

## **УФ + озон, хлор и ультразвук: как корректно сочетать методы обеззараживания воды**

### **Когда и зачем вообще комбинировать УФ-обеззараживание с другими методами?**

Комбинации применяют там, где одному методу не хватает нужного свойства: УФ-обработка не даёт последствия в сети, а хлор в стандартных режимах не гарантирует нужного уровня инаktivации отдельных групп возбудителей. Поэтому методы ставят последовательно, как этапы одной технологии. Важно понимать: говорить о «синергии» в смысле сверхсуммарного биоцидного эффекта некорректно, поскольку процессы разделены во времени и каждый из них работает уже с изменённой средой. Корректнее оценивать суммарный результат и экономику всей связки, а не «искать синергию» ради самой формулы.

### **Как «озонирование + УФ» влияет на качество и экономику водоподготовки?**

Озон — мощная окислительная технология, которая решает задачи физико-химической очистки и одновременно создаёт первичный барьер обеззараживания. Ключевой для УФ-стадии эффект озонирования — заметное улучшение прозрачности воды в УФ-диапазоне, что снижает требуемую установленную мощность и делает последующую УФ-инаktivацию экономичнее. На практике предварительное озонирование с последующим УФ применяют на ряде крупных станций подготовки питьевой воды; эта связка позволяет снизить расход реагентов, в том числе хлора, и стабилизировать микробиологические показатели конечной воды.

### **Почему размещать УФ-стадию удобнее «в конце цепочки»?**

Даже простая последовательность коагуляция → отстаивание → фильтрация уменьшает органику и взвешенные вещества, тем самым повышая УФ-пропускание. Дополнительные операции — озонирование и сорбция — усиливают эффект. В результате наиболее рационально ставить УФ-обеззараживание на финальном участке линии, где вода уже имеет наилучшие оптические свойства: это облегчает достижение целевой УФ-дозы и уменьшает потребление электроэнергии. При этом

даже при дозах, кратно превышающих обычно применяемые, существенных изменений большинства показателей качества воды не наблюдается; если остался свободный хлор, после УФ-дозы порядка 40 мДж/см<sup>2</sup> его концентрация может немного уменьшиться.

## Что даёт сочетание «УФ-облучение + хлорирование»?

Связка УФ с хлорированием широко используется для природных и промышленных вод: она помогает добиться глубокого обеззараживания (включая вирусологически значимые группы), сохранить пролонгированное действие дезинфектанта в сети и при этом уменьшить расход хлорсодержащих реагентов. Показано, что при оценке совместного действия в различных дозах отсутствует взаимоусиление обеззараживающей способности — по сути, речь о корректно подобранной последовательности процессов, а не о «сверхэффекте». В ряде случаев УФ-стадию используют и как инструмент для удаления остаточного хлора.

## Насколько сильно УФ влияет на свободный и связанный хлор?

Эксперименты с предварительно аммонизированной и затем гипохлоритированной водой показывают: при УФ-дозах 58–105 мДж/см<sup>2</sup> содержание общего активного хлора снижается в среднем на ~8 % (максимально до 12 %), при этом фиксируется одновременное уменьшение хлорорганических соединений на 4–8 %. Для заметного разложения хлорсодержащих форм нужны дозы, кратно превышающие «обеззараживающие»: при 150–500 мДж/см<sup>2</sup> концентрация остаточного хлора может снижаться на 10–45 %. Соединения связанного хлора (хлорамины) обычно устойчивее к УФ, чем формы свободного хлора. Важная деталь: фотолиз хлорсодержащих соединений не сопровождается образованием нежелательных побочных продуктов — напротив, вместе со снижением остаточного хлора уменьшается и уровень вредных хлорорганических веществ.

## Что показывают эксплуатационные примеры бассейнов по «УФ + хлор»?

В ряде объектов фиксировалось уменьшение содержания связанного хлора с ростом УФ-дозы без изменения концентрации хлоридов. Например, снижение связанного остаточного хлора в 2 раза при дозе 500 мДж/см<sup>2</sup>; аналогично на другом объекте при 300 мДж/см<sup>2</sup> связанный

хлор уменьшался на ~63 %, при 150 мДж/см<sup>2</sup> — на ~46 %, при 50 мДж/см<sup>2</sup> — на ~18 %. В сумме это позволяет либо сократить расход хлорреагента, либо удерживать его на прежнем уровне при меньших остаточных концентрациях в воде.

## **Какую роль играет ультразвук и есть ли смысл соединять его с УФ?**

Ультразвук — это упругие колебания с частотой выше 15–20 кГц; в жидкостях он вызывает целый набор эффектов — от кавитации и диспергирования до дегазации и локального нагрева. Биологическое действие ультразвука сильно зависит от интенсивности: при низких уровнях и коротких экспозициях он способен стимулировать активность и рост микроорганизмов; при высоких интенсивностях и длительной обработке — подавляет и разрушает микрофлору, причём бактерицидный эффект в основном связан с кавитацией. Тем не менее отсутствие отраслевых регламентов и высокая энергоёмкость в рабочих режимах пока делают самостоятельное ультразвуковое обеззараживание неконкурентоспособным для промышленного применения.

## **Есть ли «сверхэффект», если использовать ультразвук вместе с УФ?**

Специальные исследования показывают, что совместное использование УФ и УЗ-обработки не демонстрирует синергетического эффекта: суммарный результат не превышает сумму эффектов по отдельности, а вклад ультразвука в инактивацию на фоне УФ часто незначителен. Поэтому «УФ + УЗ» применяют не ради «суммарной дозы», а прицельно — для разрушения взвешенных частиц, улучшения массообмена и доставки окислителя в объёме, когда в технологию включены озон, хлорсодержащие реагенты или, к примеру, пероксидные/фотокаталитические звенья. Такие задачи ультразвук действительно интенсифицирует.

## **Что учитывать по последовательности этапов «озон ↔ УФ ↔ хлор»?**

Логика простая: сначала — операции, улучшающие УФ-пропускание (включая озонирование), затем — УФ-обеззараживание, а уже после — ввод реагента для поддержания последействия в сети, если оно требуется. При таком построении линии снижается нагрузка на УФ-источники, а расход реагента — меньше при равной

эпидемиологической надёжности. Если в воде остаётся остаточный хлор, УФ-стадию подбирают с учётом возможного небольшого снижения его концентрации на выходе — этот эффект для доз порядка 40 мДж/см<sup>2</sup> описан и в лабораторных, и в эксплуатационных наблюдениях.

## Когда УФ-стадию используют именно для «дехлорирования»?

В некоторых схемах целенаправленно применяют высокие УФ-дозы (сотни мДж/см<sup>2</sup>), чтобы уменьшить содержание связанного и свободного хлора. Это востребовано, например, там, где ограничивают концентрации хлорсодержащих форм по санитарным или технологическим причинам. В таких случаях ориентируются на режимы, в которых достигается требуемое снижение: для свободного хлора — на уровне десятков процентов при 150–500 мДж/см<sup>2</sup>, для хлораминов — режимы жёстче из-за их большей устойчивости к УФ. При этом фотолиз не даёт нежелательных побочных продуктов.

## Какие выводы по комбинированию методов в целом?

1. Озон + УФ — рациональная связка: озон «подготавливает» воду, улучшая её оптику, УФ обеспечивает гарантированную инактивацию без реагентов.
2. УФ + хлор — технологичная комбинация: глубина обеззараживания выше, расход реагента ниже, есть опция контролируемого снижения остаточного хлора при повышенных УФ-дозах.
3. УФ + УЗ — инструментальный тандем без «сверхэффекта»: ультразвук улучшает физико-химические условия (массообмен, разрушение взвесей), а не «усиливает» УФ-инактивацию как таковую.

Последовательность стадий и учёт УФ-пропускания — ключ к экономике и стабильности результата. УФ-узел логично располагать там, где вода максимально прозрачна в диапазоне 254 нм.