

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ: НОВАЯ КОНЦЕПЦИЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОДЫ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Н. И. Базалеев,

кандидат технических наук, НТЦ электрофизической обработки НАН Украины, Харьков

В. Ф. Клетиков,

*доктор физико-математических наук, академик НАНУ,
НТЦ электрофизической обработки НАН Украины, Харьков*

В. В. Литвиненко, *кандидат физико-математических наук,*

НТЦ электрофизической обработки НАН Украины, Харьков

С. Н. Шалятин,

Харьковская электротехническая компания, Харьков

Надійшла до редакції 17.12.03

Резюме: В работе рассмотрены экологические, технические и экономические аспекты внедрения технологии обеззараживания воды бактерицидными ультрафиолетовыми лучами. Предложена модель процесса обеззараживания и методика проектирования и создания УФ-установок.

Резюме: В роботі розглянуто екологічні, технічні та економічні аспекти впровадження технології знезараження води бактерицидними ультрафіолетовими променями. Запропоновано модель процесу знезараження та методика проектування та створення УФ-установок.

Abstract: Ecological, engineering and economic aspects of implementation of water disinfection technology based on utilization of ultraviolet rays are discussed in the paper. The model of disinfection process and the method of projecting and assembling ultraviolet units are proposed.

Ключевые слова: ультрафиолетовое бактерицидное излучение, обеззараживание воды, распределение дозы.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, общей особенностью электрофизических лучевых технологий является получение заданного эффекта в результате радиационной передачи энергии в установленном спектральном диапазоне к технологическому объекту. Множество эффектов и,

соответственно, приложений, получаемых с помощью данных технологий, обусловлено широкими возможностями вариации параметров процесса облучения: спектр, энергия, мощность, время воздействия, внешние условия обработки, внутреннее состояние технологического объекта. Разнообразие и технологическая емкость получаемых эффектов

столь широка, что многие направления выделились в самостоятельные отрасли науки и промышленности, развитие которых определяет технический прогресс. К наиболее очевидным примерам можно отнести электронно-лучевую сварку, лазерные технологии, радиационно-химические технологии. В то же время ряд интересных эффектов не получили столь широкого развития несмотря на их актуальность и технологическую привлекательность. К числу таких примеров относится обеззараживание воды ультрафиолетовыми лучами – метод известный более ста лет, получивший достаточно серьезное развитие на этапе становления централизованных предприятий водоподготовки [1], имеющий примеры внедрения, отмечаемый во многих классических трудах [2], как эффективный, и тем не менее, в силу традиционного мышления, не получающий должного внедрения.

В настоящее время, когда начали в глобальных масштабах сказываться отрицательные последствия химических технологий водоподготовки, возникла потребность внедрения новых высокоэффективных безреагентных методов обеззараживания и очистки, позволяющих снизить степень химического загрязнения питьевых и сточных вод. В этой связи представляется уместной разработка и глобальное внедрение в практику водоподготовки и водоотведения метода обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением, принципиальной особенностью которого является отсутствие вредного влияния на физико-химические и органолептические показатели обеззараженной воды при более высоком обеззараживающем действии.

Анализировать причины того, что данный метод уступил химическим реагентам на рынке технологий водоподготовки, следует во временном срезе. Прежде всего, следует отметить, что от крупного предприятия водоподготовки и очистки сточных вод зависит жизнедеятельность больших населенных

пунктов и промышленных предприятий, то есть, оно должно быть стабильно функционирующим и контролируемым. На момент выбора между химическими окислителями (хлор, гипохлорит натрия) и ультрафиолетовым излучением (начало 1950-х гг.), не было стабильно работающих источников ультрафиолетового излучения. Использование большого количества ламп – УФ-излучателей предъявляло повышенные требования к их качеству, ресурсу, изменению интенсивности бактерицидного излучения в процессе работы, контролю большого количества одновременно работающих УФ ламп и т. п. Одной из главных причин сдерживания развития альтернативных технологий стали устаревшие стандарты и методические руководства по контролю эффективности обеззараживания. В соответствии с существующими нормативными документами контроль эффективности обеззараживания осуществляется по наличию в воде остаточного хлора. Есть хлор – вода обеззаражена, нет хлора в воде – значит вода по своим микробиологическим параметрам не соответствует санитарно-гигиеническим требованиям.

Необходимо обратить особое внимание на то, что хлор опасен не только при обеззараживании питьевых вод, но и при обеззараживании сточных вод. Он способствует образованию в воде высокотоксичных диоксидов и тригалометанов. Насыщенные хлором сточные воды сбрасываются в поверхностные водоемы – реки и водохранилища, откуда она поступает на питьевые водозаборы других городов и поселков, жители которых вынуждены употреблять отравленную токсинами воду. Академик НАН Украины В. В. Гончарук отмечал: "Небольшие количества нефтепродуктов, которые попадают в организм с питьевой водой, менее опасны, чем вода, загрязненная теми же нефтепродуктами и обеззараженная хлором" ("Урядовий кур'єр" від 5.08.2000 р.). Кроме того, за-

грязнение водоемов хлором губительно сказывается на жизнедеятельности флоры и фауны водоемов.

С появлением нового поколения бактерицидных УФ-ламп с высокими показателями стабильности параметров излучения и высоким коэффициентом выхода коротковолнового (обладающего наибольшим бактерицидным действием) УФ-излучения и микропроцессорной техники на рынке возник ряд фирм, специализирующихся на производстве установок, ориентированных на локального пользователя с объемами потребления воды до 100 м³/ч [3]. Тем не менее за небольшим исключением [1, 4] УФ-метод обеззараживания воды и в настоящее время остается за порогом централизованных предприятий водоподготовки и очистки сточных вод. Для того, чтобы не оставить в тени перспективный, экологически безупречный метод требуется радикальное изменение подхода к созданию установок для УФ-обеззараживания воды.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Причины сложившейся ситуации требуют более подробного рассмотрения. Начать следует с наиболее очевидных. К первой группе причин нужно отнести кажущуюся простоту реализации метода. Для демонстрации приводим "обобщенную" формулу изобретения встречающуюся в патентах: "УФ-излучатель помещается в корпус, снабженный устройством ввода-вывода воды, с целью равномерной обработки воды устанавливается турбулизатор, за время прохождения через камеру жидкость получает требуемую дозу ультрафиолетового излучения..." Более или менее добросовестная реализация такой конструкции вполне способна дать ожидаемый эффект на установках небольшой производительности для воды с невысоким значением первичной зараженности, низким коэффи-

циентом поглощения ультрафиолета (как правило, вода из подземных источников), содержанием железа и жесткости в пределах установленной нормы. Иначе складывается ситуация при попытке создания установок, предназначенных для обеззараживания воды из поверхностных источников или для обеззараживания сточных вод. В настоящее время в Украине только 2 % поверхностных вод по показателю бактериальной зараженности оцениваются как удовлетворительные (академик НАН Украины В. В. Гончарук, газета "СВІТ", №1-2 2001 г.). В этом случае начинают срабатывать те скрытые минусы, которые могли не приниматься во внимание при небольших значениях производительности. Приведем некоторые из них:

- используемые мощные лампы высокого (среднего) давления содержат более широкий спектр излучения, в том числе длинноволновую часть спектра, способную вызывать в зависимости от типа бактерии и величины УФ-дозы как гибель, так и репарацию (восстановление) пораженной клетки;
- присутствующие в воде примеси способны в различной степени рассеивать различные составляющие спектра излучения;
- необходимость использования дополнительных химических реагентов (хлор, озон, гипохлорит натрия) требует определения оптимального соотношения химических и физических факторов обеззараживания с целью достижения мультипликативного синергетического эффекта [5];
- необходимость более частой очистки поверхностей защитных кварцевых чехлов от органических и минеральных отложений, существенно снижающих интенсивность бактерицидного УФ-излучения;
- нагревание УФ-излучателей;
- интенсивный контакт воды с внутренней

- поверхностью камеры обработки может вызвать коррозионные процессы;
- использование турбулизаторов увеличивает гидродинамические потери в сети.

Исходя из вышесказанного, становится очевидным необходимость выработки индивидуального подхода к созданию высокопроизводительных установок, основанного на:

- комплексном изучении физико-химических и биологических свойств воды конкретного источника, а также их динамики в течение годового цикла;
- моделировании физико-химических, биологических, гидродинамических процессов, происходящих в проектируемой установке при взаимодействии УФ-излучения с технологическим объектом – водой;
- системном анализе и учете особенностей сопутствующих капитальных сооружений при проектировании и изготовлении установок.

Если определение физико-химических и микробиологических параметров воды производится по стандартным методикам, то выполнение последних двух пунктов затруднено из-за отсутствия соответствующих методик и принципов проектирования УФ-установок.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УФ-ЛУЧЕЙ С ВОДОЙ И ЕЕ КОМПОНЕНТАМИ

Построение модели взаимодействия УФ-лучей с компонентами воды является многоэтапным наукоемким процессом. И здесь уместно вернуться к общему определению электрофизических лучевых технологий и к тем подходам, которые были выработаны ав-

торами при создании электрофизических комплексов [6]. Предлагаемая концептуальная модель физико-химических и биологических процессов, происходящих при обеззараживании воды УФ-лучами, апробирована при разработке ряда других электрофизических лучевых технологий [7] и адаптирована авторами с учетом существующего опыта по проектированию, изготовлению и внедрению УФ-установок. Модель является, по сути, структурной оболочкой для автоматизации эксперимента и создания экспертной системы автоматизированного проектирования. Ввиду многофакторности процесса возникает задача учета взаимосогласованного действия всех факторов и оценки их вклада в формирование обеззараживающего эффекта – на основании этого надо сформулировать оптимальные параметры технологического процесса.

На рис. 1 изображена схема формирования обеззараживающего эффекта под действием УФ-излучения. Определяющим является фактор параметров УФ-излучения FUV (спектр излучения, мощность, доза), обуславливающий физико-химические и биологические превращения. Обеззараживающий эффект основан на летальных фотохи-

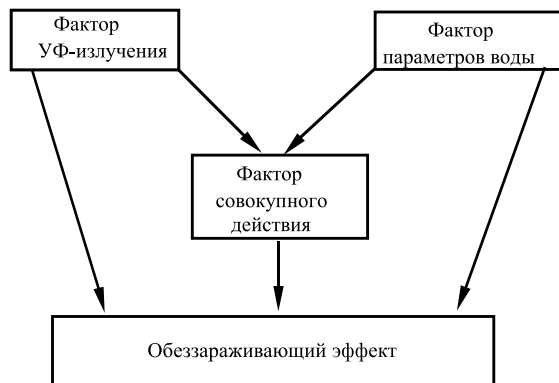


Рис. 1. Схема формирования обеззараживающего эффекта под действием УФ-излучения

мических реакциях в живой материи микроорганизмов [8] (бактериальных вирусов, микробов и простейших), приводящих при облучении большими дозами УФ-излучения к инактивации биосинтетического аппарата воспроизводства жизненно важных макромолекул ДНК, РНК и белков, гибели аминокислот, пептидов и белков, повреждению ДНК, нарушению проницаемости мембран, образованию сшивки белок – ДНК и пр. При этом различают бактерицидный (гибель клеток), бактериостатический (клетки живут, но не размножаются) и разнообразные летальные мутационные эффекты. Бактерицидное действие УФ-излучения носит одноударный характер. Хотя квантовый выход составляет 10^5 – 10^8 , для уничтожения клетки достаточно одного кванта энергии (один летальный удар) УФ-излучения при условии его поглощения молекулой ДНК, играющей решающую роль в жизнедеятельности клетки.

Интенсивность фотохимических реакций, приводящих к гибели клетки, зависит от длины волны и дозы облучения. Спектр действия УФ-излучения, приводящий к гибели клетки, максимален при 260–265 нм (результат повреждения нуклеиновых кислот, преимущественно поглощающих излучение в

указанном спектральном диапазоне), для отдельных "белковых" микроорганизмов – 280 нм (белковый максимум), для смешанных – 260 и 280 нм. Летальный эффект УФ-излучения с длиной волны более 320 нм незначителен. При длинах волн менее 200 нм эффективность инактивации возрастает из-за ионизирующего действия излучения. На бактерицидное действие УФ-излучения оказывают влияние такие факторы, как температура среды, характер окислительного обмена и пищевой режим клеток, фаза роста, наличие в среде химических протекторов или сенсибилизаторов и пр. Необходимо принимать во внимание, что повторное поглощение кванта излучения с длиной волны 310–340 нм может привести к репарации (восстановлению клетки) и повысить выживаемость бактерий от 1 до 40 % [8]. На рис. 2 приведена кривая бактерицидной эффективности УФ-излучения и спектральные характеристики УФ-ламп. Как видно, ряд ламп, используемых в высокопроизводительных установках, имеет достаточно широкий разброс спектра, и таким образом существует возможность протекания всего многообразия вышеперечисленных механизмов взаимодействия УФ-излучения с микроорганизмами.

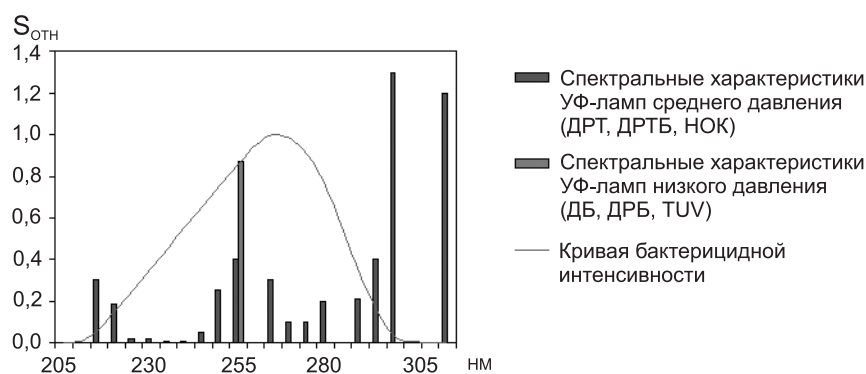


Рис. 2. Относительная спектральная эффективность бактерицидного УФ-излучения

Роль фактора параметров воды F_{wat} в формировании обеззараживающего эффекта состоит в большей или меньшей степени ослабления УФ-излучения, т. е. равномерности распределения дозы излучения в зоне размещения бактерий. В зависимости от первичной зараженности воды выбирается доза УФ-излучения. В случае обработки поверхностных и сточных вод целесообразно вносить в воду дополнительные химические реагенты, но в количествах гораздо меньших, чем при использовании окислительных технологий. Окислители, взаимодействуя с сульфгидридными группами аминокислот белков наружных оболочек, делают микроорганизм более уязвимым к действию других факторов (УФ), поражающих жизненно важные структурные единицы клетки. Эффективность такого совместного действия и возможность снижения количества физического и химического дезинфектанта обосновано в работе [5].

Фактор совокупного действия F_{mix} определяет особенности протекания фотохимических реакций, продукты которых способны усиливать бактерицидный или бактериостатический эффект, а в ряде случаев создавать пролонгирующее обеззараживающее действие. Например, часть присутствующего в воде кислорода под действием УФ-излучения трансформируется в озон, а молекулы воды способны образовывать радикалы, в т. ч. перекись водорода, являющиеся сильными окислителями. Возможно также протекание фотостимулированных реакций разложения органических соединений [9].

Таким образом можно получить обобщенную формулу для нахождения минимума функционала, описывающего формирование обеззараживающего эффекта:

$$\frac{N}{N_0} = f(F_{UV}, F_{wat}, F_{mix}) \rightarrow \min ,$$

где N_0 – первичная зараженность бактериями, N – количество бактерий после обработки.

Таблица 1. Основные параметры обеззараживаемой воды

Показатель	Значение
1. Взвешенные вещества, мг/дм ³	14,9
2. Прозрачность, см	34
3. БПК ₅ , мг/дм ³	8,7
4. ХПК, мг/дм ³	37
5. Железо общее, мг/дм ³	0,3
6. Нефтепродукты, мг/дм ³	0,12
7. Коли-индекс, КОЕ/дм ³	2 400 000

Его решением будет служить уравнение регрессии, получаемое на основе многофакторного эксперимента. Установив для конкретного источника воды оптимальные значения дозы УФ-излучения, типа излучателя (низкого, среднего давления), необходимость применения дополнительных реагентов и их количеств, получаем исходные данные для проектирования установки. В качестве примера на рис. 3 приводим экспериментальные данные по изучению изменения коли-индекса в сточной воде, обрабатываемой УФ-излучением с длиной волны $\lambda = 253,7$ нм; горизонтальная линия показывает максимальный уровень бактериального загрязнения сточных вод, сбрасываемых в открытые водоемы (СанПиН 4630-88 "Охрана поверхностных вод от загрязнения").

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ

Проектирование установок для внедрения на крупных водохозяйственных предприятиях требует комплексного учета как исходных факторов – тип источника водоснабжения, параметры воды, суточный и мгновенный расход воды, допустимое значение гидравлического сопротивления в сети, энергоемкость и др., так и конечных характеристик установки – габариты, вес, геометрия камеры облучения, капитальные и эксплуатационные затраты, производительность.

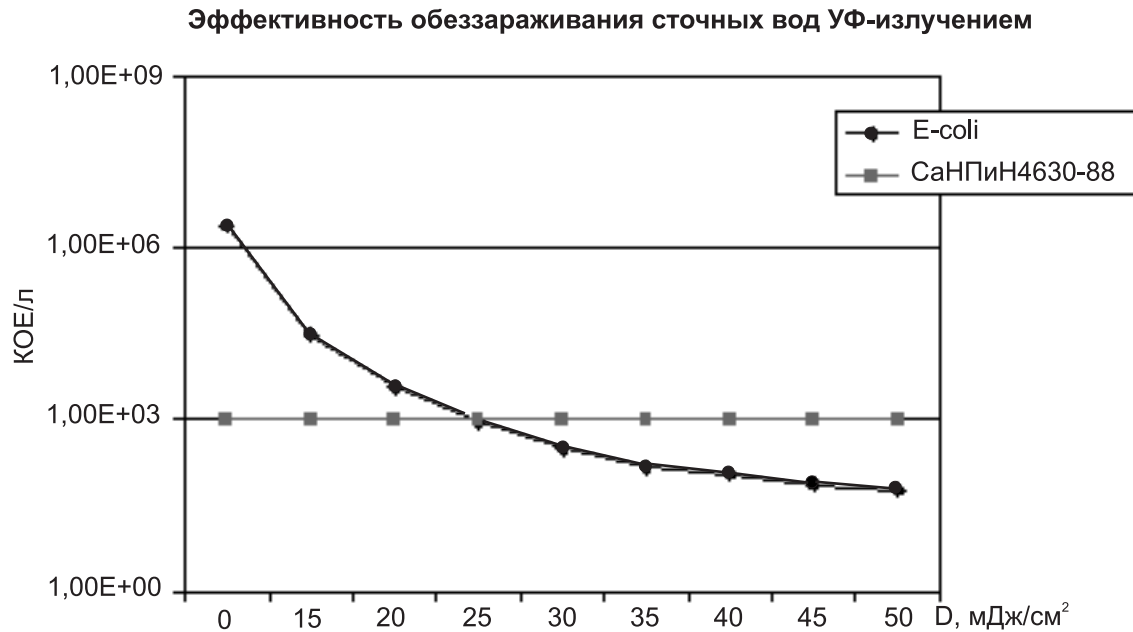


Рис. 3. Изменение микробиологического загрязнения сточной воды в зависимости от величины поглощенной УФ-дозы

Установка должна обеспечивать:

- равномерность облучения жидкости в пределах установленной дозы;
- высокий коэффициент использования излучения;
- низкие потери давления в сети водопровода, в который вмонтирована установка;
- большие объемы обработки жидкости, соизмеримые с реальными потребностями предприятия в обработке питьевой, технической или сточной воды;
- коррозионная устойчивость.

Одна из основных проблем – обеспечение равномерности облучения воды – решается, исходя из общего определения поверхностной дозы УФ-излучения, получаемой объемом потока воды, проходящей через камеру обработки.

$$D = \int_{r_1}^{r_2} \frac{I(r)}{s_r} \cdot t_r \cdot dr,$$

где r – обобщенная координата пространства камеры облучения, $I(r)$ – интенсивность излучения в точке r , s_r – площадь поверхности элементарного объема; t_r – время пребывания элементарного объема в точке r , r_1, r_2 – пределы интегрирования, определяемые конструкцией камеры облучения и расположением в ней УФ-источников. Не случайно доза рассматривается как интегральная величина, получаемая поверхностью элементарного объема за время прохождения через камеру обработки, поле излучения в которой, как правило, распределено неравномерно. Существующие подходы к оценке дозы по среднему показателю или по наихудшему оп-

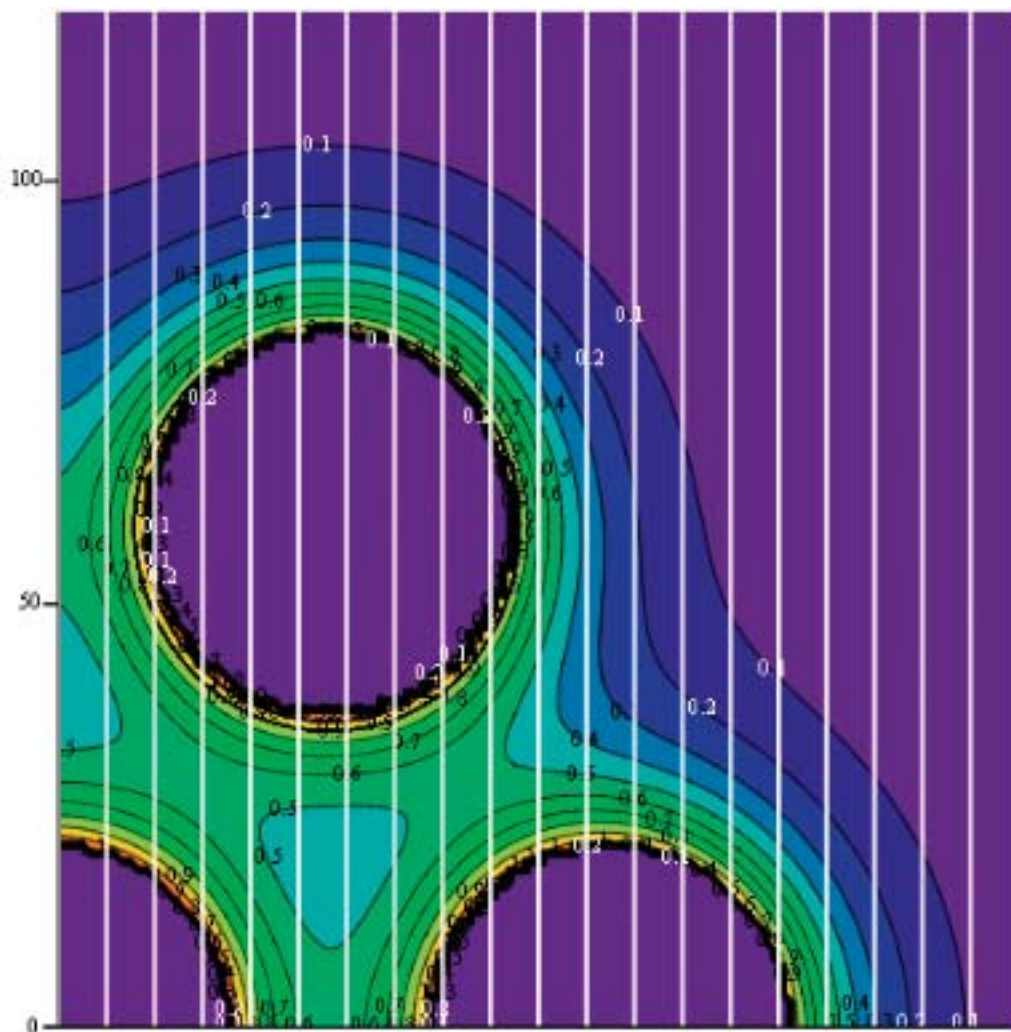


Рис. 4. Распределения дозы УФ-излучения в поперечном разрезе цилиндрической камеры, содержащей семь излучателей (верхний правый квадрант)

равданы для обработки воды с невысоким значением коэффициента поглощения излучения α ($0,1-0,2 \text{ см}^{-1}$), характерным для воды из подземных источников. Проектирование установок для обработки вод из поверхностных источников или сточных вод (как правило, объем обработки $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более) связано с решением всех вышеупомянутых требований, причем их выполнение может

быть взаимоисключающим. Например, неравномерность облучения снижается за счет установки турбулизаторов, которые, в свою очередь, увеличивают гидродинамические потери в сети. Проблема устранения недооблученных участков решается путем размещения нескольких излучателей таким образом, что зоны, расположенные на границе пересечения полей отдельных УФ-источников,

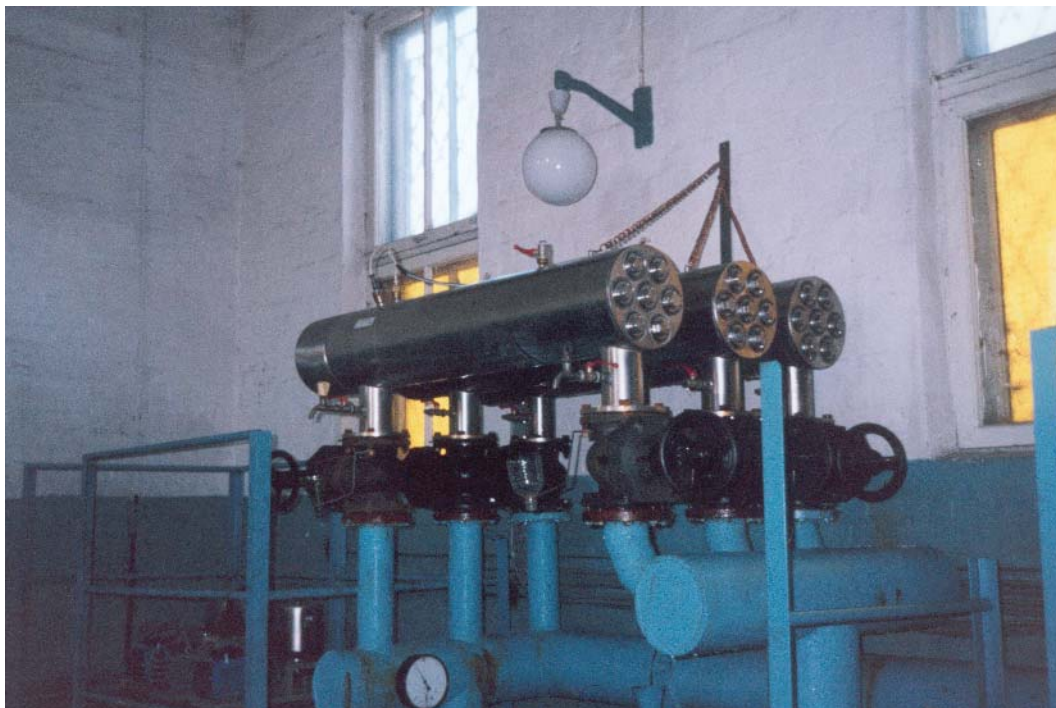


Рис. 5. Комплекс обеззараживания воды из трех семиламповых модулей, общей производительностью 300 м³/ч

имеют требуемую облученность благодаря эффекту сложения полей. На рис. 4 изображены изолинии распределения дозы УФ-излучения в поперечном разрезе цилиндрической камеры (верхний правый квадрант) для случая семи излучателей (обозначены окружностями) в воде с значением α равным 0,5. Площадь недооблученных зон сводится к внешним сегментам условной окружности, описывающей радиально расположенные УФ-источники. Этот недостаток устраняется путем вмонтирования дополнительных турбулизаторов, либо конструктивной геометрией камеры или установкой ламинаторов потока, обеспечивающих увеличение времени пребывания воды в недооблученной зоне. Выбор оптимального варианта конструкции целесо-

образно проводить с использованием средств системного анализа [10], что требует разработки специального алгоритма технологии проектирования. Так, конструкция установки характеризуется совокупностью параметров x , реализация которых позволяет получить ряд эксплуатационных характеристик $F_i(x)$, $i = 0, 1, \dots, N$ (например, стоимость обработки, равномерность облучения воды, коэффициент использования излучения и др.). Данные характеристики являются функционалами, достигающими заданных значений при определенных параметрах установки. Исходя из технических и экономических соображений для ряда функционалов задается наиболее предпочтительная величина, которая достигается при некоторых значениях X .

Учитывая, что в реальной ситуации достичь оптимальных значений функционалов, как правило, не удастся, налагается ограничение вида

$$F(x) \leq (1+k)F(\bar{x}), \quad (1)$$

где $0 < k \ll 1$. Затем на основе специально разработанного алгоритма строится сетка значений x_2 , из которых конструктором выбираются наиболее реализуемые и удовлетворяющие условию (1).

На рис. 5 приведен комплекс из трех модулей, содержащих семь излучателей, общей производительностью 300 м³/ч.

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Затраты на эксплуатацию установки состоят из затрат на электроэнергию, сменные УФ-лампы и другие затраты, связанные с периодическим техническим обслуживанием. Учитывая, что обычно УФ-установки состоят из одинаковых обеззараживающих модулей, расчет эксплуатационных затрат производится для одного модуля с последующим умножением полученного результата на количество модулей в УФ-установке.

Для примера, проведем расчет затрат на эксплуатацию одного обеззараживающего модуля типа 8В12ПКМ.02-TUV115W производительностью порядка 440 м³/ч.

Итак:

1) Затраты на электроэнергию.

Модуль в штатном режиме потребляет 12 кВт электроэнергии. Количество потребленной электроэнергии в течение года составляет:

$$365 \text{ сут} \cdot 24 \text{ ч} \cdot 12 \text{ кВт} = 105120 \text{ кВт}\cdot\text{ч}.$$

При стоимости 1 кВт·ч электрической энергии равной 0,23 грн, затраты на электроэнергию составляют:

$$105120 \text{ кВт}\cdot\text{ч} \cdot 0,23 \text{ грн/кВт}\cdot\text{ч} = 24178 \text{ грн}.$$

2) Затраты на приобретение сменных УФ-ламп.

В течение года в модуле необходимо заменить

$$\frac{96 \text{ ламп} \times 8760 \text{ ч}}{10000 \text{ ч}} = 84 \text{ лампы}.$$

Учитывая, что стоимость одной УФ-лампы TUV115W составляет 200 грн, затраты на приобретение 84 сменных УФ-ламп составляют:

$$84 \text{ ламп} \cdot 200 \text{ грн} = 16800 \text{ грн}.$$

3) Другие эксплуатационные затраты связаны с периодическим техническим обслуживанием модуля и не превышают 6000 гривен в год.

Таким образом, эксплуатационные затраты составляют:

$$24178 + 16800 + 6000 = 46978 \text{ грн}.$$

Таким образом, стоимость обеззараживания 1 м³ сточных вод составляет 1,22 копейки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выработанный комплексный подход к изучению процесса обеззараживания воды УФ-излучением позволяет проектировать установки с учетом индивидуальных особенностей водозабора (водостока) и предложить заказ-

Таблица 2. Основные экономические показатели

Показатель	Значение
Эксплуатационные расходы, тыс. грн:	
- электроэнергия	24,2
- УФ лампы	16,8
- техническое обслуживание	6,0
Итого:	47,0
Себестоимость обеззараживания 1 м ³ воды, грн/м ³	0,0122

чику несколько вариантов конструкции установки, являющихся оптимальными относительно заказываемых технико-экономических и эксплуатационных характеристик, с учетом требований конкретного объекта, где планируется внедрение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Соколов В. Ф.** Обеззараживание воды бактерицидными лучами. – М.: Стройиздат, 1964.–334 с.
2. **Николадзе Г. И., Минц Д. М., Касгальский А. А.** Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения. – М: Высшая школа, 1986.–386 с.
3. **Шаляпин С. Н.** Обеззараживание питьевой воды бактерицидным ультрафиолетовым излучением // Сумма технологий.–1999.–1.
4. **Альшин В. М., Безделин С. М., Волков С. В. и др.** Применение технологии УФ-облучения воды взамен первичного хлорирования // Водоснабжение и санитарная техника.–1996.–12.–С. 13–16.
5. **Маслюков А. П., Рахманин Ю. А., Матюшин Г. А. и др.** О природе синергизма в процессах обеззараживания воды смесями химических дезинфектантов // Доклады академии наук РАН.–1992.–325(6). –С. 1238–1241.
6. **Базалеев Н. И., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В.** Моделирование и прогнозирование изменений физико-химических свойств материалов под воздействием излучений // Доповіді НАН України.–1997.–4. –С. 82–86.
7. **Базалеев Н. И., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В.** Электрофизические радиационные технологии. – Харьков: Акта, 1998.–206 с.
8. **Конев С. В., Волотовский И. Д.** Фотобиология. – Минск: Изд. БГУ, 1979.–384 с.
9. **Гончарук В. В.** Фотокаталитическое деструктивное окисление органических соединений в водных средах // Химия в интересах устойчивого развития.–1997.–5.–С. 345–355.
10. **Моисеев Н. Н.** Математические задачи системного анализа. – М.: Наука, 1981.–488 с.