

УДК 628.16.08/358.21

doi: 10.53816/20753608\_2025\_4\_57

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ  
УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ БЛОКОВ ОЧИСТКИ ВОДЫ  
В ИНТЕРЕСАХ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СРЕДСТВ  
ПОЛЕВОГО ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ**

**SCIENTIFIC FOUNDATIONS OF THE DESIGN OF ULTRAVIOLET WATER  
PURIFICATION UNITS IN THE INTERESTS OF CREATING  
PROMISING MEANS OF FIELD WATER SUPPLY**

*По представлению академика РАН Р.А. Дурнева*

*А.В. Шевченко*

*Военно-инженерная академия им. Д.М. Карбышева*

*A.V. Shevchenko*

С использованием теоретических представлений о фотохимических процессах детоксикации боевых отравляющих веществ в воде под действием ультрафиолетового излучения в присутствии сильных окислителей даны основные принципы и математические выражения, позволяющие проводить расчеты и конструировать блоки фотохимической очистки воды в составе средств полевого водоснабжения, и обосновывать их оптимальные режимы работы.

**Ключевые слова:** блок фотохимической очистки воды, боевое отравляющее вещество, окислитель, конструирование, соединения ксенона, средство полевого водоснабжения, ультрафиолетовое излучение.

Using theoretical concepts of photochemical processes of detoxification of chemical warfare agents in water under the influence of ultraviolet radiation in the presence of strong oxidizing agents, basic principles and mathematical expressions are given that allow calculations and design of photochemical water purification units as part of field water supply facilities, and substantiate their optimal operating modes.

**Keywords:** photochemical water purification unit, chemical warfare agent, oxidizer, construction, xenon compounds, field water supply, ultraviolet radiation.

### **Введение**

Статья продолжает цикл публикаций по перспективным методам очистки воды в интересах полевого водоснабжения на основе достижений современной науки. Современные инновационные взгляды на создание войсковых станций очистки ориентированы на конструи-

рование их по блочно-модульному типу с применением в технологических схемах модифицированных мембран, фотокаталитических или фотохимических процессов с возможностью автоматического изменения технологии обработки воды в зависимости от вида и степени загрязнения водисточника. В предшествующих статьях [1–3] были представлены теоретические

основы разложения в воде таких боевых отравляющих веществ (ОВ), как ви-экс и зоман, под действием ультрафиолетового (УФ) излучения в присутствии таких окислителей, как триоксид ксенона, дифторид ксенона и пероксид водорода. С использованием этих теоретических представлений выделены научные основы (в виде основных принципов и математических выражений), позволяющие проводить расчеты и конструировать блоки фотохимической очистки воды в составе средств полевого водоснабжения, и обосновывать их оптимальные режимы работы.

### 1. Основные принципы расчета блока УФ-облучателя

Анализ теоретических представлений о фотоиндуцированном разложении веществ в воде и экспериментального материала позволяет заключить, что основными факторами, влияющими на процесс очистки воды, являются:

- интенсивность УФ-потока используемых источников излучения;
- эффективность поглощения излучения водой и удаляемой примесью;
- величина квантового выхода разложения удаляемой примеси.

Подчеркнем одну очень важную отличительную особенность фотохимии очистки воды от ОВ, связанную с низкой эффективностью использования УФ-излучения из-за необходимости добиваться высокой степени разложения сильно разбавленных растворов токсичных веществ, по сравнению с традиционной фотохимией. Это обуславливает поиск наиболее оптимальных условий использования самого УФ-излучения и режимов удаления вредной примеси.

Наиболее оптимальным является применение установок с погружными источниками УФ-излучения, которые и рассматриваются в дальнейшем.

Расчет таких установок сводится к нахождению потребного обезвреживающего потока излучения для обеспечения заданной производительности, необходимого количества источников излучения, расхода электроэнергии и размеров самой облучательной кюветы. В свою очередь размеры облучательной кюветы зависят от толщины облучаемого слоя.

Толщина этого слоя в основном определяется коэффициентом поглощения воды, зависящим в сильной степени от энергии кванта света и содержания побочных веществ.

В табл. 1 отражены коэффициенты поглощения дистиллированной воды и воды из реки Яуза (г. Москва), которая предварительно очищалась отстаиванием и фильтрованием (цветность 60 градусов), при различных длинах волн.

Из сравнительного анализа представленных данных видно насколько резко возрастает поглощательная способность природной воды по сравнению с дистиллированной. Это приводит, естественно, к уменьшению толщины слоя, в котором может происходить эффективное разложение удаляемой примеси и, в конечном итоге, к снижению производительности установки.

На рис. 1 показана типичная кривая эффективности фотолиза ви-экс при различном коэффициенте поглощения среды.

Из анализа данных рис. 1 видно, что, как и следовало ожидать, эффективность разложения ви-экс падает с увеличением поглощающей

Таблица 1

**Коэффициенты поглощения излучения  
для различных водных сред  
(определены экспериментально)**

Длина волны излучения, нм	Коэффициент поглощения, см <sup>-1</sup>	
	вода дистиллированная	вода из реки Яуза (очищенная)
190	0,512	3,96
195	0,308	3,08
200	0,219	2,69
210	0,150	2,12
220	0,100	1,27
230	0,075	0,737
240	0,060	0,506
250	0,046	0,420
260	0,036	0,346
270	0,032	0,276
280	0,027	0,230
290	0,023	0,184
300	0,014	0,138
310	0,009	0,092
320	0,005	0,069
330	0	0,046
340	0	0,023
350	0	0

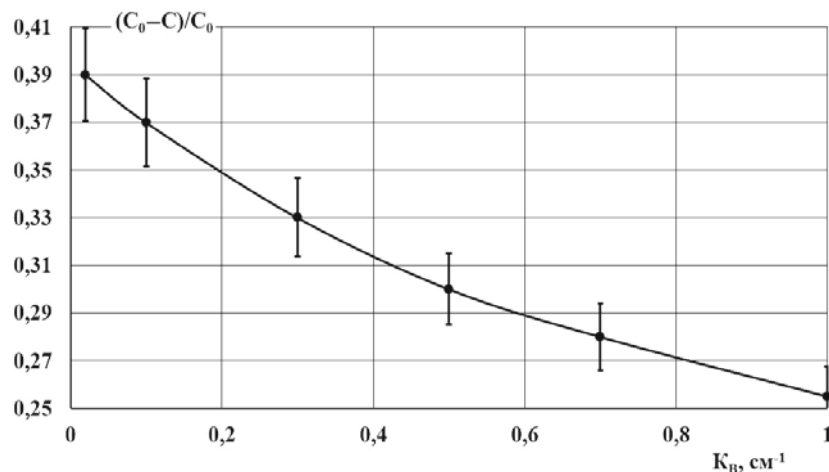


Рис. 1. Зависимость доли разложившегося ви-экс от коэффициента поглощения среды:

$C_0 = 1 \text{ мг/л}$  и  $C$  — начальная и текущая концентрации ви-экс; источник УФ-излучения — импульсная ксеноновая лампа низкого давления ИНП 3/250; частота импульсов  $\varphi = 4 \text{ Гц}$ ; интенсивность УФ-излучения  $I = 2,6 \cdot 10^{-16} \text{ (кв/см}^3 \cdot \text{имп.)}$ ; молярный коэффициент экстинкции  $E = 340 \text{ л/(моль} \cdot \text{см)}$ , толщина облучаемого слоя  $L = 0,5 \text{ см}$

способности среды (при неизменных значениях других параметров облучения). Поэтому вода перед УФ-облучением должна быть подвергнута предварительной водоочистке. Наиболее сильное влияние на значение коэффициента поглощения воды оказывают ее мутность и цветность. Но, если мутность может быть значительно снижена еще на предварительной стадии за счет физических процессов, то уменьшение цветности воды возможно в основном только за счет последующих химических реакций, и часто она является основным фактором, устанавливающим границы применимости метода

фотохимической очистки воды. Обобщенная корреляция между цветностью воды и соответствующим ей коэффициентом поглощения представлена на рис. 2.

Следующим важным моментом, вытекающим из условия использования установок с погружным источником УФ-излучения, является то, что поверхность работающей лампы проявляется как источник повышенного выделения тепла, которое приводит к нагреву воды, если лампа не заключена в кварцевый кожух. Этот момент имеет две стороны. Отрицательную, связанную с возможным уменьшением потока

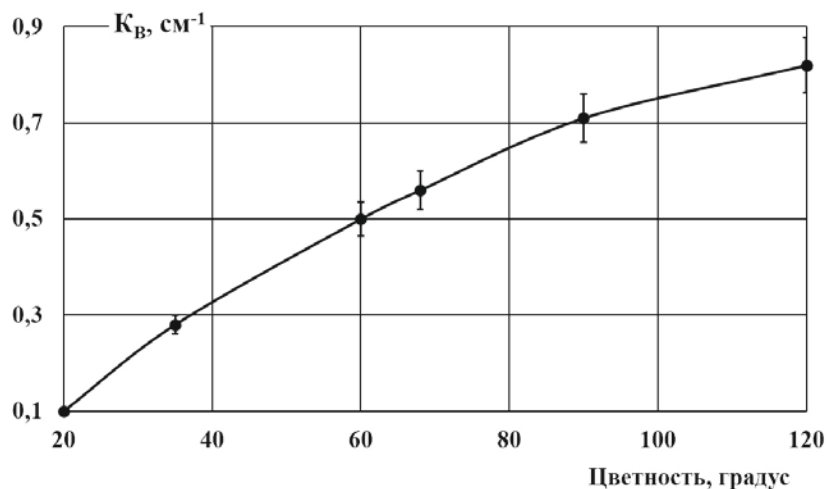


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения воды ( $K_B$ ) от ее цветности (длина волны УФ-излучения  $\lambda = 250 \text{ нм}$ )

излучения за счет выделения на поверхности работающей лампы различных солей, определяющих ее жесткость, и положительную — проявляющуюся в возрастании квантовых выходов разложения ОБ (и часто значительно) с увеличением температуры среды [1]. Как показывает экспериментальный опыт, положительная сторона этого момента является более весомой, чем отрицательная. Это наряду с не менее важным условием необходимости использования части спектра лампы (190–210 нм), ответственной за образование частиц радикального характера, и которая, скорее всего, будет потеряна, если лампу заключить в кварцевый кожух, позволяет рекомендовать применение именно непосредственного контакта поверхности лампы с водой.

Конечно же, использование факта повышения температуры требует введения в установку и дополнительных устройств, связанных с необходимостью охлаждения облученной воды. При этом для охлаждения может использоваться вода, подаваемая на очистку.

## 2. Основные этапы расчета блока УФ-облучателя установки

### 2.1. Расчет требуемого обезвреживающего потока излучения

Скорость разложения ОБ в простой фотохимической реакции дается выражением

$$-\frac{d[OB]}{d\tau} = \Phi I_{\text{полг.}}^{\text{ОБ}}, \quad (1)$$

где  $\Phi$  — квантовый выход разложения ОБ;  $I_{\text{полг.}}^{\text{ОБ}}$  — интенсивность излучения, поглощенная молекулами ОБ.

Учитывая, что свет в реакторе поглощает не только ОБ, но и сама среда, то фотохимическую реакцию разложения вызывает только та часть излучения, которая поглощается веществом  $I_{\text{полг.}}^{\text{ОБ}}$ .

$$I_{\text{полг.}}^{\text{ОБ}} = \frac{D_{\text{ОБ}}}{D} I_{\text{полг.}}, \quad (2)$$

где  $I_{\text{полг.}}$  — общая интенсивность поглощенного света;  $D_{\text{ОБ}}, D$  — оптические плотности ОБ в растворе и воды соответственно.

При этом запишем  $I_{\text{полг.}}$  как

$$I_{\text{полг.}} = \eta I_0, \quad (3)$$

где  $I_0$  — интенсивность падающего потока излучения;  $\eta$  — суммарный коэффициент поглощения среды.

Тогда выражение (1) с учетом уравнений (2) и (3) запишется в виде

$$-\frac{d[OB]}{d\tau} = \frac{D_{\text{ОБ}}}{D} \Phi \eta I_0.$$

Интегрирование этого выражения в пределах от  $[OB]_0$  до  $[OB]$  и от 0 до  $\tau$  с учетом того, что

$$\frac{D_{\text{ОБ}}}{D} = \frac{E_{\text{ОБ}} [OB]}{K_B},$$

где  $E_{\text{ОБ}}$  — коэффициент экстинкции ОБ;  $K_B$  — коэффициент поглощения воды;  $[ ]$  — знак, обозначающий концентрацию вещества, при допущении о  $\eta = \text{const}$ , дает

$$I_0 \cdot \tau = \frac{E_{\text{ОБ}} ([OB]_0 - [OB]) + K_B \ln \frac{[OB]_0}{[OB]}}{\eta \Phi E_{\text{ОБ}}}.$$

Если  $[OB]$  так мала, что  $D_{\text{ОБ}} \ll D$  (что и бывает на практике), то

$$I_0 \cdot \tau = \frac{K_B \ln \frac{[OB]_0}{[OB]}}{\eta \Phi E_{\text{ОБ}}}. \quad (4)$$

Анализ полученного выражения (4) показывает, что стоящий слева член выражения  $I_0 \cdot \tau$  представляет собой дозу энергии (квантов), необходимую для снижения в единице объема содержания ОБ с уровня  $[OB]_0$  до уровня  $[OB]$ .

Исходя из этого, находим обезвреживающий поток излучения ( $F$ ), необходимый для обеспечения заданной производительности ( $Q$ ) установки

$$F = \frac{Q K_B \ln \frac{[OB]_0}{[OB]}}{\eta \eta_{\Pi} \Phi E_{\text{ОБ}}}. \quad (5)$$

В это уравнение дополнительно введен еще коэффициент  $\eta_{\Pi}$ , учитывающий полноту использования обезвреживающего потока, который принимается равным: для установок с

погружным источником без кварцевого кожуха 1, с кварцевым кожухом — 0,8...0,9 и для установок с непогружным источником — 0,75.

Применяя выражение (5), необходимо следить, чтобы все величины были выражены в одной системе единиц. Например:

$$E_{\text{ОВ}} = \frac{\text{М}^3}{\text{моль} \times \text{М}}; K_{\text{В}} = \text{М}^{-1};$$

$$\tau = \text{с}; I_0 = \frac{\text{Эйнштейн}}{\text{М}^3 \times \text{с}}; Q = \frac{\text{М}^3}{\text{с}}.$$

Тогда, учитывая, что

$$1 \text{ Эйнштейн} = \frac{1,197 \cdot 10^8}{\lambda} \text{ Дж},$$

где  $\lambda$  — средневзвешанное значение длины волны излучения лампы в интервале поглощения примеси, нм, величина обезвреживающего потока выразится в Вт, а выражение (5) в следующем виде

$$F = \frac{1,197 \cdot 10^8 Q K_{\text{В}} \ln \frac{[\text{ОВ}]_0}{[\text{ОВ}]}}{\lambda \eta \eta_{\text{П}} \Phi E_{\text{ОВ}}} \text{ Вт.} \quad (6)$$

## 2.2. Определение необходимого количества источников излучения

Потребное количество источников излучения ( $N$ , шт.) находится из выражения

$$N = \frac{F}{F_{\text{Л}}},$$

где  $F_{\text{Л}}$  — расчетный обезвреживающий поток лампы к концу срока службы.

Значение  $F_{\text{Л}}$  берется приблизительно на 30 % меньше, чем в начальный период службы, и определяется на основе спектрального распределения коэффициента полезного действия (КПД) в единичном телесном угле в диапазоне длин волн, соответствующих спектру поглощения ОВ, и в общем случае равно

$$F_{\text{Л}} = \eta_{\Delta\lambda} F_{\text{Л}}^0 \eta_{\text{ЭЛ}},$$

где  $F_{\text{Л}}^0$  — общая потребляемая лампой мощность;  $\eta_{\Delta\lambda}$  — спектральный КПД в интервале длин волн  $\Delta\lambda$ ;  $\eta_{\text{ЭЛ}}$  — КПД преобразования электрической энергии в световую.

## 2.3. Определение расхода электроэнергии

Расход электроэнергии составит

$$W = \frac{N F_{\text{Л}}^0}{Q} \left( \frac{\text{Вт} \cdot \text{час}}{\text{М}^3} \right),$$

где единицы измерения  $F_{\text{Л}}^0$  — Вт, а  $Q$  —  $\frac{\text{М}^3}{\text{час}}$ .

## 2.4. Расчет облучательной кюветы

Из всего разнообразия конструкций облучательных кювет для погружных источников излучения наиболее приемлемой является конструкция в виде цилиндра, которая обеспечивает равномерное распределение излучения по слоям. При этом длина кюветы определяется длиной используемого источника излучения, а диаметр определится предельной толщиной облучаемого слоя. Основываясь на выражении (3) и принимая во внимание закон Ламберта — Бера при условии  $D_{\text{ОВ}} \ll D$ , имеем  $\eta = 1 - 10^{-K_{\text{В}} l}$ , откуда получаем толщину облучаемого слоя

$$l = - \frac{\lg(1 - \eta)}{K_{\text{В}}}.$$

Тогда внутренний диаметр облучательной кюветы  $d_{\text{К}}$  для одной лампы с внешним диаметром  $d_{\text{Л}}$  составит  $d_{\text{К}} = d_{\text{Л}} + 2l$ .

Анализ выражения (9) свидетельствует, что значение требуемого обезвреживающего потока  $F$  минимально при условии, в частности, если  $\eta$  равно 1. Однако на практике это условие недостижимо. Поэтому в технических расчетах принимают  $\eta$ , равное 0,8...0,9 [2]. Исходя из этого, внутренний диаметр облучательной кюветы  $d_{\text{К}}$  для одной лампы с внешним диаметром  $d_{\text{Л}}$  при условии  $\eta = 0,9$  найдется выражением

$$d_{\text{К}} = d_{\text{Л}} + \frac{2}{K_{\text{В}}}.$$

С целью увеличения эффективности разложения ОВ в кювете рекомендуется обеспечить перемешивание облучаемого слоя.

Анализ выражения, дающего значение необходимого обезвреживающего потока излучения (6), показывает, что его снижение возможно, в основном, путем уменьшения поглощающей способности среды и повышения квантового выхода разложения ОВ.

Из рассмотрения литературного и экспериментального материала следует, что снижение поглощающей способности среды возможно на основе проведения физических процессов, основанных на отстаивании и фильтрации, а так же химических, связанных с уменьшением цветности воды, например, за счет синергизма пероксида водорода и УФ-облучения, описанного в работах [3, 4].

Увеличение квантового выхода разложения ОВ, согласно результатам исследований [1], возможно за счет повышения температуры и введения в воду окислителей.

Не мало важное значение, согласно (6), имеет и правильный выбор необходимой глубины разложения ОВ (член  $\ln \frac{[ОВ]_0}{[ОВ]}$ ). Вполне понятно, что необоснованное увеличение глубины разложения ОВ приводит к повышенному расходу электроэнергии, увеличению необходимого количества источников излучения и, как следствие, к укрупнению габаритов установки. Рекомендуемым является значение этого показателя равное 100.

Из представленного материала просматривается стратегия создания установки по УФ-очистке воды, которая заключается в использовании как единое целое процессов фильтрации, УФ-облучения с введением окислителя и сорбции остаточных количеств ОВ и продуктов их разложения на угольных фильтрах. При

этом используется источник погружного типа без кварцевого кожуха, дающий излучение в области близкой к вакуумному ультрафиолету.

### 3. Экспериментальное подтверждение принципов и математического аппарата расчета блока УФ-облучателя установки

Принципиальная схема модельной установки для очистки воды под действием УФ-излучения представлена на рис. 3.

УФ-облучатель выполнен на одной лампе. Размеры кюветы: длина — длина рабочей части используемой лампы ИНП 3/250 — 25 см; внутренний диаметр — 1,6 см; толщина облучаемого слоя — 0,5 см; объем кюветы — 0,032 л. Установка рассчитывалась для очистки воды от ОВ при цветности ее до 120 градусов. Испытания проводили с использованием воды из реки Яуза (г. Москва), зараженной отравляющим веществом типа ви-экс или зоман с исходной концентрацией 1 мг/л, пропуская ее через установку [5]. Режим облучения при этом рассчитывался исходя из значения следующих параметров:

- среднее значение в диапазоне длин волн 200–300 нм:
- коэффициента поглощения воды,  $\text{см}^{-1}$  — 0,3;
- коэффициента экстинкции ви-экс, л/(моль·см) — 340;

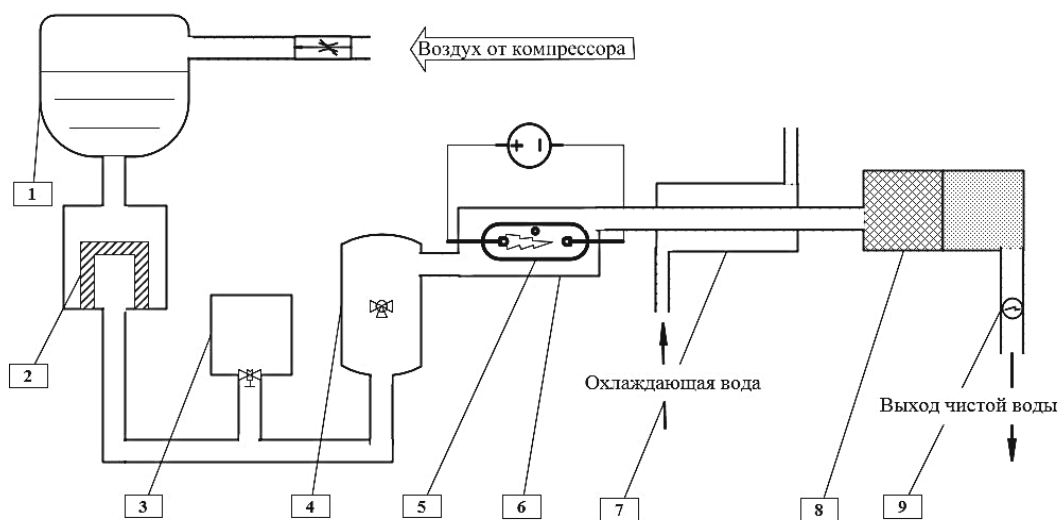


Рис. 3. Схема модельной установки для очистки воды под действием УФ-излучения:

- 1 — емкость с зараженной ОВ водой; 2 — блок механических фильтров; 3 — дозатор для окислителей; 4 — емкость для перемешивания; 5 — оптический блок с лампой ИНП 3/250 погружного типа и источником питания; 6 — облучательная кювета; 7 — водяной холодильник; 8 — блоки фильтров концевой доочистки; 9 — расходомер



коэффициента экстинкции зомана, л/(моль·см) — 10;  
 квантового выхода разложения ви-экс — 0,3;  
 квантового выхода разложения зомана — 10;  
 потока обезвреживающего излучения лампы, Вт — 0,6;  
 — коэффициент использования излучения  $\eta_{\text{п}}$  — 1;  
 — толщина облучаемого слоя, см — 0,5;  
 — коэффициент поглощения излучения  $\eta$  — 0,3;  
 — общая мощность, потребляемая лампой, Вт — 60;  
 — частота следования импульсов, Гц — 4;  
 — количество ламп в кювете, шт. — 1;  
 — степень обезвреживания,  $\frac{[\text{ОВ}]_0}{[\text{ОВ}]}$  — 100.

Расчет, согласно уравнению (6), показывает, что в этом случае установка на одной лампе ИНП 3/250 обеспечивает очистку воды с производительностью 1 л/час. В табл. 2 представлены результаты контроля зараженности воды по стадиям очистки при указанной производительности.

Анализ представленных данных показывает, что после УФ-облучения степень обезвреживания  $\frac{[\text{ОВ}]_0}{[\text{ОВ}]_{\text{уф}}}$  составила для ви-экс 91, для зомана 110. Полученные значения согласуются с заданной степенью обезвреживания, равной 100. При прохождении всех стадий очистки анализ на содержание ви-экс и зомана показал отсутствие этих ОВ на уровне чувствительности биохимического метода анализа.

#### 4. Предложения по дополнению войсковых станций очистки воды блоком УФ-облучателя

В настоящее время с целью создания запасов воды питьевого качества с длительным сроком хранения и обеспечения ею подразделений

видов и родов войск, действующих в отрыве от основных сил, а также населения в условиях чрезвычайных ситуаций, техногенных аварий и природных катастроф из средств полевого водообеспечения имеются станции комплексной очистки воды типа СКО-10К, а также мобильные комплексы (комплекты) доочистки и консервирования воды типа МККВ-400 и МККВ-1000. Особенностью их конструкций является безрегентная схема обработки воды. Технологическое оборудование включает блок очистки, микрофильтрационные и ультрафильтрационные аппараты, блок ультрафиолетового облучения (для СКО-10К), сорбционный блок, электронасосы, электроагрегат (для СКО-10К мощностью 16 кВт, для МККВ-1000 — 30 кВт), трубопроводы, резервуары для чистой воды (оборудование для бутилирования чистой воды). Сутью ультрафильтрационной очистки природной воды в станциях комплексной очистки воды серии СКО является фильтрование «в тупик», т.е. без движения воды вдоль мембраны и специальная технология периодических промывок аппаратов. При такой фильтрации, на мембране за короткое время, оседают загрязняющие вещества, находящиеся в исходной воде, часть из них внедряется в поры мембраны. Производительность аппарата падает. Для восстановления и удаления загрязнений с поверхности мембраны и из ее пор используется специальная технология промывки. Кроме этого, молекулы, вытянутые в длину и имеющие большую молекулярную массу, чем номинальная отсекаемая молекулярная масса мембраны, могут пройти через нее, в отличие от сферических незаряженных молекул данной молекулярной массы. Поэтому для обеспечения требуемого качества очистки воды в условиях высокого содержания в ней одновременно различных антропогенных загрязнителей (например, пестицидов) и токсичных веществ

Таблица 2

Содержание ОВ в воде по стадиям ее очистки

ОВ	Концентрация исходная $[\text{ОВ}]_0$ , мг/л	После фильтрования		После облучения		После сорбционных фильтров	
		$[\text{ОВ}]_{\text{ф}}$ , мг/л	$\frac{[\text{ОВ}]_0}{[\text{ОВ}]_{\text{ф}}}$	$[\text{ОВ}]_{\text{уф}}$ , мг/л	$\frac{[\text{ОВ}]_0}{[\text{ОВ}]_{\text{уф}}}$	$[\text{ОВ}]_{\text{с}}$ , мг/л	$\frac{[\text{ОВ}]_0}{[\text{ОВ}]_{\text{с}}}$
Ви-экс	1,0	1,0	1	0,011	91	0	Полная очистка
Зоман	1,0	1,0	1	0,009	110	0	Полная очистка

дополнительно может быть использован блок УФ-облучателя с узлом насыщения очищаемой воды окислителями.

В качестве примера для станции комплексной очистки воды СКО-10К определим основные конструктивные параметры УФ-облучательной кюветы и ее производительность по очистке воды от ОВ типа ви-экс при использовании в качестве реагента триоксида ксенона в концентрации 40 мг/л.

Исходные данные для расчета.

1. Мощность электрогенератора станции  $W$ , выделяемая для генерации УФ-излучения — 12000 Вт.

2. В качестве источника УФ-излучения рассмотрим ксеноновую лампу ИНП 5/580, имеющую следующие характеристики: энергия одного импульса  $E$  — 150 Дж; КПД преобразования энергии импульса в световую энергию  $\eta_{эл}$  — 0,45; спектральный КПД в области длин волн 200–300 нм  $\eta_{\Delta\lambda}$  — 0,15; частота следования импульсов  $\varphi$  — 10 Гц; длина рабочей части лампы  $L$  — 0,58 м; наружный диаметр  $d_{л}$  — 0,007 м.

3. Требование к воде: коэффициент поглощения  $K_B$  — 30 см<sup>-1</sup>.

4. Параметры удаляемой примеси: значение коэффициента экстинкции ОВ типа ви-экс  $E_{ОВ}$  — 34 м<sup>3</sup>/(моль·м); квантовый выход разложения ви-экс при содержании триоксида ксенона 40 мг/л  $\Phi$  — 0,7.

5. Другие данные: степень обезвреживания  $[ОВ]_0/[ОВ]$  — 100; коэффициент использования излучения  $\eta_{п}$  — 1; коэффициент поглощения среды  $\eta$  — 0,9.

Расчет.

1. Определяем мощность, потребляемую одной лампой,  $W_{л}$

$$W_{л} = E \cdot \varphi = 150 \cdot 10 = 1500 \text{ (Вт)}.$$

2. Находим количество ламп, работу которых может обеспечить используемая энергетическая установка,  $n$

$$n = \frac{W}{W_{л}} = \frac{12000}{1500} = 8 \text{ шт.}$$

3. Определяем величину обезвреживающего потока излучения, генерируемого этими лампами,

$$F = n W_{л} \eta_{эл} \eta_{\Delta\lambda} = 8 \cdot 1500 \cdot 0,45 \cdot 0,15 = 810 \text{ Вт.}$$

4. Из выражения (6) определяем производительность установки  $Q$  (с учетом  $\lambda = 250$  нм)

$$Q = \frac{F \lambda \eta_{п} \Phi E_{ОВ}}{1,197 \cdot 10^8 K_B \ln \frac{[ОВ]_0}{[ОВ]}} = \frac{810 \cdot 250 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 0,7 \cdot 34}{1,197 \cdot 10^8 \cdot 30 \cdot \ln(100)} = 2,62 \cdot 10^{-4} \left( \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right) \approx 1 \left( \frac{\text{м}^3}{\text{час}} \right).$$

5. Рассчитываем размеры облучательной кюветы.

В рамках примера форму облучательной кюветы определим в виде параллелепипеда длиной  $D$ , равной длине рабочей части лампы ИНП 5/580 ( $L$ ) 0,58 м. При параллельном в один ряд расположении восьми ламп по ширине кюветы высота облучательной кюветы  $B$  определится из выражения

$$B = d_k = d_{л} + \frac{2}{K_B} = 0,007 + \frac{2}{30} = 0,033 \text{ м,}$$

а ширина  $\Pi$  кюветы составит

$$\Pi = n \cdot d_k = 8 \cdot 0,033 = 0,264 \text{ м.}$$

При предложенной конструкции и рассчитанных габаритов облучательной кюветы с учетом производительности установки, равной 1 м<sup>3</sup>/час, линейная скорость течения воды в кювете составит около 1 см/с, а время контакта облучаемого объема воды около полутора минут. Такой гидродинамический напор не вызовет разрушение лампы ИНП 5/580.

В используемых для УФ-облучения трубчатых лампах дуга может достигать длины нескольких десятков сантиметров, и ее стабилизация осуществляется стенками. Преимуществом таких ламп являются большие размеры тела свечения, недостатком — воздействие на стенки ударных волн и высоких температур, что приводит к снижению пропускания кварцевой оболочки в коротковолновом диапазоне и снижению срока службы лампы. По этим причинам режимы



работы таких ламп часто выбираются таким образом, при которых достигаемая яркостная температура в УФ-области спектра не превышает  $\sim 9000$  К.

Повышение эффективности очистки воды от ОВ можно ожидать от применения шаровых импульсных ксеноновых ламп [6]. В них достигаются большие, чем в трубчатых, максимальные яркостные температуры за счет высокой плотности энерговклада и особенностей конструкции таких ламп, обусловленных малым межэлектродным расстоянием (порядка нескольких мм) и стабилизацией дуги электродами. Контакт плазмы со стенками в таких лампах не происходит за счет высокого начального давления ксенона (3...7 атм.). При работе в импульсном режиме длительность разряда в шаровых лампах составляет  $10^{-7} \dots 10^{-5}$  с. Благодаря короткой дуге, удельная плотность энерговклада в них выше, что позволяет достигать высоких яркостных температур — вплоть до 30000 К, и возможен эффективный вывод коротковолнового УФ-излучения в обрабатываемые растворы.

### Заключение

Представленный материал свидетельствует, что технология, основанная на фильтрации, УФ-облучении и доочистке на адсорбционных фильтрах, позволяет очищать воду от таких ОВ как ви-экс и зоман. Для достижения наибольшего успеха в эффективности очистки воды необходимо корректное задание требований к установкам подобного типа, а также предусматривать введение в очищаемую воду перед стадией УФ-облучения (устройства 3 и 4 на рис. 3) сильных окислителей типа пероксида водорода, триоксида ксенона, дифторида ксенона или насыщение ее озоном и кислородом воздуха.

Повышение производительности ультрафиолетовых блоков очистки воды связывается в первую очередь с повышением эффективности источников ультрафиолетового излучения по КПД преобразования электрической энергии в световую, спектральному КПД, сроку службы и гидродинамической устойчивости.

### Список источников

1. Шевченко А.В. Теоретические основы технологии очистки воды от боевых отравляющих веществ ультрафиолетовым излучением и окислителями в интересах создания перспективных средств полевого водообеспечения // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2025. № 3 (138). С. 71–83.
2. Соколов В.Ф. Применение бактерицидного излучения для обеззараживания питьевой воды: Дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 342 с.
3. Соколов В.Ф. Опыт проектирования и эксплуатации установок для обеззараживания воды бактерицидными лучами. М.: Стройиздат, 1962. 245 с.
4. Семеняк Л.В. Окислительно-восстановительные и фотохимические процессы с участием пероксида водорода в природных, сточных и модельных системах: Дис. ... канд. хим. наук. М., 1990. 176 с.
5. Лунина Л.В. Фотохимическая очистка природных вод в децентрализованном водоснабжении: Дис. ... канд. техн. наук. Таллин, 1989. 186 с.
6. Мишаков М.А., Камруков А.С. Исследование спектральных характеристик импульсных ксеноновых ламп для комбинированной фотохимической деструкции металлоорганических комплексов в жидких радиоактивных отходах // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. № 06. С. 29–41.