

Бактерицидное и противовирусное обеззараживание воздуха УФ-излучением и метод УФ рециркуляции

Авторы: Филип Пейсахович, Светлана Банковская, Алексей Константинов, Павел Банковский, Андрей Гайваронский, Криста Канберга-Силиня, Артур Кигитович и Василий Банковский
Январь 2021; Biosan (Rātsupītes iela 7 k-2, Rīga, Latvia LV-1067)

Аннотация

Ультрафиолетовое облучение — хорошо изученный метод обеззараживания воздуха, воды и поверхностей, который успешно применяется против различных патогенов. Ультрафиолетовое излучение оказывает летальное действие на животные, растительные, бактериальные вирусы (фаги) и одноклеточные организмы (микробы и простейшие). Летальное действие проявляется в утрате способности вирусов и фагов к внутриклеточному размножению, а у микроорганизмов — в гибели клеток до первого деления или в первом или последующих поколениях. При поглощении УФ излучения молекулами нуклеиновых кислот в составе ДНК, происходит димеризация пиримидиновых оснований, в основном тимина. Инактивация РНК-содержащих вирусов протекает с участием не только одних пиримидиновых димеров. Существенный вклад в инактивацию вносят и гидраты оснований пиримидина. Спектры летального эффекта имеют выраженный нуклеиновый максимум при 260–265 нм.

Однако для отдельных организмов описаны как «белковые» с максимумом при 280 нм, так и спектры летального эффекта с максимумами при 260 и 280 нм, указывая, что в абсорбции УФ-света, участвуют и белки и нуклеиновые кислоты. Несмотря на способность микроорганизмов восстанавливаться после фотоповреждений путем фотореактивации, при высоких дозах микроорганизмы могут быть инактивированы вплоть до $\log 7$ (99,99999%) сокращения. Было показано, что возбудитель пандемии 2020 года, SARS-CoV-2, восприимчив к УФ и подвергается значительному урону при дозах менее 12 мДж/см². В статье обсуждается эффект УФ излучения, механизм его действия, свидетельства эффективности против различных микроорганизмов (включая агента COVID-19). Также, в статье описывается математическая модель эффективности устройств Biosan, в которых применяется УФ для обеззараживания воздуха.

Введение

На момент этого обзора (13 Января 2021 г.) было зарегистрировано свыше 90 миллионов подтвержденных случаев COVID-19 и почти 2 миллиона летальных исходов (WHO, 2020a). Было установлено, что возбудитель болезни, вирус SARS-CoV-2, передается множеством путей, но, в основном, от человека к человеку. В частности, вирус распространяется воздушно-капельным путем и в аэрозоли от кашля или чихания (Vardoulakis et al., 2020; WHO, 2020b). А также другие инфекционные заболевания, такие

как грипп (Influenza), туберкулез (*Mycobacterium tuberculosis*) и туляремия (*Francisella tularensis*), в значительной степени передаются через воздух. Более того, в случае с туляремией и туберкулезом, достаточно всего нескольких клеток, чтобы вызвать инфекцию, которая может привести к летальному исходу при отсутствии лечения (Fernstrom & Goldblatt, 2013).

Свойство ультрафиолетового света (УФ) обеззараживать воздух было отмечено еще в 1877 году.

УФ не только отчетливо продемонстрировал свою эффективность против многих переносимых по воздуху патогенов (туберкулез или грипп например), но и был использован в процессе доказательства того, что инфекционные агенты могут распространяться по воздуху (McDevitt et al., 2012; Sharp, 1938). Есть свидетельства восприимчивости SARS-CoV-2 к УФ-излучению, рассматриваемые ниже. BioSan предлагает несколько продуктов, использующих УФ в целях обеззараживания, например, УФ-боксы (Рисунок 1) для операций с ДНК и РНК (например, ПЦР) и УФ-рециркуляторы (Рисунок 2) для дезинфекции воздуха в помещении. В этом кратком обзоре



Figure 1: UV-cleaner box UVC/T-M-AR by Biosan.

рассматривается механизм бактерицидного действия УФ-излучения, восприимчивость микробов, в частности вирусов, включая SARS-CoV-2, и описывается принцип действия УФ-рециркуляторов.



Figure 2: UV cleaner-recirculators UVR-M (left) and UVR-Mi (right) by Biosan.

Бактерицидный эффект УФ-излучения

УФ-излучение представляет собой электромагнитную волну с длиной от 100 до 400 нм. УФ-диапазон делится на три области: 100–280 нм УФ-С, 280–320 нм УФ-В и 320–400 нм УФ-А. Говоря о свойстве УФ излучения нарушать размножение патогенов, излучение описывают как бактерицидное ультрафиолетовое излучение (БУФИ), при котором волны УФ-С наносят наибольший вред патогенам, нарушая структуры ДНК и РНК при максимальном пике эффективности около 260–265 нм (Kowalski, 2009). Наиболее часто используется УФ с длиной волны 253,7 нм, поскольку

изначально для дезинфекции использовались ртутные лампы низкого давления. Их пиковая интенсивность была 253,7 нм в большинстве исследований, которые, в свою очередь, сделали выводы в пользу эффективности ламп данного вида (Reed, 2010). Еще одним фактором, влияющим на поглощение УФ-излучения, является относительная влажность (RH). Как было показано, эффективность инактивации микроорганизмов обратно-пропорциональна RH: чем выше относительная влажность, тем менее эффективна УФ-инактивация. Следовательно, сухое помещение будет более эффективно продезинфицировано (Woo et al., 2012; Peccia, 2001).

УФ-облучение нарушает структуру ДНК или РНК за счет соединения двух нуклеотидных оснований - всего одной пикосекунды достаточно для образования димера, если основания соответственно ориентированы в пространстве. Изначальные водородные связи каждого из оснований до абсорбции УФ слабее, чем ковалентная связь, которая образуется при абсорбции и последующей реакции димеризации, что ограничивает возможности спонтанного восстановления и приводит к нарушению цикла размножения микроорганизмов (Рисунок 3).

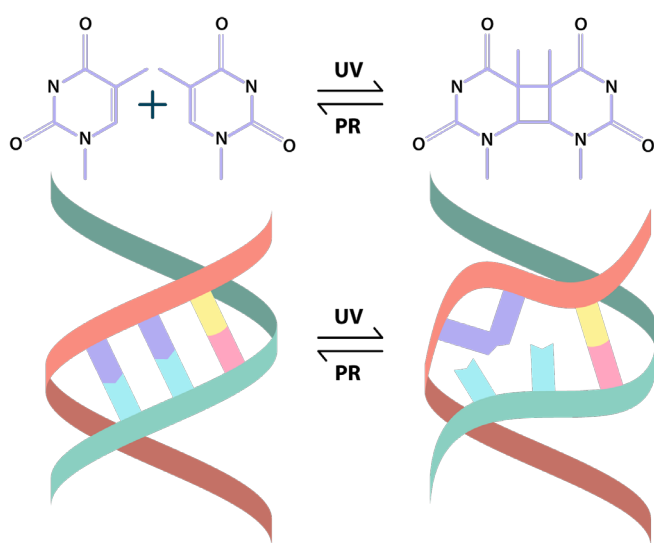


Рисунок 3: Димеризация тимина по воздействию УФ. Схема демонстрирует реакцию димеризации тимина (показан фиолетовым), которая стимулирована УФ излучением, и искажение цепи ДНК в результате реакции. Реакция может быть обратима с помощью фотореактивации (ФР).

В большинстве случаев димеризация происходит между двумя тиминами в ДНК или урацилами в РНК, но ивоникают и димеры цитозина. Пурины также способны поглощать УФ-излучение, но пиримидины обладают десятикратной поглощающей способностью, и на практике среди всех фотопродуктов димеры тимина обнаруживают наиболее часто. Кроме того, у некоторых патогенов, особенно у вирусов, ультрафиолетовое излучение может поглощаться белками и образовывать связи между белками и ДНК/РНК, что также может привести к летальному исходу (Kowalski, 2009).

Необходимо понимать взаимоотношения между джоулями (Дж) и ваттами (Вт), чтобы понимать разницу между дозой УФ-излучения [Дж/м²] и интенсивностью УФ-излучения [Вт/м²]. Мощность - это скорость, с которой энергия (Дж) передается за единицу времени (секунды), в Международной системе единиц мощность выражается в Вт, равных Дж в секунду. Следовательно, Вт = Дж/с и Дж = Вт×с. В контексте УФ-излучения, доза измеряется в Дж/м². Таким образом, доза УФ-излучения описывает общее количество энергии, переданной на площадь (например, на квадратный сантиметр). Между тем, единицы измерения интенсивности УФ-излучения это Вт/м², равные Дж с-1 м-2. Таким образом, интенсивность УФ-излучения описывает количество энергии, передаваемой на площадь в секунду. Можно рассчитать один параметр из другого и наоборот, если известно время воздействия. Например, если за 30 секунд полученная доза УФ-излучения составила 180 Дж/м², это означает, что интенсивность УФ-излучения составила 6 Вт/м² [(180 Дж/м²) / (30 с)].

Противоположный пример: в течение 2 секунд область подвергалась воздействию УФ-излучения с интенсивностью 10 мВт/см², значит полученная доза составила 20 мДж/см² [(10 мВт/см²) × (2 с)] (Рисунок 4).

$$\begin{aligned} \text{Вт} &= \text{Дж/с} \\ \text{Дж} &= \text{Вт} \times \text{с} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{УФ доза [Дж/см}^2\text{]} &= \\ &= \text{УФ интенс. [Вт/см}^2\text{]} \times \text{Время [с]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{УФ интенс. [Вт/см}^2\text{]} &= \\ &= \text{УФ доза [Дж/см}^2\text{]} / \text{Время [с]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 10 \text{ мДж/см}^2 &= 0,01 \text{ Дж/см}^2 = 100 \text{ Дж/м}^2 \\ 10 \text{ мВт/см}^2 &= 0,01 \text{ Вт/см}^2 = 100 \text{ Вт/м}^2 \end{aligned}$$

Рисунок 4: Взаимоотношения между единицами измерения УФ дозы и УФ интенсивности.

Чувствительность микробов к БУФИ

Восприимчивость и устойчивость микроорганизмов к УФ различаются, но в большинстве случаев это вопрос дозировки. Бактерии могут фотореактивироваться и восстанавливаться с помощью определенных ферментов (например, фотолиазы) и механизмов восстановления. Однако, способность восстанавливать повреждения нивелируется при высоких дозах УФ-излучения. В обзоре Nijnen et al. (2006) утверждается, что УФ инактивирует не менее 99% исходного количества полиовируса, ротавируса, *Escherichia coli*, *Cryptosporidium parvum*, *Giardia muris* в рассмотренных исследованиях, а также виды *Yersinia* и *Salmonella* инактивируются до $\log 5$ (99.999%) при дозе УФ ниже 10 мДж/см². Аналогично, обзор Chevrefils et al. (2006) обобщает результаты более 60 экспериментов определяющих дозы излучения, необходимые для достижения определенного логарифмического сокращения до $\log 7$ (99.99999%) для различных бактерий, вирусов, простейших и спор простейших, включая *Legionella pneumophila*, *Staphylococcus aureus*, калицивирусы, аденовирусы, споры *Bacillus subtilis* и другие.

Было показано, что вирусы восприимчивы к БУФИ. Как отмечает Ковальский (2009), 10 Дж/м² (1 мДж/см²) должно быть достаточно для существенной инактивации большинства вирусов диаметром 0,1 μm . Более того, поскольку нуклеокапсидные белки вирусов также поглощают УФ-лучи, ДНК/РНК и капсидные белки могут соединяться, что приводит как к нарушению генетического материала, так и к нарушению структуры капсида (Kowalski, 2009). Walker & Ko (2007), изучая УФ-дезинфекцию вирусных аэрозолей фага MS2, аденовируса серотипа 2 и коронавируса гепатита мыши, обнаружили, что относительно низкие дозы инактивируют упомянутые вирусы. В 2007 году авторы сделали пророческий вывод: «Высокая чувствительность аэрозолей коронави

руса к УФ-излучению позволяет предположить, что ультрафиолетовая дезинфекция воздуха может быть эффективным средством предотвращения серьезных респираторных вирусных заболеваний, таких как SARS» (перевод с английского языка). В Таблице 1 представлены некоторые примеры доз для воздушных патогенов.

COVID-19

Говоря о коронавирусах, одноцепочечные РНК-вирусы, к примеру SARS-CoV-2 (Romano, 2020), чаще бывают менее устойчивыми к УФ-излучению, чем двухцепочечные, из-за более низкой стабильности генетического материала (Kowalski, 2009). Heßling et al. (2020) суммировав 30 статей об УФ-инактивации различных коронавирусов, рассчитали среднюю дозу \log сокращения равную $11,9 \pm 11,4$ мДж/см² УФ-излучения для всех коронавирусов. Тем не менее, авторы предположили, что скорректированная доза составляет $5,8 \pm 5,5$ мДж / см², что эффективно и против SARS-CoV-2 из-за структурного сходства всех коронавирусов. На практике эксперимент Bianco et al. (2020) показал, что доза 3,7 мДж/см² является минимальным порогом для уничтожения данного вируса. Аналогично, Heilingloh et al. (2020) добились полной инактивации вируса после 9 минут воздействия УФ-излучения с интенсивностью 1,94 мВт/см² УФ-С и 0,54 мВт/см² УФ-А. Inagaki et al. (2020) добились инактивации 87.5% ($\log 0.94$) изначального количества вируса после облучения дозой в 3,75 мДж/см² и инактивировали 99.9% ($\log 3$) дозой в 37,5 мДж/см². Таким образом, была показана эффективность БУФИ против возбудителя COVID-19, SARS-CoV-2.

Таблица 1: Инактивирующие УФ дозы. Дозы были усреднены из двух обзоров, и диапазоны соответствуют стандартному отклонению.

* — доза определена по одному исследованию. [Источник: ClorDiSys (2019); Chevrefils (2006). Для SARS-CoV-2: Bianco (2020) и Inagaki (2020)]

Номер	Класс патогена	Вид	Средняя доза, мДж/см ²	Инактивация, %
1	Бактерии	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	10.0–12.2	99
2		<i>Escherichia coli</i> ATCC 11229	8.2–11.0	99.999
3		<i>Legionella pneumophila</i>	6.6–9.0	99.99
4		<i>Bacillus subtilis</i> ATCC6633 spores	48.4–60.6	99.9
5		<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	10.5*	99
6		<i>Staphylococcus aureus</i>	5.6–6.6	99
7	Грибы	<i>Aspergillus niger</i>	132*	90
8	Вирусы	Adenovirus serotype 2 (Самый устойчивый известный вирус)	97.1–149.5	99.99
9		Calicivirus feline	15.9–25.5	99.9
10		Influenza	6.6–6.8	99
11		SARS-CoV-2	3.70–3.75	87.5

УФ рециркуляторы воздуха

Biosan производит устройства для обеззараживания воздуха с помощью УВГИ. Рециркуляторы воздуха UVR-M и UVR-Mi имеют простую конструкцию и принцип действия. Два вентилятора нагнетают поток воздуха через камеру, в которой установлена УФ-лампа (TUV 25 W 1SL / 25 от Philips), излучающая УФ с длиной волны 253,7 нм. Для повышения эффективности облучения внутренние стенки камеры покрыты отражающей пленкой. UVR-Mi отличается от UVR-M наличием блока управления и двух ламп, соответственно большей эффективностью. Воздух проходит через камеру, где БУФИ повреждает микроорганизмы в аэрозоли по принципу, описанному в предыдущих разделах (Рисунок 5).

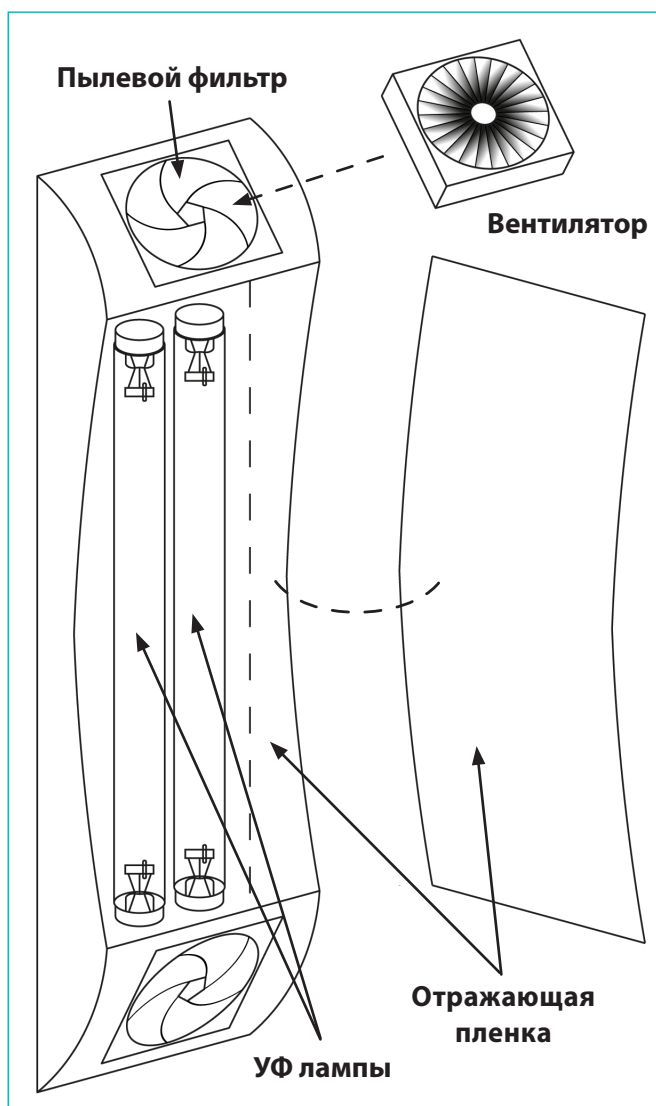
В целом, эффективность UVR-Mi в непроветриваемом помещении можно описать несколькими значениями. Согласно измерениям: (1) производитель-

ность воздушного потока составила 14 м³ воздуха, нагнетаемого в час; (2) интенсивность УФ-излучения внутри камеры от 18.6 (MIN интенсивность) до 36 мВт/см² (MAX интенсивность) в зависимости от расстояния до лампы, но не учитывая отражающую поверхность; (3) внутренний объем камеры 2233,721 см³ за вычетом занимающих объем факторов, таких как лампы и неровности формы корпуса.

Используя эти значения, была создана математическая модель для двух случаев, MIN и MAX интенсивности. Мы предположили отсутствие дифракции, интерференции и отражения света (например, из-за RH). Таким образом, за один цикл доза УФ будет составлять от 10,7 до 22.4 мДж/см² (Рисунок 7). Следовательно, всего одного цикла достаточно, чтобы инактивировать множество патогенов и нанести критический урон SARS-CoV-2. Кроме того, 23 минуты работы одного UVR-Mi заметно сокращают количество колониеобразующих единиц (Рисунок 6).

Наличие кондиционера в помещении влияет на эффективность рециркуляции. Один UVR-Mi способен эффективно обрабатывать вентилируемое помещение площадью 9 м² или не вентилируемое площадью 18 м², а эффективная площадь обработки помещения UVR-M составит 6 и 12 м² соответственно (Таблица 2). Площадь может показаться небольшой, однако, важно учитывать, что доза, полученная за один цикл, обратно-пропорциональна скорости потока. Увеличение мощности вентилятора в целях более быстрой обработки воздуха сократит время воздействия на пролетающие частицы и, следовательно, уменьшит дозу УФ, получаемую за один проход (Рисунок 8). Возможность преодолеть это ограничение — увеличить как мощность вентилятора, так и интенсивность УФ-ламп, что делает устройство более шумным и более энергозатратным. Тем не менее, наличие нескольких рециркуляторов увеличивает эффективный объем без снижения дозы и создания неприятного шума.

Рисунок 5: Схема конструкции УФ рециркулятора UVR-Mi от Biosan. Воздух прогоняется вентиляторами через камеру, где поток облучается УФ. Затем, обеззараженный воздух покидает камеру.



$$\begin{aligned} \text{УФ доза} &= \text{УФ интенс.} \times \text{Время воздействия} = \text{УФ интенс.} \times \frac{\text{Объём камеры}}{\text{Скорость потока воздуха}} = \\ &= 36 \text{ мВт/см}^2 \times \frac{2.25 \times 10^{-3} \text{ м}^3}{3.61 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}} \approx \mathbf{22.4 \text{ мДж/см}^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{УФ доза} &= \text{УФ интенс.} \times \text{Время воздействия} = \text{УФ интенс.} \times \frac{\text{Объём камеры}}{\text{Скорость потока воздуха}} = \\ &= 18.6 \text{ мВт/см}^2 \times \frac{2.25 \times 10^{-3} \text{ м}^3}{3.61 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}} \approx \mathbf{10.7 \text{ мДж/см}^2} \end{aligned}$$

Рисунок 6: Уровень заражения воздуха до и после короткосрочной рециркуляции с помощью UVR-Mi.

Таблица 2: Эффективный объем обеззараживания помещений УФ рециркуляторами UVR-M и UVR-Mi. Количество устройств увеличивает эффективный объем обеззараживания. Размеры помещений указаны как площадь (м²) и объем (м³). Аббревиации: Вент. — вентилированное; Кол. — количество; Невент. — невентилированное.

Модель	UVR-M			UVR-Mi		
	1	2	3	1	2	3
Кол. устройств						
Вент. помещение	6 м² (18 м³)	12 м² (36 м³)	18 м² (54 м³)	9 м² (27 м³)	18 м² (54 м³)	27 м² (81 м³)
Невент. помещение	12 м² (36 м³)	24 м² (72 м³)	36 м² (108 м³)	18 м² (54 м³)	36 м² (108 м³)	54 м² (162 м³)



Рисунок 7: УФ доза произведенная UVR-Mi от Biosan: уравнение и расчеты.

Зависимость УФ дозы от скорости потока воздуха через камеру рециркулятора UVR-Mi

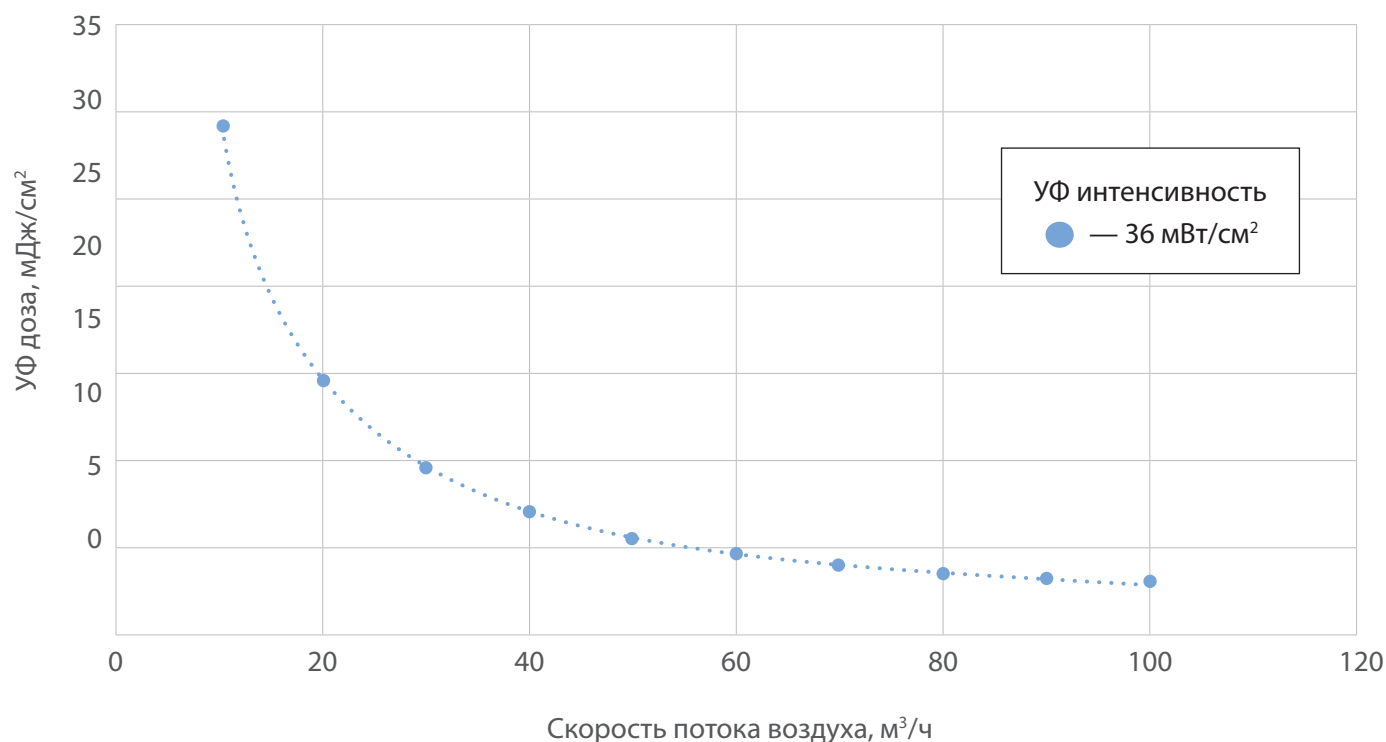


Рисунок 8: Соотношение потока воздуха в UVR-Mi производства Biosan и УФ дозой за один цикл.

Выводы

УФ облучение — хорошо изученный метод дезинфекции воздуха, который был эффективно использован против таких переносимых по воздуху патогенов, как Influeza и *Mycobacterium tuberculosis*. Данные показывают, что возбудитель COVID-19 также чувствителен к УФ-излучению. Таким образом, дезинфекция воздуха является не только хорошей профилактической техникой, но и важным стратегическим шагом в борьбе с пандемией 2020 года. Следует отметить, что УФ восприимчивость SARS-CoV-2 еще недостаточно изучена. Тем не менее, весьма вероятно, что доза инактивации останется такой же низкой, как показано на данный момент, ввиду сходства между всеми коронавирусами.

Biosan производит устройства использующие УФ для дезинфекции с 2004 года. Данные устройства проверены временем, отлажены и подходят для обеззараживания воздуха в лабораторных помещениях, больницах (например, операционных, родильных залах, амбулаторных отделениях), школах и других общественных местах. Согласно описанной математической модели, УФ рециркуляторы подвергают воздух дозе УФ-излучения, достаточной для нанесения серьезного ущерба патогенам, распространяющимся воздушно-капельным путем, включая SARS-CoV-2. Бокс Biosan UVT-S-AR подходит для работы с чувствительными методами, такими как ПЦР. Пожалуйста, ознакомьтесь с тематическим исследованием Bankovsky et al (2018) наших УФ-боксов, чтобы лучше понять метод этих устройств.

Ссылки

- Bianco, A., Biasin, M., Pareschi, G., Cavalleri, A., Cavatorta, C., Fenizia, F., Galli, P., Lessio, L., Lualdi, M., Redaelli, E. et al.** (2020) UV-C irradiation is highly effective in inactivating and inhibiting SARS-CoV-2 replication. *SSRN*.
- Chatwal, G., & Madhu, A.** (2007) *Organic photochemistry*. Mumbai [India]: Himalaya Pub. House.
- Chevrefils, G., Caron, É., Wright, H., Sakamoto, G., Payment, P., Barbeau, B., & Cairns, B.** (2006). UV dose required to achieve incremental log inactivation of bacteria, protozoa and viruses. *IUVA News*, 8(1): pp. 38–45.
- ClorDiSys** (2019) Ultraviolet Light Disinfection Data Sheet. (online) Available at: <www.clordisys.com/pdfs/misc/UV%20Data%20Sheet.pdf> [Accessed on 29 September 2020].
- Fernstrom, A., & Goldblatt, M.** (2013). Aerobiology and its role in the transmission of infectious diseases. *Journal of pathogens*, 2013.
- Heßling, M., Hönes, K., Vatter, P., & Lingenfelder, C.** (2020). Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation—review and analysis of coronavirus photoinactivation studies. *GMS hygiene and infection control*, 15.
- Heilingloh, C.S., Aufderhorst, U.W., Schipper, L., Dittmer, U., Witzke, O., Yang, D., Zheng, X., Sutter, K., Trilling, M., Alt, M. et al.** (2020). Susceptibility of SARS-CoV-2 to UV Irradiation. *American Journal of Infection Control*.
- Hijnen, W. A. M., Beerendonk, E. F., & Medema, G. J.** (2006). Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo) cysts in water: a review. *Water Research*, 40(1): pp. 3–22.
- Inagaki, H., Saito, A., Sugiyama, H., Okabayashi, T. & Fujimoto, S.** (2020) Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with Deep-UV LED irradiation. *bioRxiv*.
- Kowalski, W.** (2009). Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection. *Springer Science & Business Media*.

- Lindsley, W.G., Blachere, F.M., Thewlis, R.E., Vishnu, A., Davis, K.A., Cao, G., Palmer, J.E., Clark, K.E., Fisher, M.A., Khakoo, R. and Beezhold, D.H.** (2010) Measurements of airborne influenza virus in aerosol particles from human coughs. *PloS one*, 5(11): e15100.
- McDevitt, J.J., Rudnick, S.N. and Radonovich, L.J.** (2012) Aerosol susceptibility of influenza virus to UV-C light. *Applied and environmental microbiology*, 78(6): pp. 1666–1669.
- Peccia, J., Werth, H. M., Miller, S., & Hernandez, M.** (2001). Effects of relative humidity on the ultraviolet induced inactivation of airborne bacteria. *Aerosol Science & Technology*, 35(3): pp. 728–740.
- Reed, N.G.** (2010). The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Public Health Reports*, 125(1): pp. 15–27
- Romano, M., Ruggiero, A., Squeglia, F., Maga, G. & Berisio, R.** (2020) A Structural View of SARS-CoV-2 RNA Replication Machinery: RNA Synthesis, Proofreading and Final Capping. *Cells*, 9(5): pp. 1267.
- Sharp, D.G.** (1938) A quantitative method of determining the lethal effect of ultraviolet light on bacteria suspended in air. *J Bacteriol*, 35: pp. 589–599.
- Tarvida, M., Isakova, J., Gimelfarb, V., Kigitovics, A. & Bankovsky, V.** (2018) Case study: UV-Cabinet with UV Air Recirculator UVC/T-M-AR and Class II Biological Safety Cabinets, *Biosan*.
- Vardoulakis, S., Sheel, M., Lal, A. & Gray, D.** (2020) COVID-19 environmental transmission and preventive public health measures. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*.
- Walker, C. M., & Ko, G.** (2007). Effect of ultraviolet germicidal irradiation on viral aerosols. *Environmental science & technology*, 41(15): pp. 5460–5465.
- Wang, J., Mauser, A., Chao S.-F., Remington, K., Treckmann, R., Kaiser, K., Pifat, D. & Hotta, J.** (2004) Virus inactivation and protein recovery in a novel ultraviolet-C reactor. *Vox Sanguinis*, 86: pp. 230–238.
- World Health Organisation** (2020^a) WHO Coronavirus Disease (COVID-19) Dashboard. (online) Available at: <covid19.who.int> [Accessed on 13 January 2021].
- World Health Organisation** (2020^b) Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions. (online) Available at: <www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions> [Accessed on 14 September 2020].
- Woo, M. H., Grippin, A., Anwar, D., Smith, T., Wu, C. Y., & Wander, J. D.** (2012). Effects of relative humidity and spraying medium on UV decontamination of filters loaded with viral aerosols. *Applied and environmental microbiology*, 78(16): pp. 5781–5787.