

А. В. КОВЕРГА, начальник ПУ «Мосводоподготовка»; И. Ю. АРУТЮНОВА, начальник Центра по совершенствованию технологии водоподготовки ПУ «Мосводоподготовка» (МГУП «Мосводоканал»); С. В. КОСТЮЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук, генеральный директор; С. В. ВОЛКОВ, заместитель генерального директора; С. Г. ЗАЙЦЕВА, начальник технологического отдела (НПО «ЛИТ»)

## Пилотные испытания ультрафиолетового обеззараживания на московских станциях водоподготовки

Совершенствование методов аналитических исследований качества воды и развитие гигиенического направления науки неизбежно приводят к ужесточению требований, предъявляемых к питьевой воде, что в свою очередь обуславливает необходимость модернизации сооружений водоподготовки. Тенденции изменения требований к питьевой воде становятся очевидными задолго до изменения нормативных документов, что предопределяет необходимость и возможность разработки перспективных технологий подготовки воды.

Для очистных сооружений крупного города любая модернизация схемы водоподготовки связана с большими капитальными вложениями, поэтому вопрос о ее целесообразности требует тщательной проработки и проведения предварительных пилотных испытаний. В МГУП «Мосводоканал» такие работы проводит Центр по совершенствованию технологии водоподготовки, располагающий лабораторией и экспериментальными сооружениями. Поскольку питьевое водоснабжение Москвы осуществляется из двух водоисточников – Москворецкого и Волжского, экспериментальные базы расположены на Рублевской (РСВ) и Восточной (ВСВ) станциях водоподготовки.

В 2006–2007 годах были проведены опытно-промышленные испытания, целью которых являлась оценка эффективности применения ультрафиолетового обеззараживания в технологических схемах московских станций водоподготовки.

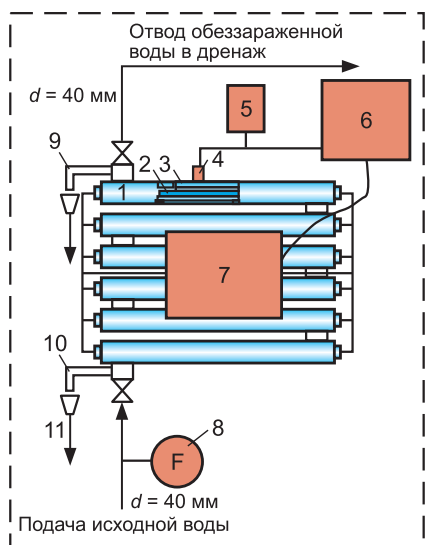
Основная задача УФ-облучения при обеззараживании питьевой воды – повышение барьерной роли очистных сооружений в отношении микроорганизмов, в том числе устойчивых к воздействию хлора [1]. Доза облучения выбирается в зависимости от концентрации микроорганизмов и взвешенных веществ в исходной воде. В большинстве случаев требуемые для обеззараживания дозы облучения составляют 25–40 мДж/см<sup>2</sup> [2]. Многолетний опыт применения УФ-обеззараживания в системах коммунального водоснабжения свидетельствует, что такие параметры, как УФ-пропускание воды, эффективная доза облучения, периоды между промывками могут значительно отличаться для различных объектов. Проведение длительных опытно-промышленных испытаний позволяет точно определить эти показатели и создать возможность выбора оптимальной модификации УФ-оборудования.

**Методы проведения исследований.** В процессе прове-

дения исследований оценивались: эффективность УФ-обеззараживания в отношении индикаторных микробиологических показателей; влияние УФ-облучения на фито- и зоопланктон; возможность образования побочных продуктов при обработке воды УФ-излучением; влияние предварительной обработки воды УФ-излучением на эффективность последующих этапов физико-химической очистки.

Для проведения опытно-промышленных испытаний на Рублевской и Восточной станциях водоподготовки были смонтированы пилотные установки УФ-облучения проточного типа УДВ-6/6. На рис. 1 приведена схема пилотной установки, а на рис. 2 – установка на Рублевской станции водоподготовки. Оборудование, используемое для испытаний, состоит из шести последовательно соединенных ламп в индивидуальных корпусах. Такая конструкция позволяет изменять дозу облучения в широких пределах за счет переменного расхода воды и количества работающих ламп.

На установки подавалась исходная вода из Волжского и Москворецкого водоисточников. В период проведения исследований поддерживался режим эксплуатации, обеспечивающий дозу облучения не менее 25 мДж/см<sup>2</sup>, определен-



**Рис. 1. Схема опытно-промышленного комплекса УФ-обеззараживания**

1 – камера облучения; 2 – УФ-лампа; 3 – кварцевый чехол; 4 – УФ-датчик; 5 – мультиметр; 6 – пульт управления; 7 – блок пускорегулирующей аппаратуры; 8 – расходомер; 9 – проботборный кран воды, поступающей на установку; 10 – проботборный кран воды, обработанной в установке; 11 – система отвода воды в дренаж

ную по результатам предварительных испытаний. Контроль дозы облучения осуществлялся на основе показаний датчика интенсивности излучения в УФ-установках, расхода воды (измеряемого расходомерами) и пропуска воды на длине волны 254 нм. Загрязнение кварцевых чехлов оценивалось по показаниям датчика интенсивности излучения с учетом влияния на них пропуска воды. При достижении загрязнения 20–30% проводилась химическая промывка установок 0,2-процентным раствором щавелевой кислоты.

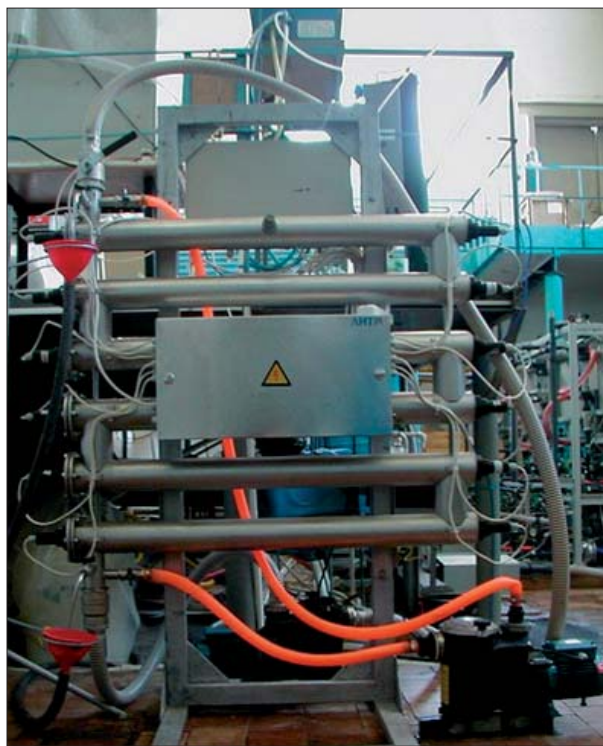
Испытания проводились в непрерывном режиме: на Московском водоисточнике с апреля 2006 г. по май 2007 г., на Волжском – с января по ноябрь 2007 г. Таким образом, для обоих водоисточников были отработаны режимы эксплуатации УФ-оборудования в различные периоды года. В

процессе исследований исходная вода водоисточников подвергалась обеззараживанию с целью моделирования максимально возможного микробного загрязнения. Эффективность УФ-обеззараживания определялась до и после УФ-облучения по изменению следующих показателей: общие колиформные бактерии (ОКБ), КОЕ/100 мл; термотолерантные колиформные бактерии (ТКБ), КОЕ/100 мл; общее микробное число (ОМЧ), КОЕ/1 мл; колифаги, БОЕ/100 мл; споры сульфитредуцирующих кластридий (СРК), КОЕ/20 мл. Бактериологические показатели определяли согласно МУК 4.2.1018-01 [3] и МУ 2285-81 [4].

Для изучения влияния физико-химических показателей качества воды на эффективность УФ-обеззараживания в пробах также анализировались: мутность, мг/л; цветность, град; перманганатная окисляемость, мг/л; коэффициент пропуска воды, %. Коэффициент

пропуска воды определяет долю УФ-излучения с длиной волны 254 нм, пропускаемого слоем воды толщиной 1 см, на спектрофотометре UVT-15.

Изучение возможного влияния УФ-облучения на эффективность последующей физико-химической очистки проводилось на основе моделирования процессов коагуляции, отстаивания и фильтрации в лабораторных условиях. Моделирование проводилось параллельно: с исходной водой без обработки; с водой, прошедшей первичное хлорирование (традиционная схема водоподготовки); с водой, прошедшей облучение на опытно-промышленном комплексе. Моделирование физико-химической очистки воды выполнялось согласно «Методике проведения технологических изысканий и моделирования процессов очистки воды на водопроводных станциях» [5] с использованием лабораторного флокулятора. Оценка влияния предвари-



**Рис. 2. Опытно-промышленный комплекс на экспериментальной установке очистки воды Рублевской станции водоподготовки**

тельной обработки проводилась по результатам сравнения основных физико-химических показателей после моделирования процессов очистки в лабораторных условиях для трех типов воды.

Возможность образования побочных продуктов в результате УФ-облучения оценивалась по результатам хромато-масс-спектрометрического анализа и анализа на содержание формальдегида до и после УФ-облучения. Определение полетучих и летучих органических соединений проводилось методом газовой хроматографии с использованием масс-спектрометрического детектора в Аналитическом центре контроля качества воды «РОСА».

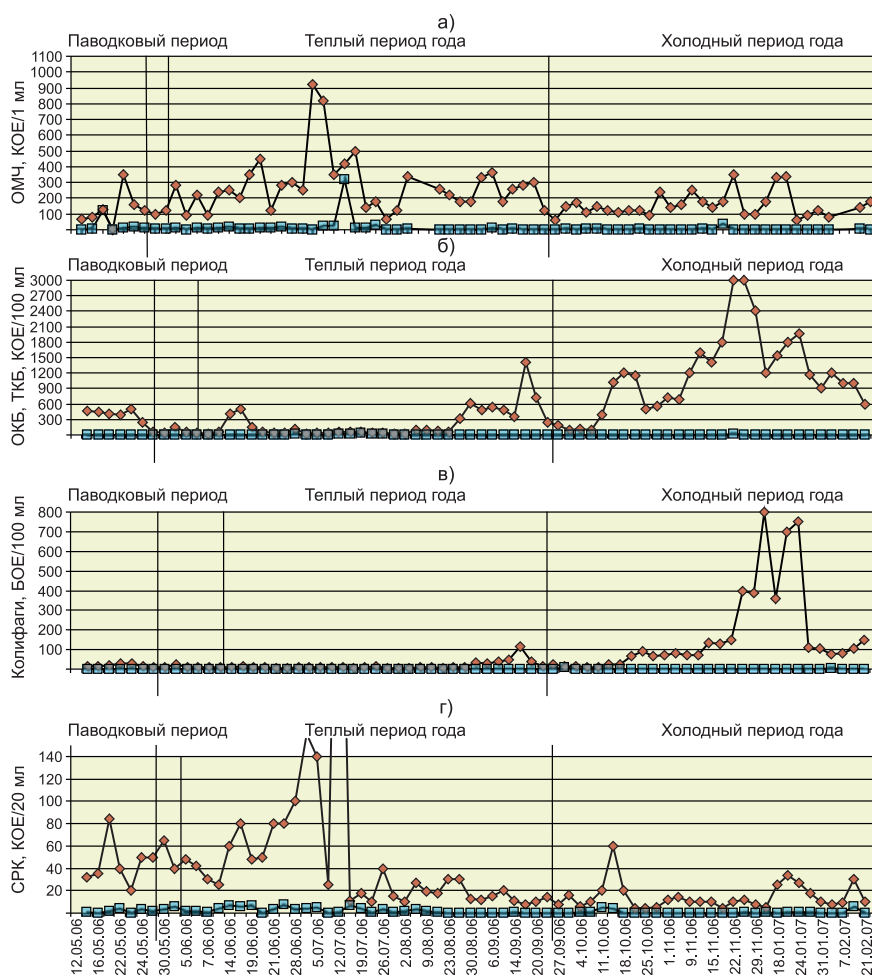
Оценка влияния УФ-облучения на фито- и зоопланктон осуществлялась по результатам серий модельных облучений речной воды различными дозами. Облучение проводилось на лабораторном приборе непроточного типа в емкостях объемом 1 л. Доза облучения обеспечивалась различным временем экспозиции. Проведение гидробиологического анализа воды на наличие фитопланктона осуществлялось согласно «Методическим указаниям по учету фитопланктона в лабораториях МГУП «Мосводоканал» [6], зоопланктона – согласно «Методике проведения гидробиологического анализа в лабораториях водопроводных станций МГУП «Мосводоканал». Подсчет организмов осуществлялся трижды: непосредственно после облучения, через 18 ч и через 24 ч после облучения с указанием вида и жизнеспособности при 16-кратном увеличении в камере Богорова или Кольквица.

**Результаты исследований. Эффективность обеззараживания** исходной воды Москво-

рецкого водоисточника, характеризующейся наличием постоянного фона микробного загрязнения, представлена на рис. 3. По отдельным показателям наблюдаются сезонные колебания: увеличение значений ОКБ, ТКБ и колифагов в холодный период года и значительное увеличение количества спор сульфитредуцирующих клостридий в теплый период года. В период проведения исследований паводок не сопровождался существенными изменениями значений микробиологических показателей. Значения ОКБ и ТКБ в течение всего периода исследований были достаточно близкими, поэтому они отражены одним графиком.

Качество речной воды по физико-химическим показателям не оказывало значительного влияния на эффективность обеззараживания. Мутность поступающей воды в течение исследуемого периода колебалась от 1,8 до 16 мг/л (среднее значение 6 мг/л), цветность – от 25 до 55 град (среднее значение 32 град), перманганатная окисляемость – от 3,8 до 6,7 мг/л (среднее значение 5,2 мг/л), коэффициент УФ-пропускания воды – от 48 до 73% (среднее значение 66%). Таким образом, качество воды Москворецкого водоисточника является приемлемым для применения УФ-обеззараживания.

По показателю ОМЧ во всех пробах воды было обеспече-

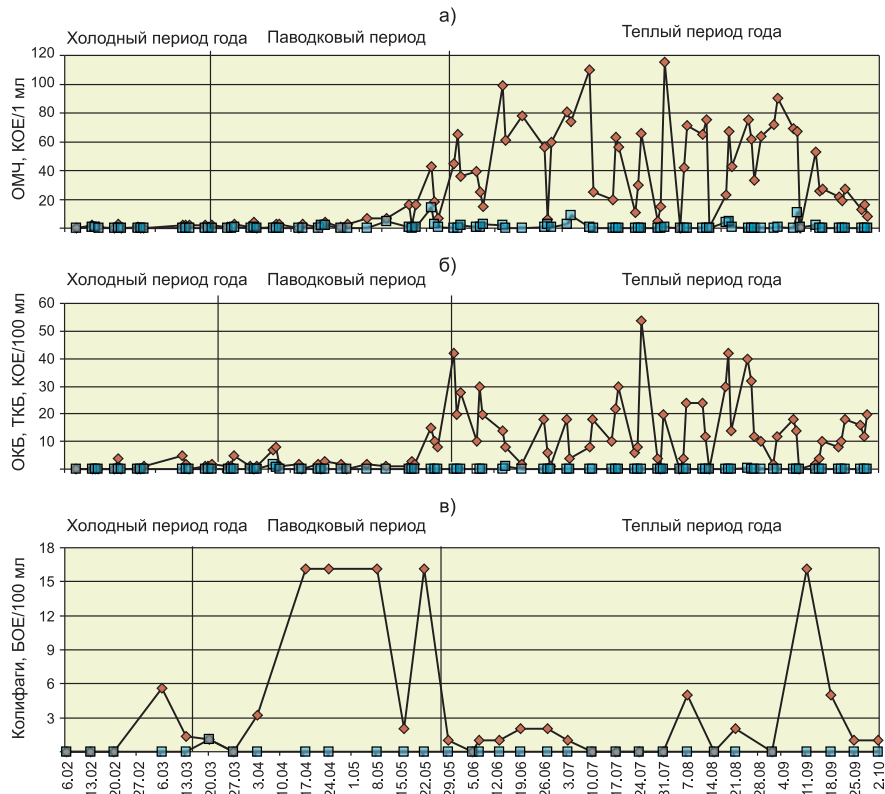


**Рис. 3. Эффективность УФ-обеззараживания по микробиологическим показателям на Москворецком водоисточнике**  
а – ОМЧ; б – ОКБ, ТКБ; в – колифаги; г – споры сульфитредуцирующих клостридий;  $\blacklozenge$  – до облучения;  $\blacksquare$  – после облучения

но снижение не менее чем на 2 порядка и на порядок меньше требуемого уровня СанПиН 2.1.4.1074-01 [7]. По показателям ОКБ и ТКБ было обеспечено снижение на 3–4 порядка, в отношении колифагов – на 2–3 порядка. Содержание спор кластридий снижалось с десятков до значений 0–1 КОЕ/20 мл. В большинстве проб воды после УФ-обеззараживания индикаторные микробиологические показатели отсутствовали.

Волжский водоисточник характеризуется меньшим микробным загрязнением, чем Москворецкий. Показатель колиформных микроорганизмов не превышает 100 КОЕ/100 мл, колифаги наблюдались периодически (от нескольких единиц до десятков БОЕ/100 мл), споры сульфитредуцирующих кластридий не обнаруживались. Результаты микробиологических анализов до и после УФ-обработки исходной воды Волжского водоисточника представлены на рис. 4.

По основным физико-химическим показателям волжская вода отличается от москворецкой более низким содержанием нерастворенных примесей, но более высоким содержанием растворенных органических соединений. Сезонные колебания качества воды выражены незначительно. Мутность поступающей воды в течение исследуемого периода колебалась от 0,1 до 1,9 мг/л (среднее значение 1 мг/л), цветность – от 18 до 101 град (среднее значение 66 град), перманганатная окисляемость – от 4 до 11 мг/л (среднее значение 9 мг/л). Коэффициент УФ-пропускания воды колебался от 39 до 75% (среднее значение 51%). Таким образом, качество воды в Волжском водоисточнике также является приемлемым для применения



**Рис. 4. Эффективность УФ-обеззараживания по микробиологическим показателям на Волжском водоисточнике**  
 а – ОМЧ; б – ОКБ, ТКБ; в – колифаги;  $\blacklozenge$  – до облучения;  $\blacksquare$  – после облучения

УФ-обеззараживания. Доза 25 мДж/см<sup>2</sup> обеспечивала соответствие микробиологических показателей требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 в 95% случаев уже на этапе первичной обработки.

**Прозрачность воды в УФ-спектре.** В процессе исследований была проведена оценка изменения коэффициента пропускания водой УФ-лучей не только в исходной воде, но и по этапам очистки. Прозрачность воды на длине волны 254 нм отражает наличие растворенных органических соединений и учитывается при подборе мощности УФ-оборудования. Таким образом, коэффициент пропускания оказывает непосредственное влияние на экономические показатели процесса УФ-обеззараживания. Если исходная вода Москворецкого и Волжского водоисточников характеризуется ко-

эффициентами пропускания 39–76%, то очищенная вода имеет значительно более высокие значения этого показателя, не подверженные при этом значительным колебаниям. В таблице приведены данные по коэффициентам пропускания воды.

**Влияние УФ-облучения на физико-химическую очистку.** Сравнение эффективности физико-химической очистки исходной воды и воды, прошедшей предварительное УФ-облучение в холодный и теплый периоды года, показало, что УФ-обеззараживание не оказывает влияния на эффективность процессов коагуляции, отстаивания и фильтрации.

**Влияние УФ-облучения на формирование побочных продуктов дезинфекции.** Влияние УФ-облучения на трансформацию соединений, содержащихся в природной воде, оценивалось

Тип воды	Коэффициент пропускания водой УФ-лучей на 1 см на длине волны 254 нм		
	минимальный	средний	максимальный
Исходная (Волжский водоисточник, ВСВ)	39	51	75
Исходная (Московорецкий водоисточник, РСВ)	48	66	73
После песчаных фильтров	80	86	89
После угольных фильтров	90	91	93

сравнением хроматограмм на летучие и полуметучие соединения до и после УФ-облучения исходной воды без дополнительной обработки. Анализ хроматограмм показал, что УФ-излучение на длине волны 254 нм не влияет на химическую форму полуметучих органических соединений, присутствующих в воде, и не вызывает образования новых полуметучих и летучих органических соединений. Концентрация формальдегида в пробах воды до и после УФ-облучения была ниже порога определения, т. е. менее 0,02 мг/л. Полученные в ходе исследований данные согласуются с результатами других опубликованных исследований по этой теме [8–10].

**Воздействие УФ-облучения на планктон.** Имеется ограниченное количество данных о воздействии УФ-облучения на фито- и зоопланктон, однако известно, что для инактивации этих организмов требуются большие дозы облучения, чем

для обеззараживания, по санитарным показателям. Поэтому исследования воздействия УФ-облучения на планктон проводились на модельном приборе ПИКЧ (доза 50, 100 и 150 мДж/см<sup>2</sup>) в период увеличения его концентрации в водоеме. Результаты экспериментов с зоопланктоном представлены на рис. 5.

После воздействия на зоопланктон УФ-облучения дозой 50 мДж/см<sup>2</sup> и более было выявлено снижение как общей концентрации, так и концентрации отдельных подвидов. Особенность процесса заключается в том, что отмирание и распад зоопланктона происходит не сразу после воздействия УФ-излучения, а нарастает с течением времени. Непосредственно после облучения изменение количества зоопланктона было незначительным, а через 24 часа общее число зоопланктона снижалось в среднем в 2 раза, количество живых организмов – в 5 раз. При этом общее

количество и количество живых экземпляров зоопланктона в речной воде, не подвергавшейся облучению, оставалось стабильным в течение этого периода. В облученной воде помимо снижения численности, определяемой по методике подсчета, визуально наблюдался распад отмерших организмов. С увеличением дозы облучения интенсивность процесса отмирания зоопланктона увеличилась незначительно.

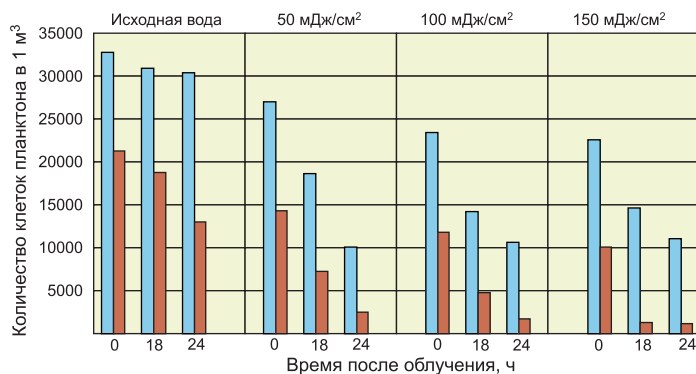
Эксперименты с облучением фитопланктона проводились в мае–июне. Количество фитопланктона в исходной воде Московорецкого водоисточника в этот период составляло порядка 10<sup>4</sup> клеток в 1 мл. По видовому составу в этот период преобладали диатомовые водоросли. Результаты исследований показали отсутствие какого-либо воздействия УФ-облучения на фитопланктон.

## Выводы

Результаты длительных пилотных испытаний УФ-технологии на московских станциях водоподготовки показали, что, несмотря на достаточно высокие значения физико-химических показателей качества речной воды, УФ-обеззараживание монохроматическим УФ-излучением не приводит к образованию побочных продуктов и позволяет уже на этапе первичной обработки обеспечить соответствие воды требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 по микробиологическим показателям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hargy T. Status of UV Disinfection of Municipal Drinking Water Systems in North America // J. Water Conditioning and Purification. 2002. № 6.
2. UV Dose Required to Achieve Incremental Log Inactivation of



**Рис. 5. Инактивация зоопланктона при воздействии УФ-облучения**  
 ■ общее количество; ■ живые экземпляры

- Bacteria, Protozoa and Viruses / G. Chevretils, E. Caron, H. Wright, etc. // J. IUVA News. 2006. № 8 (1).
3. МУК 4.2.1018-01. Санитарно-микробиологический анализ питьевой воды.
  4. МУ 2285-81. Методические указания по санитарно-микробиологическому анализу воды поверхностных водоемов.
  5. Методика проведения технологических изысканий и моделирования процессов очистки воды на водопроводных станциях. – М., ОАО «НИИ КВОВ», 2001.
  6. Методические указания по учету фитопланктона в лабораториях МГУП «Мосводоканал». – М., МГУП «Мосводоканал», 2005.
  7. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества.
  8. Application of a Test combination of three different Bioassays for the Investigation of genotoxic effects induced by UV irradiation / Th. Haider, R. Sommer, S. Knasmüller, etc. – (CD-ROM) Proceedings 1<sup>st</sup> International Congress on Ultraviolet Technologies. – Washington, DC, USA, International Ultraviolet Association. PO Box 1110, Ayr, ON, Canada N0B 1E0. 14–16 June. 2001.
  9. Genotoxic response of different drinking water samples treated with a standardized UV-disinfection (253,7 nm) flow-through system under practical conditions in a combination of three different bioassays / Th. Haider, R. Sommer, W. Pribil, etc. // Wat. Res. 2002. № 36.
  10. By-product formation during UV disinfection of a pre-treated surface water / G. I. Jpelaar, B. Der Veer, G. Medema, J. C. Kruithof. – (CD-ROM) Proceedings 2<sup>nd</sup> International Congress in Ultraviolet Technologies, Vienna, Austria, International Ultraviolet Association. PO Box 1110, Ayr, ON, Canada N0B 1E0. 9–11 July. 2003.