

## СТАТЬИ

УДК 621.31:631.171

**УСТАНОВКА ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ  
УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ****Вендин С.В., Заболотный В.Н., Ульяновцев Ю.Н.***ФГБОУ ВО «Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина»,  
п. Майский, e-mail: elapk@mail.ru*

Представлены результаты исследований по разработке установки для обеззараживания воды УФ излучением, которые состоят в следующем. Предлагается конструктивная схема установки непрерывного действия для обеззараживания воды УФ излучением. Конструкция установки обеспечивает повышение качества обеззараживания воды за счет установки блока по предварительной очистке воды от механической примесей и специальной винтовой вставки для перемешивания слоев воды. Для обеспечения поверхностной или объемной дозы УФ облучения при обеззараживании воды предложены расчетные соотношения, учитывающие интенсивность облучения и конструктивные параметры рабочей зоны установки. Учитывая, что в рассматриваемой конструкции установки поток воды движется внутри цилиндрической кварцевой трубки, преодолевая на пути винтовую вставку, то для расчетных соотношений были использованы теоретические результаты, применимые к одновинтовому насосу. Фактически представленный технологический процесс УФ обработки воды идентичен обратной задаче для одновинтового насоса. Предложен алгоритм управления временем УФ обработки воды в цилиндрическом аппарате с винтовой вставкой. Основная функция управления заключается в обеспечении расхода воды при подаче на вход аппарата и напора создаваемого в системе при подаче на вход аппарата. Представленные расчеты направлены на обеспечение дозы УФ облучения по времени. Эффект повышения однородности облучения объема воды может быть конструктивно реализован изменением шага и числа витков винтовой вставки.

**Ключевые слова:** УФ обеззараживание воды, очистка от примесей, бактериальная очистка, доза УФ облучения, аппарат непрерывного действия, алгоритм управления

**INSTALLATION FOR WATER DISINFECTION  
WITH ULTRAVIOLET RADIATION****Vendin S.V., Zabolotniy V.N., Ulyantsev Yu.N.***Belgorod State Agricultural University named after V.Gorin, Maiskiy, e-mail: elapk@mail.ru*

The results of studies on the development of a plant for water disinfection by UV radiation are presented, which are as follows. A constructive scheme of a continuous operation plant for water disinfection by UV radiation is proposed. The design of the installation provides an increase in the quality of water disinfection by installing a block for preliminary water purification from mechanical impurities and a special screw insert for mixing water layers. To provide a surface or volume dose of UV irradiation during water disinfection, calculation ratios are proposed that take into account the intensity of irradiation and the design parameters of the working area of the installation. Considering that in the considered design of the installation, the water flow moves inside a cylindrical quartz tube, overcoming a screw insert on the way, the theoretical results applicable to a single screw pump were used for the calculated ratios. In fact, the presented technological process of UV water treatment is identical to the inverse problem for a single screw pump. An algorithm for controlling the time of UV water treatment in a cylindrical apparatus with a screw insert is proposed. The main control function is to ensure the flow of water when supplied to the inlet of the apparatus and the pressure created in the system when it is supplied to the inlet of the apparatus. The presented calculations are aimed at providing the dose of UV irradiation over time. The effect of increasing the uniformity of irradiation of the volume of water can be constructively implemented by changing the pitch and number of turns of the screw insert.

**Keywords:** UV disinfection of water, purification from impurities, bacterial purification, UV radiation dose, continuous apparatus, control algorithm

Вода является главным ресурсом для поддержания жизни человека, так же вода используется при производстве сельскохозяйственной продукции. Актуальность данного вопроса связана с тем, что при контакте с водой в организм может попасть большое количество вредных микроорганизмов. Поэтому перед использованием воды необходимо провести ее обеззараживание [1].

Одним из методов обеззараживания воды является обработка хлорсодержащими реагентами. Однако этот способ имеет недостаток, при котором он может привести к тяжелым заболеваниям с образованием

высокотоксичных соединений. При несоблюдении дозы вносимого вещества в воде она может причинить вред человеку, несмотря на то, что некоторые вирусы обладают высокой устойчивостью к хлору, для чего необходимо увеличивать количество вносимого вещества, что приводит к появлению привкуса и запаха хлора.

Еще одним способом обеззараживания воды является озонирование. При добавлении озона (O<sub>3</sub>) во время очистки воды происходит реакция на окисление, что приводит к устранению вредных микроорганизмов. Но этот способ, связанный с получением

озона, энергозатратен и дорог. Недостатком этого способа обеззараживания также является то, что озон требует большого внимания и соблюдения безопасности, так как озон – опасный газ, требующий отдельных помещений, оборудованных приточно-вытяжной вентиляцией и специализированными датчиками [2-4].

Обеззараживание ультрафиолетовым излучением (УФ-обеззараживание) – физический метод обеззараживания, суть которого заключается в том, что под действием фотохимической реакции ультрафиолета происходит невосстанавливаемые нарушения ДНК и РНК вредных микроорганизмов. То есть благодаря воздействию ультрафиолета С-диапазона (с длиной волны 265-275 нм) образуются молекулы ДНК и РНК, которые не допускают размножения вредных микроорганизмов. Такая клетка называется инактивированной. УФ-обеззараживание можно использовать для множества вредных микроорганизмов, поскольку клетки не имеют механизма, который бы гарантированно защищал их от бактерицидного излучения.

Вредные микроорганизмы имеют различную чувствительность к УФ-воздействию: наиболее чувствительны бактерии в вегетативной форме и паразитические простейшие, менее чувствительны вирусы и споровые формы бактерий, наиболее устойчивы грибы и плесневые грибы. Критерием сравнения чувствительности микроорганизмов к действию бактерицидного излучения является количество энергии, затрачиваемое для достижения данной степени обеззараживания. Доза облучения принимается как мера бактерицидной энергии излучения, которая является произведением интенсивности облучения в момент облучения и выражается в Дж/м<sup>2</sup>. Каждый тип микроорганизмов требует определенной дозы УФ для инактивации. Международная ультрафиолетовая ассоциация IUVA периодически проводит обзор всех известных исследований и публикует список доз УФ для инактивации различных видов микроорганизмов.

Важно отметить, что в мировой практике используется понятие-термин «поверхностная бактерицидная доза» или «флюенс» для обеззараживания воды и воздуха в объеме. Использование понятия «объемная бактерицидная доза» в мировой практике не используется, так как содержит слишком много допущений, делающих его использование во многих случаях некорректным. Например, предполагается, что УФ-излучение равномерно распределено по всему объему помещения или жидкости, в котором осуществляется интенсивное и равномерное

перемешивание воздуха (это происходит только при идеальных условиях), либо помещение имеет правильную форму (часто помещения имеют вытянутую форму). Поэтому в современных расчетах и рекомендациях по выбору УФ-оборудования во всем мире, кроме России, используется только поверхностная доза [5].

### Материалы и методы исследования

Цель и научная новизна представленных исследований состоит в повышении эффективности обеззараживания воды за счет обработки потоком УФ излучения. При этом задачи исследований включали: анализ известных технических решений, разработку конструктивной схемы установки для обеззараживания воды УФ излучением, а также разработку алгоритма управления процессом УФ обработки воды по времени в цилиндрическом аппарате с винтовой вставкой.

Методология исследований предполагала использование методов анализа научной литературы и теоретических методов анализа движения жидкостей по винтовым поверхностям.

### Результаты исследования и их обсуждение

В современной концепции развития систем водоподготовки УФ-обеззараживание служит основой принципа многобарьерности в обеззараживании воды [6-9]. Суть принципа в том, что используется не одна технология обеззараживания, а несколько, сочетание которых позволяет сгладить недостатки отдельных технологий. Наиболее распространено сочетание ультрафиолетового излучения с фильтрами для очистки воды от механических примесей. Фильтра нужны для того, чтобы очищать воду от механических примесей, так как во время обеззараживания микроорганизмы могут находиться на примеси и быть защищенными от попадания на них лучей ультрафиолета, что может привести к некачественной обработке. Также есть и недостатки, которые могут снизить качество обработки. Перед подачей воды в камеру УФ-обработки нужно добиться того, чтобы мутность воды не превышала 5 единиц мутности (ЕМ) на один литр.

Поэтому для повышения качества обеззараживания воды была предложена комбинированная установка (рисунок), содержащая блок предварительной очистки воды от механических примесей и блок ультрафиолетовой обработки. Для повышения однородности обработки воды в УФ-узле установлена специальная винтовая вставка, которая обеспечивает перемешивание слоёв воды.

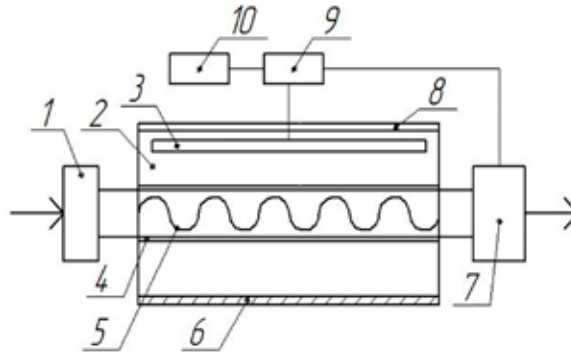


Схема установки для УФ обеззараживания воды:

1 – блок предварительной очистки воды; 2 – блок ультрафиолетовой обработки; 3 – источник УФ излучения; 4 – кварцевая трубка; 5 – винтовой механизм; 6 – отражающий элемент; 7 – электронасос; 8 – отражающий элемент; 9 – блок управления; 10 – блок питания

Процесс работы установки состоит в следующем. Сначала вода поступает на блок предварительной очистки воды (1), далее вода прошедшая очистку от механических примесей попадает во второй блок ультрафиолетовой обработки (2). Вода поступает в камеру ультрафиолетовой обработки по прозрачной кварцевой трубке (4). Внутри трубки установлен специальный винтовой механизм (5), который перемешивает различные слои воды. На эту кварцевую трубку воздействуют ультрафиолетовые лучи, излучаемые ультрафиолетовым диодом (3), который излучает в диапазоне оптического спектра 265-275 нм поток бактерицидного излучения не менее 700 мВт. Также стенки камеры ультрафиолетовой обработки выполнены из отражающих элементов (6), (8), чтобы отражать ультрафиолетовое излучение и обратно направлять на кварцевую трубку (4). После прохождения процесса обеззараживания вода выходит из УФ камеры и с помощью электронасоса (7) вода поступает к потребителю. Также в установке имеется блок управления (9), который подсоединен к ультрафиолетовому диоду (3) и к блоку питания (10). Добавление блока по предварительной очистке воды от механических примесей и установка винтовой вставки в кварцевую трубку для перемешивания различных слоев жидкости позволило повысить качество обработки воды. Данное устройство позволяет обеспечить полное обеззараживание воды со степенью обеззараживания на 99,9%.

Как указывалось ранее, эффективность процесса обеззараживания в первую очередь будет определяться обеспечением поверхностной или объемной дозы УФ облучения, полученной объектом обеззараживания.

Поверхностная  $D_F$  (Дж/м<sup>2</sup>) или объемная  $D_V$  (Дж/м<sup>3</sup>) дозы УФ облучения бу-

дут определяться интенсивностью (удельной мощностью) воздействия  $P_F$  (Вт/м<sup>2</sup>) или  $P_V$  (Вт/м<sup>3</sup>), а также временем облучения – экспозицией  $\tau$  (с). Поверхностная или объемная доза УФ облучения, а также время облучения связаны расчетными соотношениями:

$$D_F = P_F \tau, \quad (1)$$

$$D_V = P_V \tau. \quad (2)$$

Если поверхностную  $P_F$  и объемную  $P_V$  удельные мощности воздействия можно обеспечить установленной мощностью источника УФ излучения и размерами рабочей зоны при облучении продукта (воды), то для обеспечения экспозиции  $\tau$  надо учитывать выбранный способ обработки – периодический или поточный (непрерывный).

При периодическом способе обработки экспозицию обеспечить несложно, выдерживая продукт в зоне облучения необходимое время.

При поточном (непрерывном) способе обработки экспозиция  $\tau$  будет определяться рабочей длиной зоны облучения  $L_p$  (длинной аппарата) (м) и скоростью передвижения продукта в аппарате  $v$  (м/с):

$$\tau = L_p v, \quad (3)$$

Для разработанной конструкции установки для УФ обеззараживания воды процесс обеззараживания осуществляется непрерывно. Кроме того, особенностью конструкции (рисунок) является то, что поток воды движется внутри цилиндрической кварцевой трубки, преодолевая на пути винтовую вставку. Следовательно скорость движения воды будет определяться рабочим сечением потока воды  $S_p$  (м<sup>2</sup>) и параметрами винтовой вставки (5), к которым относятся диаметр  $D$ , шаг  $t$  и число витков  $k$ .

Расчетные параметры в системе подачи воды на вход установки

Показатели	Значения						
	5	10	20	30	40	50	60
Время обработки $\tau$ , с	5	10	20	30	40	50	60
Расход воды $Q$ , л/с	0,20	0,10	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02
Напор воды $H$ , м	2,04	0,51	0,13	0,06	0,03	0,02	0,01
Мощность насоса $N_p$ , Вт	4444,44	555,56	69,44	20,58	8,68	4,44	2,57

Заметим, что решаемая технологическая задача, по сути, представляет задачу осесимметричного винтового течения жидкости [10]. В тоже время ее можно представить, как обратную задачу для одновинтового насоса. Теория расчета винтовых насосов разработана достаточно полно.

С учетом общих физических подходов для непрерывного движения продукта через рабочую зону аппарата можно показать, что время УФ обработки  $\tau$  может быть рассчитано с учетом рабочей зоны облучения  $L_p$  при обеспечении требований по расходу  $Q^p$  (м<sup>3</sup>/с) напору  $H$  (м) воды подаваемой на вход установки. Для этого можно использовать приведенные ниже расчетные соотношения.

Расход воды  $Q$  проходящей через аппарат определяется равенством:

$$Q = S_p v. \quad (3)$$

Скорость движения потока воды  $v$  в аппарате равна:

$$v = L_p / \tau. \quad (4)$$

Рабочую длину зоны облучения  $L_p$  определим с учетом параметров винтовой вставки:

$$L_p = kt, \quad (5)$$

где  $k$  – число витков винтовой вставки;  $t$  – шаг винта, м.

Напор воды  $H$  и расход воды  $Q$  связаны соотношением:

$$Q = S_p \sqrt{2gH}. \quad (6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

С учетом соотношений (3) – (6) вытекают рабочие формулы для формирования алгоритма управления временем УФ обработки воды  $\tau$  в цилиндрическом аппарате с винтовой вставкой.

Суть алгоритма управления состоит в следующем.

1. С учетом дозы УФ облучения ( $D_F, D_V$ ) и интенсивности облучения ( $P_F, P_V$ ) определяем время обработки  $\tau$ :

$$\tau = D_F / P_F, \quad (7)$$

$$\tau = D_V / P_V. \quad (8)$$

2. Определяем расход воды при подаче на вход аппарата  $Q$ :

$$Q = S_p v = \frac{S_p L_p}{\tau} = \frac{S_p kt}{\tau}. \quad (9)$$

3. Определяем напор, создаваемый в системе при подаче на вход аппарата  $H$ :

$$H = \frac{1}{2g} \left( \frac{Q}{S_p} \right)^2. \quad (10)$$

4. Далее алгоритм переходит к управлению питающим насосом в системе для обеспечения  $Q$  и  $H$ .

Заметим, что для подачи воды в систему мощность насоса должна быть не менее расчетной мощности:

$$N_p = \frac{\rho g Q H}{\eta_n}, \quad (11)$$

где  $\rho$  – физическая плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\eta_n$  – КПД насоса.

Для примера в таблице представлены расчетные значения  $Q, H$  и  $N_p$  в зависимости от  $\tau$  при следующих значениях исходных данных:  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $k = 10$ ;  $t = 0,1$  м;  $S_p = 0,001$  м<sup>2</sup>;  $\eta_n = 0,9$ .

Необходимо отметить также, что представленные расчеты направлены на обеспечение дозы УФ облучения по времени. Эффект повышения однородности облучения объема воды может быть конструктивно реализован изменением шага и числа витков винтовой вставки.

Немаловажным вопросом при УФ обработке является также и обеспечение интенсивности облучения. Эти задачи решаются с учетом законов распространения электромагнитного излучения в УФ диапазоне и имеют свою специфику.

**Выводы**

Представлены результаты исследований по разработке установки для обеззараживания воды УФ излучением, которые состоят в следующем:

1. Разработана конструктивная схема установки непрерывного действия для обез-

зараживания воды УФ излучением. Предлагаемая конструкция установки обеспечивает повышение качества обеззараживания воды за счет установки блока по предварительной очистке воды от механических примесей и специальной винтовой вставки для перемешивания слоёв воды.

2. Для обеспечения поверхностной или объемной дозы УФ облучения при обеззараживании воды предложены расчетные соотношения, учитывающие интенсивность облучения и конструктивные параметры рабочей зоны установки.

3. Предложен алгоритм управления временем УФ обработки воды в цилиндрическом аппарате с винтовой вставкой. Основная функция управления заключается в обеспечении расхода воды при подаче на вход аппарата и напора создаваемого в системе при подаче на вход аппарата.

#### Список литературы

1. Соколова Н.Ф. Средства и способы обеззараживания воды // Медицинский алфавит. Эпидемиология и гигиена. 2013. № 1. С. 44-54.
2. Абуова Г.Б., Ибатуллина В.Р., Филимонов В.Н. Сравнительная оценка современных методов обеззараживания для водоподготовки // Перспективы развития строительного комплекса. 2017. № 1. С. 17-21.
3. МУ 2.1.4.719-98. «Санитарный надзор за ультрафиолетовые излучения в технологии подготовки питьевой воды». [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200030958> (дата обращения: 28.11.2022).
4. Томилов В.В., Томилова О.С., Сергеев П.Б. Совершенствование методики контроля дозы ультрафиолетового облучения воды // Омский научный вестник. 2017. № 1 (151). С. 101-103.
5. Рахманин Ю.А. Загайнова А.В., Артемова Т.З., Гипп Е.К., Кузнецова К.Ю., Курбатова И.В., Грицок О.В., Новожилов К.А., Асланова М.М., Маня Т.Р., Федец З.Е., Недачин А.Е., Дмитриева Р.А., Доскина Т.В., Абрамов И.А., Журавлев П.В. Определение унифицированных доз ультрафиолетового обеззараживания воды от бактериального, вирусного и паразитного заражения // Гигиена и санитария. 2019. № 98(12). С. 1342-1348.
6. Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И. Сборка корпусных установок с амальгамными лампами типа УДВ-А для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 5. С. 28-32.
7. Долгих П.П., Макулькина Ю.Л. Инновационная система обеззараживания питьевой воды на основе оптических электротехнологий // Вестник КрасГАУ. 2015. № 8. С. 121-127.
8. Томилов В.В., Томилова О.С. Экспериментальное исследование эффективности работы ультрафиолетовых стерилизаторов воды // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 94-98.
9. Патент 2736990 Российская Федерация, МПК C02F 1/32, C02F 1/36. Устройство для очистки и обеззараживания воды / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, А.Ю. Ракова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ. Заявка № 2020108719, заявл. 27.02.2020; опубл. 23.11.2020 Бюл. № 33.
10. Ковалёв В.П., Сизых Г.Б. Осесимметричные винтовые течения идеальной жидкости // ТРУДЫ МФТИ. 2016. Т. 8. № 3. С. 171-179.