

Как считать и проверять эффективность УФ-установок: расчёт дозы, гидродинамическое и трассерное моделирование

Зачем вообще моделировать УФ-оборудование, если «всё решает доза»?

УФ-доза действительно определяет санитарный результат, но в реальном реакторе дозу формирует не один параметр, а совокупность факторов: поле УФ-интенсивности, оптика среды и гидродинамика потока. Поэтому инженерная задача сводится к двум шагам: сначала получают распределение УФ-интенсивности в зоне обработки, затем учитывают, как именно движется вода (или воздух) через эту зону. Только совместный учёт оптики и течений даёт корректную оценку средней дозы и её разбросов по объёму. Для воздушных систем расчёты в одном смысле проще (воздух практически прозрачен на бактерицидных длинах волн), но в другом — сложнее, так как вклад отражателей в набор УФ-дозы нужно учитывать особенно аккуратно.

Как в расчётах вводят УФ-пропускание и почему удобно работать с «коэффициентом на 10 мм»?

Для удобства вводят коэффициент пропускания τ (в долях или процентах), который характеризует ослабление излучения на 254 нм при прохождении 10 мм среды. Тогда интенсивность параллельного пучка после пути l выражают в виде

$$I = I_0 \cdot \tau^{l/10}$$

где I_0 — интенсивность на входе. Такой формат легко масштабируется и позволяет напрямую сравнивать воды разного состава (для хорошо пропускающих сред также используют коэффициенты на 50 и 100 мм).

Откуда берётся карта УФ-интенсивности в реакторе?

Нужно знать пространственное распределение интенсивности $I(\tau, x, y)$ в сечениях, перпендикулярных оси лампы: для одиночной лампы, либо для системы «лампа + кварцевый чехол» в установках обеззараживания воды. Распределение вычисляют численно: излучатель аппроксимируют цилиндрическими слоями, которые делят на угловые сектора, а затем суммируют вклад от всех элементарных источников в интересующих точках. Полученная карта служит основой для последующих расчётов дозы.

Как оценить среднюю дозу без громоздкой CFD? Что даёт «модель полного перемешивания»?

Общепринятая инженерная модель — модель полного перемешивания. Её идея: каждая элементарная частица жидкости «успевает побывать» во всех точках зоны облучения и проводит в каждой одинаковое время. В таком представлении средняя доза выражается через усреднённую интенсивность и среднее время пребывания в камере:

- усреднённая интенсивность: $\langle I \rangle = \frac{L}{V} \int \int I(\tau, x, y) dx dy$, где V — объём зоны, L — длина дуги лампы (межэлектродное расстояние), ρ — коэффициент, учитывающий компоновку;
- среднее время пребывания: $\langle t \rangle = \frac{V}{Q}$, где Q — расход;
- «рабочая» средняя доза с запасом: $\langle D \rangle = \frac{\rho L}{Q} \int \int I(\tau, x, y) dx dy$, где $\rho < 1$ — коэффициент запаса, учитывающий застойные зоны и неполное перемешивание (обычно $\rho = 0,8$). Модель проста, прозрачна и не зависит от «биочувствительности» микроорганизмов, что удобно на этапе прикидок и выбора компоновки.

Где у модели полного перемешивания границы применимости?

Её ограничение — «средний» взгляд на процесс. Модель не позволяет детально учесть влияние локальных конструктивных элементов (решёток, направляющих, лопаток), не раскрывает неоднородности поля дозы при разных схемах расположения ламп и не показывает «холодные карманы». Когда такие эффекты важны, используют либо гидродинамическое моделирование, либо экспериментальные методы, которые дают фактическую картину распределений времени пребывания и позволяют косвенно судить об эффективности.

Что даёт гидродинамическое моделирование и как с его помощью считают эффективную дозу?

Современные вычислительные средства позволяют численно решать систему уравнений, включающую Навье—Стокса, уравнение непрерывности и законы сохранения импульса и энергии. Поток на входе разбивают на набор «струй» (элементарных объёмов); для каждой струи прослеживают усреднённую траекторию, на которой в каждой точке известны компоненты скорости и координаты. Доза на элементарном отрезке i для k -й струи:

$$D_i^k = I_i(\tau) \cdot t_i,$$

где t_i — время прохождения отрезка, $I_i(\tau)$ — локальная УФ-интенсивность с учётом пропускания, а I в любой точке получают суммированием вкладов от всех ламп.

Доза для струи :

$$D^k = \sum_i D_i^k ;$$

далее получают распределение доз по струям и рассчитывают эффективную дозу обеззараживания (RED). Такой путь напрямую связывает оптику, гидродинамику и итоговую метрику эффективности.

Можно ли без вычислительной «тяжёлой артиллерии» проверить гидродинамику реактора?

Да. Для этого применяют трассерный метод — экспериментальное получение функции распределения времени пребывания (ФРВП) в зоне облучения. Подход прост по идее: в поток на входе кратковременно вводят трассер, а на выходе регистрируют его «ответ» во времени. Так восстанавливают ФРВП, по которой судят о перемешивании, наличии застойных зон и общем «возрасте» жидкости на выходе. Водные установки трассируют, например, с помощью раствора NaCl: на входе формируют возмущение близкое к δ -импульсу, на выходе измеряют изменение электропроводности высокочувствительным кондуктометром (в разработанных схемах — с временным разрешением до **0,01 с**), используя соответствующие системы электродов. Итог — «портрет» гидродинамики конкретного реактора.

Как соединить ФРВП с дозой и получить оценку эффективности оборудования?

ФРВП фиксирует, сколько времени частицы потока проводят в камере. Зная её и имея карту $I(t, x, y)$, можно оценивать распределение доз и сравнивать конфигурации оборудования: где хватает перемешивания, где «время недостаточное», где полезно перестроить компоновку ламп или изменить гидравлические элементы. Если задача — быстрое ранжирование вариантов, берут модель полного перемешивания как базовую и накладывают поправки на основе ФРВП. Если нужна детальная картина, используют CFD-подход (численное моделирование) с «прошивкой» траекторий и последующим расчётом дозы вдоль них.

Чем особа расчётная ситуация для воздушных УФ-систем?

Воздух прозрачен для бактерицидного диапазона, и потому «оптическая» часть упрощается. Однако при применении эффективных отражателей их вклад в набор УФ-дозы становится значимым, и его следует считать аккуратно. В помещениях часто правомерно считать среду полностью перемешанной: конвекция из-за отопления, естественная и искусственная вентиляция, движение людей и механизмов быстро выравнивают параметры (температуру, влажность, концентрации примесей и микроорганизмов). Это даёт простую математическую модель изменения концентрации во времени и позволяет использовать её для расчётных оценок и выбора оборудования.

Как выглядит простая модель обеззараживания воздуха в помещении с людьми?

В рамках модели полного перемешивания изменение концентрации микроорганизмов $C(t)$ задают балансом поступления из внешней среды и от людей, а также удаления за счёт вытяжки и рециркуляционного прибора с производительностью R и эффективностью α . Получающаяся динамика хорошо согласуется с измерениями в реальных помещениях при заданных исходных условиях (объём, начальная обсеменённость, число людей, вентиляция, производительность и эффективность рециркулятора). Модель проста и применима для инженерных расчётов и подбора оборудования, оставаясь независимой от конкретного метода обеззараживания воздуха как такового.

В чём практическая логика выбора между «средними» оценками и детальными расчётами?

- Когда нужно быстро получить прикидочную среднюю дозу и проверить, «входит ли» вариант в рамки по расходу и объёму, используют модель полного перемешивания. Это быстрый способ сравнить схемы и расставить приоритеты.
- Когда важны локальные эффекты (перераспределение потоков, отражатели, направляющие, решётки, расположение ламп), переходят к гидродинамическому моделированию с последующим расчётом дозы.
- Когда нужно верифицировать гидродинамику без сложных вычислений либо подтвердить допущения модели, применяют трассерный метод и получают ФРВП.

Какие результаты считаются ключевыми на выходе моделирования?

По итогам расчётов и/или экспериментов получают:

- карту поля УФ-интенсивности в рабочем объёме (для данного t и компоновки ламп);
- распределение времени пребывания (ФРВП) и/или распределение доз по струям;
- среднюю дозу и эффективную дозу обеззараживания (RED) для сопоставления с целевыми требованиями.

Этот набор параметров позволяет уверенно переходить к проектным решениям и к валидации оборудования на объекте.