолетового обеззараживания в системах питьевого водоснабжения

Основной причиной применения ультрафиолетового облучения при подготовке питьевой воды является необходимость обеспечения обеззараживания в отношении устойчивых к хлору микроорганизмов: вирусов и цист простейших [1]. Важным фактором в распространении этого метода в России послужило появление методических указаний, регламентирующих его использование. В настоящее время существуют три таких документа [2–4]. Основной из них – «Санитарный надзор за применением ультрафиолетового излучения в технологии подготовки питьевой воды» – разработан в 1998 г. и описывает общие технические требования к оборудованию. Два более поздних документа специализированы на определении методов контроля и условий эффективного использования УФ-обеззараживания в отношении вирусологических и паразитарных показателей.

Микроорганизмы обладают различной устойчивостью к УФ-облучению. Большинство бактерий инактивируются на 3–4 порядка небольшими дозами облучения – 5–25 мДж/см² [5]. Разработчики первых методических указаний ориентировались на чувствительность к обеззараживанию колиформных микроорганизмов, которые на тот момент были единственным индикатором санитарно-эпидемиологической безопасности воды. В результате была определена минимальная требуемая доза облучения – 16 мДж/см². Цисты простейших, споры бактерий и вирусы более устойчивы к УФ-обеззараживанию, для их инактивации требуются дозы облучения 25–45 мДж/см². Поэтому в методических указаниях по вирусологическому и паразитологическому контролю рекомендуется использовать дозы 25–45 мДж/см², что согласуется и с современными требованиями к УФ-обеззараживанию в

странах Европейского союза и США [6; 7].

В России на данный момент наиболее актуальна проблема инактивации вирусов. Недостаточная эффективность традиционно используемой схемы обеззараживания хлорированием чаще всего проявляется неудовлетворительными пробами по содержанию колифагов. Как и вирусы вообще, колифаги устойчивы к воздействию соединений хлора, однако весьма чувствительны к УФ-облучению [8]. На рис. 1 показаны результаты опытно-промышленных исследований установки УФ-обеззараживания на воде р. Невы. В процессе испытаний УФ-оборудования было определено, что при исходном содержании колифагов в речной воде до нескольких сотен в 100 мл УФ-облучение дозами 25–40 мДж/см² обеспечивает их отсутствие.

На рис. 2 представлены результаты исследований с ис-

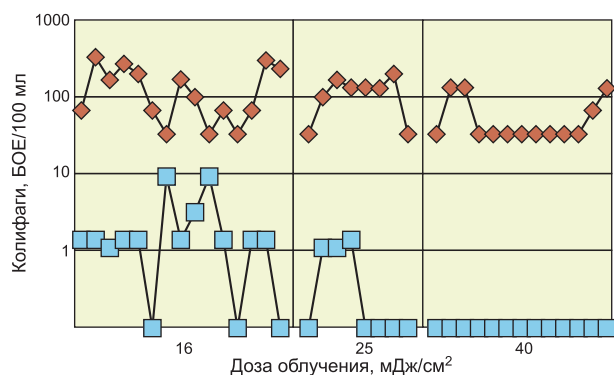


Рис. 1. Эффективность УФ-облучения в отношении колифагов

—♦— до облучения; —□— после облучения

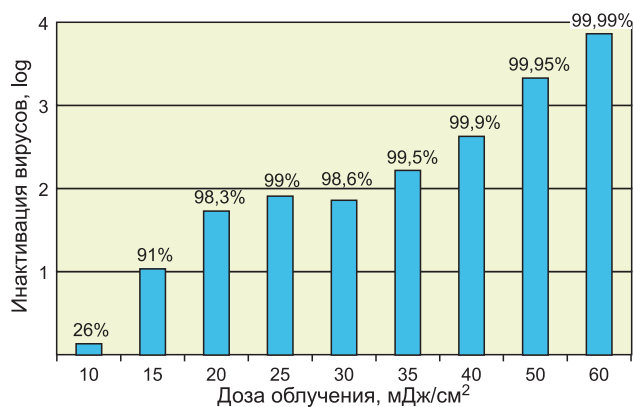


Рис. 2. Инактивация энтеровирусов УФ-облучением

кусственным заражением воды энтеровирусами и последующим облучением различными дозами. Для инактивации вирусов на 2 порядка требуется доза 25 мДж/см², а на 3 порядка – 40 мДж/см². Учитывая, что содержание вирусов в природной воде редко достигает значений более 100 в 100 мл, такая степень инактивации считается достаточной для обеспечения эпидемиологической безопасности воды. Среди паразитарных патогенов, распространяющихся с водой, непосредственную угрозу здоровью человека чаще всего представляют цисты лямблий и ооцисты криптоспоридий. В связи с высокой устойчивостью к окислению оболочки простейших долгое время считалось, что приемлемого средства борьбы с этими микроорганизмами не существует, а в качестве необходимых мероприятий рекомендовалось улучшение процессов коагуляции и фильтрации.

Зарубежные исследования, проведенные в конце 1990-х годов, показали, что УФ-излучение частично проникает через оболочку цист и повреждает ДНК микроорганизмов, лишая их инвазионных свойств. Инактивация этих микроорганизмов происходит и в том случае, когда оболочка остается целой и обнаруживается стандартными методами прямого подсчета под микроскопом. Поэтому для оценки эффективности УФ-обеззараживания необходимо определять инвазионные свойства простейших биологическим тестированием, основанным на инфицировании мышей [9; 10]. НПО «ЛИТ» совместно с Институ-

том медицинской паразитологии и тропической медицины им. Е. И. Марциновского были проведены исследования (аналогичные зарубежным) с искусственным заражением воды жизнеспособными возбудителями паразитарных заболеваний и последующей оценкой эффективности УФ-обеззараживания биопробами на мышах [11].

На рис. 3 показаны результаты биологического тестирования: до облучения все животные, задействованные в опыте, заразились лямблиозом и криптоспоридиозом, после облучения дозой 16 мДж/см² количество заразившихся животных снизилось в 2,5–3 раза, а после облучения дозой 40 мДж/см² и больше – зараженных не было. Данные лабораторных исследований были подтверждены наблюдениями за действующими водопроводными станциями, имеющими блоки УФ-обеззараживания в городах Тольятти и Отрадный.

В России в настоящее время контролируются в питьевой воде только цисты лямблий, которые чаще всего не обнаруживаются даже в водоемных источниках, поэтому вопрос их инактивации не актуален. В то же время в Европе и США

именно контроль за ооцистами криптоспоридий является основной мотивацией использования УФ-обеззараживания. О необходимости контроля за этим показателем заявляют и отечественные паразитологи, поэтому в ближайшем будущем можно ожидать появления этого показателя и в российских требованиях, предъявляемых к питьевой воде [12]. Для обеспечения эпидемиологической безопасности питьевой воды по всем показателям необходимо создание множественных барьеров. Одним из наиболее эффективных мероприятий в этом направлении является сочетание УФ-облучения и хлорирования.

Традиционная схема использования УФ-облучения в системах водоснабжения из подземных водоисточников предполагает размещение блока УФ-обеззараживания как можно ближе к потребителю, т. е. на насосной станции, подающей воду в город (рис. 4). Вопрос об использовании хлорирования в данном случае решается органами Роспотребнадзора и определяется в первую очередь состоянием и протяженностью разводящих сетей.

Системы питьевого водоснабжения, использующие для обеззараживания только УФ-облучение, эксплуатируются в Дмитровграде, Нефтекамске, Серпухове, Новокуйбышевске и других городах.

В Новокуйбышевске качество подземной воды, используемой для водоснабжения, и состояние водопроводных сетей позволяют отказаться от хлорирования для консервации воды (рис. 5). До 2004 г. обеззараживание на

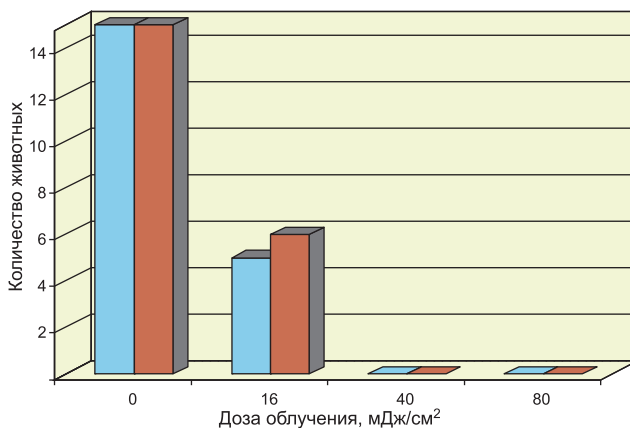


Рис. 3. Эффективность УФ-облучения в отношении цист паразитарных простейших
 ■ животные, заразившиеся лямблиозом; ■ животные, заразившиеся криптоспоридиозом

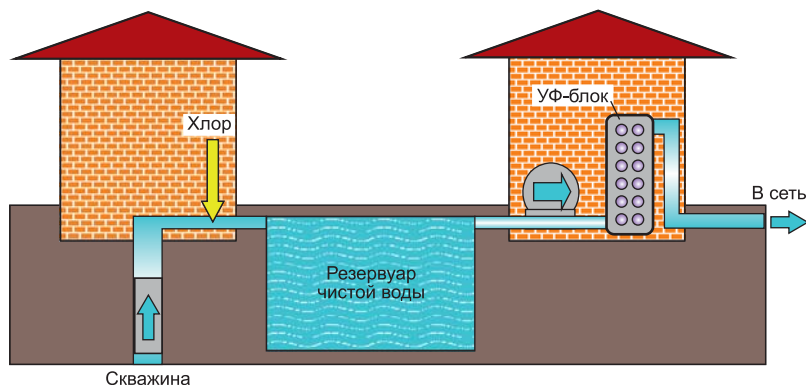


Рис. 4. Схема применения УФ-облучения в системах водоснабжения из подземных источников

водопроводной насосной станции № 1 (производительность 50 тыс. м³/сут) осуществлялось периодически жидким хлором, а на водопроводной насосной станции № 2 (производительность 24 тыс. м³/сут) применялись УФ-установки очистки воды старого образца. На насосно-фильтровальной станции № 2 старые установки обеззараживания были заменены новым оборудованием с амальгамными лампами, а на насосно-фильтровальной станции № 1 благодаря УФ-обеззараживанию было ликвидировано хлорное хозяйство.

В системах **питьевого водоснабжения из поверхностных водоисточников** возможны различные варианты размещения блока УФ-обеззараживания. Одним из определяющих факторов является качество воды на различных этапах очистки. Для обеспечения эффективного обеззараживания мутность обрабатываемой воды не должна превышать в среднем 2 мг/л (максимально до 5 мг/л). При расчете требуемой мощности УФ-оборудования учитывается коэффициент пропускания водой УФ-лучей. Этот показатель оказывает непосредственное влияние на количественный состав оборудования и затраты электроэнергии в процессе обеззараживания. Требуемая мощность УФ-оборудования

и энергопотребление для исходной и очищенной воды могут отличаться в три раза, в то же время при достаточно хорошем качестве исходной воды различие может быть незначительным. В условиях, когда качество исходной воды является приемлемым для использования УФ-обеззараживания, возможен вариант **размещения УФ-блока на этапе предварительной обработки**. Такая схема использования УФ-облучения позволяет не только повысить эффективность обеззараживания, но и создать условия для снижения образования хлорорганических соединений в питьевой воде.

Основная масса хлорорганических соединений образуется при первичном хло-

рировании. В условиях, когда УФ-блок размещается на этапе предварительной очистки, первичное хлорирование может осуществляться периодически низкими дозами (для поддержания санитарного состояния сооружений). Таким образом, применение УФ-облучения в начале схемы водоподготовки повышает в целом барьерную роль сооружений в отношении возбудителей заболеваний и создает условия для корректировки регламента первичного хлорирования, что в свою очередь позволяет уменьшить образование хлорорганических соединений. По такой схеме реализованы и успешно эксплуатируются УФ-станции в Тольятти, Отрадном, Жигулевске и Уфе. В стадии проектирования и строительства находятся станции УФ-обеззараживания в Самаре.

На очистных сооружениях Тольятти до внедрения УФ-облучения обеззараживание осуществлялось хлорированием в трех точках технологической цепи: на водозаборе, перед смесителями и перед резервуаром чистой воды. После ввода в эксплуатацию в 1996 г. УФ-станции производительностью 405 тыс. м³/сут хлори-



Рис. 5. Станция УФ-обеззараживания подземной воды в г. Новокуйбышевске

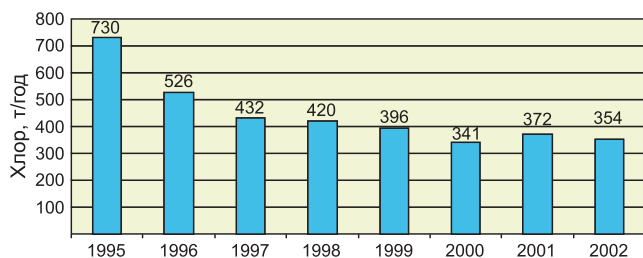


Рис. 6. Динамика снижения потребления хлора на очистных сооружениях г. Тольятти

1995 г. – до внедрения УФ-обеззараживания; 1996–1998 годы – внедрение УФ-обеззараживания; 1998–2002 годы – УФ-обеззараживание внедрено

рование на водозаборе было исключено, а ввод хлора перед смесителями осуществлялся низкими дозами в периодическом режиме. Эти мероприятия позволили сократить потребление хлора на станции в два раза и снизить концентрацию хлорорганических соединений в питьевой воде до нормативных величин. На рис. 6 показана динамика потребления хлора на очистных сооружениях Тольятти за период с 1995 по 2002 г.

На одной из водопроводных станций г. Череповца реализован уникальный вариант **размещения УФ-оборудования в середине схемы водоподготовки**. Качество речной воды не позволяло использовать УФ-облучение на этапе первичного обеззараживания, в то же время довольно остро стояла проблема образования хлорорганических соединений, поэтому УФ-блок производительностью 125 тыс. м³/сут был размещен после рециркуляторов-осветлителей перед фильтрами. В результате этой модернизации было исключено первичное хлорирование. Потребление хлора снизилось на 40%, концентрация хлороформа в питьевой воде – на 30%. При этом обеспечивается достаточно высокая эффективность обеззараживания осветленной воды. На рис. 7 представлены результаты

производственного контроля до и после УФ-облучения по показателю общие колиформные бактерии.

В большинстве случаев УФ-оборудование рациональнее располагать в конце очистных сооружений, чтобы облучению подвергалась вода, имеющая наиболее высокий коэффициент УФ-пропускания. Удачным решением является сочетание УФ-обеззараживания и хлораммонизации. Связанный хлор в меньшей степени способствует образованию хлорорганических соединений и дольше сохраняется в сети, а его недостаточно высокая эффективность в отношении устойчивых микроорганизмов полностью компенсируется УФ-облучением. Примером такого решения служат водопроводные станции Санкт-Петербурга [13]. Облучению подвергается вода, прошедшая полный цикл очистки, состоящий на разных станциях из двух- или одноступенчатой очистки и обеззараживания хлораминами. Все блоки УФ-обеззараживания размещаются в насосных станциях, подающих воду в город. Аналогичная схема водоподготовки используется на крупных станциях в Стокгольме (Швеция) и пригороде Ванкувера (Канада) [14]. В стадии строительства находится система УФ-обеззараживания для Нью-Йорка [15].

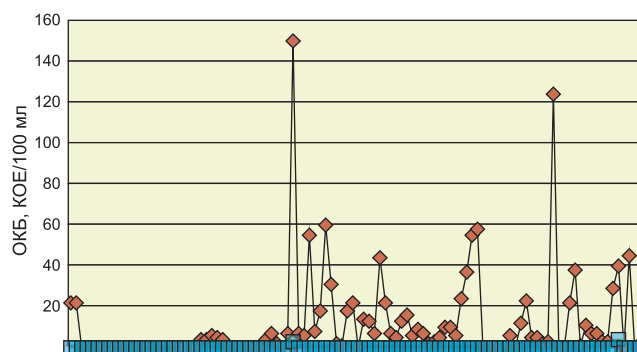


Рис. 7. Эффективность УФ-обеззараживания по показателю ОКБ на очистных сооружениях г. Череповца

—♦— до облучения; —■— после облучения

Концепции множественных барьеров наиболее полно соответствует комбинация УФ-облучения с современными методами глубокой очистки – озонсорбцией и мембранной фильтрацией [16]. Наиболее мелкие микроорганизмы (вирусы) могут попадать в питьевую воду и при глубокой очистке. Поэтому использование дополнительного этапа обеззараживания является необходимым элементом улучшения качества питьевой воды. Высокая степень удаления органических соединений позволяет значительно снизить затраты на УФ-облучение, поскольку вода имеет прозрачность более 90%. УФ-обеззараживание после озон-сорбционной очистки осуществляется в г. Хельсинки на двух станциях производительностью 120 и 168 тыс. м³/сут [17]. На станциях водоподготовки в городах Феникс и Перрис (США) УФ-обеззараживание осуществляется после этапа ультрафильтрации (производительность станций 67 и 90 тыс. м³/сут) [18; 19].

Выводы

Высокая эффективность УФ-облучения в отношении вирусов и цист простейших делает этот метод незаменимым элементом современной системы подготовки питьевой воды из

подземных и поверхностных водоисточников. В зависимости от качества воды по стадиям очистки и схемы водоподготовки возможны различные варианты размещения УФ-комплекса. Применение УФ-облучения актуально как для традиционной двухступенчатой схемы обработки природной воды, так и в комбинации с этапами глубокой очистки. Прогрессивный подход к обеспечению эпидемиологической безопасности питьевой воды подразумевает использование многоступенчатой схемы очистки и обеззараживания. Дополнение схемы обработки этапом УФ-облучения является одним из наиболее эффективных мероприятий в этом направлении, которое обеспечивает повышение барьерной роли сооружений в отношении вирусов и цист простейших, а также создает условия для корректировки регламента хлорирования с целью снижения содержания в питьевой воде хлорорганических соединений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cosman J., Wright H. UV Disinfection for drinking water // J. IUVA News. 2000. V. 2. № 3.
2. МУ 2.1.4.719-98. Санитарный надзор за применением ультрафиолетового излучения в технологии подготовки питьевой воды. – Минздрав России, 1998.
3. МУ 3.2.1757-03. Санитарно-паразитологическая оценка эффективности обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением. – Минздрав России, 2003.
4. МУК 4.3.2030-05. Санитарно-вирусологический контроль эффективности обеззараживания питьевых и сточных вод УФ-облучением.
5. UV Dose Required to Achieve Incremental Log Inactivation of Bacteria, Protozoa and Viruses / G. Chevretils, E. Caron, H. Wright, etc. // J. IUVA News. 2006. № 8 (1).
6. Hulsey R. A., Mackey H. E., Neemann J. J. Application of UV in North America and USEPA Guidance Manual for UV Disinfection // J. IUVA News. Dec. 2004. V. 6. № 4.
7. UV Drinking Water Disinfection – Requirements, Testing and Surveillance: Exemplified by the Austrian National Standards M 5873-1, M 5873-2 / R. Sommer, A. Cabaj, T. Haider, G. Hirschmann // J. IUVA News. Dec. 2004. V. 6. № 4.
8. Онищенко Г. Г. Эффективное обеззараживание воды – основа профилактики инфекционных заболеваний // Водоснабжение и сан. техника. 2005. № 12, ч. 1.
9. Campbell A. T. Inactivation of oocyst *Cryptosporidium parvum* by ultraviolet radiation // Water Res. 1995. 29:2583.
10. Clancy I. L., Bukhari Z. Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts by medium pressure ultraviolet light // Water technology. September. 1999.
11. Russia Battling Waterborne Contaminants with UV / S. V. Volkov, A. V. Krasnochub, A. V. Yakimenko, S. G. Zaitseva // J. Water Condition & Purification. Feb. 2003.
12. Романенко Н. А., Сергеев В. П., Рахманин Ю. А. О необходимости включения ооцист криптоспоридий в число показателей эпидемиологической безопасности питьевой воды // Гигиена и санитария. 2002. № 1.
13. Модернизация систем обеззараживания на очистных сооружениях водопровода (опыт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» / Ф. В. Кармазинов, В. Б. Чернов, С. В. Костюченко и др. // Водоснабжение и сан. техника. 2005. № 1.
14. Singh L., Neden D., Phelan T. Great Vancouver Implements the World's Largest Drinking Water UV Disinfection System. – (CD-ROM) Proceedings 3rd International Congress on Ultraviolet Technologies. – Wistler, Canada, International Ultraviolet Association. 24–27 May, 2005.
15. New York City Embraces UV Disinfection of its Water Supplies / P. D. Smith, D. Keesler, M. Valade, etc. – (CD-ROM) Proceedings World Congress on Ozone and Ultraviolet Technologies. – Los-Angeles, USA, International Ultraviolet Association. 27–29 August, 2007.
16. Kruihof J. C. Ozonation and biological activated carbon filtration in Dutch drinking water treatment / Regional Conference on Ozone, Ultraviolet Light, Advanced Oxidation Processes in Water Treatment. – Amsterdam, 1996.
17. Eira T., Veli-Pekka V., Heili H. Long-term Experience of Ozone and UV in Large Waterworks: Case Helsinki Water. – (CD-ROM) Proceedings World Congress on Ozone and Ultraviolet Technologies. – Los-Angeles, USA, International Ultraviolet Association. 27–29 August, 2007.
18. Startup of the first full-scale UV system for drinking water treatment in Arizona / S. Reddy, J. Matta, G. Roth, T. Friday. – (CD-ROM) Proceedings 3rd International Congress on Ultraviolet Technologies. – Wistler, Canada, International Ultraviolet Association. 24–27 May, 2005.
19. Awaad J. UV Disinfection Synergy with Ultrafiltration. – (CD-ROM) Proceedings 3rd International Congress on Ultraviolet Technologies. – Wistler, Canada, International Ultraviolet Association. 24–27 May, 2005.