

## Как УФ-излучение взаимодействует с веществом: что важно знать про оптические свойства материалов?

В ультрафиолетовой области оптические свойства многих веществ резко отличаются от поведения в видимой зоне. Для инженера ключевой вывод прост: по мере перехода к меньшим длинам волн прозрачность большинства привычных материалов падает, а коэффициент поглощения растёт. Обычное оконное стекло становится непрозрачным уже при длинах волн короче  $\sim 320$  нм. Если требуется передать ближний УФ, применяют специальные среды и оптику: увиолевое стекло, сапфир, кварц, фториды ( $MgF_2$ ,  $CaF_2$ ), фтористый литий. Среди кристаллических материалов наибольшая «глубина» в ультракороткую область у LiF — граница прозрачности около 105 нм. Ещё короче прозрачных твёрдых материалов практически нет. Из газов оптимальны инертные: воздух в целом непрозрачен в области  $\lambda < 190$  нм из-за интенсивного поглощения кислородом и водяными парами; самая коротковолновая граница прозрачности среди инертных газов — у гелия ( $\approx 50,4$  нм). Эти факты определяют выбор материалов окон, кварцевых кожухов, защитных экранов и газовых сред в оптических трактовках УФ-установок.

## Какая «длина волны работает»: витальное, антирахитное и бактерицидное действие в одном графике

Биологические эффекты УФ напрямую зависят от длины волны. В области 315–390 нм воздействие слабое. Для спектрального интервала 280–400 нм в определённых дозах показано полезное влияние на организм человека, животных и птицы — его называют витальным действием. Противорахитным эффектом обладают лучи диапазона УФ-В (280–315 нм). Способность инактивировать микроорганизмы демонстрирует излучение в интервале 200–315 нм — этот участок и формирует «бактерицидную кривую» на стандартной схеме распределения эффективности. Характерная реакция кожи — эритема: специфическое покраснение, которое затем переходит в защитную пигментацию (загар). Для оценки облучения используют эритемную дозу: за единицу принята 1 эр — это 1 Вт УФ-излучения с длиной волны 297 нм в течение 1 с; эритемная облучённость выражают в эр/м<sup>2</sup>. Для профилактики дефицита УФ-облучения достаточно около десятой части эритемной дозы — ориентир 60–90 (мкэр·мин)/см<sup>2</sup>. Все эти ориентиры привязаны к наблюдаемым спектральным зависимостям, поэтому в прикладных задачах важно указывать не только дозу, но и длину волны излучения.

## Почему в УФ-обеззараживании говорят «инактивация», а не «убивает»?

Терминологический акцент неслучаен. При низких уровнях облучённости и малых полученных дозах УФ действует на молекулярном уровне: поглощение фотонов ДНК и РНК нарушает способность микроорганизма к воспроизводству. Обмен веществ при этом может сохраняться, то есть формально клетки остаются живыми, но размножаться они уже не способны — следовательно, не вызывают заболевания. Поэтому корректный термин — «инактивация», и именно его используют в контексте УФ-обеззараживания воздуха, воды и поверхностей.

## От кВт/см<sup>2</sup> до мДж/см<sup>2</sup>: как плотность мощности и доза определяют механизм действия?

Механизм изменяется с ростом плотности излучения.

- **Крайне высокие облучённости (порядка 1–10 кВт/см<sup>2</sup>)** достижимы практически только от мощных импульсных источников. В этом режиме микроорганизмы поглощают столько энергии, что их температура поднимается выше ~130 °С, начинается перегрев и термическая деструкция вплоть до разрыва оболочки из-за внутреннего давления.
- **Средние уровни плотности излучения** термического разрушения не вызывают, но при достаточно большой мощности внешние мембраны протеиновых клеток поглощают УФ и постепенно разрушаются; гибель клетки здесь связана с утечкой протоплазмы.
- **Низкие уровни облучённости и дозы** дают нетермический механизм — молекулярное повреждение генетического материала (ДНК/РНК), что приводит к инактивации. Современные системы обеззараживания работают именно в этом «низкодозовом» диапазоне, где критична корректная оценка флуенса и времени экспозиции.

## Что ограничивает «свободный полёт» фотонов: поглощение в газах и материалах

Даже идеально рассчитанная геометрия теряет точность, если не учесть поглощение на пути луча. Воздух оказывается непрозрачным уже при  $\lambda < 190$  нм — ключевая причина в поглощении кислородом и водяным паром. Вакuumный тракт или инертная атмосфера требуются для коротковолновых участков; в качестве газовой среды часто выбирают инертные газы, которые в целом более прозрачны, а «короткая» граница у гелия доходит до  $\approx 50,4$  нм. В твёрдых средах роль «окна» выполняют

материалы с подходящей границей прозрачности: кварц, сапфир, фториды и др. Именно совокупность этих ограничений диктует выбор окон, кожухов и межлампового пространства в бактерицидах и реакторах.

## Как «коэффициент отражения» материалов влияет на распределение УФ-поля?

Помимо поглощения, излучение переотражается от стенок камер, корпусов, кожухов. Значения коэффициента отражения для распространённых материалов в УФ различаются на порядки, что принципиально влияет на «подсветку» теневых зон и общий баланс флуенса: прессованная окись магния может давать отражение порядка ~93 %, алюминиевая фольга — около ~73 %, нержавеющая сталь — ориентировочно 20–30 %, белые обои — ~22 %, стекло — ~4 %, черный лак — ~5–7 %. Эти величины (приводимые как характерные) наглядно показывают, почему внутренняя отделка, тип покрытия и чистота поверхности становятся параметрами расчёта, а не деталями оформления. Подбор отражающих материалов позволяет уменьшить «провалы» облучённости, но он не заменяет корректного расчёта оптических потерь и учёта геометрии.

## Где проходит граница между фотохимией, фотобиологией и бактерицидным эффектом?

Физическое действие УФ связывает эти области общей оптико-энергетической платформой: один и тот же спектральный диапазон может инициировать разные первичные процессы. Для живых тканей глубина проникновения невелика — до ~1 мм, поэтому эффекты локализуются в поверхностных слоях; в растениях УФ меняет активность ферментов и гормонов, влияет на синтез пигментов и интенсивность фотосинтеза. В интервале 280–320 нм для растительных объектов чаще наблюдают вредное влияние на рост и развитие, а в зоне 320–400 нм — регуляторную роль. Эти зависимости важны, когда рядом с установками присутствуют биологические системы, чувствительные к фоновой УФ-подсветке.

## Почему внешняя среда «защищает» микроорганизмы от УФ?

При обработке воздуха и поверхностей бактерии и вирусы зачастую окружены белковой матрицей, субстратами и иными органическими примесями, с которыми взаимодействуют в реальной среде. Такая белковая «оболочка» действует как УФ-протектор — она поглощает часть

излучения и ослабляет бактерицидное действие. Следствие для инженера: при равных внешних настройках доза, достигающая мишени, может быть меньше ожидаемой из-за прокладки из органики. Это требует либо увеличения времени экспозиции, либо корректировки геометрии и оптических потерь для достижения целевого флуенса на микробной клетке.

## Как связаны «облучённость», «флуенс» и спектр с практической эффективностью?

Флуенс (поверхностная доза) — энергия, пришедшаяся на единицу площади; измеряют в Дж/м<sup>2</sup> или мДж/см<sup>2</sup>. Её формируют поток излучения и время облучения; при переходе к коротким длинам волн становится важен ещё и реальный пропуск оптической трассы. В инженерной постановке задачи «физическое действие УФ» превращается в поиск баланса: достаточный флуенс в нужной спектральной области (например, в бактерицидной зоне), при учёте поглощения и отражения, и при отсутствии нежелательных побочных эффектов (например, эритемы у персонала). Именно поэтому в паспортах и ТЗ фиксируют длину волны/полосу, облучённость в контрольной зоне, время экспозиции и материалы на лучевом пути.