



Москва
Тел./Факс: **8 (800) 100-123-7** (Звонки по России бесплатно);
+7 (495) 617-19 -45, -46, -47, -48; +7(499) 795-77-86
E-mail: svarog@svarog-uv.ru

ДЕЗИНФЕКЦИЯ ВОДЫ УЛЬТРАФИОЛЕТОМ

Критический подход к вопросам спектральных характеристик во время проверки и работы полихроматических ультрафиолетовых дезинфицирующих реакторов.

А. Н. Ульянов, Ген. директор ЗАО «Сварог», действительный член ВАНКБ (По материалам второго международного конгресса по ультрафиолетовым технологиям)

Краткое содержание

Полихроматические лампы, используемые в ультрафиолетовых дезинфицирующих реакторах, излучают свет в широком диапазоне длин волн, уничтожающих бактерии. Оценка эффективности дезинфекции при помощи ультрафиолетового излучения затруднена вследствие того, что поглощение света водой и реакция микроорганизмов на излучение зависят от длины волны этого излучения. Таким образом, при заданных рабочих условиях ультрафиолетовый реактор может обеспечивать разные уровни дезинфекции в зависимости от вида микробов и от поглощающей способности воды для волн различного спектрального диапазона. Эти различия производительности реактора важны при оценке результатов проверки, проводимой при использовании определенных организмов и при определенных включениях в воде, влияющих на ее поглощающую способность, для приложений, направленных на удаление различных патогенных организмов в воде, имеющей разные спектральные характеристики.

Разработана полихроматическая модель производительности ультрафиолетового реактора, учитывающая полихроматический характер излучения лампы, спектральные характеристики пропускания стакана и воды, а также спектр бактерицидного воздействия. Модель была использована для предсказания полихроматического эффекта для воды с разными характеристиками и для разных организмов в зависимости от соответствующих действующих переменных. Возможность точно количественно определить дозы ультрафиолетового излучения для разных микроорганизмов и типов воды представляется в контексте приложения оценочных тестов ультрафиолетового реактора к конструкции полномасштабных систем дезинфекции.

1. Введение

Полихроматические лампы, используемые в ультрафиолетовых дезинфицирующих реакторах, излучают свет в широком диапазоне длин волн, уничтожающих бактерии. Оценка эффективности дезинфекции осложнена тем, что поглощение света водой и реакция микроорганизмов на излучение зависят от длины волны этого излучения. Таким образом, при заданных рабочих условиях ультрафиолетовый реактор может обеспечивать разные уровни дезинфекции в зависимости от вида микробов и от поглощающей способности воды для волн различного спектрального диапазона. Эти различия производительности реактора важны при оценке результатов проверки, проводимой при использовании определенных организмов и при определенных включениях в воде, влияющих на ее поглощающую способность, для приложений, направленных на удаление различных патогенных организмов в воде, имеющей разную спектральную характеристику.

Разработана полихроматическая модель производительности ультрафиолетового реактора, учитывающая полихроматический характер излучения лампы, поглощающую способность стакана и воды, а также спектр бактерицидного воздействия (Petri и Olson, 2001). Мы использовали эту модель для предсказания полихроматического эффекта для различных организмов и для воды с различными

характеристиками, проходящей через ультрафиолетовые реакторы. Так как ультрафиолетовые реакторы не имеют идеальных параметров, на микроорганизмы, проходящие через реактор, будет действовать излучение, характеризующееся интегральной плотностью потока (Weight и Lawryshyn, 2000). Таким образом, полихроматический эффект зависит от конструкции реактора. В ходе наших исследований полихроматический эффект изучался с использованием различных организмов и воды с различными характеристиками на двух реакторах, конструкция которых обеспечивала относительно равномерное или неравномерное распределение интенсивности излучения. Мы исследовали производительность реактора при работе с определенными организмами и с водой с определенными параметрами поглощения, а также разброс эквивалентной интегральной плотности потока (показателя REF; в мДж/см², аналогичный дозе облучения) во время работы с различными организмами в воде различного типа.

2. Материалы и методы

В наших исследованиях применялась вычислительная модель дезинфекции, описанная до этого в работе (Petri и Olson, 2001). В кратком изложении модель выглядит следующим образом: она основана на используемом в вычислительной гидродинамике (CFD) методе пробега частиц, а также на полихроматической модели излучения с суммированием потоков от точечных источников (PSS). Согласно этой модели, гипотетические частицы следуют по траекториям, проходящим через реактор, и аккумулируют интегральную плотность потока в зависимости от положения в полихроматическом поле интенсивности в течение дискретных интервалов времени. Для каждой частицы к отдельным значениям интегральной плотности потока применяется кинетика инактивации, производится подсчет взвешенного снижения числа частиц.

Кинетическая модель вновь применяется к общему снижению численности частиц, в результате чего получается показатель снижения эквивалентной интегральной плотности потока (REF).

Наши расчеты были основаны на использовании проточного реактора под давлением, диаметром 24 дюйма, имеющего набор полихроматических ламп с длиной дуги 24 дюйма, направленных перпендикулярно потоку. Моделировались два варианта реактора: «хороший» реактор с относительно равномерным распределением излучения, имеющий восемь расположенных по окружности ламп, и «плохой» реактор с относительно неравномерным распределением излучения, имеющий две лампы, расположенные в плоскости вдоль центральной оси реактора (в положениях для компоновки восьми ламп, соответствующих девяти и трем часам на циферблате часов). Реактор с двумя лампами назван «плохим» не потому, что он имеет меньшее количество ламп и таким образом, пропорционально этому меньшую бактерицидную мощность, а потому, что в воде с меньшим коэффициентом пропускания в нем будут темные зоны сверху и снизу, через которые могут проходить микроорганизмы и где они будут подвергаться минимальной дезинфекции. Моделирование производилось при расходе 10 USMGD и при 100-процентной мощности лам (150 Вт/см-дуги), в диапазоне коэффициента пропускания ультрафиолетового излучения (75-95 % при длине волны 254 нм). Результаты были нормализованы (см. раздел «Обсуждение результатов») для возможности корректного сравнения реакторов обоих типов. Исторически сложилось, что в ультрафиолетовых системах используются ртутные дуговые лампы, излучающие монохроматический ультрафиолетовый свет с длиной волны 254 нм, поэтому коэффициент пропускания волны длиной 254 нм используется в промышленности в качестве параметра для описания коэффициента пропускания в воде. В этой статье мы используем термин UVT для обозначения коэффициента пропускания излучения с длиной волны 254 нм на пути длиной 1 см.

Расчеты полихроматических характеристик выполнялись в диапазоне 200-400 нм с интервалами 1 нм. На **рис.1** показан относительный спектр излучения полихроматических ламп, использовавшихся при моделировании. На **рис.2** показаны спектры бактерицидного воздействия для рассматриваемых микроорганизмов, в состав которых входят споры бактерий (споры *Bacillus subtilis*, Munakata и др., 1991), бактерии (*Escherichia coli*, Meulemans, 1986), бактериофаги (MS2 и PhiX 174, Rauth, 1965) и простейшие одноклеточные (*Cryptosporidium*, Linden и др., 2000). При необходимости данные были интерполированы для формирования непрерывного спектра, нормализованного к длине волны 254

нм. Спектр бактерицидного воздействия для *Cryptosporidium* был экстраполирован до диапазона от 216 нм до 200 нм, был также сформирован сравнительный спектр MS2 при помощи экстраполяции от значений для 225 нм к значениям для 200 нм («расширенный спектр для MS2»).

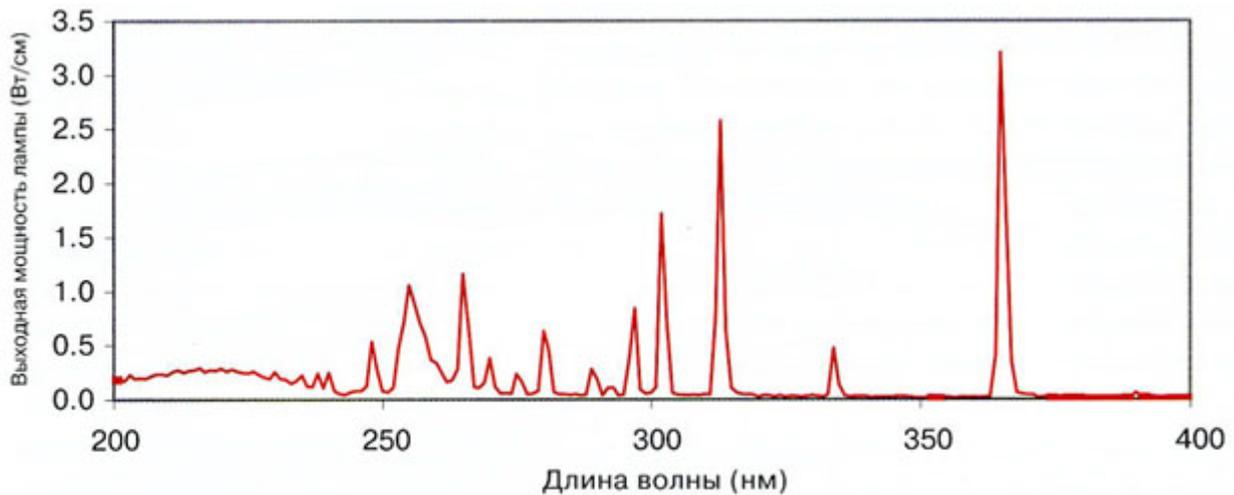


Рис. 1. Распределение спектральной мощности полихроматических ламп, использовавшихся при моделировании

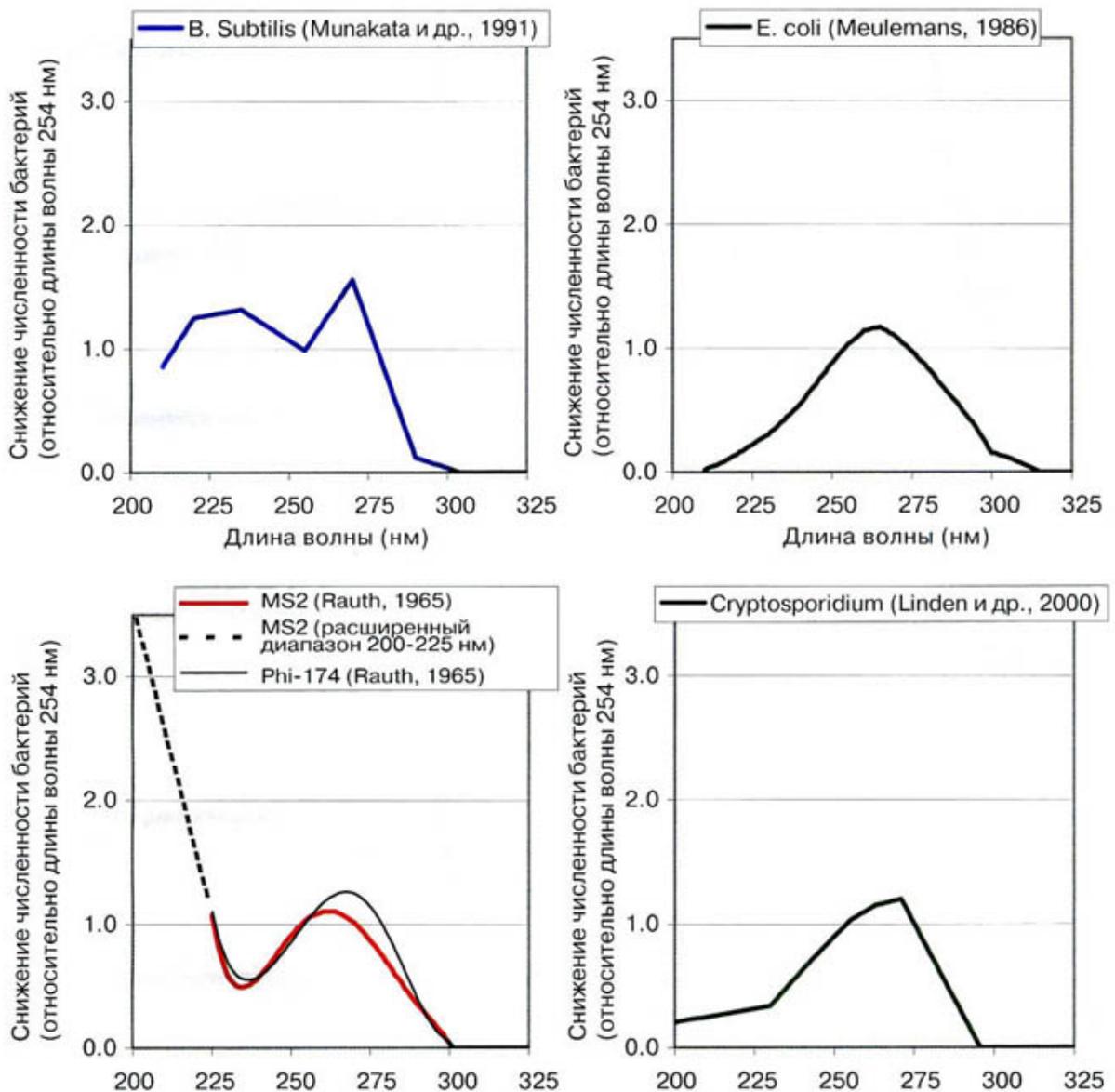


Рис. 2. Спектры бактерицидного воздействия, используемые при моделировании дезинфекции для различных микроорганизмов. Спектры были нормализованы к длине волны 254 нм, а некоторые были расширены до более широкого диапазона длин волн (расширенный диапазон для MS2 и для микроорганизмов *Cryptosporidium*)

На **рис.3** показан использовавшийся при моделировании спектр поглощения воды. Спектр гипотетической не поглощающей воды был использован в качестве базового спектра для устранения эффекта поглощения воды, зависящего от длины волны и определяемого в результате анализа спектров бактерицидного воздействия на микроорганизмы. Кроме того, этот спектр служит основой для сравнения зависящей от длины волны величины поглощения природной воды и воды с добавками, изменяющими параметры поглощения воды. Спектр природной воды соответствует параметрам воды озера Гурон (Канада), очень большого олиготрофического озера с малым содержанием фульвиновой кислоты. Кроме этого, при моделировании использовались два других спектра поглощения воды: для воды с кофе и с лигносульфоновой кислотой (LSA). Быстрорастворимый кофе и LSA изменяют коэффициент пропускания воды и обычно добавляются в воду в ходе проверочных тестов для определения диапазона пропускания. В нашем моделировании относительный спектр воды был масштабирован (на основании поглощающей способности) для формирования спектра при определенных значениях UVT (при длине волны 254 нм).

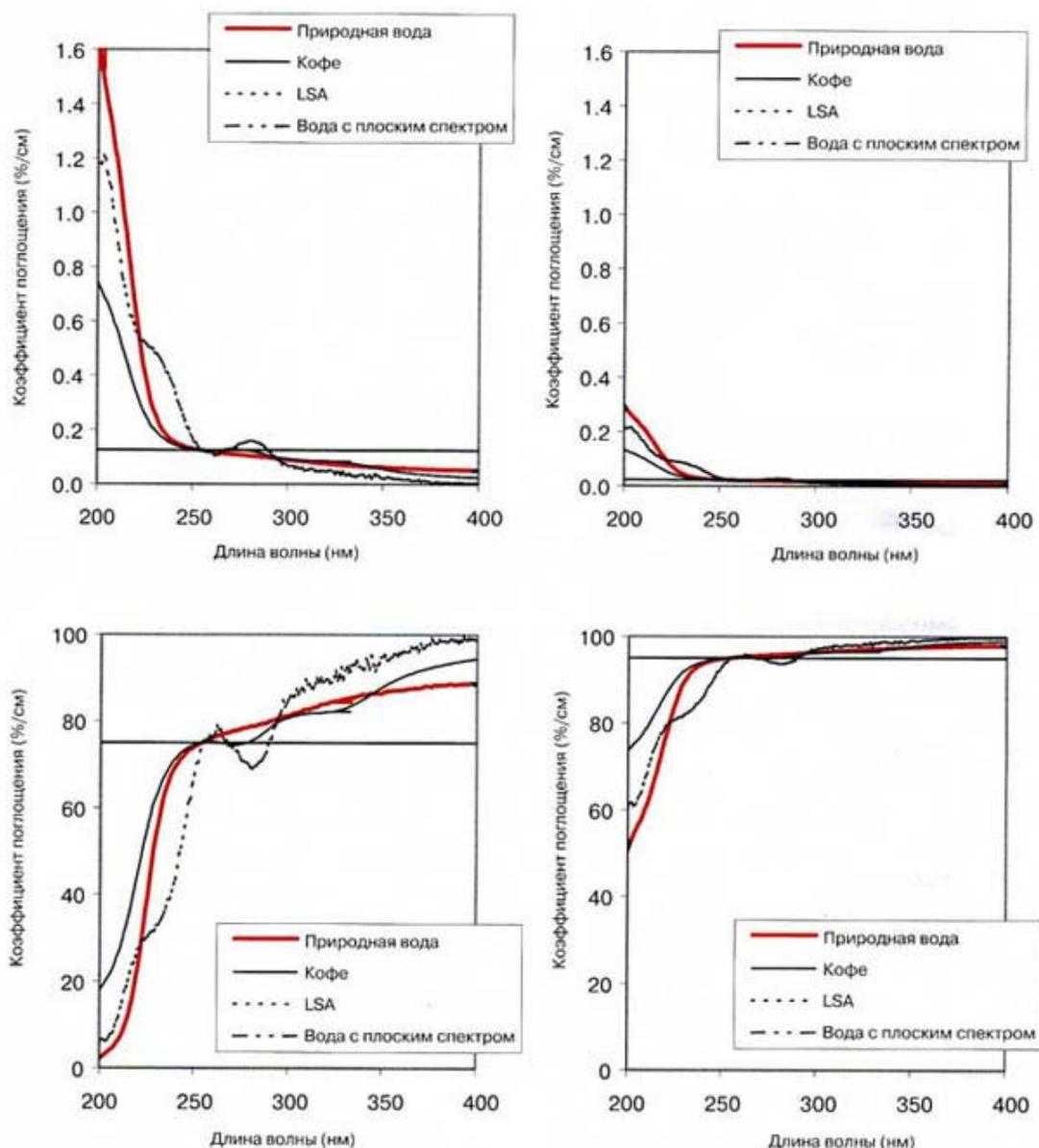


Рис. 3. Диапазоны характеристик воды, используемой при моделировании: природная вода (из озера Гурон), смесь воды с кофе, вода с LSA и гипотетическая не поглощающая вода (вода с плоским спектром). Представлены диапазоны поглощения (верхняя диаграмма) и пропускания (нижняя диаграмма). Диапазон левого графика масштабирован к 75 % пропускания УФ-излучения (UVT) (для длины волны 254 нм), а правого графика – к 95 % UVT.

Различные микроорганизмы отличаются не только спектрами бактерицидного воздействия на них, но и кинетикой инактивации или отношением доза реакция. Для устранения влияния разной кинетики отношения доза-реакция все микроорганизмы моделировались при помощи линейной кинетики инактивации. Моделирование проводилось с разной степенью реакции (мДж/см² на единицу

логарифма снижения численности) для каждого микроорганизма. Для сравнения спектров бактерицидного воздействия и поглощения воды (разделы 4.1 и 4.2) все организмы моделировались с одинаковой степенью реакции (20 мДж/см^2 на единицу логарифма снижения численности). Однако при определении числовых значений разности (в единицах REF) между оценочными и рабочими показателями для различных микроорганизмов (раздел 4.3) применялись реальные значения степени реакции микроорганизмов.

3. Результаты

Значения REF вычислялись для различных организмов в воде разного типа. На **рис.4** представлены значения REF для дезинфекции в «хорошем» 8-ламповом реакторе в зависимости от значений UVT. С ростом UVT значения REF экспоненциально увеличиваются для всех типов воды и спектров бактерицидного воздействия. Для диапазона UVT 75-95 % и для микроорганизмов со стойкостью к ультрафиолетовому облучению, выражающейся значением 20 мДж/см^2 на единицу логарифма снижения численности, значения REF лежат в диапазоне $20\text{-}172 \text{ мДж/см}^2$ в гипотетической не поглощающей воде, от 20 до 129 мДж/см^2 в природной воде, от 19 до 130 мДж/см^2 в воде с кофе и от 18 до 113 мДж/см^2 в воде с LSA. Для «плохого» 2-лампового реактора значения REF для микроорганизмов (со стойкостью 20 мДж/см^2 на единицу логарифма снижения численности) лежат в диапазоне $4\text{-}35 \text{ мДж/см}^2$ в гипотетической не поглощающей воде, от 4 до 28 мДж/см^2 в природной воде, от 4 до 27 мДж/см^2 в воде с кофе и от 4 до 25 мДж/см^2 в воде с LSA.

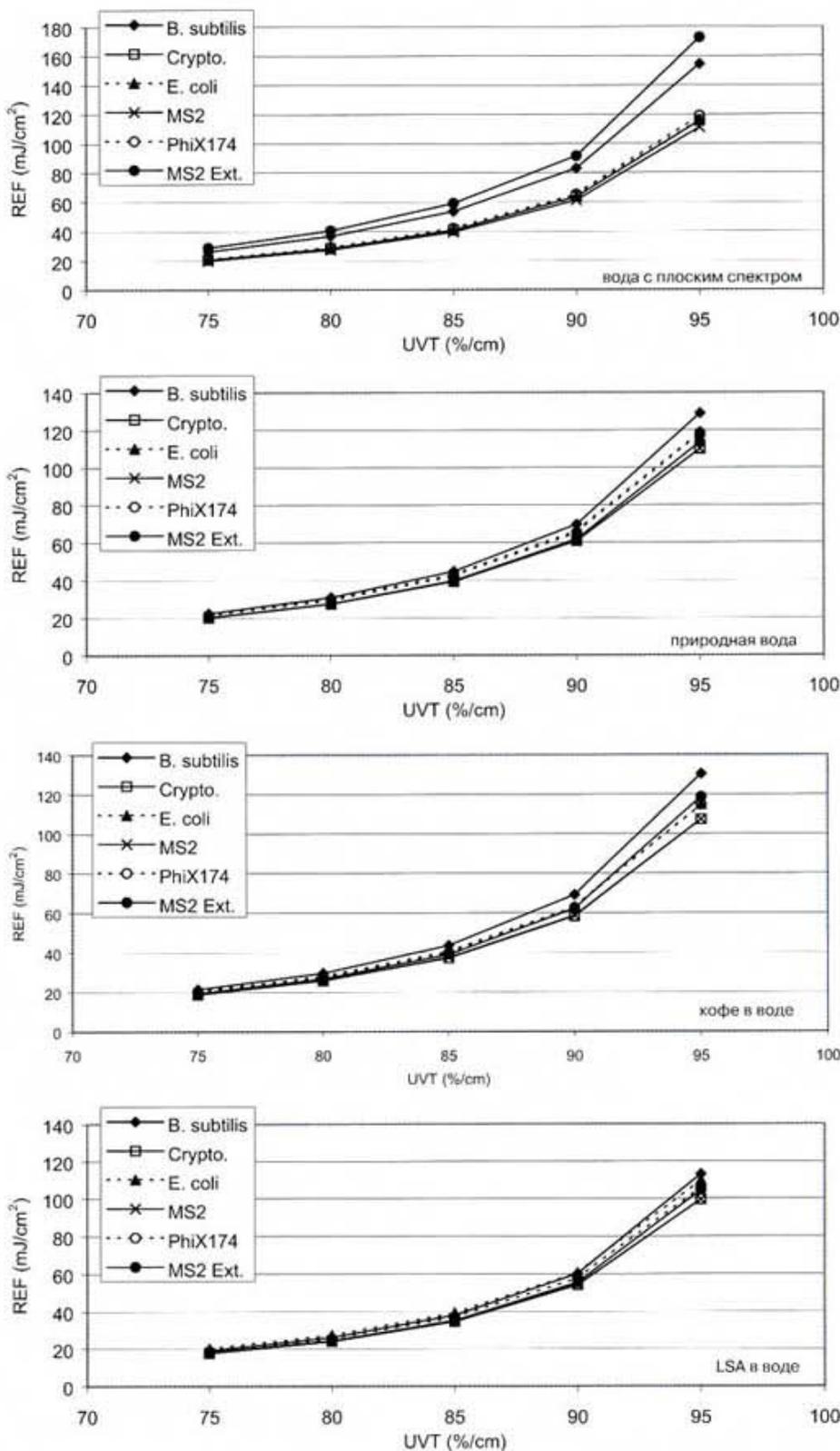


Рис. 4. Модельное предсказание интегральной плотности потока для различных организмов в воде разного типа в виде функции UVT. Кинетика инактивации моделировалась одинаковым образом для всех организмов (линейная, степень реакции 20 мДж/см^2 на единицу логарифма снижения численности), что позволяет оценивать различия только в самом спектре.

4. Обсуждение результатов

4.1 Спектр бактерицидного воздействия на микроорганизмы

Спектры бактерицидного воздействия, показанные на **рис.2**, представлены для большого числа разных типов микроорганизмов, но у них у всех имеются некоторые общие черты (см. **табл.1**). Во всех спектрах есть локальный максимум реакции на бактерицидное воздействие в диапазоне 260-271 нм. При длине волны 235 нм споры *B. subtilis* имеют другой локальный максимум, в то время как *E. coli*, два бактериофага и *Cryptosporidium* имеют промежуточный максимум реакции (-0,5 на шкале, нормализованной к длине 254 нм). При очень малых длинах волн, близких 200 нм, споры *B. subtilis* все еще имеют высокое, но уже уменьшающееся значение реакции, *E. coli* имеют пренебрежимо малое значение, а *Cryptosporidium* имеют низкий, но все еще значительный показатель реакции. При уменьшении длины волны реакция двух бактериофагов обладает тенденцией к увеличению. Моделировался также расширенный спектр MS2, экстраполированный за длину 225 нм. Эти категории бактерицидной реакции позволяют производить идентификацию важных сегментов спектра воздействия.

Таблица 1

Широкое распределение категорий относительной бактерицидной реакции по зонам УФ-спектра

Микроорганизмы		Небольшие длины волн	Около 235 нм	260–271 нм
Вирусы	Расширенный диапазон MS2	очень высокая реакция	средняя, локальный минимум	высокая, локальный максимум
Вирусы	MS2, PhiX174	неизвестная, возрастающая	средняя, локальный минимум	высокая, локальный максимум
Бактерии	<i>E. coli</i>	очень низкая, спадающая	средняя	высокая, локальный максимум
Споры бактерий	<i>B. subtilis</i>	высокая, спадающая	высокая, локальный максимум	высокая, локальный максимум
Простейшие одноклеточные	<i>Cryptosporidium</i>	низкая, спадающая	средняя	высокая, локальный максимум

Устранение влияния различной чувствительности организмов при помощи моделирования всех организмов с показателем стойкости 20 мДж/см^2 на единицу логарифма снижения численности дает возможность сравнения значений REF для разных микроорганизмов со значениями REF для MS2 с расширенным спектром. Такой выбор сделан произвольно, но также из-за того, что MS2 часто используется при определении параметров реакторов. На **рис.5** показаны отношения REF для различных организмов к REF для MS2 с расширенным спектром, для дезинфекции в «хорошем» реакторе. Эти отношения нечувствительны к UVT, но при высоких значениях UVT для некоторых организмов отмечается небольшое уменьшение такого отношения. На верхней диаграмме представлены результаты, которые могут быть получены в гипотетической не поглощающей воде. Все отношения меньше единицы. Это означает, что организмы MS2 в расширенном диапазоне подвержены бактерицидному воздействию в большей степени, чем другие микроорганизмы. Наибольшая схожесть с показателями реакции MS2 в расширенном диапазоне отмечается для спор *B. subtilis*, характеризующихся наибольшим отношением (около 0,9). Все остальные микроорганизмы имеют сходные значения отношения (около 0,7), указывающие на то, что различия в их спектрах оказывают небольшое влияние на эффективность дезинфекции.

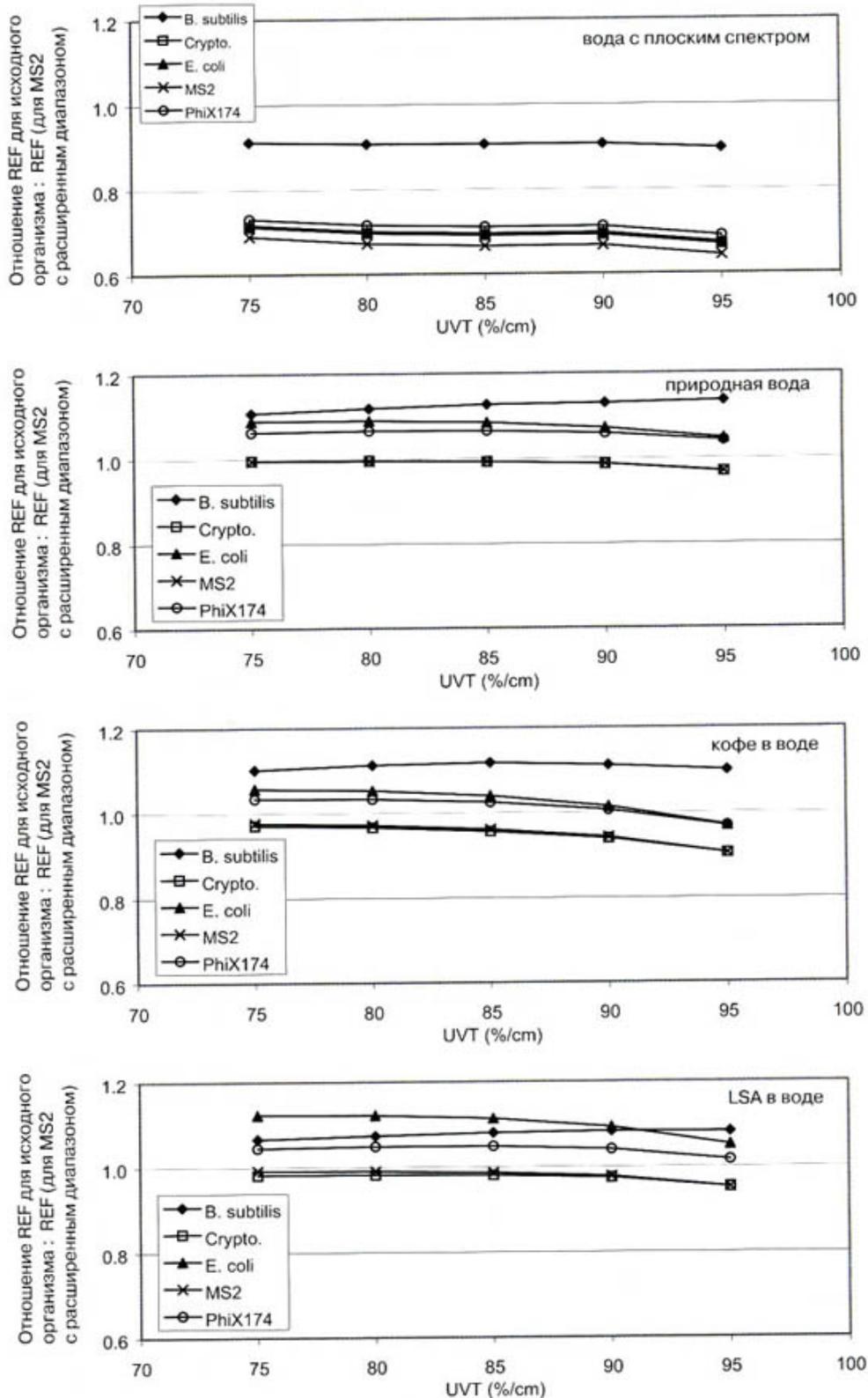


Рис. 5. Отношения интегральной плотности потока для различных организмов в «хорошем» реакторе к плотности потока для MS2 с расширенным коротковолновым сегментом диапазона бактерицидного воздействия. Разные диаграммы соответствуют результатам в воде разного типа

Однако в природной воде с заметной поглощающей способностью в коротковолновом диапазоне значения отношения REF к REF для MS2 в расширенном диапазоне возрастают: это указывает на то, что высокая бактерицидная реакция при малых длинах волн может экранироваться поглощением воды. Микроорганизмы MS2 и Cryptosporidium имеют отношения, близкие к единице. Это означает, что зоны значений реакции на бактерицидное воздействие, отличающихся от значений реакции MS2 в расширенном диапазоне (см. табл.1, коротковолновые зоны) оказывают небольшое влияние в природной воде. Микроорганизмы MS2 и PhiX174 имеют сходные спектры, но PhiX174 имеют

отношения REF около 1,06 к REF для MS2 в расширенном диапазоне, в то время как MS2 имеют отношения, близкие к 1,0. Повышенная реакция PhiX174 может возникать из-за небольшой разницы в максимуме реакции на бактерицидное воздействие в диапазоне 260-271 нм. E. coli характеризуются отношениями, сходными с PhiX174 (около 1,06), и, таким образом, небольшая разница в спектральных характеристиках в длинноволновом диапазоне также дает значение 1,06 отношения к REF для MS2 в расширенном диапазоне. Споры B. subtilis имеют самые высокие значения отношения относительно MS2 в расширенном диапазоне (1,11-1,14). Причиной этому является наличие двойного максимума в спектре бактерицидного воздействия и большие относительные значения этого максимума. Здесь также организмы моделировались с одинаковой чувствительностью, поэтому результаты демонстрируют влияние только в спектре бактерицидного воздействия.

наличие двойного максимума в спектре бактерицидного воздействия и большие относительные значения этого максимума. Здесь также организмы моделировались с одинаковой чувствительностью, поэтому результаты демонстрируют влияние только в спектре бактерицидного воздействия.

4.2 Спектры воды

Как уже указывалось выше, поглощение, зависящее от длины волны (водой и растворенными в воде компонентами) влияет на дезинфекцию. Для оценки такого влияния значения REF для конкретного организма в воде определенного типа сравнивались со значениями REF для того же организма в гипотетической не поглощающей воде (с «плоским» спектром), также с использованием той же чувствительности (20 мДж/см² на единицу логарифма снижения численности). Такое сравнение производилось для всех организмов. На рис.6 показаны такие отношения для различных спектров бактерицидного воздействия на организмы. Для организмов всех типов отношения были сравнительно нечувствительны к UVT. Почти во всех случаях отношения были меньше единицы. Это указывает на то, что для рассматриваемого организма поглощение воды, зависящее от длины волны, уменьшает значение REF по сравнению с ситуацией, если бы вода не поглощала ультрафиолетовое излучение (вода с «плоским» спектром).

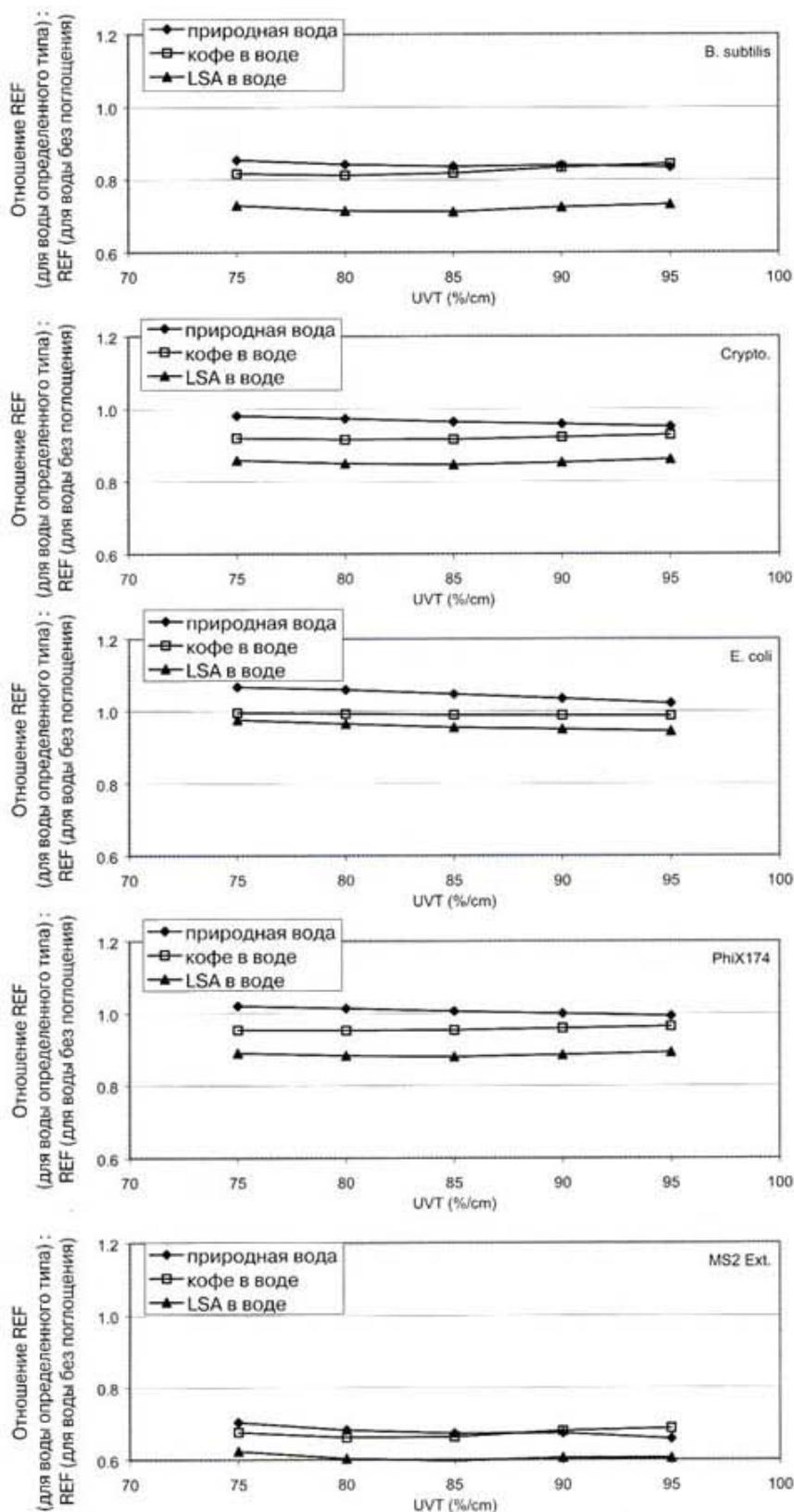


Рис. 6. Отношения интегральной плотности потока для воды разного типа в «хорошем» реакторе к плотности потока для гипотетической не поглощающей воды [с «плоским» спектром]. Разные диаграммы соответствуют спектрам бактерицидного воздействия для разных организмов

Величины отношений почти всегда имели следующий порядок для воды разных типов: природная вода > вода с кофе > LSA.

4.3 Следствия для оценки и работы

При полихроматической дезинфекции ультрафиолетовым излучением на значения REF совместное влияние оказывают спектр бактерицидного воздействия на микроорганизмы и спектр поглощения воды. Таким образом, количественные характеристики производительности реактора во время процедуры оценки могут отличаться от показателей производительности во время работы с водой различного типа и с разными организмами. Такой эффект трудно предсказать без привлечения сложных моделей. Здесь мы дадим несколько примеров, основанных на многочисленных результатах нашего моделирования для «хорошего» и «плохого» реакторов.

Начнем с предсказания производительности реактора в ходе оценочного тестирования с использованием организмов MS2 в расширенном диапазоне (предполагая, что в этом случае обеспечивается наиболее вероятный спектр бактерицидного воздействия для MS2), с ультрафиолетовой чувствительностью, равной 20 мДж/см² на единицу логарифма снижения численности, при тестировании в природной воде без модификаторов поглощающей способности, в воде с добавлением кофе и в воде с добавлением LSA для получения соответствующего значения UVT. Затем при тех же рабочих условиях (расход, значение UVT, мощность) мы прогнозируем производительность в природной воде для различных микроорганизмов. Мы моделировали очень устойчивый вирус (с таким же спектром воздействия для MS2 с расширенным диапазоном, что и для рассматриваемого вируса, и с чувствительностью 20 мДж/см² на единицу логарифма снижения численности), и очень чувствительный простейший одноклеточный организм (Cryptosporidium с чувствительностью к воздействию 2 мДж/см² на единицу логарифма снижения численности).

На **рис.7** представлены отношения REF в рабочем режиме к REF в режиме проверки. Отношения >1 указывают на большие значения REF в рабочем режиме и, следовательно, на передозировку и на излишнюю трату энергии. Отношения <1 указывают на меньшие значения REF в рабочем режиме и, следовательно, на недостаточную дозировку. Следует отметить, что показанные отношения представляют просто значения REF и игнорируют смягчающий эффект, который может обеспечить система мониторинга.

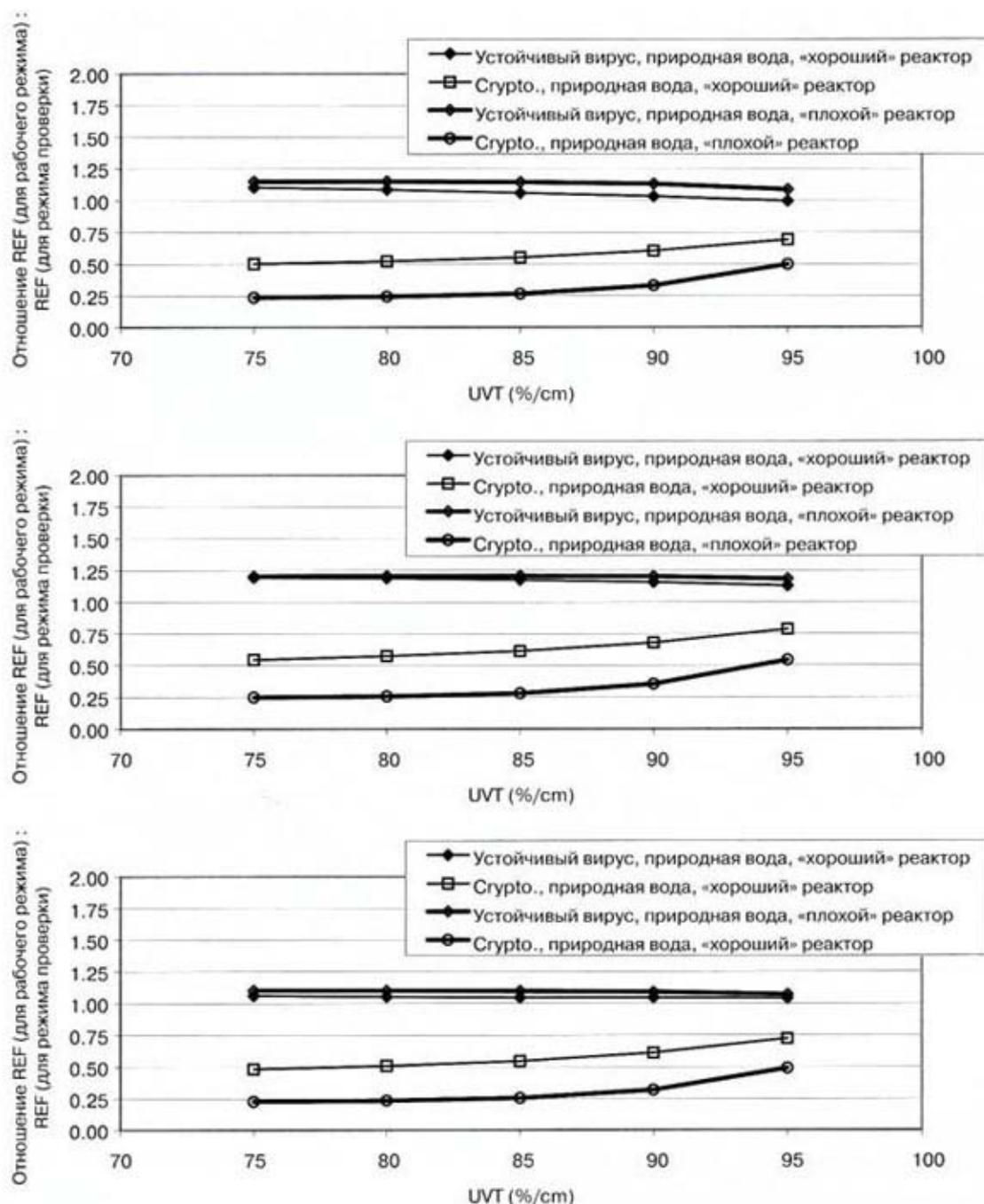


Рис. 7. Отношения интегральной плотности потока в рабочем режиме к плотности потока в режиме проверки. В режиме проверки моделировалась работа с MS2 с расширенным коротковолновым сегментом диапазона и с сопротивляемостью к ультрафиолетовому облучению, выражающейся величиной 20 мДж/см² на единицу логарифма снижения численности. В рабочем режиме моделировались в природной воде устойчивый вирус (с 24 мДж/см² на единицу логарифма снижения численности), имеющий такой же спектр, что и MS2, и неустойчивый (2 мДж/см² на единицу логарифма снижения численности) простейший одноклеточный организм со спектром, аналогичным спектру бактерицидного воздействия для *Cryptosporidium*. На верхней диаграмме представлены результаты режима проверки с использованием кофе, на средней диаграмме – LSA и на нижней диаграмме – результаты, полученные в режиме проверки для воды такого же типа, что и в рабочем режиме.

На верхней и средней диаграмме рис.7 представлены результаты проверки для MS2, выполнявшейся в воде с кофе и LSA, соответственно. Когда проверка производится в воде с кофе, передозировка для устойчивого вируса немного меньше, недостаток дозировки для чувствительных простейших организмом немного ниже при проверке в воде с LSA. На нижней диаграмме представлены результаты проверки, производимой в такой же воде, что и в рабочем режиме (в предположении, что проверка производится на месте эксплуатации). Величины передозировки и недостаточной дозировки находятся на таком же уровне, что и при проверке с использованием кофе. Это не удивительно, учитывая представленное выше сходство показателей производительности для воды и воды с кофе.

Следует отметить показанные на **рис.7** отличия в отношениях между «хорошим» и «плохим» реакторами. Передозировка для устойчивого вируса одинакова для обоих реакторов, величина недостаточной дозировки больше в «плохом» реакторе, и этот показатель ухудшается при меньших значениях UVT. Этот неверно спроектированный реактор характеризуется не только худшей производительностью вообще, но и худшей производительностью по сравнению с результатами проверки.

Хотя кажется, что отношения, отличные от единицы, связаны с определенными проблемами из-за передозировки или недостаточной дозировки во время работы, эффекты передозировки или недостатка дозировки могут быть смягчены при помощи точного предсказания этих эффектов. Точное предсказание производительности для воды любого типа и любого обрабатываемого организма может быть встроено в основанные на мониторинге алгоритмы регулирования. Это позволяет устранить передозировку или недостаток дозировки из полихроматических эффектов, обусловленных различиями во время проверочных испытаний.

5. Заключение

Метод дезинфекции при помощи полихроматического ультрафиолетового света отличается сложностью, обусловленной зависимостью реакции различных организмов на бактерицидное воздействие от длины волны и от поглощающей способности воды разного типа. При использовании воды различного типа и при обработке разных организмов при проверке и в реальной работе производительность в рабочем режиме может отличаться от производительности в режиме проверки. Неверная конструкция реактора может усугубить эти различия в производительности. Кроме того, различия чувствительности к ультрафиолету организмов, используемых в ходе проверки и в реальной работе, оказывают большее влияние, чем полихроматические эффекты, благодаря чему во время работы возникают явления передозировки и недостаточной дозировки. Этот феномен чувствительности организма проявляется как в полихроматических, так и в монохроматических реакторах ультрафиолетовой дезинфекции. Следовательно, для правильного понимания и количественной оценки производительности системы сохраняется необходимость взятия и анализа биологических проб. Благодаря учету полихроматических эффектов, эффективности реактора и чувствительности микроорганизмов в системе мониторинга и регулирования могут быть оценены и сведены к минимуму разные результаты при проверке и при работе, а также эффекты передозировки и недостаточной дозировки.