

Ц. Жанг<sup>1</sup>, Б. Лю<sup>2</sup>, Я. Лю<sup>3</sup>, С. Цай<sup>3</sup>, С. Лю<sup>3</sup>, Р. Дай<sup>3</sup>

## УДАЛЕНИЕ И ИНАКТИВАЦИЯ ВИРУСА ПУТЕМ ОБРАБОТКИ ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ В ПРИСУТСТВИИ БРОМИДА ИЛИ ЙОДИДА

<sup>1</sup>Хубейская академия энвироники, г. Ухань;

<sup>2</sup>Центральная аналитическая лаборатория, Хубейская центральная станция экологического мониторинга, г. Ухань;

<sup>3</sup>Фуданьский университет, г. Шанхай, Китай  
d.ang@163.com

*Инактивацию вируса в сырой воде проводили на опытной системе непрерывного действия. Колифаг MS2 использовали в качестве модельного микроорганизма для энтеровируса человека. Исследовано влияние технологических процессов обеззараживания воды (одиночный или комбинированный процесс озонирования и хлорирования) и мешающих веществ (бромид и йодид) на инактивацию вируса в сырой воде с помощью опытной установки, включающей две линии. Полученные данные свидетельствуют, что присутствие бромида или йодида в воде ухудшает озонирование, но благотворно влияет на процесс хлорирования для инактивации вируса. После добавления бромида или йодида степень удаления колифага MS2 озонатором оказалась намного ниже, чем ранее ( $p < 0,01$ ), удаление же его хлоратором было эффективнее ( $p < 0,05$ ). Обе линии способны полностью удалить и инактивировать MS2 в сырой воде даже при высокой концентрации бромида (675,24 мкг/дм<sup>3</sup>) и йодида (52,33 мкг/дм<sup>3</sup>), а также гарантировать вирусологическую безопасность питьевой воды.*

**Ключевые слова:** бромид, вирус, йодид, озонирование, питьевая вода, хлорирование.

**Введение.** Патогенные вирусы (аденовирус, норовирус, ротавирус и вирус гепатита А) обычно встречаются в источниках поверхностных (открытых) и грунтовых (подземных) вод [1]. Как было показано в [2], они являются причиной ~ 80% вспышек эпидемий, для которых удалось установить возбудителей инфекции. Поэтому удаление вирусов и других патогенов из питьевой воды является важным фактором для

© Ц. Жанг, Б. Лю, Я. Лю, С. Цай, С. Лю, Р. Дай, 2015

сохранения здоровья и благополучия общества [3]. В процессе очистки питьевой воды колифаг MS2 часто используют в качестве организма-индикатора или модельного микроорганизма для энтеровирусов, поскольку он имеет сходную морфологию и относительно устойчив при обеззараживании по сравнению с патогенными вирусами человека [4].

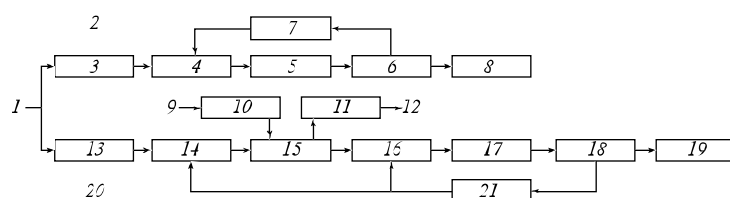
Обеззараживание – необходимая процедура для инактивации микробных патогенов в водопроводной сети и удаления некоторых физико-химических загрязняющих веществ. Но традиционное обеззараживание хлором, хотя и является достаточно эффективным для инактивации вирусов, приводит к образованию вредных побочных продуктов (ППО) органических соединений [5]. Чтобы избавиться от них при обработке питьевой воды, широко используют озон как основное обеззараживающее средство. В [6 – 8] сообщалось, что озон эффективно инактивирует несколько вирусов, включая полиовирус 1, вирус гепатита А, вирус гриппа А, вирус везикулярного стоматита, вирус инфекционного ринотрахеита крупного рогатого скота, а также несколько штаммов бактериофагов. Однако озон является нестабильным для обеспечения защиты обработанной воды в водораспределительных системах [9]. В сущности, его следует использовать с хлором (или в смеси со свободным хлором) для поддержания остаточного обеззараживающего средства в водораспределительной системе с целью предотвращения микробного загрязнения и образования биопленки.

Обычно концентрации бромидов и йодидов в природных водах довольно низкие. Но в силу особых геологических формаций либо проникновения морской воды концентрации бромидов и йодидов в природных водах могут достигать уровней, составляющих соответственно 658 и  $\geq 50$  мкг/дм<sup>3</sup> [10]. Хотя в источниках питьевой воды ионы бромидов и йодидов встречаются в следовых концентрациях, они серьезно влияют на здоровье человека, что связано с образованием вредных ППО. В [11 – 13] исследовано влияние бромидов и йодидов на образование ППО в процессе хлорирования или озонирования. В то же время было изучено несколько факторов, влияющих на инактивацию вирусов при обеззараживании: температура, рН, органические компоненты, твердые частицы и др. [14]. Однако до сих пор остается неясным влияние бромидов или йодидов на инактивацию вируса, которое может возникать в сырой воде при ее обеззараживании озоном или хлором.

Была исследована опытная система непрерывного действия, которая включала коагуляцию, седиментацию, фильтрование сквозь песчаный фильтр, озонирование, фильтрование сквозь гранулированный активный уголь (ГАУ) и хлорирование. В качестве модельного организма для энтеровируса человека использовали колифаг MS2.

Цель данной работы – изучение эффективности инактивации вируса в случае одиночного или комбинированного процесса озонирования и хлорирования при различных дозах, влияния бромида или йодида на инактивацию вируса при обеззараживании воды, а также степени удаления и инактивации вируса в сырой воде с помощью указанной опытной системы при оптимальных условиях.

**Методика эксперимента.** На рисунке представлена опытная установка по обработке питьевой воды и рабочие параметры установки. Она содержит две параллельные линии. Линия А предназначена главным образом для эксперимента по хлорированию, который включает коагуляцию/седиментацию, фильтрование сквозь песчаный фильтр и обеззараживание хлором; линия Б – для озонирования и комбинированного эксперимента по обеззараживанию, который включает коагуляцию/седиментацию, фильтрование сквозь песчаный фильтр, озонирование, фильтрование сквозь ГАУ и обеззараживание хлором.



*Схема опытной установки по обработке питьевой воды: 1 – сырая вода; 2 – линия А; 3, 13 – коагуляция; 4, 14 – фильтрование сквозь песчаный фильтр; 5, 17 – обеззараживание; 6, 18 – емкость с чистой водой; 7, 21 – насос для промывки обратной струей; 8, 19 – сточные воды; 9 – кислород; 10 – генератор озона; 11 – абсорбция хвостовых газов; 12 – выброс; 15 – озонирование; 16 – фильтрование сквозь гранулированный активный уголь; 20 – линия Б.*

В нашей работе колифаг MS2 (ATCC 23631) использовали в качестве модельного вируса. Поскольку титр вируса в сырой воде был слишком низким для того, чтобы исследовать изменения вируса в процессе обработки, колифаг MS2 совместно с ионами бромида или йодида добав-

ляли к сырой воде. Пробы отбирали из отходящих потоков на каждом участке линий А и Б. Пробы с пониженной концентрацией MS2 концентрировали при помощи нового электроположительного фильтра [15]. Пробы с повышенной концентрацией MS2 подвергали непосредственному анализу. Все пробы нумеровали в соответствии с методологией Британского института стандартизации (BSI) [16].

Содержание бромидов и йодидов определяли плазменным оптическим эмиссионным спектрометром с индуктивной связью (ICP-OES), концентрацию озона – с использованием йодометрической процедуры [17]. Концентрацию хлора измеряли с помощью йодометрического метода [17]. Анализ ХПК<sub>Mn</sub> проводили с помощью процедур, которые изложены в [17]. Содержание растворенного кислорода определяли с использованием селективного электрода ("Hach"), мутность воды – с помощью турбидиметра 2100N ("Hach"), а pH измеряли pH-метром Sension3 ("Hach").

Экспериментальные данные анализировали с помощью программного пакета SPSS (Статистический пакет для социальных наук) (Стандартная версия 10.0.1) (фирма "SPSS").

**Результаты и их обсуждение.** При проведении экспериментов на опытной установке параметры сырой воды непрерывно контролировали. Сырая вода имела общие характеристики, представленные в табл. 1. Поскольку источник воды был подвержен попаданию морской воды, сельскохозяйственному загрязнению и транспортировке по внутреннему водному пути, образцы сырой воды характеризовались высоким содержанием бромидов, йодидов,  $\text{NH}_4^+$  и ХПК<sub>Mn</sub>, а также заметной мутностью. Средние значения этих параметров достигали соответственно 668,97 и 53,54 мкг/дм<sup>3</sup>, 37,2 NTU (нефелометрические единицы мутности), 5,50 и 7,67 мг/дм<sup>3</sup>. Однако содержание бромидов, йодидов, pH, температура, концентрация растворенного кислорода, ХПК<sub>Mn</sub>, мутность и  $\text{NH}_4^+$  как исходные данные сырой воды во время экспериментов не претерпели существенных изменений.

Эксперимент с использованием только хлорирования проводили на линии А. Поскольку концентрация MS2 в сырой воде была слишком низкой для исследования влияния хлорирования на обеззараживание воды, которое предусмотрено на этой линии, к сырой воде добавляли суспензию MS2, в результате чего снижение концентрации MS2 достигало 8 log. После коагуляции/седиментации средний порядок снижения MS2 составлял соответственно 2,44 и 3,45 log. Однако, чтобы избежать вспышек эпидемии, связанной с питьевой водой, Управление по охране окружающей среды США (USEPA) ввело две долгосроч-

ные нормы, регламентирующие более строгую (усиленную) обработку поверхностных вод [18], что предусматривало удаление или инактивацию энтеровируса из источника водоснабжения с порядком снижения не менее 4 log (что соответствовало степени удаления 99,99%).

Таблица 1. Характеристики сырой воды

Параметр	Среднее значение (n=30)	$S_r$
Температура (°C)	21,3	1,1
pH	7,27	0,18
Мутность (NTU)	37,2	3,7
Концентрация растворенного кислорода (мг/дм <sup>3</sup> )	4,43	0,51
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (мг/дм <sup>3</sup> )	5,50	0,33
XПК <sub>Mn</sub> (мг/дм <sup>3</sup> )	7,67	0,27
Бромид (мг/дм <sup>3</sup> )	668,97	11,02
Йодид (мг/дм <sup>3</sup> )	53,54	3,25

Степень удаления MS2 после коагуляции/седиментации и фильтрования сквозь песчаный фильтр не соответствовала требованиям стандарта для питьевой воды USEPA. При увеличении дозы хлора до 0,5 мг/дм<sup>3</sup> степень удаления MS2 составляла 4,92 log, что соответствовало требованиям стандарта USEPA. Присутствие MS2 не было обнаружено в сточных водах на выходе линии А при увеличении дозы хлора до 2,0 мг/дм<sup>3</sup>. Содержание остаточного хлора в сточных водах на выходе составило 0,21 мг/дм<sup>3</sup>.

Эксперимент с использованием только озонирования проводили на линии Б. К сырой воде также добавляли суспензию MS2. Как и в случае с опытом, в котором использовали только хлорирование, степень удаления MS2 возрастала с увеличением обеззараживающей дозы озона. После коагуляции/седиментации и фильтрования сквозь песчаный фильтр степень удаления MS2 характеризовалась средним порядком снижения – соответственно 2,64 и 3,41 log. Однако после озонирования она достигала 5,12 log даже при минимальной дозе озона, равной 0,25 мг/дм<sup>3</sup>. Присутствие MS2 не обнаруживали после озонатора при возрастании дозы озона до 1,0 мг/дм<sup>3</sup>. Остаточный озон в сточных водах на выходе озонатора составил 0,12 мг/дм<sup>3</sup>. Такие резуль-

таты были получены из-за более высокой окислительной активности озона. Кроме того, нельзя пренебрегать влиянием на обеззараживание ионов  $\text{NH}_4^+$ , содержание которых в сырой воде достигало  $5,50 \text{ мг/дм}^3$ , поскольку они могут вступать в реакцию с хлораминами, что препятствует эффективной инактивации вируса [19]. Однако хлорамины могут сохранять остаточный обеззараживающий агент в распределительной (водопроводной) системе питьевой воды. Поэтому на следующем этапе проводили комбинированные опыты, в которых озон и хлор совместно использовали для инактивации вируса.

Эксперимент по комбинированному обеззараживанию воды с применением озонирования и хлорирования проводили на линии Б, где после озонирования проводили хлорирование. К сырой воде добавляли суспензию MS2. По результатам эксперимента с обеззараживанием только с помощью хлорирования установлено, что степень удаления MS2 достигала  $4 \text{ log}$  (при дозе хлора  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ ). Поэтому было исследовано влияние дозы озона на инактивацию MS2 в случае комбинированного процесса, тогда как дозу хлора установили на уровне  $0,5 \text{ мг/дм}^3$  на протяжении всего опыта с тем, чтобы гарантировать вирусологическую безопасность питьевой воды.

Полученные данные показали, что степень удаления MS2 достигала  $4 \text{ log}$  при дозе озона после озонатора, равной  $0,25$  и  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ . Когда доза озона увеличилась до  $0,5 \text{ мг/дм}^3$ , интегрированная система обеспечила полное удаление колифага MS2 (порядок снижения составил  $7,90 \text{ log}$ ). В этот момент содержание остаточного озона и остаточного хлора в сточных водах на выходе системы составляло соответственно  $0$  и  $0,16 \text{ мг/дм}^3$ . Согласно результатам эксперимента с использованием только озонирования степень удаления MS2 составляла  $4 \text{ log}$  (при дозе озона  $0,25 \text{ мг/дм}^3$ ). Поэтому было изучено влияние дозы хлора на инактивацию MS2 в случае комбинированного процесса, тогда как дозу озона установили на уровне  $0,25 \text{ мг/дм}^3$ . При увеличении дозы хлора интегрированная система повышала степень удаления колифага MS2. Линия Б обеспечивала полное удаление колифага MS2 (порядок снижения составил  $7,91 \text{ log}$ ) до тех пор, пока доза хлора увеличивалась до  $1,0 \text{ мг/дм}^3$ . При этом концентрации остаточного озона и остаточного хлора в сточных водах на выходе системы составляли соответственно  $0$  и  $0,25 \text{ мг/дм}^3$ .

Более раннее исследование [20] показало, что комбинированная обработка озоном и хлором позволяет не только избежать соответ-



ствующим недостаткам, присущим системам с использованием только озона или хлора, но также повышает эффективность инактивации благодаря синергическому эффекту озона и хлора. Поэтому озонирование совместно с хлорированием представляет собой перспективный процесс инактивации вируса в питьевой воде. Оптимальные дозы озона и хлора в комбинированном процессе озонирования и хлорирования составляли соответственно 0,5 и 1,0 мг/дм<sup>3</sup>, что может гарантировать удаление всех вирусов в сырой воде.

Исследование влияния бромида или йодида на инактивацию вируса проводили на линии Б при их различных дозах в диапазоне от 0 до 1,0 мг/дм<sup>3</sup>. К сырой воде добавляли бромид или йодид, а также суспензию MS2. Благодаря высокой окислительной способности озона или хлора колифаг MS2 можно было удалить полностью даже при низких дозах указанных препаратов. В этом эксперименте для лучшего понимания влияния бромида или йодида на обеззараживание воды с целью удаления MS2 концентрации озона и хлора были установлены на уровне 0,25 мг/дм<sup>3</sup> каждая. Соответственно, в течение всего эксперимента остаточный озон и остаточный хлор не были обнаружены в сточных водах на выходе линии Б. Как указано в табл. 2, после добавления бромида степень удаления MS2 с помощью озонатора оказалась значительно ниже, чем ранее ( $p < 0,001$ ), причем она повышалась с возрастанием дозы бромида. Очевидно, что присутствие бромида в воде может снизить окислительную эффективность озона. Это, предположительно, обусловлено тем, что бромид может вступать в реакцию с озоном и образовывать ППО [11, 13], тогда как общее количество озона ограничено. В результате количество озона для инактивации вируса уменьшается соответствующим образом. Напротив, после добавления бромида степень удаления MS2 с помощью установки хлорирования оказалась значительно выше, чем ранее ( $p < 0,001$ ), причем это наблюдалось с возрастанием дозы бромида. В присутствии бромида во время хлорирования воды гипохлоридная кислота (HOCl) может окислять бромид до гипобромидной кислоты (HOBr), которая является более сильным галогенирующим агентом по сравнению с HOCl [21]. Вот почему после добавления бромида к рассматриваемой опытной системе была достигнута более высокая степень удаления MS2. В целом, после добавления бромида удаление MS2 в линии Б оказалось значительно выше, чем ранее ( $p < 0,05$ ).

Изменение титра MS2 при увеличении дозы йодида представлено в табл. 3. Подобно эксперименту с бромидом, после добавления йодида

степень удаления MS2 с помощью озонатора оказалось значительно ниже, чем ранее ( $p < 0,01$ ), причем она повышалась с возрастанием дозы йодида. При этом йодид может реагировать с озоном, образуя ППО [12]. В результате количество озона, доступное для инактивации вируса, соответствующим образом уменьшается. Степень удаления MS2 хлоратором оказалась значительно выше, чем ранее ( $p < 0,05$ ), причем она возрастала с увеличением дозы йодида. Кислота HOCl также может окислять йодид до образования гипойодистой кислоты (HOI), которая является более сильным галогенирующим агентом. Однако после добавления йодида в изучаемую опытную систему степень удаления MS2 на линии Б существенно отличалась от предыдущей ( $p > 0,05$ ). Очевидно, присутствие бромидов или йодидов в воде снижает безопасность питьевой воды за счет образования бромированных или йодированных ППО, но повышает инактивацию MS2 в процессе хлорирования.

Проведены также исследования по удалению вируса в сырой воде. Согласно полученным данным при комбинированном обеззараживании воды дозы озона и хлора были установлены на уровне соответственно 0,5 и 1,0 мг/дм<sup>3</sup>. При таких условиях опытная система способна работать непрерывно. Пробы воды различного объема отбирали для концентрирования MS2 в сточных водах на выходе каждого участка технологического процесса в соответствии с различием в качестве воды. В табл. 4 показано среднее значение степени удаления вируса, бромидов и йодидов в сырой воде при оптимальных условиях. В сырой воде концентрации бромидов и йодидов составляли соответственно 675,24 и 52,33 мкг/дм<sup>3</sup> и сколь угодно заметного их удаления в процессе обработки воды на линиях А и Б не наблюдалось.

Поэтому можно сделать вывод, что они будут оказывать большее влияние на инактивацию MS2 во время озонирования или хлорирования. Титр MS2 в сырой воде достигал 7650 БОЕ/100 дм<sup>3</sup>. Коагуляция/седиментация была основным этапом для удаления MS2. При этом степень удаления MS2 составила соответственно 7515 и 7530 БОЕ/100 дм<sup>3</sup> (98,24 и 98,43%) на линиях А и Б. Колифаг MS2 намного меньше (32 нм) [22], чем бактерии и цисты простейших, и, следовательно, в меньшей степени поддается удалению с помощью фильтрования. Поэтому после фильтрования сквозь песочный фильтр общая степень его удаления возросла на линиях А и Б соответственно только до 99,53 и 99,86%.

После хлорирования на линии А MS2 был полностью инактивирован, и остаточный хлор составлял 0,48 мг/дм<sup>3</sup>.



Таблица 2. Изменение титра MS2 при возрастании дозы бромада

Вг ; мг/дм <sup>3</sup> Линия Б	0		0,25		0,50		0,75		1,00	
	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)
Сырая вода	8107	7,90	810 <sup>7</sup>	7,90	8·10 <sup>6</sup>	7,90	810 <sup>7</sup>	7,90	810 <sup>7</sup>	7,90
Седиментация	610 <sup>5</sup>	5,78	610 <sup>5</sup>	5,78	510 <sup>5</sup>	5,70	610 <sup>5</sup>	5,78	5,610 <sup>5</sup>	5,75
Фильтрование сквозь песча- ный фильтр	2,110 <sup>4</sup>	4,32	2·10 <sup>4</sup>	4,30	2,110 <sup>4</sup>	4,32	2·10 <sup>4</sup>	4,30	1,910 <sup>4</sup>	4,28
Озонирование	1·10 <sup>3</sup>	3,00	2,2·10 <sup>3</sup>	3,34	2,710 <sup>3</sup>	3,43	2,810 <sup>3</sup>	3,45	2,9·10 <sup>3</sup>	3,46
ГАУ	910 <sup>2</sup>	2,95	1,810 <sup>3</sup>	3,26	2,810 <sup>3</sup>	3,45	2,410 <sup>3</sup>	3,38	2,710 <sup>3</sup>	3,43
Хлорирование	4,610 <sup>2</sup>	2,66	310 <sup>2</sup>	2,48	4,110 <sup>2</sup>	2,61	3,310 <sup>2</sup>	2,52	3,210 <sup>2</sup>	2,51

\* Порядок снижения.

Таблица 3. Изменение титра MS2 при возрастании дозы йодида

Г, мг/дм <sup>3</sup> Линия Б	0		0,25		0,50		0,75		1,00	
	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)	Титр MS2 (БОЕ/дм <sup>3</sup> )	log* (титр MS2)
Сырая вода	8·10 <sup>7</sup>	7,90	8·10 <sup>7</sup>	7,90	8·10 <sup>7</sup>	7,90	8·10 <sup>7</sup>	7,90	8·10 <sup>7</sup>	7,90
Седиментация	6·10 <sup>9</sup>	5,78	6·10 <sup>9</sup>	5,78	5,7·10 <sup>9</sup>	5,76	5,6·10 <sup>9</sup>	5,75	5,6·10 <sup>9</sup>	5,75
Фильтрование сквозь песча- ный фильтр	2,1·10 <sup>4</sup>	4,32	2,3·10 <sup>4</sup>	4,36	2,4·10 <sup>4</sup>	4,38	2,2·10 <sup>4</sup>	4,34	2,2·10 <sup>4</sup>	4,34
Озонирование	1·10 <sup>3</sup>	3,00	1,8·10 <sup>3</sup>	3,26	2,2·10 <sup>3</sup>	3,34	2,3·10 <sup>3</sup>	3,36	2,6·10 <sup>3</sup>	3,41
ГАУ	9·10 <sup>2</sup>	2,95	1,9·10 <sup>3</sup>	3,28	1,8·10 <sup>3</sup>	3,26	2·10 <sup>3</sup>	3,30	2,1·10 <sup>3</sup>	3,32
Хлорирование	4,6·10 <sup>2</sup>	2,66	4,5·10 <sup>2</sup>	2,65	4·10 <sup>2</sup>	2,60	4·10 <sup>2</sup>	2,60	2,2·10 <sup>2</sup>	2,34

\* См. табл. 2.

Таблица 4. Средние значения степени удаления MS2, брома и йода в природной (сырой) воде (n=4)

Показатель	Объем пробы (дм <sup>3</sup> )	Титр MS2 (БОЕ/100 дм <sup>3</sup> )		log* (титр MS2) (БОЕ/100 дм <sup>3</sup> )	Степень удаления MS2 (%)		Бромид		Йодид		
		A	B		A	B	A	B	A	B	
		мкг/ дм <sup>3</sup>									
	A/B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Сырая вода	100	7650	7650	3,88	3,88	—	—	675,24	675,24	52,33	52,33
Седиментация	150	135	120	2,13	2,08	98,24	98,43	627,37	633,85	50,01	49,36
Фильтрование сквозь песочный фильтр	150	36	11	1,56	1,04	99,53	99,86	631,13	629,69	50,84	50,73
Озонирование	200	—	0	—	—	—	100,00	—	616,52	—	46,30
ГАУ	200	—	4	—	0,60	—	99,95	—	603,48	—	41,15
Хлорирование	250	0	0	—	—	100,00	100,00	601,34	592,30	46,17	39,10
Сточные воды	250	0	0	—	—	100,00	100,00	600,11	590,16	46,00	39,04

\* См. табл. 2.

Предположительно, это обусловлено сильной окисляемостью хлора и положительным поддерживающим влиянием бромидов и йодидов, концентрация которых достигала соответственно 631,13 и 50,84 мкг/дм<sup>3</sup> в водах, поступающих на вход хлоратора. В связи с влиянием бромидов и йодидов на инактивацию вируса оба эти препарата будут поглощать определенное количество озона, что, соответственно, приводит к снижению количества озона, доступного для инактивации вируса. Хотя концентрации бромидов и йодидов в водах, поступающих на вход озонатора в линии Б, достигали соответственно 629,69 и 50,73 мкг/дм<sup>3</sup>, степень удаления MS2 составляла 100% после озонирования, при этом остаточный озон не был обнаружен (см. табл. 4).

Для аммиачного азота и органических соединений, требующих глубокой очистки, использовали фильтрование сквозь ГАУ при обработке воды на линии Б. Благодаря образованию биопленки на поверхности этого угля происходило размножение MS2 и других патогенов. При этом общая степень удаления MS2 снижалась до 99,95% после фильтрования сквозь ГАУ. Кроме того, MS2 не был обнаружен после хлорирования на линии Б, когда степень его удаления достигла 100%. Остаточный хлор в сточных водах на выходе составлял 0,57 мг/дм<sup>3</sup>. Линия Б обеспечивала более сложный комбинированный процесс для предотвращения образования ППО по сравнению с линией А. Теоретически она обладает более высоким потенциалом для гарантирования химической безопасности питьевой воды. После обработки воды на линии Б степень удаления и инактивации MS2 достигла 100%. Очевидно, что обе линии способны полностью удалить и инактивировать MS2 в сырой воде даже при высоких концентрациях бромидов и йодидов и могут гарантировать вирусологическую безопасность питьевой воды.

**Выводы.** Присутствие бромидов или йодидов в воде отрицательно влияет на озонирование, но оказывает благоприятное воздействие на хлорирование для инактивации вируса. После добавления бромидов или йодидов удаление MS2 с помощью озонатора оказалось значительно хуже, чем ранее ( $p < 0,01$ ), что вызвано поглощением озона бромидом или йодидом; удаление MS2 хлоратором было эффективнее ( $p < 0,05$ ), что обусловлено образованием кислоты НОВг или НОІ, представляющих собой более сильные галогенирующие агенты.

Обе линии (А и Б) способны полностью удалять и инактивировать MS2 в сырой воде даже при высоких концентрациях бромидов (675,24 мкг/дм<sup>3</sup>) и йодида (52,33 мкг/дм<sup>3</sup>) за счет сильной окислительной способности хлора и позитивного стимулирующего влияния бромидов или йодида. Процессы на линиях А и Б могут гарантировать вирусологическую безопасность питьевой воды.

Настоящее исследование получило финансовую поддержку Национальной программы научно-исследовательских работ в области высоких технологий (863) Китая (№ 2008AA062501), Национального фонда естественных наук Китая (№51078091 и № 51008083) и Докторского фонда Министерства образования Китая (№20090071110005 и №20100071120011).

**Резюме.** Инактивацию вируса в сырой воде проводили на дослідній системі безперервної дії. Коліфаг MS2 використовували як модельний мікроорганізм для ентеровірусу людини. Досліджено вплив технологічних процесів знезараження води (одиночний або комбінований процес озонування і хлорування) і заважаючих речовин (бромід і йодид) на інактивацию вірусів в сирій воді за допомогою дослідної установки, що включає дві лінії. Отримані дані свідчать, що присутність броміду або йодиду у воді погіршує озонування, але благотворно впливає на процес хлорування для інактивации вірусу. Після додавання броміду або йодиду ступінь видалення коліфага MS2 за допомогою озонатора виявилася набагато нижче, ніж раніше ( $p < 0,01$ ), видалення ж його за допомогою хлоратора (установки для хлорування) було ефективніше ( $p < 0,05$ ). Обидві лінії здатні повністю видалити і інактивувати MS2 в сирій воді навіть при високій концентрації броміду (675,24 мкг/дм<sup>3</sup>) і йодиду (52,33 мкг/дм<sup>3</sup>), а також гарантувати вірусологічну безпеку питної води.

*Qiang Zhang, Bin Liu, Yan Liu, Xuan Cai, Xiang Liu,  
Ruihua Dai*

## **REMOVAL AND INACTIVATION OF VIRUS BY DRINKING WATER TREATMENT PROCESSES IN THE PRESENCE OF BROMIDE OR IODIDE**

### **Summary**

The inactivation of virus in raw water was conducted in a continuous flow pilot scale system. Coliphage MS2 was used as model organism for human

enteric virus. The effect of disinfection technologies (single or combined process of ozonation and chlorination) and interfering substances (bromide or iodide) on inactivation of virus, and the removal performance of virus in raw water by the pilot scale system (Train A and B) were investigated. The results indicated that bromide or iodide in water was detrimental to ozonation but beneficial to chlorination for virus inactivation. After bromide or iodide was added, the removal of MS2 by ozonation unit was highly significantly lower than before ( $p < 0,01$ ), the removal of MS2 by chlorination unit was significantly higher than before ( $p < 0,05$ ). Both Train A and B could remove and inactivate MS2 in raw water completely even at high concentration of bromide (675,24  $\mu\text{g/L}$ ) and iodide (52,33  $\mu\text{g/L}$ ). The processes of Train A and B can guarantee the virological safety of drinking water effectively.

#### Список использованной литературы

- [1] *Abbaszadegan M., Lechevallier M., Gerba, C.* //J. Amer. Water Works Assoc. – 2003. – **95**. – P. 107–120.
- [2] *Ryan J.N., Harvey R.W., Metge D., Elimelech M., Navigato T., Pieper A.P.* //Environ. Sci. and Technol. – 2002. – **36**. – P. 2403–2413.
- [3] *Bowen W.R.* // Desalination and Water Treatment. – 2009. – **1**. – P. 1–6.
- [4] *Zhang Q., Liu Y., Wei Y.Y., Quan Z.X., Zhang Y., Dai R.H., Liu X.* //Ibid. – 2012. – **48**. – P. 221–231.
- [5] *Ali O.A., Tarek S.J.* // Ibid. – 2009. – **1**. – P. 289–296.
- [6] *Bolton D.C., Zee Y.C., Osebold J.W.* // Environ. Res. – 1982. – **27**. – P. 476–484.
- [7] *Finch G.R., Fairbairn N.* //Appl. Environ. Microbiol. –1991. – **57**. – P. 3121–3126.
- [8] *Shin G.A., Sobsey, M.D.* // Ibid. – 2003. – **69**. – P. 3975–3978.
- [9] *Singer P.C.* // J. Environ. Eng. – ASCE. – 1994. – **120**. – P. 727–744.
- [10] *Gunten U.V.* // Water Res. – 2003. – **37**. – P. 1469–1487.
- [11] *Symons J.M., Krasner S.W., Simms L.A., Scimmenti M.* //J. Amer. Water Works Assoc. – 1993. – **85**. – P. 51–62.
- [12] *Bichsel Y., Gunten U.V.* // Environ. Sci. and Technol. – 2003. – **4**. – P. 2784–2791.
- [13] *Richardson S.D., Thruston A.D., Rav-Acha C., Groisman L., Popilevsky I., Juraev O.* //Ibid. – 2003. – **37**. – P. 3782–3793.
- [14] *Kahler A.M., Cromeans T.L., Roberts J.M., Hill V.R.* // Water Res. – 2011. – **45**. – P. 1745–1751.



- [15] *Karim M.R., Rhodes E.R., Brinkman N., Wymer L., Fout G.S. //Appl. Environ. Microbiol. – 2009. – 75. – P. 2393–2399.*
- [16] *British Standards Institution (BSI), Water quality – P. 1: Detection and enumeration of bacteriophages-Enumeration of F-specific RNA bacteriophages. – BS EN ISO 10705-1. – 2001.*
- [17] *APHA/AWWA/WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. – 20<sup>th</sup> Ed. – Washington DC, USA, 1998.*
- [18] *USEPA Long Term Second Enhanced Surface Water Treatment Rule; Final Rule, United States Environmental Protection Agency. – Washington DC, USA, 2006.*
- [19] *Sirikanchana K., Shisler J.L., Marinas B.J. // Water Res. – 2008. – 42. – P. 1467–1474.*
- [20] *Biswas K., Craik S., Smith D.W., Belosevic, M. //Ibid. – 2003. – 37. – P. 4737–4747.*
- [21] *Sun Y.X., Wu Q.Y., Hu H.Y., Tian J. //Ibid. – 2009. – 43. – P. 2391–2398.*
- [22] *Aronino R., Dlugy C., Arkhangelsky E., Shandalov S., Oron G., Brenner A., Gitis V. // Ibid. – 2009. – 43. – P. 87–96.*

Поступила в редакцию 23.07.2013 г.