

М. В. БОГОМОЛОВ, начальник Управления канализации; А. В. КОВЕРГА, начальник ПУ «Мосводоподготовка» (МГУП «Мосводоканал»);
 С. В. ВОЛКОВ, заместитель генерального директора; С. Г. ЗАЙЦЕВА, начальник технологического отдела;
 С. В. КОСТЮЧЕНКО, канд. физ.-мат. наук, генеральный директор;
 М. Е. КУЗЬМЕНКО, А. С. ХАН, инженеры (НПО «ЛИТ»)

Международный конгресс озоновых и ультрафиолетовых технологий в Лос-Анджелесе

Ультрафиолетовое облучение и озонирование являются одними из наиболее перспективных и динамично развивающихся водных технологий. В августе 2007 г. в Лос-Анджелесе (Калифорния, США) проходил объединенный Международный конгресс по ультрафиолетовым и озоновым технологиям, организованный Международной ультрафиолетовой ассоциацией (IUVA) и Международной озоновой ассоциацией (IOA). Конгресс впервые проводился в формате объединенного форума для двух ассоциаций. До этого каждая из ассоциаций один раз в два года проводила собственные конгрессы. В рамках объединенного конгресса в течение трех дней проходили сессии по различным темам, на которых были представлены 289 устных докладов, постерные доклады. Также были организованы выставка и технические туры на объекты коммунального хозяйства, где используются озоновые и ультрафиолетовые технологии.

С докладами на конгрессе выступили специалисты из США, Канады, Германии, Австрии, Англии, Нидерландов, Бельгии, Эстонии, Швейцарии, Франции, Испании, Италии, Финляндии, Турции, Мексики, Аргентины, Кубы, Израиля, Индии, Австралии, Японии, Китая, Кореи. Россию

представили специалисты компании НПО «ЛИТ», которые сделали устный доклад о крупнейшей в мире системе ультрафиолетового обеззараживания питьевой воды, действующей в Санкт-Петербурге. На конгрессе присутствовали также ведущие специалисты МГУП «Мосводоканал».

Темы докладов условно можно разделить на три категории: озонирование, УФ-облучение, технологии глубокого окисления. Количество докладов по УФ-облучению и озонированию было равным, 1/5 часть всех докладов была посвящена технологиям глубокого окисления с использованием УФ-облучения, озонирования, перекиси водорода и диоксида титана. Поскольку непосредственное сочетание технологий озонирования и УФ-облучения происходит именно при применении глубокого окисления, эта тема и послужила мотивацией для объединения конгрессов.

В статье представлены обобщенные тезисы по основным направлениям конгресса, сформулированные авторами по итогам обмена мнениями о прослушанных докладах. При описании конкретных примеров и фактов в скобках указана фамилия докладчика и в некоторых случаях ключевые слова (на английском языке) для воз-

можности поиска публикаций по интересующей теме.

Общие тенденции. В докладах специалистов служб санитарного надзора и институтов гигиенического профиля указывалось, что проблема периодических вспышек инфекционных заболеваний, передающихся водным путем, сохраняется во всех странах. Для повышения безопасности питьевой воды при водоподготовке в качестве основного направления предлагается увеличение количества ступеней очистки и использование комбинации различных методов обеззараживания. Среди индикаторов микробного загрязнения особое внимание уделяется паразитарным и вирусологическим показателям. Согласно руководствам и требованиям по подготовке питьевой воды, технологические схемы должны обеспечивать инактивацию вирусов и паразитарных простейших не менее чем на 2–3 порядка.

Важным фактором в комплексе мероприятий по повышению эпидемиологической безопасности питьевой воды является снижение содержания органических соединений, которые могут способствовать вторичному загрязнению воды в сетях. Для контроля за этими показателями в США и Европе принята практика определения

в воде общего и ассимилируемого органического углерода.

В аспекте санитарной и токсикологической безопасности питьевой воды практически во всех докладах гигиенистов говорилось о необходимости контроля за побочными продуктами, образующимися в процессе водоподготовки, а также за так называемыми микрозагрязнителями (micro-pollutants). Этот термин объединяет широкий перечень соединений, к которым относятся антропогенные вещества, оказывающие неблагоприятное воздействие в микроконцентрациях.

Большое внимание уделялось повторному использованию сточных вод как в промышленности, так и для питьевых целей, что актуально для регионов с засушливым климатом (юг США, Австралия, Израиль и др.). Различают прямое и не прямое использование сточных вод для питьевых целей. В первом случае речь идет о пополнении водоносных горизонтов, смежных с предназначенными для питьевых нужд. Во втором случае восстановленная сточная вода направляется непосредственно в резервуары чистой воды.

Озонирование широко распространено в США при подготовке питьевой воды из поверхностных водоемов. В штате Калифорния насчитывается 38 водопроводных станций, использующих озонирование. Большинство станций имеют производительность порядка 20 тыс. м³/сут, но есть три очень крупных станции (Joseph Jensen WTP, LAAFP, Skinner WTP) производительностью от 2271000 до 2838750 м³/сут.

К 2013 г. количество станций, использующих озон, должно увеличиться до 48. Озонирование применяется для разложения органических веществ,

контроля запахов и привкусов, улучшения условий коагуляции, снижения концентрации побочных продуктов хлорирования и обеспечения барьерной функции в отношении цист лямблий. Метод применяется на этапах предварительной, промежуточной и финишной обработки воды. Чаще всего используется предварительное и промежуточное озонирование и их сочетание.

Дозы озона для обработки воды из поверхностных водоемов составляют 1,3–6,5 мг/л (С. Thompson). Основной тенденцией развития и модернизации станций озонирования является переход от систем генерации озона из воздуха к системам генерации озона из кислорода. Это позволяет повысить производительность системы, снизить эксплуатационные затраты и избежать поломок генераторов из-за недостаточной осушки воздуха (G. F. Stolarik). Аналогичные тенденции наблюдаются и в Европе: в докладе о станциях озонирования и УФ-обеззараживания в г. Хельсинки сообщалось о том, что переход на систему генерации озона из кислорода позволил сократить расходы на эксплуатацию системы озонирования на 20% (Т. Eira).

Много докладов было посвящено контролю за образованием броматов при озонировании питьевой воды. Основываясь на экспериментах с животными, броматы относят к канцерогенным веществам. Поскольку в исследованиях с животными не удалось определить безопасную дозу броматов, первоначально US EPA (Агентство по защите окружающей среды, США) было предложено установить максимально допустимую концентрацию броматов на уровне 0 мг/л. Однако, учитывая до-

стоинства озонирования при обработке воды и аналитические возможности измерения броматов, был принят максимально допустимый уровень 10 мкг/л (D. E. Kimbrough). С целью уменьшения образования броматов применяются методы, снижающие в исходной воде (до озонирования) концентрацию бромидов, являющихся предшественниками образования броматов. Снижение концентрации бромидов происходит за счет окисления их до броматов. Для этого используются соединения хлора (D. E. Kimbrough), а также хлорамины (Eberle).

В США озонирование при обработке сточных вод применяется с 1970-х годов, однако его популярность снизилась с развитием систем УФ-обеззараживания. С 1980 по 1989 г. количество станций очистки сточных вод, использующих озонирование, увеличилось с 10 до 45, а с 1989 по 1999 г. в эксплуатацию было введено только 4 новых системы. Ряд станций перешли на УФ-обеззараживание из-за более низких эксплуатационных расходов. Озонирование применяется не только для обеззараживания, но и для повышения эффективности биологической очистки при дозировании в аэротенки, а также для интенсификации доочистки на биофильтрах (J. Drago). Озонирование при обработке сточных вод достаточно широко распространено в Японии – четыре из семи докладов в секции «Озонирование сточных вод» были представлены специалистами из Японии (N. Nishimura, Y. Kato).

В Германии на одной из станций при обработке сточных вод по схеме: биологическая очистка – озонирование – биофильтры – УФ-обеззараживание ис-

пользуется комбинация озонирования и УФ-облучения. Такая схема обработки позволяет обеспечить глубокую очистку сточных вод (в том числе от продуктов фармакологии) и надежное обеззараживание. Доза озона составляет 5–10 мг/л, эксплуатационные затраты на озонирование – 0,01–0,02 евро/м³ воды (A. Ried).

Популярность **технологии ультрафиолетового облучения** в подготовке питьевой воды, в первую очередь, обусловлена необходимостью контроля по таким показателям, как ооцисты криптоспориций, цисты лямблий и вирусы. При подготовке питьевой воды в Европе и США УФ-облучение используется в основном в конце технологической схемы дополнительно с другими методами обеззараживания. Проектная доза облучения составляет, как правило, 40 мДж/см². В США, Германии и Австрии существуют нормативные документы, регламентирующие применение УФ-облучения для обеззараживания питьевой воды. В соответствии с этими документами, в Западной Европе запрещено использование УФ-ламп, имеющих в своем спектре излучения длину волн ниже 240 нм, из-за возможности образования нитратов, при этом в США такого ограничения нет (R. Sommer).

Специалистами санитарного департамента Лос-Анджелеса был представлен обзор методов дезинфекции, применяемых в США на этапе окончательного обеззараживания перед подачей воды в сеть (N. Munakata). Из обзора следует, что УФ-облучение используется в основном в сочетании с хлорированием и озонированием. При этом УФ-обеззараживание внедрено на станциях подготовки воды, составляющих 21%

общего количества. В то же время озонирование на последней ступени обеззараживания ограничивается 0,2%. В США, как и в России, источниками централизованного водоснабжения являются преимущественно поверхностные водоемы. В процессах водоподготовки практически в 100% случаев применяется хлорирование (в основном перед подачей воды в сеть) и достаточно часто – озонирование (на предварительных этапах подготовки). Тем не менее данные о частоте использования УФ-облучения вполне адекватно показывают его долю, поскольку в США этот метод применяется именно в конце схемы водоподготовки дополнительно к существующему методу обеззараживания. Большое количество докладов, описывающих пилотные испытания и проекты крупных станций УФ-обеззараживания, свидетельствует о том, что в ближайшие годы можно ожидать увеличения количества станций водоподготовки с применением УФ-облучения.

Одним из факторов, обуславливающих рост популярности УФ-метода в США, является документ (The Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule), разработанный US EPA. В документ входит перечень требований и мероприятий, касающихся обеспечения безопасности питьевой воды в отношении ооцист криптоспориций. В соответствии с этим документом, УФ-обеззараживание является одним из эффективных способов контроля ооцист криптоспориций. Кроме того, одно из требований – использование не менее двух различных методов обеззараживания для поверхностных водоисточников, вода которых по своим физико-химическим свойствам не нуж-

дается в обработке. При этом наиболее часто в качестве дополнительного метода применяется УФ-обеззараживание.

В рамках мероприятий, направленных на выполнение требований The Long Term 2, были представлены проекты УФ-систем для крупных городов: Бостон, Сан-Франциско и Нью-Йорк.

На станции водоподготовки Massachusetts Water Resources Authority, снабжающей питьевой водой г. Бостон, УФ-обеззараживание используется совместно с озонированием. Производительность станции составляет 1530900 м³/сут (G. Sullivan).

Система УФ-обеззараживания питьевой воды в Сан-Франциско имеет производительность 1190700 м³/сут, при этом УФ-обеззараживание применяется совместно с предварительным хлорированием (E. Sebastiani).

О проектировании системы УФ-обеззараживания для Нью-Йорка докладывалось еще на предыдущей конференции (2005 г.). Проектная производительность системы составляет 8731800 м³/сут, УФ-обеззараживание будет проводиться дополнительно к существующей системе хлорирования. Ввод в эксплуатацию запланирован на 2010 г. (P. D. Smith), в настоящее время ведутся строительные работы.

Применение УФ-облучения для обеззараживания сточных вод является основным методом при проектировании новых станций и наиболее распространенным среди действующих крупных станций. Основная мотивация при этом – защита окружающей среды от негативного воздействия соединений хлора и безопасность эксплуатации. При обеззараживании сточных вод

в основном используются системы лоткового типа. Дозы облучения составляют от 15 до 60 мДж/см² в зависимости от требований к обеззараживанию. При вторичном использовании сточных вод распространена доочистка на мембранах и облучение высокими дозами (40–60 мДж/см²). Требования к сточным водам, сбрасываемым в водоемы, как правило, более лояльные, чем в России (от тысячи до нескольких тысяч колиформных микроорганизмов в 100 мл). Дозы облучения в этом случае составляют 15–40 мДж/см² (В. Petri).

При обеззараживании природных вод и обработке сточных вод наиболее часто применяются высокоэффективные амальгамные лампы, имеющие КПД преобразования потребляемой электроэнергии в бактерицидную порядка 40%, срок службы ламп 12 тыс. ч (М. Sasges).

Большое количество докладов было посвящено описанию проектирования, аттестации и эксплуатации УФ-станций. В настоящее время проектирование УФ-систем осуществляется с помощью методов компьютерного моделирования, позволяющих рассчитать распределение потоков воды и дозы облучения в зоне обеззараживания.

Для аттестации УФ-систем на соответствие проектной дозе облучения в Европе и США используется метод биодозиметрии. Суть метода заключается в определении дозы облучения по достигаемой степени инактивации микроорганизмов. В настоящее время существует несколько протоколов проведения аттестационных тестов биодозиметрии, разработанных Австрийским институтом стандартов (ONORM M 5873-2), US EPA (Draft 6/03) и Германской

ассоциацией по проблемам воды и газа (DVGW). Протоколы имеют некоторые различия в обработке результатов и проведении процедуры, однако в целом сопоставимы (R. Sommer, A. Sabaj) и позволяют провести адекватную оценку надежности УФ-оборудования.

В секции «Синергия озона и УФ-облучения» были представлены доклады, касающиеся **совместного использования озона и УФ-облучения при подготовке питьевой воды**. В представленных докладах речь шла о последовательном применении озона (как предварительного окислителя) и УФ-облучения (для обеззараживания). Синергетический эффект при этом отсутствует, но предварительная обработка воды озоном позволяет повысить прозрачность воды на длине волны 254 нм и за счет этого снизить расходы на УФ-облучение (N. Burns). Известным примером сочетания озонирования и УФ-облучения являются две станции в г. Хельсинки – Pitkakoski производительностью 180 тыс. м³/сут и Vanhakaupunki 120 тыс. м³/сут. На станциях проводится озонирование воды после песчаных фильтров перед угольными и последующее УФ-обеззараживание (Т. Eira). На этих сооружениях решается также задача по удалению микроорганизмов, образующихся вследствие повторного роста на угольных сорбционных фильтрах, установленных после станции озонирования воды.

К процессам глубокого окисления (Advanced Oxidation Process – AOP) относятся различные технологии, приводящие к образованию в воде радикалов ОН[•], имеющих высокий окислительный потенциал, уступающий только фтору. Наиболее распространены и изучены технологии, сочетающие: H₂O₂ +

+ УФ; O₃ + УФ; H₂O₂ + O₃; TiO₂ + УФ. Схема предполагает предварительную обработку воды окислителями (озон или перекись водорода) и последующее УФ-облучение воды. В случае с диоксидом титана имеет место фотокаталитический процесс, при котором диоксид титана служит либо прикрепленным катализатором внутри камеры облучения, либо вводится в воду в порошкообразном виде.

Технологии глубокого окисления эффективны для удаления соединений, обуславливающих неприятные запахи и привкусы воды, – геосмина и метилзобарниола (F. Javiet). Однако основной мотивацией использования технологии является необходимость удаления из воды микрозагрязнений: продуктов фармакологии, пестицидов и гербицидов (атразин), устойчивых антропогенных загрязнений (1,4-диоксан и нитрозодиметиламин – NDMA). Эти соединения объединяет высокая устойчивость ко всем методам очистки, включая обратный осмос, а также очень низкие концентрации, оказывающие негативное воздействие (J. Kruithof, W. S. Lobo).

О необходимости контроля за этой группой соединений указывалось во многих докладах, в том числе на пленарной сессии представителя US EPA (S. Gutierrez) и профессора Венского медицинского университета (R. Sommer).

Очистка воды от продуктов фармакологии и персональной гигиены приобретает все большую актуальность в развитых странах мира. Широкое использование гормональных препаратов и антибиотиков в лекарственных и бытовых средствах, а также в животноводстве приводит к попаданию этих веществ в водоемы (со

сточными водами). Традиционные способы очистки сточных и природных вод не эффективны в отношении этой группы соединений, и продукты фармакологии обнаруживаются в питьевой воде. Употребление человеком питьевой воды, содержащей микроконцентрации гормонов и антибиотиков, приводит к появлению устойчивых штаммов микроорганизмов и может влиять на гормональный фон.

Удаление из воды пестицидов актуально для стран с развитой аграрной промышленностью, например для Англии и Голландии. Пестициды и гербициды последнего поколения не удаляются даже в процессе обратного осмоса и представляют опасность для здоровья людей.

Антропогенные загрязнители представляют опасность как в случае аварийного поступления в водоемы, так и при постоянном фоновом присутствии в низких концентрациях. Развитие аналитических методов обнаружения различных соединений, совершенствование методов определения канцерогенности и мутагенности соединений неизбежно приводят к пополнению списка показателей, контролируемых в питьевой и природной воде. Ситуация с NDMA является ярким примером этого явления. В 1998 г. NDMA с концентрацией 0,15 мкг/л был обнаружен в скважине, используемой для питьевого водоснабжения в Северной Калифорнии (США). Мониторинг других источников водоснабжения выявил, что NDMA обнаруживается в подземных и природных водах, а также в питьевой воде. NDMA образуется при сгорании ракетного топлива и в некоторых промышленных процессах. Исследования, проведенные

Департаментом здоровья и сферы услуг США (Department of Health and Human Services – DHS), показали, что определенные процессы дезинфекции (озонирование, хлорирование) и ионный обмен могут приводить к образованию NDMA в питьевой воде. Поскольку NDMA и другие нитрозамины относятся к сильным канцерогенным соединениям (Title 22, California Code of Regulations, Section 12000), в 1998 г. DHS был установлен нормируемый уровень (notification level) для NDMA – 0,002 мкг/л. Однако, учитывая, что современные методы анализа не позволяют обнаружить такую концентрацию, был принят нормируемый уровень 0,02 мкг/л, а в 2005 г. – 0,01 мкг/л. В 2004 г. был разработан метод 521 для определения нитрозаминов в питьевой воде. Полное описание метода доступно на официальном сайте калифорнийского департамента здоровья населения (www.cdph.ca.gov/certlic/drinkingwater/Pages/NDMA.aspx).

В докладах, представленных на конгрессе, NDMA наиболее часто использовался в качестве индикатора эффективности процесса глубокого окисления, так как это соединение является наиболее стойким к разложению (J. Veugrum).

Было сделано несколько обзорных докладов по сравнению различных методов глубокого окисления (W. S. Lobo, E. J. Rosenfeldt, J. Malley). Результаты исследований различных авторов порой носили противоречивый характер в части выбора оптимальной технологии. Тем не менее основой всех представленных проектов и действующих станций, использующих технологию глубокого окисления, является сочетание перекиси водорода и

УФ-излучения, что свидетельствует о перспективности этого направления. При прямом фотолизе, применяемом для разложения некоторых продуктов фармакологии и других соединений, наиболее эффективны УФ-лампы среднего давления (за счет широкого спектра излучения). В сочетании с окислителями значения эффективности ламп низкого и среднего давления сравнимы (G. F. Jpelaar, M. Patel, C. Williamson). Дозы облучения, требуемые для индукции процесса глубокого окисления, составляют 200–600 мДж/см², т. е. на порядок больше, чем для обеззараживания. Например, технология обработки воды дозой облучения 300 мДж/см² и дозой перекиси водорода 10 мг/л обеспечивает снижение колифага MS-2 на 8 порядков, тогда как для эпидемиологической безопасности требуется снижение всего на 3–4 порядка (G. F. Jpelaar). Во всех докладах, описывающих реальные проекты или станции, использующие технологию глубокого окисления, приводятся приблизительно одинаковые параметры: требуемая степень снижения NDMA 1,2 log, доза облучения 500–600 мДж/см², доза перекиси водорода 3–10 мг/л (J. Neemann, R. Munter, B. J. Martijn, P. S. Kamp).

Процессы глубокого окисления применяются при подготовке питьевой воды, а также в схемах прямого и непрямого повторного использования сточных вод для питьевого водоснабжения.

По технологии подготовки питьевой воды было представлено несколько проектов станций в США и Канаде для подземных водоисточников, в которых обнаружены 1,4-диоксан или NDMA. По результатам лабораторных и опытно-

промышленных испытаний технологий глубокого окисления ($H_2O_2 + УФ$; $O_3 + УФ$; $TiO_2 + УФ$) для станции водоснабжения г. Онтарио (Канада), использующей воду подземного источника, было определено, что все три технологии обеспечивают требуемое снижение 1,4-диоксана. Для промышленного внедрения была рекомендована система $H_2O_2 + УФ$ как наиболее экономичная и простая в эксплуатации (L. Wojcicka).

При обработке воды поверхностных водоисточников технология глубокого окисления применяется в Голландии (с 2004 г.) на станции Andijk, снабжающей питьевой водой г. Амстердам. Система глубокого обеззараживания предназначена для защиты от органических гербицидов и обеззараживания, а также для контроля за другими соединениями. Основным индикаторным соединением является атразин. Производительность блока глубокого обеззараживания составляет 3 тыс. $m^3/ч$. На станции используется технология $H_2O_2 + УФ$. Источниками УФ-излучения служат лампы среднего давления, доза облучения составляет 600 мДж/см^2 , доза перекиси водорода 6 мг/л. Расход электроэнергии на процесс глубокого окисления составляет $0,56 \text{ кВт/м}^3$. После блока глубокого окисления вода подвергается сорбции на угольных фильтрах для снижения содержания ассимилируемого органического углерода, а также нитритов, образующихся при облучении высокими дозами лампами среднего давления (B. J. Martijn, P. S. Kamp).

Вопрос о необходимости использования угольных фильтров после технологии глубокого окисления в настоящее время широко обсуждается. На

станции Andijk угольные фильтры на момент внедрения этой технологии уже были, к тому же станция Andijk – одна из многих систем глубокого окисления, где используются лампы среднего давления, что приводит к образованию побочных продуктов. В других представленных проектах с амальгамными лампами этап доочистки на угольных фильтрах отсутствовал.

В 2006 г. в Канаде в системе питьевого водоснабжения г. Корнвол (Cornwall) введена в эксплуатацию система глубокого окисления на основе технологии $H_2O_2 + УФ$. Производительность станции составляет $98410 \text{ м}^3/\text{сут}$. Система запроектирована для обеспечения инактивации цист лямблий на 4 log и снижение геосмина на 1 log. Удаление остаточной перекиси водорода осуществляется гипохлоритом натрия.

Доочистка сточной воды для повторного использования в питьевых целях производится всеми доступными технологиями, включая обратный осмос и глубокое окисление. Мотивацией для такой многоступенчатой очистки является возможность присутствия в сточной воде неизвестных и неконтролируемых в настоящее время соединений, которые могут представлять опасность для здоровья людей.

В Австралии, где наблюдается серьезный дефицит пресной воды, был выполнен проект станции доочистки сточных

вод, в котором в качестве последней ступени обработки после обратного осмоса используется технология глубокого окисления $УФО + H_2O_2$. Доза облучения составляет 500 мДж/см^2 , доза перекиси водорода 10 мг/л. УФ-установки с амальгамными лампами низкого давления состоят из нескольких последовательно соединенных камер. Блок глубокого окисления запроектирован для снижения NDMA на 1,2 log и 1,4-диоксана на 0,5 log. После очистки вода хлорируется и направляется в резервуары чистой воды для питьевых нужд населения. Производительность станции составляет $94625 \text{ м}^3/\text{сут}$. Станция будет введена в эксплуатацию в 2008 г. (J. Neemann).

Аналогичная схема внедрена на станции обработки повторно используемой сточной воды Orange Country Water District Facility в Калифорнии, США (Fountain Valley), на которую был организован технический тур (рис. 1). Источником водоснабжения города является подземная вода. Однако увеличение дебита скважин приводит к проникновению в водоносные горизонты соленой воды из океана. Для минимизации этого процесса в скважины закачивается сточная вода, прошедшая глубокую очистку. Это пример непрямого повторного использования сточной воды в целях питьевого водоснабжения.

На рис. 2 представлена схема обработки воды, включающая

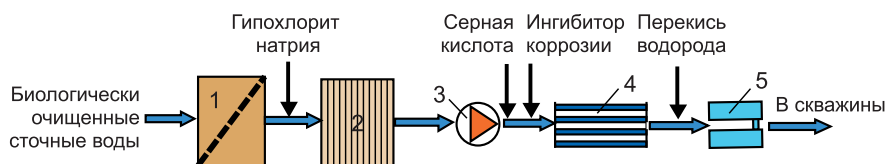


Рис. 1. Блок глубокого окисления на станции Orange Country Water District Facility

1 – решетки; 2 – микрофильтры; 3 – насосная станция; 4 – обратный осмос; 5 – УФ-реакторы глубокого окисления

в себя решетки, микро-фильтры, обратный осмос и систему глубокого окисления $H_2O_2 + УФ$. Для предотвращения обрастания микрофильтров после решеток в воду добавляется гипохлорит натрия дозой 2–3 мг/л. Перед подачей на обратный осмос в воду добавляются серная кислота и ингибитор коррозии с целью поддержания индекса стабильности воды на уровне, близком к нулю (для предотвращения образования отложений на мембранах обратного осмоса). Производительность системы обратного осмоса составляет 264950 м³/сут. Промысловая вода системы обратного осмоса сбрасывается в океан, пермеат поступает в систему глубокого окисления.

Система глубокого окисления состоит из УФ-реакторов, перед которыми вводится перекись водорода. На станции применены УФ-установки фирмы Trojan на амальгамных лампах низкого давления. Девять параллельных линий состоят из трех реакторов, в каждом из которых две последовательно соединенных камеры с 72 лампами в каждой. Таким образом, всего в системе используется 3888 УФ-ламп. Производительность одной линии составляет 33118 м³/сут, максимальная производительность всей системы глубокого окисления – 298068 м³/сут. Система запроектирована на обеспечение снижения NDMA на 1,2 log и вирусов на 4 log. Для достижения этих показателей доза облучения составляет 500 мДж/см², доза перекиси водорода – 3 мг/л.

Стоимость технологии глубокого окисления $H_2O_2 + УФ$ для повторно используемой сточной воды или природной,



Рис. 2. Схема обработки повторно используемой сточной воды на станции Orange Country Water District Facility

при условии круглосуточной в течение года эксплуатации, составляет 1–5 долл/1000 амер. галлонов (6,5–32,5 руб/м³), а при периодическом целевом использовании технологии – 0,3–2,5 долл/1000 амер. галлонов (1,94–16 руб/м³) (J. Malley). Наиболее затратной в эксплуатации является технология глубокого окисления, сочетающая озонирование и УФ-облучение (R. Munter).

Выводы

Озонирование и УФ-облучение широко применяются в системах подготовки питьевой воды. Основная направленность докладов конгресса по технологиям озонирования и УФ-облучения касалась практических аспектов эксплуатации, а не фундаментальных исследований по эффективности их применения. Это свидетельствует о прочных позициях этих методов на рынке водных технологий. Из категории перспективных они перешли в категорию практических.

С учетом ужесточения контроля за побочными продуктами окисления и дезинфекции прослеживается тенденция использования комбинации небольших доз различных окис-

лителей и УФ-облучения, позволяющей обеспечить окислительный и обеззараживающий эффект при соблюдении требуемых уровней по всем контролируемым побочным продуктам и микробиологическим индикаторам.

В последние годы основным методом обеззараживания сточных вод по экономическим и экологическим соображениям является УФ-облучение. Распространение систем УФ-облучения

ослабило позиции озонирования в этой области, тем не менее оно находит применение при обработке сточных вод, когда помимо обеззараживания требуется окислительный эффект.

В Европе и США возрастает актуальность контроля за микрозагрязнителями – соединениями антропогенного происхождения, присутствующими в воде в очень малых концентрациях (гормоны, атразин, 1,4-диоксан, нитрозодиметил-амин). Эти вещества объединяет высокая устойчивость к традиционным методам очистки. Поэтому для контроля за микрозагрязнениями разрабатываются методы глубокого окисления с участием радикалов $ОН\cdot$: перекись водорода и УФ-облучение; озон и УФ-облучение; диоксид титана и УФ-облучение; перекись водорода и озон.

В Нидерландах, США и Канаде уже работают системы глубокого окисления на основе перекиси водорода и УФ-облучения в системах питьевого водоснабжения и повторного использования сточных вод. На конгрессе были представлены проекты аналогичных систем для Австралии, США, Китая и других стран.