

10, октябрь 2015

УДК 621.22-225

Очистка ультрафиолетовым излучением морской воды, используемой в качестве рабочей жидкости гидравлической системы подводного аппарата

*Емельянова А.В., студентка
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Подводные роботы и аппараты»*

*Научные руководители: Вельтищев В.В., д.т.н., зав. кафедрой
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Подводные роботы и аппараты»*

*Сарвира Д.В., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Подводные роботы и аппараты»
kafsm11@sm.bmstu.ru*

Введение

В настоящий момент в МГТУ им. Н.Э. Баумана проводится научно-исследовательская работа на тему использования забортной воды в качестве рабочего тела гидравлической системы подводного аппарата (ПА) [1]. Морская вода в данном ключе имеет ряд преимуществ перед минеральными маслами, таких как:

- низкие эксплуатационные затраты;
- экологичность;
- исключение проблемы обводнения гидросистемы.

Основное число отказов гидравлических приводов связано именно с проникновением воды в гидросистему, а потому исключение данной проблемы повысит надежность исполнительных органов ПА.

Однако морская вода по сравнению с минеральными маслами обладает и рядом недостатков, таких как:

- высокая электропроводность, провоцирующая коррозию;
- низкие смазывающие свойства;
- наличие не только механических примесей но и биологических объектов.

Последний фактор может оказаться определяющим при создании гидросистемы нового типа. Методы биологической очистки морской воды могут быть различны. В статье приведены результаты экспериментальных исследований эффективности ультрафиолетовой стерилизации воды.

Использование излучения ультрафиолетового спектра для очистки воды

В рассматриваемой модели ПА очистка от взвешенных механических и биологических примесей размером до 5 мкм осуществляется заправочным фильтром при заполнении гидросистемы. Более мелкие микроорганизмы, проникающие внутрь, в процессе жизнедеятельности будут провоцировать обрастание внутренних поверхностей. Обрастание приводит к повышению трения в элементах гидросистемы вплоть до полного заклинивания, уменьшению площади проходных сечений, что приводит к ухудшению динамических характеристик, ухудшению теплопередачи и засорению элементов, имеющих малое проходное сечение. Примеры биологического обрастания приведены на рисунках 1,а (обрастание затонувшего судна) и 1,б (обрастание трубопровода).



(а)



(б)

Рис. 1. Примеры обрастания объектов в морской воде

Для очистки воды от вредоносных микроорганизмов существует ряд методов, таких как озонирование, хлорирование и облучение ультрафиолетом (УФ). В последнее время все более популярным становится третий метод благодаря следующим достоинствам [2]:

- универсальность и эффективность поражения различных микроорганизмов;
- сохранение физико-химического состава воды;
- отсутствие ограничения по верхнему пределу дозы;
- быстрота очистки;
- простота и компактность технологического оборудования.

Также данный метод очистки воды имеет и ряд недостатков:

- падение эффективности при увеличении таких показателей воды, как соленость и мутность;
- возможность последующего проникновения в воду микроорганизмов (отсутствие последствия).

В подводной технике уже имеется опыт разработок стерилизации морской воды посредством УФ излучения [3]. Суть метода стерилизации воды УФ излучением состоит в том, что вода облучается световым потоком с длиной волны в определенном диапазоне. Установлено [4], что наибольшим бактерицидным действием обладают лучи с длиной волны 200-300 нм (ультрафиолет среднего диапазона), причем максимум бактерицидного действия приходится на область 260 ± 10 нм. Ультрафиолетовое излучение вызывает нарушения в структуре клеточных стенок микроорганизмов, а также необратимые повреждения нуклеиновых кислот, являющихся носителями наследственной информации, что приводит к гибели микроорганизмов и к невозможности их дальнейшего размножения.

Эффективность очистки воды определяется соотношением:

$$\frac{p}{p_0} = \exp\left(-\frac{I \cdot t}{k}\right),$$

где

p - число бактерий в единице объема воды после облучения;

p_0 - число бактерий в единице объема воды до облучения;

I – интенсивность излучения (mW / cm^2);

t – время облучения (с);

k – коэффициент сопротивляемости бактерий. В воде содержится множество видов бактерий, но большинство из них имеют коэффициент сопротивляемости около 2500, поэтому при расчетах необходимого количества энергии облучения принимают именно это значение.

Основная характеристика процесса стерилизации воды – доза облучения, которая определяет количество энергии излучения, передаваемое единице объема жидкости. Данная характеристика определяется по формуле [5]:

$$D = I \cdot t,$$

где

D – доза облучения ($mW \cdot c / cm^2$);

I – интенсивность излучения (mW / cm^2);

t – время облучения (с).

Время пребывания в камере обеззараживания определяется соотношением:

$$t = \frac{S \cdot l}{17 \cdot Q},$$

где

S – площадь поперечного сечения камеры (см);

l – длина камеры (см);

Q – расход воды (л / мин);

17 – коэффициент пересчета единиц измерения.

Минимальная доза, установленная санитарными нормами на питьевую воду [5], $D = 16 \text{ мВт} \cdot \text{с} / \text{см}^2$. Соответствующих данных для морской воды в литературе не обнаружено, однако упоминается, что из-за особенностей химического состава морской воды требуется доза, в 2-3 раза превышающая норму на питьевую воду, то есть не менее $D = 50 \text{ мВт} \cdot \text{с} / \text{см}^2$ [2].

Следует также учесть тот факт, что оптические характеристики воды определяются растворенными в ней веществами (органическими и неорганическими) и взвесьями (минеральными и органическими). Для рассмотрения оптических свойств водной среды удобно использовать функцию \mathcal{E} – показатель ослабления излучения в водной среде, учитывающий как поглощение, так и рассеивание светового потока в воде [3].

$$\mathcal{E} = -\frac{1}{I} \cdot \frac{dI_{\mathcal{E}}}{dl},$$

где

$I_{\mathcal{E}}$ – ослабленная интенсивность излучения

На рисунке 2 представлены три графика зависимости показателя ослабления светового потока от его длины волны.

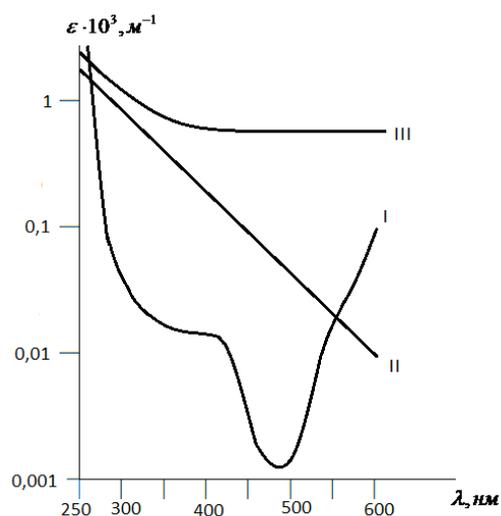


Рис. 2. Зависимость показателя ослабления светового потока от длины волны

Кривая I демонстрирует показатель ослабления в чистой воде. Кривая II иллюстрирует ослабление света растворенными в воде органическими веществами. Кривая III показывает, как мелкие минеральные частицы, взвешенные в воде, влияют на ослабление света. Как видно на рисунке 2, интересующий нас диапазон излучения (200-300 нм) распространяется гораздо хуже потока видимого спектра, что необходимо учитывать при проектировании систем очистки воды ультрафиолетовым облучением. Для интересующего нас спектра излучения в пресной воде $\epsilon = 22 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ [6]. Для морской воды данные показатели будут несколько выше из-за большего количества минеральных примесей и повышенной плотности. Причем количественно данные показатели будут зависеть от таких параметров воды, как соленость и мутность. Также оптические показатели воды изменяются с увеличением глубины из-за возрастающей плотности.

Конструкция камеры обеззараживания

В подводных условиях из-за ограничений по энергопотреблению целесообразно использовать светодиодную технику. На рисунке 3 представлен светодиодный светильник UV-CLEAN-255FW-50 фирмы SETI с длиной волны излучения 255 нм и мощностью 50мВт.

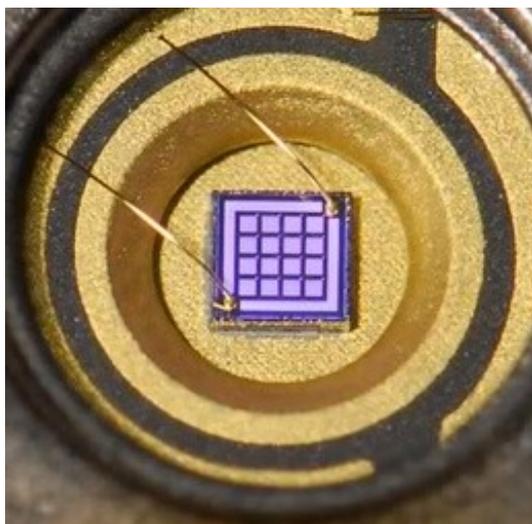


Рис. 3. УФ излучатель

Из-за высокой поглощаемости водой ультрафиолетового спектра требуется максимально сократить потери излучения на иллюминаторе, разделяющем УФ излучатели и тело камеры обеззараживания, поэтому необходимо использовать специальные материалы с высокими оптическими показателями. Одним из таких материалов является лейкосапфир.



Рис. 5. Иллюминатор из лейкосапфира

Воспользуемся приведенными выше формулами для определения требуемой для эффективной очистки длины камеры обеззараживания. Если четыре излучающих элемента установить таким образом, чтобы они светили вдоль трубы (в направлении, параллельном потоку течения жидкости) диаметра 70 мм и условиться, что свет в воде распространяется линейно, то предварительно можно вычислить длину камеры обеззараживания. Суммарная мощность 4 излучающих элементов равна 200 мВт. Тогда интенсивность излучения в цилиндрическом объеме сечением S будет равна:

$$I = \frac{P}{\pi \cdot R^2} \approx 5,2 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}.$$

Требуемое время пребывания жидкости в области обеззараживания:

$$t = \frac{D}{I} = 9,62 \text{ с.}$$

Длина камеры обеззараживания:

$$l = \frac{17 \cdot Q \cdot t}{S} = 85 \text{ см.}$$

Примем во внимание то, что свет распространяется в воде нелинейно:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\varepsilon \cdot l).$$

Если принять интенсивность излучения $I_0 = 5,2 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$, длину камеры $l = 8,5$ см, показатель ослабления $\varepsilon = 0,22 \text{ см}^{-1}$, а также учесть потери интенсивности в лейкосапфировом иллюминаторе, разделяющем камеру обеззараживания и область размещения излучателей (от 27 до 30 % для образца толщиной 15 мм, по результатам испытаний института кристаллографии РАН), то можно рассчитать дозу излучения в камере обеззараживания:

$$D = \int_0^{t_1} k \cdot I_0 \cdot \exp(-\varepsilon \cdot l) dt \approx 18,72 \frac{\text{мВт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}.$$

Так как полученный результат $D = 18,72 \frac{\text{мВт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} > 16 \frac{\text{мВт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}$, теоретически данные параметры камеры обеззараживания должны обеспечить требуемый уровень стерилизации воды в гидросистеме. На рисунке 4 изображена предлагаемая конструкция камеры обеззараживания:

- 1 – камера обеззараживания (труба диаметра 70 мм);
- 2 – вход камеры обеззараживания;
- 3 – выход камеры обеззараживания;
- 4 – иллюминатор из лейкосапфира толщиной 15 мм;
- 5 – светодиодный излучатель UVCLEAN255FW-50 (8 шт. по 4 в каждом торце камеры).

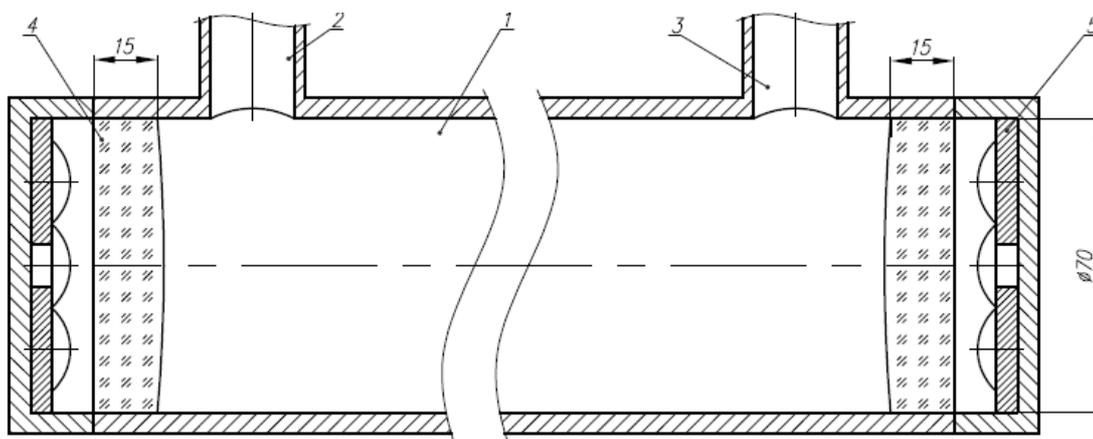


Рис. 4. Эскиз камеры обеззараживания

Экспериментальные исследования эффективности ультрафиолетового облучения В Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН были проведены лабораторные испытания по влиянию на морские микроорганизмы УФ излучения светодиодной матрицы UVCLEAN255FW-5 мощностью 5 мВт.

Целью испытаний было выявление влияния УФ излучения на микроорганизмы в морской воде и оценка эффективной дозы излучения. На рисунке 6 представлен вид экспериментальной установки. В процессе экспериментов в колбе находится образец морской воды с микроорганизмами, на колбу установлена макетная плата с УФ излучателем. В процессе работы гидросистемы рабочее тело (вода) циркулирует в замкнутом контуре системы с периодичностью порядка 1 минуты. Время облучения зависит от конфигурации камеры обеззараживания и мощности излучающего элемента. Так как в условиях эксперимента не было возможности обеспечить циркуляцию жидкости через камеру обеззараживания, было принято решение реализовать схему управления излучателем, которая обеспечит регулируемый временной интервал свечения. Период включения светодиодной матрицы – 1 минута, коэффициент заполнения периода свечением регулируется с помощью 2 кнопок, одна из которых при нажатии увеличивает время свечения на 1 секунду (вплоть до непрерывного свечения), а другая – уменьшает время свечения на 1 секунду.



Рис. 6. Макетная плата с УФ излучателем

В процессе экспериментов колбе находится образец морской воды с микроорганизмами, на колбу установлена макетная плата с УФ излучателем. В ходе экспериментов излучению были подвергнуты образцы с Адаманского, Балтийского, Чёрного и Баренцева морей. В ходе всех экспериментов излучатель располагался на высоте 2 см над поверхностью пробы, слой воды в колбе составлял 3 см. Учет микроорганизмов проводился в камере Горяева (счетный объем 0,007 мл, 22 учетные дорожки) с использованием светового микроскопа Leica (рисунок 7).



Рис. 7. Микроскоп Leica с выведенным на монитор полем зрения окуляра

В ходе экспериментов с различными режимами свечения на разного рода пробы воды был получен ряд результатов.

Спустя 10 мин после непрерывного облучения культуры *Stichococcus bacillaris* в течение 20 мин (доза облучения $16 \frac{\text{мВт} \cdot \text{с}}{\text{см}^2}$) был произведен подсчет микроорганизмов с

поврежденным хлоропластом, доля которых составила 34 %. Спустя 20 минут после облучения часть микроорганизмов с поврежденным хлоропластом составила 42 %. Подсчет через 2 суток после облучения показал, что численность здоровых микроорганизмов относительно начальной (до облучения) составила 84 %. За данный промежуток времени микроорганизмы, выжившие после облучения, смогли почти полностью восстановить свою численность. Данный эксперимент подтвердил, что минимальная доза, установленная для питьевой воды, не является критической для морских микроорганизмов, а также продемонстрировал эффект последствия УФ излучения.

Следующий ряд экспериментов проводился импульсным облучением. Излучение подавалось на 30 секунд через каждые 30 секунд. Общее время облучения при этом составило 1 час (при длительности эксперимента в 2 часа), доза облучения составила $50 \frac{мВт \cdot с}{см^2}$. Спустя 4 часа после окончания облучения доля поврежденных организмов составила около 50 %, остальные 50 % остались без повреждения. Здесь следует оговорить тот факт, что проводилось облучение неподвижной воды: это значит, что только верхний слой жидкости получал полную интенсивность излучения, а до нижних слоев доходило лишь около 70-80 % излучения (более точные данные привести сложно из-за отсутствия оборудования, позволяющего оценить оптические свойства данного образца воды). Через 4 суток после облучения было обнаружено 50 % клеток с ненарушенной структурой хлоропласта, 30 % - с нарушенной и 20 % - мертвых. Аналогично облученные микроорганизмы *Nitzschia inconspicua* дало следующие результаты: спустя 4 часа после облучения доля клеток с поврежденным хлоропластом составила 47 %. Спустя 4 суток после облучения было обнаружено, что культура практически мертва (около 1 % от общей численности микроорганизмов).

Данный эксперимент показал, что расчетная доза является достаточной для организмов определенного вида. Различия в результатах объясняются различной устойчивостью микроорганизмов к УФ излучению, их строением (некоторые из них имеют экранирующие панцири), различными способностями к регенерации. также было вывлено, что большей эффективностью обладает импульсное облучение по сравнению с непрерывным. Причиной является сложность многократной активации защитных механизмов микроорганизмов.

Заключение

Метод стерилизации ультрафиолетовым излучением в совокупности с фильтрацией заборной жидкости при поступлении в гидросистему имеет полноценное право на существование. Однако требует дальнейшего изучения и испытаний на макетных образцах гидросистемы в реальных условиях. Также при проектировании средств обеззараживания следует учитывать, что данный способ действует не мгновенно и не обеспечивает 100 % результат.

Список литературы

1. Вельтищев В.В. Перспективы развития подводной гидравлики на морской воде // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 2 (18). С. 19-28.
2. Системы очистки воды и оборудование для водоподготовки. Режим доступа: <http://www.recyrc.ru/article/detail.php?ID=1154> (дата обращения 15.04.15).
3. Chris Bueley. A new kind of antifoulant // Ocean News and technology. 2014. № 2. P. 10-12.
4. Соколов В.Ф. Обеззараживание воды бактерицидными лучами. М: МХК РСФСР, 1961. 178 с.
5. МУ 2.1.5.732-99. Санитарно-эпидемиологический надзор за обеззараживанием сточных вод ультрафиолетовым излучением. Методические указания. Введ 11-03-1999. М.: Минздрав России, 1999. 10 с.
6. Показеев К.В., Чаплина Т.О., Чашечкин Ю.Д. Оптика океана. М: МАКС Пресс, 2010. 216 с.