

Что такое бактерицидное действие УФ-излучения и какие длины волн действительно эффективны?

Бактерицидным называют диапазон ультрафиолетового излучения от **205 до 315 нм**, при котором происходит гибель или инактивация микроорганизмов. Именно эти длины волн обладают достаточной энергией фотонов, чтобы вызвать разрывы в молекулах нуклеиновых кислот и нарушить процесс деления клеток. Излучение короче **200 нм** практически не используется — оно сильно поглощается воздухом и стенками материалов, из-за чего трудно доставить энергию к объекту обработки.

Максимум эффективности приходится примерно на **265 нм**. В этом диапазоне фотоны наиболее результативно повреждают ДНК и РНК микроорганизмов. По мере удаления от этой области эффективность заметно падает, и энергия излучения начинает уходить в тепло без выраженного биоцидного эффекта.

Почему излучение с длиной волны 254 нм широко применяют в практике?

В инженерных системах именно 254 нм стало стандартом, потому что это основная рабочая линия низкого давления ртутных и амальгамных ламп. Для удобства расчётов спектральную бактерицидную эффективность $S(\lambda)$ нормируют к единице именно на этой длине волны: **$S(254 \text{ нм}) = 1$** .

Хотя реальный пик эффективности для большинства микроорганизмов наблюдается около **265 нм**, 254 нм остаётся технологически оптимальным компромиссом между мощностью, ресурсом ламп и прозрачностью воды или воздуха. Для некоторых микроорганизмов указаны смещения пика:

- *Cryptosporidium parvum* — **271 нм**, эффективность на 15 % выше;
- *Bacillus subtilis* — **270 нм**, эффективность выше на 40 %.

Если точных данных о спектральной чувствительности нет, используют зависимость поглощения ДНК как приближение. При этом учитывают, что максимальное поглощение тимина не совпадает полностью с общей кривой ДНК, что вносит небольшое расхождение между теорией и практикой.

Как рассчитывается УФ-доза (флюенс) и почему она зависит не только от мощности?

Бактерицидная доза **D** определяется интегрально — как сумма воздействий всех длин волн во времени, взвешенных по спектральной эффективности:

$$\Phi_h = \int \phi(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

где $E(\lambda, t)$ — спектральная облучённость, $S(\lambda)$ — относительная бактерицидная эффективность.

Такой подход позволяет учитывать как длительность воздействия, так и реальную «полезную» часть спектра. Для облучения воды дополнительно принимают во внимание, что поглощение резко возрастает при длинах волн короче **230 нм**, и эта часть спектра быстро теряет интенсивность в толще жидкости.

Что именно происходит в клетке под действием ультрафиолета?

Первичный эффект — **поглощение квантов ДНК**. При этом между соседними тиминовыми основаниями возникают новые химические связи, формируются **тиминовые димеры**, мешающие нормальному «чтению» генетического кода. Аналогичные процессы протекают в РНК, где связываются урациловые основания.

Помимо нуклеиновых кислот, ультрафиолет вызывает фотохимические изменения белков, ферментов и липидов мембран. Повреждение клеточных оболочек и нарушение синтеза структурных элементов делают микроорганизм нежизнеспособным, даже если часть генетического материала остаётся неповреждённой.

Почему инактивация происходит неравномерно и что означает «эффект плеча»?

Если отложить на графике логарифм выживших клеток от дозы, то кривая редко является идеальной прямой. Сначала наблюдается

«плечо», где эффект слабо выражен — это связано с репарацией ДНК или недостатком накопленных повреждений. Затем следует **линейный участок**, описываемый зависимостью

$$\lg(N/N_0) = -kF,$$

где k — коэффициент чувствительности микроорганизма, F — УФ-доза.

При дальнейшем увеличении дозы наступает **зона насыщения** — темп инактивации снижается. Возможные причины — слипание клеток, экранирование излучения частицами взвеси или снижение доступа излучения к отдельным микроорганизмам.

Насколько различается чувствительность разных микроорганизмов?

Чувствительность зависит от типа клетки, толщины оболочки и наличия пигментов. Условно можно расположить группы в порядке убывания восприимчивости к УФ-облучению:

бактерии ≈ простейшие → большинство вирусов → аденовирусы → плесени и водоросли.

Таким образом, требуемые дозы для инактивации возрастают справа налево. Этот порядок показывает, почему нельзя применять универсальные значения доз: оптимум зависит от конкретного объекта обработки.

Какие дозы при 254 нм нужны для 4-log-инактивации (99,99 %)?

Приведены ориентирующие экспериментальные значения доз (флюенсов) при длине волны **254 нм**, необходимых для снижения концентрации микроорганизмов на четыре порядка. Эти данные получены в лабораторных условиях и служат только как справочные ориентиры, поскольку фактическая доза в установке зависит от спектра источника, гидродинамики и прозрачности среды.

Для вирусов (мДж/см²):

- Adenovirus 40 — ~124;
- Adenovirus 41 — ~112;
- MS2 bacteriophage — ~62;
- Poliovirus тип 1 — ~27;
- ФХ174 — ~10;
- Rotavirus SA11 — 36;
- PRD-1 — ~30 и др.

Фотореактивация у этих вирусов, как правило, не наблюдается.

Простейшие (мДж/см²):

- Giardia lamblia — < 10;
- Giardia muris — < 10;
- Cryptosporidium parvum — < 10. (Ориентиры 4-log при 254 нм; реактивация не обнаружена.)

Для указанных простейших реактивация также не отмечена.

Что происходит при чрезвычайно больших облучённостях?

При поверхностных облучённостях порядка **1-10 кВт/см²**, достигаемых у мощных импульсных источников, микроорганизмы нагреваются выше **130 °С**, и гибель вызывается уже не фотохимией, а **термическим разрушением**. В таких условиях оболочка клетки разрывается из-за внутреннего давления.

Отмечено, что при превышении пороговой мощности импульсов к стандартному бактерицидному действию добавляется дополнительный механизм воздействия. Поэтому результаты, полученные для непрерывного излучения, не всегда корректно переносить на импульсные источники без уточняющих измерений.

Что означает реактивация и когда ею можно пренебречь?

После облучения часть микроорганизмов способна частично восстанавливаться. Различают **фотореактивацию** (на свету) и **темновую реактивацию** (в отсутствии света). Для наглядности: доза всего **1**

мДж/см² вызывает образование около **3000–4000 тиминовых димеров**, и их полное исправление может занять десятки минут.

Практические исследования показывают, что при дозах **35–40 мДж/см²** вероятность восстановления минимальна.

— У *Enterococcus* реактивация практически отсутствует при дозе выше 35 мДж/см².

— У *E. coli* при 35 мДж/см² она составляет 0,1–0,6 log против ~2 log при 5–10 мДж/см².

— У *Legionella* реактивация незначительна даже при небольших дозах.

Отсюда вывод: для большинства микроорганизмов доза порядка **40 мДж/см²** обеспечивает инактивацию минимум на три порядка и делает реактивацию практически несущественной. В системах централизованного водоснабжения условия для фотореактивации отсутствуют, а возможная темновая реактивация частично учитывается при анализе проб.

Почему коротковолновая часть спектра (ниже 230 нм) малоэффективна в воде?

Даже если источник излучает значительную долю коротковолнового ультрафиолета, он почти не достигает микроорганизмов в толще воды: собственное поглощение воды резко возрастает при длинах волн меньше 230 нм. Поэтому при проектировании водных установок спектр источника подбирают с учётом прозрачности среды и интегрально рассчитывают дозу, чтобы полезная энергия приходилась именно на бактерицидный диапазон.