

## Что такое технология УФ-обеззараживания и чем она отличается от хлорирования?

Технология УФ-обеззараживания — это обработка воды, воздуха или поверхностей ультрафиолетовым излучением с бактерицидным эффектом. В основе действия — поглощение УФ-фотонов нуклеиновыми кислотами: в ДНК и РНК формируются фотоиндуцированные повреждения, которые лишают микроорганизм возможности к воспроизводству. Это принципиально иной механизм по сравнению с окислительными реагентами (хлор, диоксид хлора, озон), где результат достигается химическим взаимодействием и выдержкой при заданной концентрации.

Практическая разница заметна уже на уровне технологической цепочки. Для реагентных методов повышение дозы дезинфектанта одновременно увеличивает риск образования побочных продуктов обеззараживания, на которые установлены нормативные ограничения. УФ-обработка, напротив, не вносит реагенты в среду и не меняет её физико-химические и органолептические свойства; опасности передозировки как таковой нет.

## Какие преимущества и ограничения у УФ-обеззараживания?

К ключевым преимуществам относятся: высокая эффективность в отношении широкого спектра микроорганизмов, включая устойчивые к хлорированию вирусы и цисты простейших; отсутствие побочных продуктов; сохранение свойств воды и воздуха. Уже начиная с пороговых доз порядка 25–40 мДж/см<sup>2</sup> процессы реактивации, как правило, не проявляются — это важная граница, которая фиксирует технологический «порог безопасности» для многих задач.

Важное пояснение: стадия УФ-обеззараживания редко существует «сама по себе». В большинстве реальных объектов воду или воздух рассматривают как сложные многокомпонентные системы; микроорганизмы могут присутствовать в разных формах и на различных носителях. Эффективность достигается только в составе всей технологической цепочки, где УФ-обработка занимает своё место среди предварительных и последующих стадий.

## Как формируется УФ-доза и почему этот показатель определяет результат?

УФ-доза ( $D$ ) — главный интегральный показатель эффективности обеззараживания. Для источников с широким спектром (например, лампы высокого давления, импульсные ксеноновые источники) корректная оценка требует суммирования вклада всех длин волн с учётом их относительной бактерицидной эффективности  $S(\lambda)$ . В общем виде доза выражается интегралом от бактерицидной облучённости  $E(\lambda, t)$  по времени и длине волны:

$$D = \int \int E(\lambda, t) S(\lambda) d\lambda dt$$

Если облучённость известна у источника, дозу на расстоянии  $x$  считают с учётом поглощения в воде; при этом используется десятичный коэффициент поглощения  $a(\lambda)$ . Для сравнения ламп часто применяют расчёт эффективного бактерицидного потока  $\Phi_e$  с весовой функцией  $S(\lambda)$ .

Для ртутных ламп низкого давления, излучающих преимущественно на длине волны 254 нм, задача упрощается: пропускание воды на 254 нм и связанные с ним факторы определяются достаточно прямо, что облегчает обеспечение требуемой дозы.

### **Что влияет на УФ-пропускание воды и как это сказывается на эффективности?**

Вода неизбежно поглощает УФ-излучение, и интенсивность в объёме снижается по мере распространения луча. Наибольшее влияние оказывают:

- коллоидные и растворённые органические вещества;
- взвешенные частицы;
- соли железа и ряд других соединений.

Именно эти факторы формируют УФ-пропускание (в частности, на 254 нм), а вместе с ним — достижимую дозу в рабочих сечениях реактора. Для разных типов вод и требуемой степени обеззараживания дозы строго регламентируют; для питьевой воды в ряде стран минимально требуемая доза с учётом поглощения — **не менее 40 мДж/см<sup>2</sup>**.

### **Достаточно ли 40 мДж/см<sup>2</sup> и что с реактивацией микроорганизмов?**

Исследования и практика показывают: для большинства микроорганизмов в воде доза 40 мДж/см<sup>2</sup> обеспечивает инактивацию не менее чем на три порядка, и вопрос реактивации можно не учитывать. Подчеркнём, что показаны и конкретные пороговые эффекты: для энтерококков при дозах **> 35 мДж/см<sup>2</sup>** реактивация не наблюдается; для некоторых штаммов *E. coli* прирост восстановления, заметный при 5–10 мДж/см<sup>2</sup>, становится незначительным после 35 мДж/см<sup>2</sup>. Для отдельных разновидностей *Legionella* фотореактивация при малых дозах отмечается как слабая. В системах централизованного питьевого водоснабжения реактивация практически неактуальна, поскольку отсутствуют условия для световой стадии восстановления; «темновую» фазу, по сути, имитируют стандартные лабораторные процедуры инкубации проб.

### **Как учесть спектр источника: 254 нм против широкополосных ламп?**

При работе с монохроматическим излучением (линия 254 нм у ламп низкого давления) расчёт дозы и оценка пропускания опираются на одну длину волны и зависящие от неё параметры. Для широкополосных источников (например, ртутные лампы высокого давления, импульсные ксеноновые) доза — результат интегрирования по всему спектру с весовой функцией бактерицидной эффективности. Это принципиально важно при проектировании и верификации результатов: корректная оценка невозможна без учёта спектральной чувствительности микроорганизмов и оптики среды.

### **Где место УФ-обработки в технологической схеме: автономный барьер или часть цепи?**

Вода и воздух — сложные системы, где возбудители находятся в разных состояниях (взвесь, агрегаты, биоплёнки, адсорбция на частицах). Поэтому надёжный санитарный результат обычно достигается совокупностью стадий: подготовка среды, собственно УФ-обработка, а при необходимости —

последующие барьеры. Выбор комбинации процессов определяется задачей конкретного объекта и должен рассматриваться в рамках всей технологической цепочки, а не «точечно».

### **Какие эксплуатационные параметры нужно контролировать в УФ-системе?**

Для стабильного обеспечения заданной УФ-дозы требуется регламент наблюдений и фиксации значений. В числе параметров, которые подлежат постоянному контролю: состояние ламп, УФ-интенсивность, УФ-пропускание и сертифицированная (заданная) УФ-доза, а также расход и объём обработанной воды. Для приборного обеспечения предусмотрены процедуры регулярной калибровки: УФ-датчики — на ежемесячной основе; радиометр — еженедельно (с возможным снижением частоты при положительных результатах наблюдений). Такой режим контроля позволяет оперативно выявлять отклонения от технических условий и удерживать процесс в заданном окне эффективности.

### **Почему нельзя оценивать УФ-обработку без учёта свойств самой воды?**

Даже при неизменном источнике излучения распределение дозы в зоне облучения будет зависеть от оптических свойств среды и гидродинамики. Поглощение определяет, насколько глубоко излучение проникает в поток, а взвесь и коллоиды формируют тени и экранирующий эффект. Поэтому показатели УФ-пропускания и сопутствующие характеристики — не формальность, а ключ к корректной оценке реальной дозы в рабочем объёме. Это же объясняет, почему в индустриально развитых странах для питьевой воды закреплён нижний порог в 40 мДж/см<sup>2</sup>: он включает запас на поглощение и стабилизирует санитарный результат.

### **Как считаться с гидродинамикой и «средней дозой» на практике?**

Точный расчёт дозы в реакторе в общем случае требует поля облучённости и картины течения жидкости. Для инженерных оценок применяют модель «полного перемешивания», в которой каждая элементарная частица жидкости как бы проходит все точки зоны облучения с равным временем пребывания. В рамках такой модели оперируют «средней дозой», что удобно для сопоставления вариантов и быстрой проверки выполнения требований по обеззараживанию.