



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

**ФАКУЛТЕТ ПО ИНДУСТРИАЛНИ
ТЕХНОЛОГИИ**

**КАТЕДРА „ТЕОРИЯ НА МЕХАНИЗМИТЕ И
МАШИНИТЕ“**

маг. инж. Деница Ивелинова Иванова-Мутафчиева

**Изследване на възможностите за разработване на
персонални защитни очила с интегрирана функция за
ултравиолетово (UV-C) стерилизиране на вдишания въздух**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

**за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"**

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.1 "Машинно инженерство"

**Докторска програма: „Автоматизирани системи за обработка на
информация и управление“**

Научни ръководители: проф. д.т.н. инж. мат. Николай Николов

доц. д-р инж. Явор Софронов

София, 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра Катедра: „Теория на механизмите и машините“ към „ФАКУЛТЕТ ПО ИНДУСТРИАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ“ на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 11.02.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 08.04.2025. от 15.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед ОЖ-5.1-27/18.02.2025 на Ректора на ТУ-София в състав:

проф. дн инж. Иво Кръстев Малаков – председател;
проф. дн инж. Георги Тодоров, чл.-кор– научен секретар;
проф. дтн. инж. Венцеслав Тошков – член;
проф. д-р инж. Юлиана Яворова – член;
проф. д-р инж. Ангел Великов – член.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на ФИТ на ТУ-София, блок №3, кабинет № 3230.

Дисертантът е редовен докторант към Катедра: „Теория на механизмите и машините“ към „ФАКУЛТЕТ ПО ИНДУСТРИАЛНИ ТЕХНОЛОГИИ“ на ТУ-София. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Деница Ивелинова Иванова-Мутафчиева
„Изследване на възможностите за разработване на персонални защитни очила с интегрирана функция за ултравиолетово (UV-C) стерилизиране на вдишания въздух“

Тираж: 30 броя

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1.1.1 Актуалност на проблема

Дисертационният труд е насочен в областта на изследване на възможността да бъде осигурена активна защита чрез допълнителни функции за UV-C стерилизиране на въздуха, който се вдишва и издишва в условията на инфектирани среди. По този начин иновативната лична защитна екипировка с интегрирана маска с функции за ефективно ултравиолетово (UV-C) стерилизиране на вдишвания въздух са насочени за превенция от COVID-19 и други вирусни и бактериални инфекции. Предложен е иновативен подход, който е ефективен при разработването на сложни мултифизични системи, чрез прилагането на когото да се ускори процеса по разработката като същевременно с това се увеличава и нивото на достоверност на разработваните виртуални и физически прототипи и валидирането им.

1.1.2 Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Въз основа на направеният анализ на състоянието на разглежданият проблем е формулирана следната цел на дисертационната работа:

Целта на дисертационния труд е да се концепира и чрез функционално формоизграждане основано на унифицирана лицева топология да се създаде иновативни очила-защитна маска с UV-C стерилизация на вдишваният и издишваният от потребителя въздух. Като чрез виртуално прототипиране се постигне оптимизация на ефективността.

От така определената цел произлизат следните основни задачи:

- Задача № 1: Да се дефинират основните елементи на концептуалния модел на предпазна маска с UV-C стерилизация
- Задача № 2: Дефиниране и верификация на подход на концепиране и формоизграждане, основан на унифицирана лицева топология и последващо виртуално прототипиране физическо материализиране
- Задача № 3: Да се разработи и верифицира подход за концепиране и формоизграждане на защитна маска, основан на унифицирана лицева топология чрез виртуално прототипиране и физическо валидиране;
- Задача № 4: Да се изследват възможностите за системна интеграция на UV-C светлинен източник чрез различни компоновъчни решения
- Задача № 5: Да се осъществи моделиране и оптимизиране на ефективността на процеса на стерилизация.
- Задача № 6: Да се извърши детайлно моделиране и изследване на защитна маска с "активни" функции за UV-C стерилизация на вдишвания и издишвания въздух.
- Задача № 7: Да се изследва тегловия баланс, ергономията, удобството за почистване и информиране на потребителя с визуален, звуков или вибротактилен начин за намален/изчерпан заряд на електрозахранването.

1.1.3 Научна новост

Надградена е методологията за развитие на нов продукт с фокус на ергономията: Дефиниране/Идейна фаза –Виртуален Прототип/Презентация на Виртуален Прототип – Материализация и Физически тест и е доказано, че се подобрява отчитането на ергономичните фактори и изисквания, като типизирана лицева топология и физическа ергономия за усъвършенстване на процесите на разработка и за по добри условия на работа за потребителя и боравенето му с маската. Изследвани са вариантни концепции на системата за стерилизация чрез валидации на всяка генерична концепция и след стъпково модифициране на части от компонентите е достигнато до оптимизирано унифицирано решение, Чрез мултифизична симулация е постигнат оптимален път на въздушните потоци през корпуса на маската постигащ ниво на максимална експозиция на UV-C LED светлината . Разработен е антропометричен модел на топологията на мъжката и женската форма на главата и е установено, че е възможно да се унифицира с определена девиация форма на женски скалп с модел на мъжка форма или обратно. Доказано е, че моделът на антропометричната форма позволява намиране на “компромисна еластична” контактна форма на маската между различните популации – много важна основа за създаване на “унисекс” и “унисайз” еластична система на маската.

1.1.4 Практическа приложимост

Предложена е оптимална селекция на материал за основата на маската с възможности за дезинфекция и стерилизация, с добра еластичност и устойчивост, както и за прилагането на покритие или добавки с антибактериален ефект за подобряване на биосъвместимостта. Обоснована е хипотеза за използване на безфилтърни системи с максимално ниско съпротивление на проходимост на обема въздух при вдишване и издишване, което дава висока приложимост на изследването. В резултат на симулациите е доказан оптимален път на въздушните потоци през корпуса на маската за постигане на максимална експозиция на UV-C LED светлината за третиране на преминаващия поток от минимум $47,88 \text{ J/m}^2$ за целия обем, което е по-високо от посочените в литературата изисквания за UVGI за постигане на LD90 (между 20 и 37 J/m^2) за SARS-CoV-2 и други корона и грипни вируси. Чрез финален дизайн на маската, изработена със серийна технология е проведена анкета с потребители и са доказани планираните ергономични показатели (удобство на поставяне, носене, обзор и силово натоварване).

1.1.5 Аprobация

Изследванията по дисертацията са извършени в лабораториите “CAD/CAM/CAE в индустрията” към ФИТ на ТУ-София и “3D Креативност и бързо прототипиране” към СНИРД, като част от изследванията са осъществени при работата по проект на Фонд Научни изследване към МОН, Договор № КП-06-Н47/9, „Изследване на възможностите за разработване на „АКТИВни“ Персонални защитни Очила с интегрирана маска с функции за ефективно ултравиолетово (UV-C) стерилизиране на вдишвания въздух – АКТИВ ПРО UV”.“ . Резултатите от изследванията са внедрени и се ползват при развитието на нови продукти “Арексим ЕАД”.

1.1.6 Публикации

Съществените резултати получени при разработване на дисертацията са докладвани на следните конференции и семинари:

1. Ivanova, D., Sofronov, Y., “UV based innovative solution for individual protection against bacterial and viral infections”, DOI: 10.1109/InfoTech58664, 2023, 2023 International Conference on Information Technologies (InfoTech), 20-21 Май 2023, Варна, България
2. Ivanova, D., “Analysis of the ergonomic and functional indicators of protective UV-C masks for work in contaminated environments” DOI:10.47978/TUS.2024.74.04.002, 2025 Proceedings of Technical University of Sofia, ISSN 1311-0829
3. Ivanova, D., Zagorski, M., Sofronov, Y., Dimova, K., “Investigation of different FDM/FFF 3D printing methods for improving the surface quality of 3D printed parts”, AIP Conference Proceeding, vol. 2449, № 1, 060001, DOI: 10.1063/5.0090805, 2022. – докладът е представен на 10th International Scientific Conference “TechSys 2021 – Engineering, Technologies and Systems”, 27 – 29 май 2021, Пловдив, България
4. Ivanova-Mutafchieva, D., Sofronov, Y., Zlatev, B., Kamberov, K., Semkov, M., Todorov, T., “Determination of UV Intensity and radiation dose from an LED for Active Air Purification for Personal Protective Equipment”

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **146** страници, като включва увод, **7** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията, използвана литература и приложение - анкета. Цитирани са общо **112** литературни източници, като **105** са на латиница и **1** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **83** фигури и **9** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

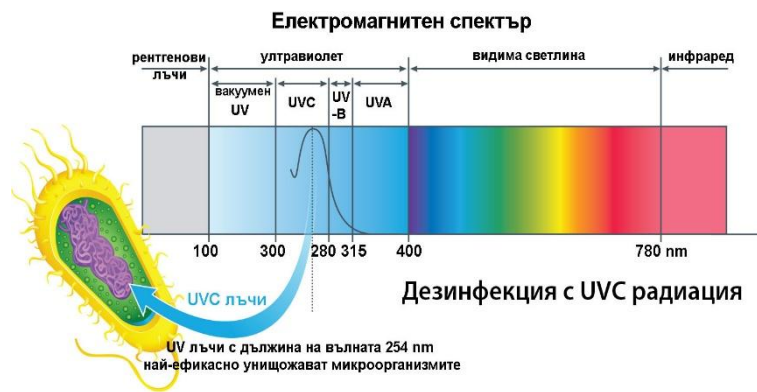
1. ГЛАВА. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Разгледана е нуждата от нови методи и решения за предпазване от вируси и бактерии при работа в инфектирани среди, подобряване на ергономията, както и прилагането на нови материали и технологии за създаване и валидиране на иновативен продукт.

1.1 Характеристики на UV светлината

UV светлината се излъчва в спектралният диапазон, обхващащ дължина на вълната между 100 и 400 nm. UV спектърът се разделя на три групи според дължината на вълната UV-A (дълги UV вълни) от 315 до 400 nm; UV-B (средна дължина на UV вълните) от 280 до 315 nm; UV-C (къси UV вълни) от 100 до 280 nm [22]. На Фигура 1.1 е показан спектъра на светлината.

1.2 Стратегии за дезинфекция с UV светлина



Фигура 1.1: Спектър на светлината [23]

Технологията за непрекъсната дезинфекция на въздуха и повърхностите е предназначена да неутрализира патогените при присъствието на хора в помещението, като същевременно отговаря на указанията за безопасност. UV-C светодиодите (UVC LED) са иновативна технология за генериране на радиация, която да осъществява стерилизация, като предлага висока ефективност и екологичност.

Съществуват и изследвания за употребата на ултракъса UV-C светлина (207-222 nm), която от своя страна предлага безопасна алтернатива за дезинфекция, тъй като при директно излагане не уврежда човешките тъкани.

1.3 Необходимост от използването на лични предпазни средства

Изключително актуална тема в научните среди е изследване на възможността да бъде осигурена активна защита чрез допълнителни функции за UV-C стерилизиране на въздуха, който се вдишва и издишва в условията на инфектирани среди. Поради тази причина се разработват иновативни лични предпазни средства тип маска или маска с очила с ефективност на защита над 99% от COVID-19 и други вирусни и бактериални инфекции.

1.4 Виртуално и физическо прототипиране

Строго погледнато методът "интегрирано развитие на продукти - ИРП" се отнася не толкова към спазване на определена методика, а по-скоро към системна компилация от методи и техники от различни дисциплини.

Етапите на процеса на проектиране при инженерния процес са:

- Дефиниране на проблема
- Осъществяване на приложни изследвания (R&D)
- Специфициране на инженерни изисквания
- Евристично търсене (мозъчна атака) на решения, оценка и нови итерации
- Избор на най-доброто решение
- Развитие на продукта (концепиране, проектиране, конструиране)
- Изграждане на прототип
- Тестове и редизайн

1.5 Изводи от ГЛАВА 1

- Проучени са характеристиките на UV светлина и е установено, че при дължина на вълната от 265 nm РНК / ДНК структурата на микроорганизмите е най-чувствителна и при нея се осигурява максимален гермициден ефект.
- Проучени са стратегиите за дезинфекция с UV светлина и е установено, че технологията се прилага за насочена дезинфекция на повърхности или във фиксирани въздуховоди на обществени заведения.
- Установено е, че предпазните маски ефективно спомагат за предотвратяване разпространението на вируси и бактерии, но с подобряване на филтриращите им способности се затрудняването дишането на потребителя, което води до недостатъчно кислород за организма, замаяност и дезориентация.
- Проучени са съвременните изисквания, на които трябва да отговарят личните предпазни средства тип маски и потенциала на UVC LED технологията. Установено е, че е възможно създаването на нови еволюции на защитни маски за активно пречистване на въздуха, приложими в условията на инфектирани среди от биологични оръжия и инфекции с животозастрашаваща опасност.
- Идентифициран е потенциала за разработване на персонални защитни маски с или без интегрирани очила, като изключително актуална и представляваща световна иновация тема, при защитните средства за глава с UV-C активно неутрализиране и дезинфекция на вдишания/издишвания въздух с висока степен на защита.
- Същевременно в литературата не са открити метод и средства позволяващи проектиране и валидиране на интегрирана маска с UV-C активно неутрализиране и дезинфекция на вдишания/издишвания въздух и се очертават следните недостатъчно проучени елементи за постигане на такива решения:
- Как да се дефинират основните елементи и концепция на предпазна маска с UV-C стерилизация;
- Липсва подход за концепиране и формоизграждане на защитни маски, основан на унифицирана лицева топология;
- Липсват данни от моделиране на ултравиолетовите източници при висока ефективност на стерилизация.
- Липсват данни за теглови баланс, ергономия и други функционални показатели за удобство и експлоатация активни маски с UV-C стерилизация.

2. ГЛАВА. . ГЛАВА. ДЕФИНИРАНЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ НА ПОДХОД НА КОНЦЕПИРАНЕ И ФОРМОИЗГРАЖДАНЕ НА ЗАЩИТНИ ОЧИЛА – МАСКА, ОСНОВАН НА УНИФИЦИРАНА ЛИЦЕВА ТОПОЛОГИЯ ЧРЕЗ ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ И ФИЗИЧЕСКО ВАЛИДИРАНЕ УНИФИЦИРАНА ЛИЦЕВА ТОПОЛОГИЯ ЧРЕЗ ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ И ФИЗИЧЕСКО ВАЛИДИРАНЕ

Първата важна част при оценката и анализа е изследване на съществуващите решения за комфорт и удобство е определянето на притискащото налягане което е необходимо за правилно прилепване към топологията на лицето. Това е важен параметър и в същото време е много труден за определяне по виртуален начин.

2.1 Изследване на контактното налягане при текущите решения на маски за лице.

Различната форма и размери при всеки индивид е уникална и стандартизирането на тези параметър е трудна задача. В литературата са описани доста широки граници за стойностите, където границите варират от 1.8 до 8 N сила на всяка страна. Измерването е направено чрез силомер INSIZE ISF-DF500A, като изследването е направено върху пет човека с различни размери и форма на главата, за да може да се изследва също така и индивидуалното възприятие за комфорт и удобство. Проведените измервания са представени на Фигура 2.2. Измерванията са направени отделно за всеки отделен човек, като са взети по пет стойности за всяко измерване и е представена средна стойност.

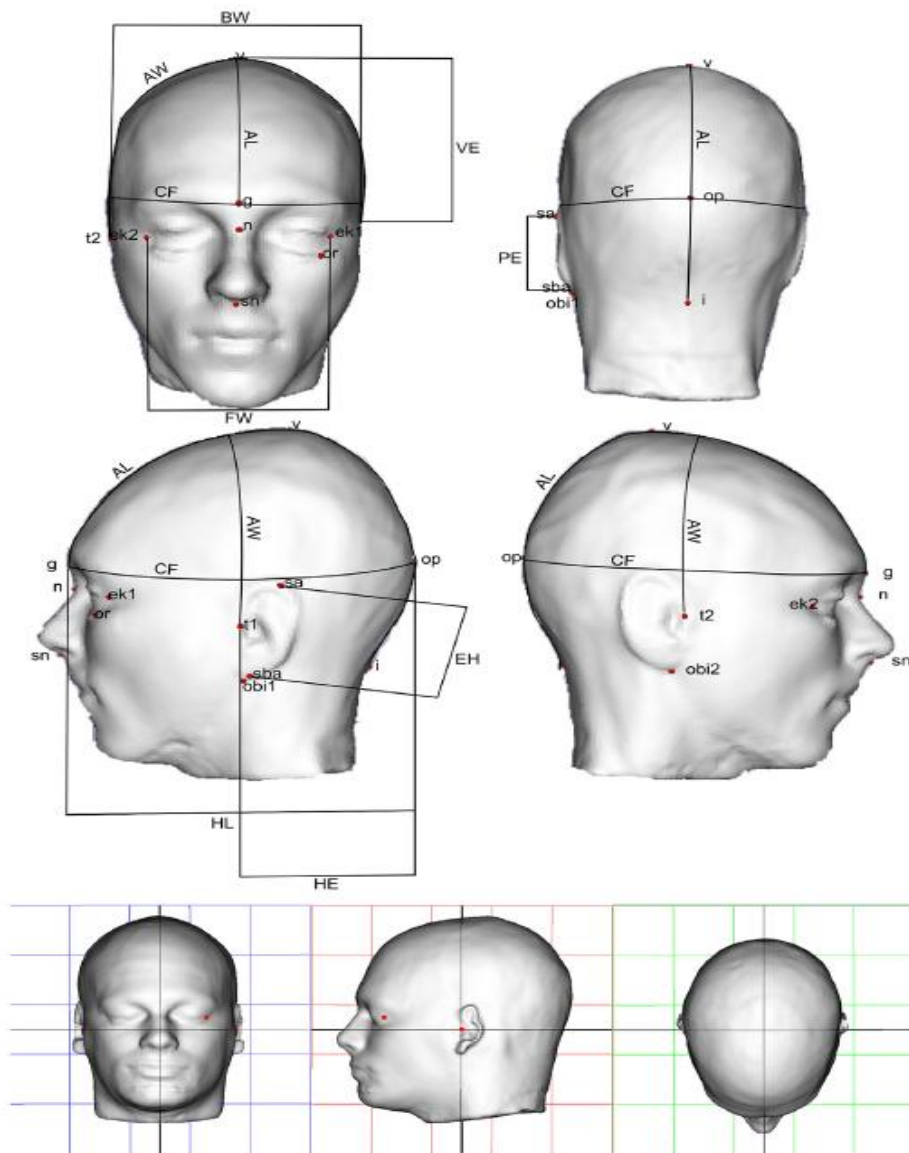
Резултатите от проведените експериментални изследвания са представени в Таблица 2.1. Средната стойност от измерванията е приблизително 3.15N, която ще бъде използвана за по-нататъшната валидация на предложеният виртуален прототип на маската. Кумулативно разпределение на средната геометрична грешка за антропометричен модел, изграден с помощта на индивидуални измервания (горе вляво), комбинации от измервания (горе вдясно) и комбинации, използващи специфични антропометрични инструменти (отдолу), включително пълен антропометричен модел за сравнение.



Фигура 2 1: Определяне на силата за притискане на маската към лицето

2.2 Изследване на антропометрична форма

Разгледан е метод за създаване на модел на антропометрична форма от 100 MRI сканирания, който може да се използва за точно прогнозиране и анализиране на формата на човешки скалп. Установено е, че височината на ухото няма връзка с цялостната форма на главата.



Фигура 2 2: Точки за анотация и координатна система. Антропометрични измервания и точки на анотация (отгоре) и пример за координатна система, използвана за антропометрични измервания, показваща съответно напречната (долу вляво), средната сагитална (долната средна) и Франкфуртската равнина (долу вдясно), обвърната към предната част.

Настоящите резултати демонстрират използваемостта на модел на форма, параметризиран чрез антропометрични измервания за ергономични изследвания и дизайн. За да се определи оптималната комбинация от антропометрични измервания за проектиране или анализ на продукта, трябва да се вземат предвид точността на прогнозиране, кумулативното разпределение и чувствителността. Значението на всеки от тези фактори зависи от предвиденото приложение.

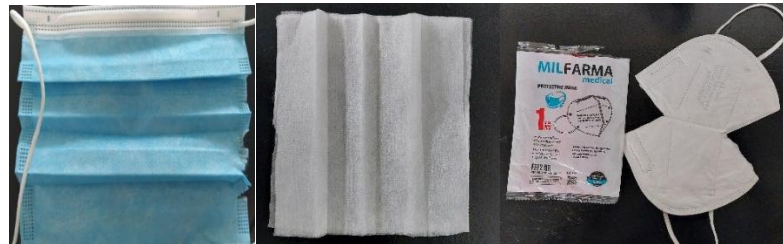
Това показва, че моделът на антропометричната форма може да се използва за точно намиране на вариации на формата между различните популации.

Чрез включване на антропометричния модел в CAD софтуера, дигиталните проекти могат да бъдат директно управлявани и проверени преди прототипиране. Очаква се прилагането на предложената методология да спести време и значително да подобри процеса на проектиране.

2.3 Въздухопропускливост на широкодостъпни защитни маски за лице

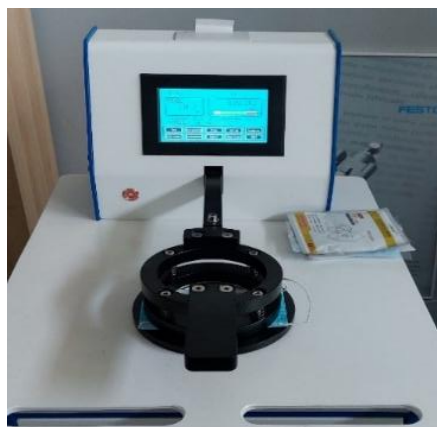
Появата на пандемията от SARSCoV2 и препоръките от СЗО предизвика властите да наложат задължителното носене на защитни маски, за да прекъснат разпространението на вирусното

заболяване. Постигането на заложените цели в работата не би било възможно без да получим фактологични данни по отношение на затрудняването при дишане, затова бе необходимо да се извърши максимално бързо доставка на уред за измерване на въздухопропускливост, част от комплекс за мониторинг на параметрите на лицеви маски, съгласно стандарт ISO 9237:1995. Някои от изследваните маски са показани на Фиг.2.5.

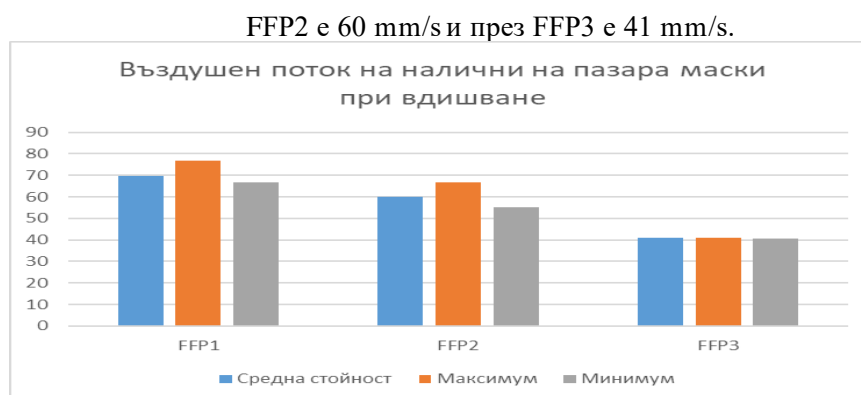


Фигура 2 3: Част от изследваните маски от класове FFP1, FFP2 и FFP3

Използвана бе измервателната глава с площ 20 cm² и относителна разлика в налягането от двете страни на пробите – 100 Pa. За всяка маска са извършени по три измервания на въздухопропускливост отвън-навътре, което представя скоростта на въздуха при вдишване и отвътре-навън за издишване. Снимка от изследването е представена на Фигура 2.6.



Фигура 2 4: Изследване на въздухопропускливост на FFP1, FFP2 и FFP3 маски



Фигура 2 5: Резултати от измерването на скоростите на пропусканите въздушните потоци през маските при вдишване

Резултатите от изследването, представени на фигурата по-долу показват, че средните стойности на скоростите на пропускания въздуха при вдишване през маските FFP1 е 70 mm/s., през

Извод – изследванията на различни маски по отношение на тяхната пропускливост при вдишване и издишване сочи, че е много по-добре да се ползват безфилтърни системи и то с максимално

ниско съпротивление на проходимост на обема въздух при вдишване и издишване. В този контекст тук изследванията ще бъдат фокусирани в решение за безфилтърна дезинфекция.

2.4 Изследване на излъчваната UV-C радиация от индустриален уред за дезинфекция

Друг аспект от заложените в изследването цели е измерване на мощността на UV-C радиация, част от комплекс за мониторинг на параметрите на лицеви маски. Методологията на измерване е базирана на измерване чрез придвижване на UV-C чувствителния сензор по протежението на линейна скала, стартираща от центъра на UV-C излъчвателя. Резултатите от измерването показваха, че максималната мощност, която постига уреда е 2.3 mW/cm^2 и естествено намалява експоненциално с отдалечаване от източника.



Фигура 2 6: Изменение на радиационната мощност на UV-C източник при отдалечаване

2.5 Изводи от ГЛАВА 2

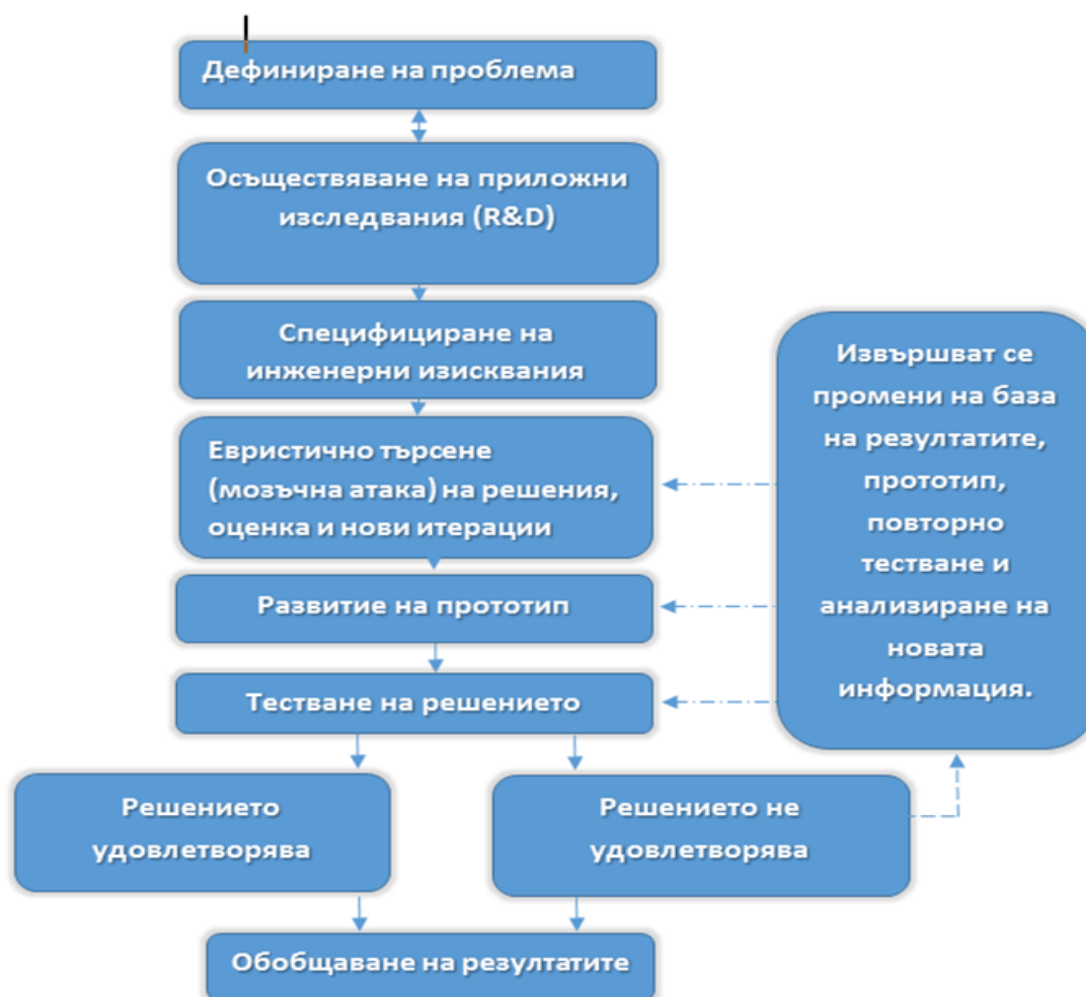
- На основата на над 90 бързи сканирания е осъществено антропометрично изследване, разглеждащо вариацията а на формата между мъжкия и женския скалп, използвайки антропометричния модел на формата. Установено е че основната разлика между мъжката и женската форма на главата е общият размер или обем на главата и е възможно да се предвижда форма на женски скалп с модел на мъжка форма или обратно. Това доказва, че моделът на антропометричната форма може да се използва за точно намиране на вариации на формата между различните популации.
- Анализирани и препоръчани са оптимална селекция на материал за основната с възможности за дезинфекция и стерилизация, както и прилагането на покритие или добавки с антибактериален ефект за биосъвместими материали с възможност за използване в сложни форми с добра еластичност и устойчивост.
- Втори аспект при избора на материали е постигането на отлични оптични качества (прозрачност, ниска дифузия, без изкривяване на изображението). Също така е необходимо да се анализират и оценят техните основни параметри и технологични критерии от гледна точка на себестойност и цена на производството.
- Осъществени са изследвания на различни маски по отношение на тяхната пропускливост при вдишване и издишване. В резултат на тях е издигната хипотеза да се ползват безфилтърни системи и то с максимално ниско съпротивление на проходимост на обема въздух при вдишване и издишване.
- За начална идентификация е осъществено измерване на мощността на UV-C радиация, на наличен уред за дезинфекция на помещения и защита от инфекциозни заболявания чрез придвижване на UV-C чувствителния сензор по протежението на линейна скала, стартираща от центъра на UV-C излъчвателя. Резултатите от измерването показваха, че максималната мощност, която постига уреда е 2.3 mW/cm^2 и намалява експоненциално с отдалечаване от източника.

3. ГЛАВА. ДЕФИНИРАНЕ И ВЕРИФИКАЦИЯ НА ПОДХОД НА КОНЦЕПИРАНЕ И ФОРМОИЗГРАЖДАНЕ НА ЗАЩИТНА МАСКА, ОСНОВАН НА УНИФИЦИРАНА ЛИЦЕВА ТОПОЛОГИЯ ЧРЕЗ ВИРТУАЛНО ПРОТОТИПИРАНЕ И ФИЗИЧЕСКО ВАЛИДИРАНЕ

В тази глава са разгледани резултатите от изследване на дигитализиран подход на концепиране и формоизграждане, основан на унифицирана лицева топология и последващо виртуално прототипиране и последващо физическо материализиране..

3.1 Виртуален модел на защитна маска

Нуждите на разработчиците на продукти в практиката показват директна необходимост от методическа подкрепа на елементарно ниво, за да може да се удовлетворяват бързо поставените цели и задачи.



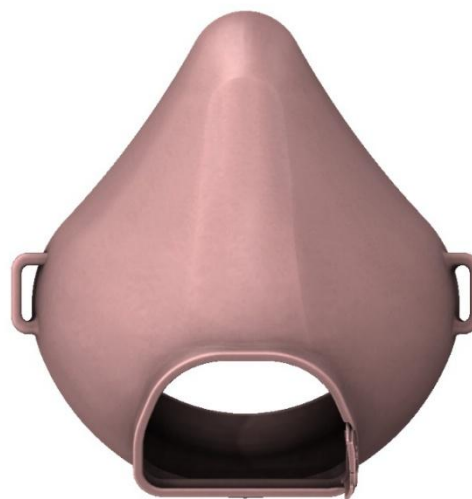
Фигура 3. 1: Инженерен метод

Предложен е модифициран вариант на Инженерният процес на проектиране, Фигура 3.1, представляващ поредица от стъпки, които инженерите следват, за да се стигне до проектиране на продукт, който отговаря на определени критерии и/или изпълнява определена задача.

На Фиг.3.2. е показана оформената „устна“ на изделието, което трябва да притиска максимално лицевата зона, при което се елиминира навлизане на замърсен външен атмосферен въздух от зоната.

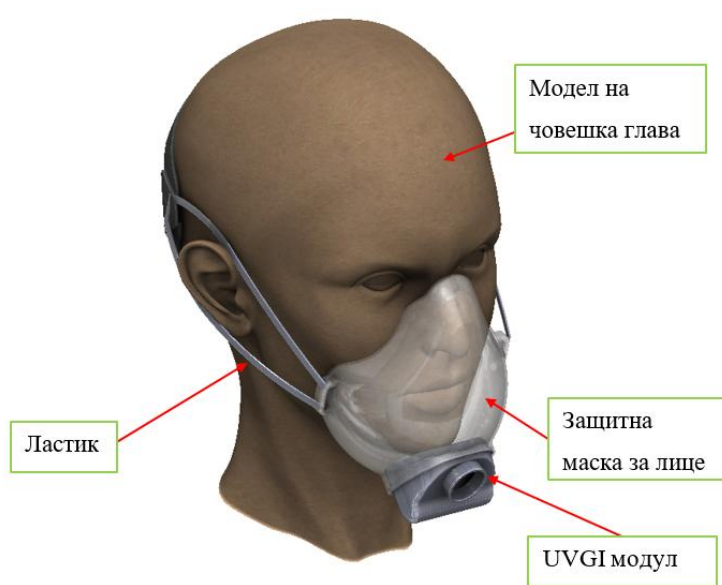


Фигура 3. 2: Зона, уплътняваща лицевата зона на потребителя



Фигура 3. 4 „Уши“ за пристягане на защитната маска към главата чрез ластик

Пристягането на защитната маска към лицето се извършва посредством ластик, който се пристяга към проектирани „уши“ на маската (виж Фиг.3.4).



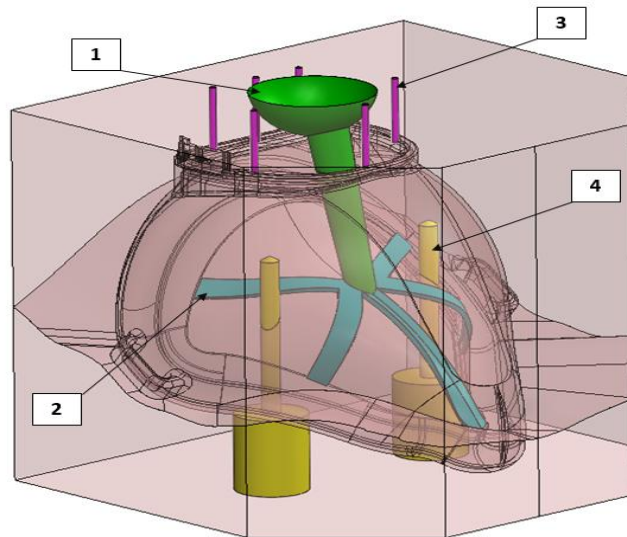
На Фигура 3.6 е показана цялостната защитна маска с всички прилежащи елементи.

3.2 Физически прототип на защитна маска

След изграждане на виртуалният прототип, геометрията следва да бъде валидирана с цел тест на дизайн и ергономия. Процесът за изработване на физическият прототип включва гравитачно леене с компресиране на силиконов материал в 3D принтиран инструмент.

Горната и долната полуформа на поансона се присъединяват посредством два самонарезни винта (Фиг.3.9).

Формообразувачия инструмент се състои от леяк с леякова чашка (1), която служи за вливане на силикона във формата. След постъпването на материала в леяка, той достига до леяковите канали (2), които разпределят материала в различните части на формата. Готовите физически прототипи на инструмента са показани на Фиг.3.11.



Фигура 3. 3: Елементи на формообразувачия инструмент

При отваряне на инструмента, се изважда и наблюдава излетият прототип. Забелязва се плътно запълване като за целите на разработка е важно периферията да бъде налице, за да се валидира геометрията, която има контакт с лицето.



Фигура 3. 4: Физически прототип на матрица



Фигура 3. 5: Физически прототип на защитна маска върху лице на потребител

Прототипното изделие приляга на формата на лицето като полученият резултат изпълнява целта на изследването, гарантирайки проникване на въздух единствено посредством устройството за филтриране на въздуха чрез UV-C светлина

3.3 Изводи от ГЛАВА 3

- Реализирани са три фази от методологията за развитие на нов продукт с фокус на ергономията: Дефиниране – Идейна фаза – Валидация чрез прототип. Така се улеснява и подобрява процеса на създаването на възможно най-оригинален продукт който не е съзнателна реплика на съществуващите на пазара продукти.

- Прилагането на Виртуален Прототип – Презентация на Виртуален Прототип доказано подобрява проектирането и прототипирането на „ергономични“ устройства, отговарящи на пазарната ниша, за която е предназначени.

- Изследвани и валидирани са стъпките от методологията, като свързващ елемент: Експериментиране – Научено – Изграждане – Измерване

- Разработената методология спомага за анализ на ергономични фактори и изисквания, като типизирана лицева топология и физическа ергономия за усъвършенстване на процесите на разработка на ергономични устройства, за по добри условия на работа за потребителя и боравенето му с маската.

- Валидирано е, че следването на стъпките в разработената методология опростяват и правят по предвидим процеса на разработка.

- Следвайки методологията може да бъде предоставен продукт, който задоволява пазарните нужди.

4. ГЛАВА. ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА СИСТЕМНА ИНТЕГРАЦИЯ НА UV-C СВЕТЛИНЕН ИЗТОЧНИК В КОМПАНОВЪЧНИ РЕШЕНИЯ

Създадена е концепция на UV-C филтър, който не затруднява дишането и осигурява защита над 99,9% от Ковид 19. Тази задача се решава с UVC LED работещ във въздушна камера, през която преминава вдишвания въздух. На стените на камерата са монтирани UVC LED диоди, които имат максимум на спектралното излъчване при дължина на вълната $\lambda = 265 \text{ nm}$. Това е дължината на вълната, която се препоръчва за унищожаване на Ковид вируса в REPORT № 155:2003 на CIE (международна комисия по осветление). В REPORT № 155:2003 се препоръчва доза от $10 \div 20 \text{ mJ/cm}^2$ на лъчистия поток за унищожаване на Ковид 19 при обеззаразяване на въздух, като се осигури 99.9% защита от Ковид 19. Вдишваният въздух постъпва във въздушната камера на UVC LED модула през отвори с напречно сечение $\geq 2 \text{ cm}^2$, като по този начин не се затруднява дишането. Отворите, през които влиза и излиза въздуха от въздушната камера, имат коефициент на отражение в UV-C областта клонящ към нула и специална форма, така, че UV-C лъчист поток да не може да „влезе“ в маската, както и да „излезе“ от въздушната камера. На фиг. 4.2 са показани кривите на спектрално отражение на различни отразяващи материали. Чрез многократните отражения между стените на въздушната камера на излъчения от UVC LED лъчист поток се увеличава общата стойност на лъчистия поток вътре в камерата Φ_{UVC} . При високи теоретични стойности на спектралният UV-C коефициент на отражение (над 96%) , и подходяща форма на въздушната камера, стойността на K_{UVC} може да достигне 10. В конкретния случай стойността на $K_{UVC} = 3.2$.

UV-C филтъра функционира по следния начин:

След като се подбере подходящия размер на маската съобразно размерите и формата на лицето, се определя максималния обем на вдишвания въздух. Той варира в широки граници. В зависимост от Фигура 4. 1: Обем въздух вдишван от човека



Фигура 4. 1: Обем въздух вдишван от човека

Условията и промените в обема и капацитетите на белия дроб, човек може да вдиша или издиша различен обем въздух. Вдишаният обем въздух може да варира, например от 200 до 2000 ml, а обемът въздух, който човек издишва, може един път да е 500 ml, друг път 1500 ml и т.н. Остатъчен обем (ОО) се нарича обемът въздух, който остава в белите дробове след максимално издишване. ОО може да варира между 1,1 и 1,2 l.

Интегрираното произведение на сферичното (обемното) облъчване и продължителността на облъчването t :

$He.o = \int Ee.o \times Dt$ или опростен израз $He.o = Ee.o.t$, когато скоростта на обемното облъчване е постоянна през разглеждания период от време. Единицата за измерване на експозицията е mJ/cm^2 .

Закон на Bousen-Roscoe – CIE Report 106 -1993. Фотохимичната реакция също показва реципрочност между облъчването (скорост на експозицията) продължителността на експозицията.

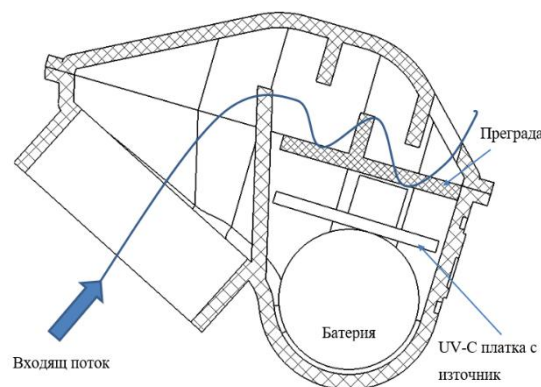
Законът гласи, че да се получи дадена реакция, независимо от продължителността на експозиция в широк диапазон е необходимо дадено излъчване mJ/cm^2 .

4.1 Концепция и детайли за проведените експерименти

Компонентите на системата включва: въздушна камера, през която преминава вдишвания и издишвания въздух, вътрешните стени на камерата са покрити с отразяващ материал, който има висок коефициент на отражение в UV-C спектъра, UV-C светодиоди, които имат максимално спектрално излъчване в при $\lambda = 265 \text{ nm}$. Преградно насочващи стени от кварцово стъкло, които завихрят въздуха във въздушната камера, в следствие на това вдишвания въздух се облъчва с UV-C лъчист поток два (три) пъти преминавайки в непосредствена близост до UVC LED диоди. Както е известно кварцовото стъкло има коефициент на пропускане на UV-C лъчист поток $J = 0,95$ и коефициент на поглъщане $\alpha = 0.01$ за кварцово стъкло с дебелина $d = 0,5 \text{ mm}$. Формата на размерите на преградното насочващите стени са показани на фиг.4.4. Решението съдържа:

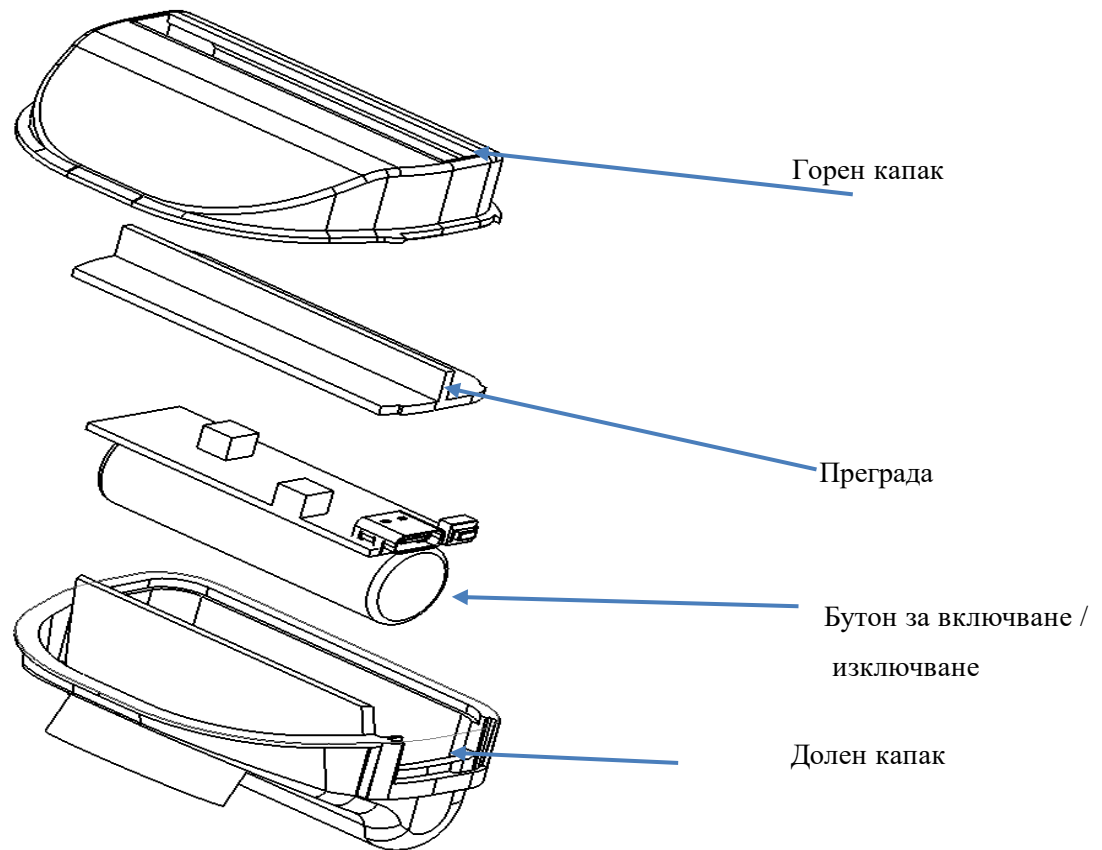
- Li – ion батерия с капацитет 7,2 Wh, напрежение 3,6 V. Батерията има цилиндрична форма с размери $\Phi = 18 \text{ mm}$ и дължина $L = 6,5 \text{ mm}$ и осигуряваща автономно захранване на UV-C около 6.5 часа.
- PCB платка на която са монтирани следните елементи:
- DC – DC драйвер с номинална мощност 2W
- Устройство което осигурява нормален заряд на батерията
- Ключ, който включва UV-C филтъра да работи
- Куплунг, към който се включва зарядното устройство от електрическа мрежа
- Сигнален светодиод намиращ се върху корпуса на UV-C филтър, като при нормална работа на UV-C филтъра контролният светодиод просветва със синя светлина.
- Въздушен филтър от специален плат, който предпазва от вируси 0% бактерии 50% и прах 50%. През определен период от време, този въздушен филтър се подменя с нов.
- Корпус на UV-C филтъра.

Формата на корпуса и местоположението на отделните елементи са показани на фиг.4.2.



Фигура 4.2: Формата на корпуса и местоположението на отделните елементи

Поради съображението, че е възможно осветяване на лицето на потребителите, в задната част където е изходът на потока е добавен лабиринт за да се гарантира, че няма да има нежелано облъчване за потребителите.



Фигура 4. 3: Разпадат вид на концепцията за UV-C LED модула

4.2 Изводи от ГЛАВА 4

- Изследвани са и вариантно са развити концепции на системата за стерилизация чрез подробна валидация на всяка от предложените концепции и след стъпково модифициране на част от компонентите е достигнато до удовлетворително решение;
- На основата на най-добрия концептуален вариант е изградена детайлна геометрична концепция за UV-C LED модула с оптимално интегрирана контролна платка на модула с предвидени изводи за зареждане и бутон за включване/изключване;
- Имплементиран е и индикатор за заряда на батерията, което е особено важно за влизане в заразени среди, за да се планира възможното време за престой;
- Развит и геометрично е определен с подходяща метрика модул за управление (платка) на UV-C LED елементите.

5. ГЛАВА. МОДЕЛИРАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ПРОЦЕСА НА СТЕРИЛИЗАЦИЯ

Интегрирането на ултравиолетовите светодиоди е от ключово значение за постигането на успешна стерилизация от 99.9%. При така поставената цел е необходимо да се подбере електрозахранването и средствата за уведомяване които да гарантират този процес за осем часа. В същото време постигането на дадената ефективност не може да бъде постигната единствено чрез захранването, а също така е необходимо да се концепира и оформи оптимален път на въздушните потоци през корпуса на маската.

5.1 Изследване на CFD модел за установяване на работните параметри

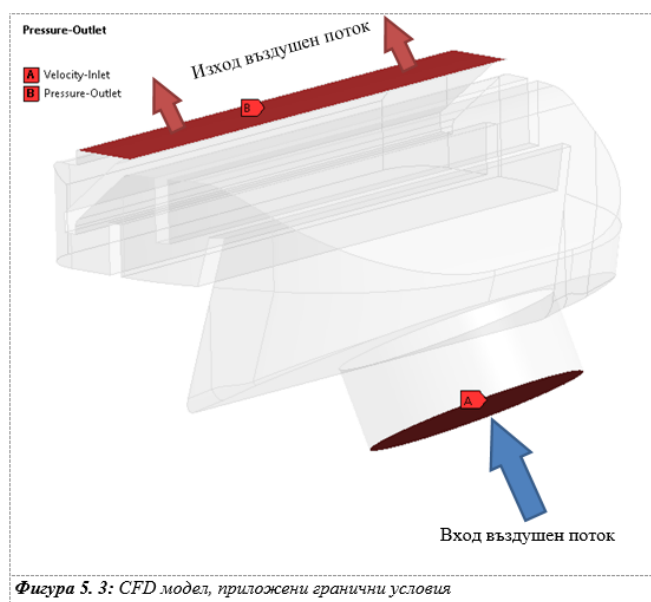
Достигането на поставените цели за стерилизация 99.9% е необходимо да се определят параметрите на въздушния поток през UV-C LED модула. Това може да бъде осъществено чрез два метода: физически измервания или използване на инструментите за виртуално прототипиране. Извършването на физически измервания налага нуждата всеки от концептуалните варианти да бъде прототипиран, което значително увеличава времето, а също така и средствата за постигането на оптималните параметри. Виртуалното инженерство позволява много бързо и точно да бъдат тествани всичките варианти още на етапа концепция.

5.2 Геометричен модел

За изследването поведението на въздушните потоци е подготвен модел от крайни елементи базиран на втория концептуален модел на UV-C LED модула. Изходния геометричен модел е показан на Фиг.5.1, като от него е необходимо да бъде изолиран обема въздух(наричан флуиден домейн) от вътрешната кухина на модула. Премахването на малки фаски, закръгления и други е също важно за да бъде улеснено генерирането на адекватна мрежа от крайни елементи, което значително ще намали времето за получаване на резултати и също така ще повиши точността на получените резултати.

5.3 Гранични условия и мрежа от крайни елементи

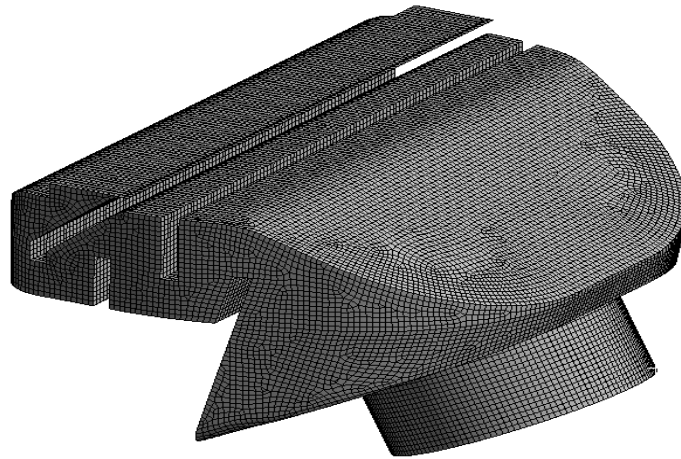
Приложните гранични условия са представени на Фиг.5.3. Те представят дефинирания флуиден домейн на UV-C LED модула в среда на Ansys Workbench.



Фигура 5. 3: CFD модел, приложени гранични условия

Моделът с генерираната мрежа от крайни елементи е представен на Фиг.5.4 съдържа 1005000 възли и 269000 елемента. При генерирането на мрежата

Моделът с генерираната мрежа от крайни елементи е представен на Фиг.5.4 съдържа 1005000 възли и 269000 елемента. При генерирането на мрежата е използван метод чрез хексаедри, който при флуидни анализи дава висока точност на решението.

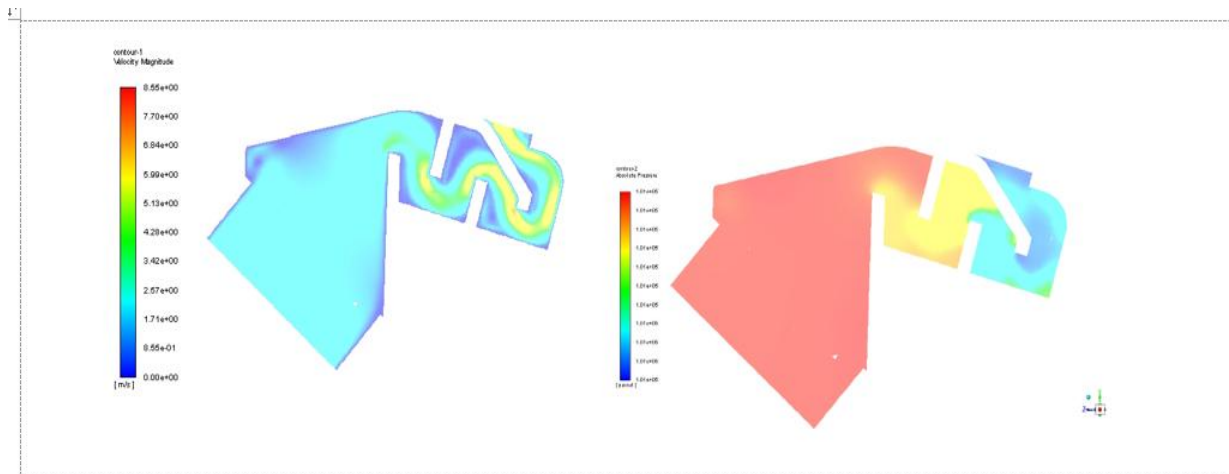


Фигура 5.4: CFD модел, генерирана мрежа от крайни елементи

5.4 Резултати от проведените изследвания

Резултатите от представените изследвания са представени в напречно сечение на флуидния домейн, като това е илюстрирано на Фиг.5.5.

Средната скорост на вдишвания въздух варира като стойности поради стесняването на канала през който преминава въздушния поток. Резултатите са представени и чрез пада на налягането през напречното сечение на UV-C Фиг.5.6. Падът на пълното налягане през системата е 77Pa.



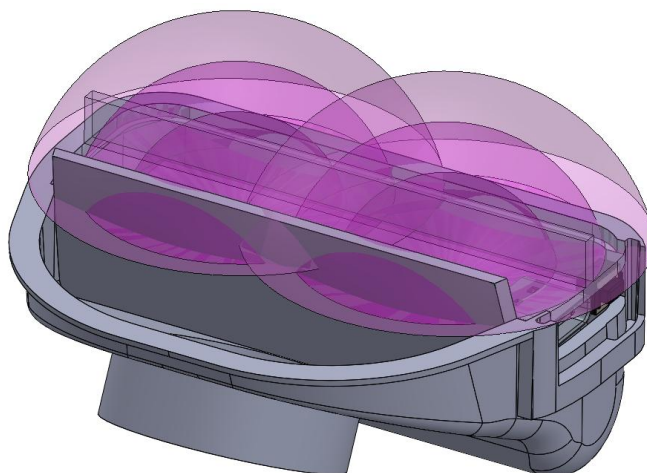
Фигура 5. 5: CFD модел, контури на скоростта, m/s **Фигура 5. 6:** CFD модел, контури на пълното налягане, Pa

5.5 Определяне на енергийно поле и параметри на UVC LED модула

Подбраните UVC LED в първия концептуален вариант на модула са заменени с по-компактни такива, това се налага поради освобождаването на височина между преградата и горната страна на диодите, това се налага за да се развие платката с всичките необходими драйвер, електронни компоненти, USB TYPE-C интерфейс и също така бутон.

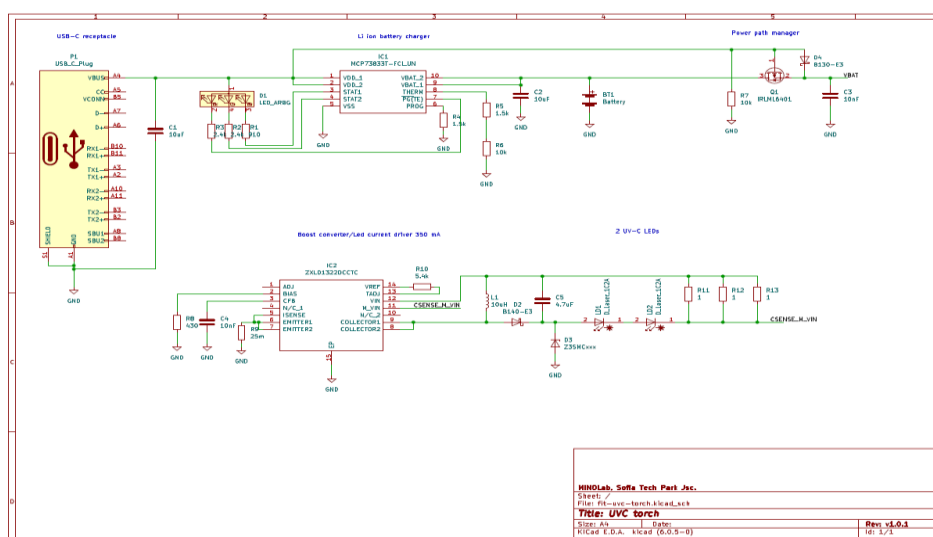
Техническите характеристики позволяват да визуализираме зоните на облъчване в UVGI модула. Чрез представените Фиг.5.8 градиентът на лилавото характеризира интензитетът на излъчване. Оформени са четири полусфери и за всяка са представени стойностите. Те са показани в Таблица 5.1. Както се забелязва от фигурата се наблюдава консистентна осветеност в целия обем флуиден поток. Това ще гарантира, че няма да има зони където да има редуцирана доза осветеност.

Радиус мм	Интензитет mW/cm ²
0,5 мм	120
10 мм	30
15 мм	23
20 мм	10.5



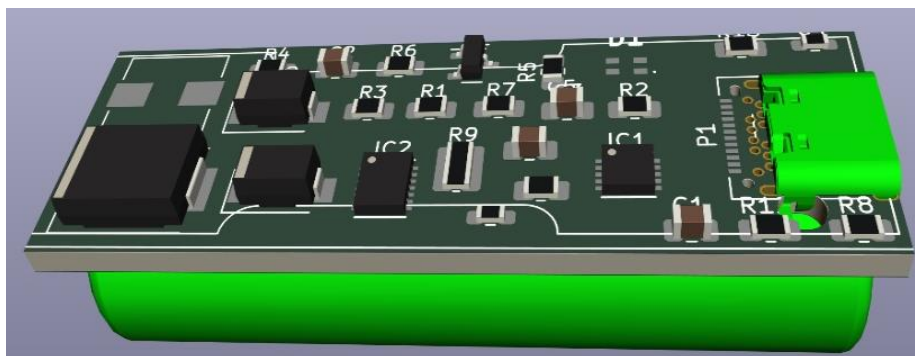
Фигура 5. 8: UVGI модул, излъчване от диодите, изометричен изглед

Интегрирането на ултравиолетовите светодиоди е от ключово значение за постигането на успешна стерилизация от 99.9%. При така поставената цел е необходимо да се подбере електрозахранването и средствата за уведомяване който да гарантират този процес за осем часа. Началната фаза при определяне на нужните компоненти е представянето на пространството за реализиране на целия UV-C LED блок като това е показано на Фиг.5.11.



Фигура 5. 11: UV-C LED модул, интегрална схема

След дефинирането на оформлението на платката, целият UV-C модул е визуализиран чрез 3D модел на Фиг.5.12.



Фигура 5.12: UV-C LED модул, 3D модел

5.6 Изводи от ГЛАВА 5

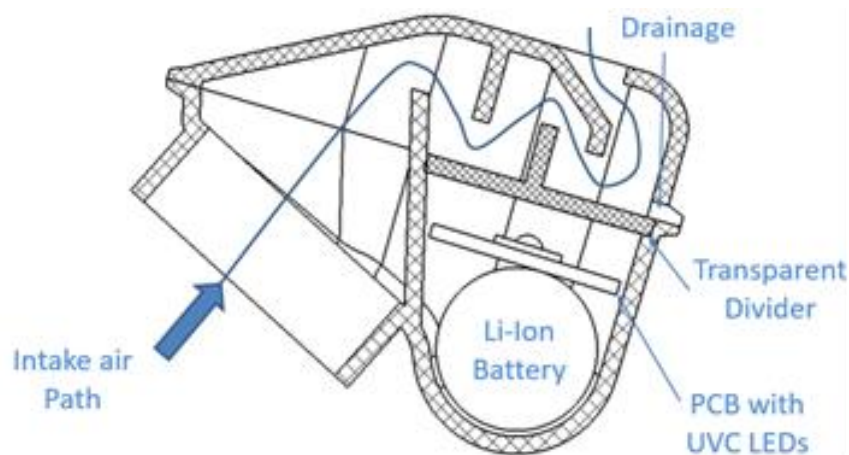
- За постигане на поставената цел е избрано електрозахранване и средства за идентификация на състоянието, които да гарантират процес на стерилизация за осем часа;
- Интегрирането на ултравиолетовите светодиоди с оглед на най-ефективно третиране на преминаващия въздух е от ключово значение за постигането на успешна стерилизация от 99.9%;
- За постигането на висока ефективност е концепиран и моделиран, изследван и в резултат на симулациите е оформен оптимален път на въздушните потоци през корпуса на маската за постигане на максимална експозиция от светлината на *UVC LED* за третиране на преминаващия поток.

6. ГЛАВА. ДЕТАЙЛНО МОДЕЛИРАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАЩИТНА МАСКА С "АКТИВНИ" ФУНКЦИИ ЗА UV-C СТЕРИЛИЗАЦИЯ НА ВДИШВАНИЯ И ИЗДИШВАНИЯ ВЪЗДУХ

Използването на UV-C LED за ултравиолетово гермицидно облъчване (UVGI) се очертава като напредничав и екологично чист метод за дезинфекция, макар и не толкова в контекста на личните предпазни средства (ЛПС). Като се има предвид, че от 2020 г. до 2022 г. човечеството страдаше от пандемия предизвикана от вируса COVID-19, а системата на обществено здраве бе на своя предел. Като най-подходящо решение се открие възможността за използването на UVGI технологията- ЛПС оформено като комбинирана с очила или само лицева маска, която покрива носа и устата на потребителя. Към нея се монтира филтриращ въздуха модул, който използва UVGI технология.

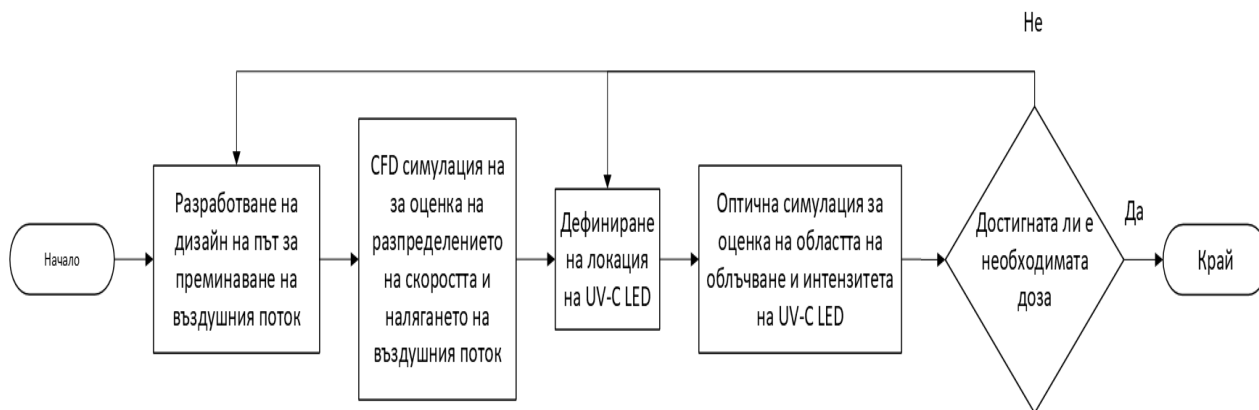
Конструкцията на модула е оформена от два корпусни елемента, които се монтират чрез еластичен лабиринт към лицевата маска. Корпусите са изработени от непрозрачен материал, за да се предпази потребителя и околните от въздействието на UV-C светлината. В допълнение, вътрешните повърхнини, където оформят облъчваният обем на филтриращото устройство са покрити със силно отразяващ материал, който постига 97% отразяваща способност. Това се прави, за да се увеличи максимално дозата на облъчване вътре във филтриращото устройство. Като източник на електроенергия е избран литиево-йонна батерия поради предимствата, че има една от най-високите енергийни плътности в сравнение с различните типове батерии (така че да не натоварва потребителя с теглото си), както и възможността за дълбоко разреждане [106]. Над нея е разположен електронният блок за управление, който е организиран върху печатна платка, към която са присъединени и UV-C LED източниците. От печатните платки са изведени пластини, които се свързват директно към батерията, поради което отпада необходимостта от използването на кабелни проводници. Електронните компоненти и литиево-йонна батерия са монтирани под прозрачен разделител, за да се изолират от влагата във вдишвания и издишвания въздух. Въздушният път е организиран в зигзагообразна форма, която се използва за по-продължителен престой на въздушния поток в облъчената зона. Основната характеристика на маската е, че UV-C модулът за UVGI е със сменяема цилиндрична литиево йонна батерия тип 14500. Тя може да се зарежда чрез USB-C порт, като се свали модула, или да се подмени с нова. По този начин се постига минимално време на прекъсване на

използването на маската. В корпуса на UVGI е предвидено влагата от околната среда и издишваният въздух да се отделят свободно посредством дренажен отвор. В предната част на е оформен отвор специално проектиран контур за добавяне на филтърен елемент за пречистване на въздуха от твърди частици. Елементите на UVGI устройството са показани в напречен разрез на Фиг.6.2.



Фигура 6. 1: Напречен разрез на UVGI модула

Филтриращите свойства на модула се осигуряват от детайлно разработена оптична система, която да осигурява подходящата доза UV-C облъчване, отчитайки мощността, локацията и големината на активното поле на UVC LED източника на енергия и скоростта на движение на въздуха при вдишване и издишване.



Фигура 6. 2: Разработена методика за оценка на дозата на облъчване за UVGI

Дозата на облъчване е определена посредством разработена в проекта оригинална методика, виж фиг.6.3. Тя включва два метода на изчисление, чрез виртуални прототипи.

След това анализът продължава с оптични симулации. Те са неразделна част от проектирането и оптимизирането на фотонни системи, като позволяват прецизно моделиране на взаимодействията светлина-материя. Тези симулации използват усъвършенствани изчислителни техники за прогнозиране на поведението на светлината в сложни структури, улеснявайки анализа на параметри като отражение, пропускливост и абсорбция. Софтуерните решения за оптични симулации използват различни методи за изчисление, но проследяването на лъчи стана най-широко използваното напоследък. Оптичните симулации могат точно да копират разпространението на електромагнитни вълни през различни среди. Тази способност за прогнозиране е от решаващо значение за разработването на ефективни оптични устройства, като светодиоди, лазери и фотодетектори, като позволява на изследователите да прецизират геометрията на устройството и свойствата на материала преди експериментално валидиране.

Методът UVGI има ефективност, която е силно зависима от експозицията на лъчение, известна също като флуенс в радиометрията, е лъчистата енергия, получена на единица площ или облъчването на повърхност, интегрирана във времето на облъчване и се обозначава като H_e :

$$H_e = \frac{\partial Q_e}{\partial A} = \int_0^T E_e(t) dt, \quad (1)$$

където: Q_e е лъчистата енергия;
 A е площта;
 T е продължителността на облъчване;
 E_e е излъчването;

6.1 Детайлно изследване на UV-C стерилизация на вдишвания и издишвания въздух

Това изследване използва усъвършенствани фотометрични техники за количествено определяне на UV изходното излъчване от светодиодите и за оценка на пространственото разпределение на UV интензитета в рамките на защитната маска. UVGI основно деактивира микробите като уврежда техния генетичен материал, като по този начин възпрепятства способността им да изпълняват жизненоважни функции.

Симулациите на изчислителната динамика на флуидите (CFD) са мощен инструмент в изследването и анализа на флуидния поток за инженерни и научни приложения. Тези симулации използват методи за дискретизация, главно краен елементен метод (FEM), за да преобразува областта на непрекъснатия поток в разрешими алгебрични уравнения. CFD позволява за визуализация и количественото определяне на параметри като разпределение на скоростта и разпределение на налягането, които са критични за оптимизиране на дизайна и производителността на системи, вариращи от космическото и автомобилното инженерство до екологични и биомедицински приложения. За да се оцени дизайнът на UV PPE за активно пречистване на въздуха се прави симулация на флуиден поток, за да се определи скоростта на флуидния поток на въздуха през облъчената зона и да се определи времето на експозиция, така че да може да се изчисли дадената доза за експозиция на лъчение.

Скоростни проучвания потвърждават способността на UV-C светлината да деактивира SARS-CoV-2, щама на коронавируса което е причинило COVID-19 в зависимост от радиационната експозиция за 90% летална доза (LD90) е между 20 J/m^2 и 37 J/m^2 .

6.1.1. Симулация на флуидния поток

Необходима е CFD симулация на флуиден поток на UV-C филтърното устройство, за да се анализира скоростта на въздуха във филтъра. За да се оцени облъчването, е важно да се изчисли средната скорост на въздушния поток вътре в маската. Това позволява изчисляването на времето, в което въздухът се облъчва, като се има предвид, че е известна дължината на пътя на въздушния поток. Освен това изчисление показва спада на налягането вътре в маската, което помага да се оцени колко по-трудно би било дишането с него.

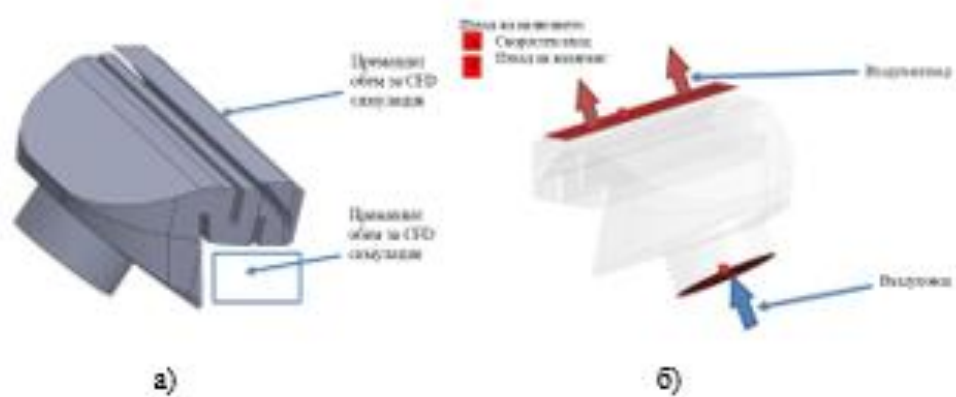
Геометричният модел за CFD анализа се състои от отрицателния обем вътре в UV-C филтърното устройство. Частта под прозрачния разделител се отстранява, тъй като не се движи физически въздух в този обем.

Граничните условия за CFD симулацията са както следва:

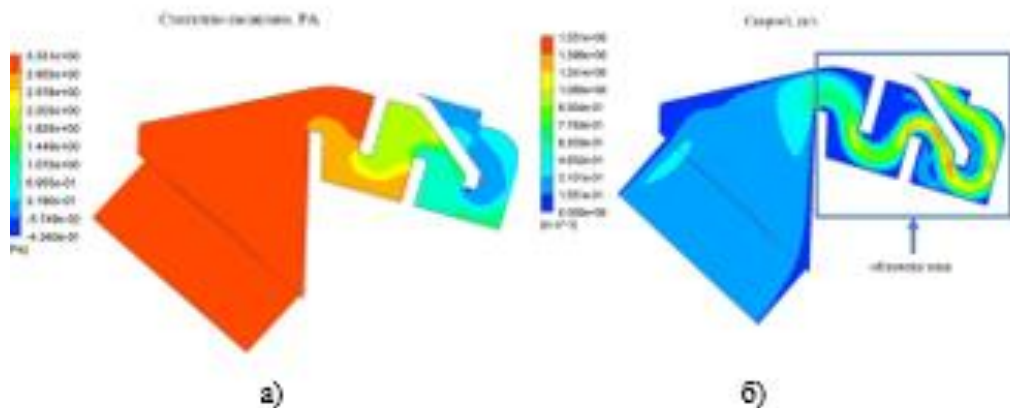
- За всмуквания въздух граничното условие е зададено като входна скорост с $V = \sim 0,003 \text{ m/s}$ (на базата на обемен дебит на дишане 6 l/min);
- Изходът за въздух е настроен като изход за налягане при 0 Pa като манометрично налягане от атмосферното налягане;

Геометричният модел и граничните условия са показани на Фиг.6.4 и резултатите от флуидния поток на CFD симулация по отношение на разпределението на скоростта.

Резултатите на Фиг.6.5 показват, че средната скорост в облъчената област е 0,5 m/s и спадът на налягането е 3,331 Pa. Като се има предвид, че спадът на налягането е само 3,3 Pa, дишането през това филтриращо устройство се извършва с минимално съпротивление по отношение на потока на флуида.



Фигура 6. 4: Геометричен модел а) и гранични условия б) на CFD симулация на флуиден поток



Фигура 6. 5: Разпределение на статичното налягане а) и скоростта б) на UV-C филтърното устройство

6.1.2. Оптична стимулация

Оптичните симулации са много полезни, когато е необходимо да се оцени излъчването в определен обем. Тези видовете симулации са силно зависими от физическите свойства на материалите, както и от свойствата на светлината излъчващи обекти вътре в симулацията.

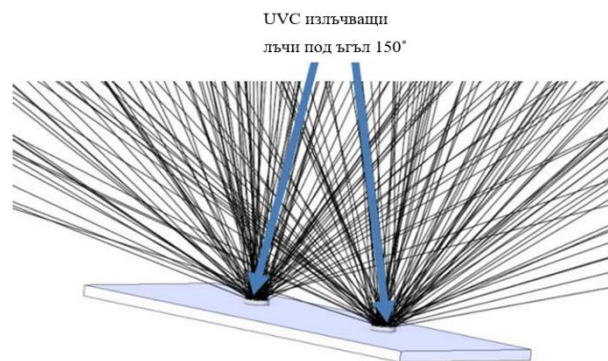
За този тип симулация е необходимо геометричното тяло на UV-C филтъра, за да се затвори зоната на облъчване правилно и опростената печатна платка с опростена геометрия на двата UV-C светодиода.

Граничните условия за симулацията са както следва:

- Свойствата на материала на корпуса на UV-C филтърното устройство са зададени като непрозрачни с 97% отразяваща способност, симулиране на отразяващото покритие, което ще бъде добавено към крайния продукт.
- UV-C светодиодите са настроени като излъчващи повърхности с монохроматичен спектър (UV) с дължина на вълната 272 nm.

- Видът на потока на излъчващите повърхности е зададен като излъчван поток и е зададен на 0,10 W.
- Ламбертовият ъгъл на F излъчване е взет от листа с данни S6060-DR250-W272-P100 UV-C LED и е настроен на 150°.

UV-C светодиодите с техните свойства са показани на Фиг.6.6.



Фигура 6. 3: Компоненти на UV-C филтърно устройство в надлъжно напречно сечение

За да се оцени облъчването отвътре, UV-C филтриращото устройство се извършва с пет сензора, които са във форма на равнини с три надлъжни равнини (две от които са през централните линии на светодиодите и в средата между тях), една коронална или фронтална равнина (през централните линии на светодиодите) и една напречна равнина, която е отгоре на светодиодите. Тези сензорни равнини са показани на Фиг.6.7. Резултатите за излъчването на тези сензори са показани на Фиг.6.8 до Фиг.6.10.

6.1.3 Изчисляване на лъчистата енергия

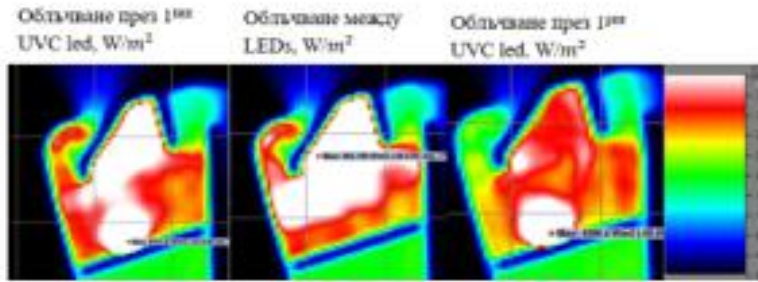
Лъчистата енергия, която се абсорбира от единица обем преминаващ през системата в зоната на облъчване от емитирания светлинен поток е функция от разпределението на скоростта в полето на облъчване. Този резултат е определен чрез симулацията на флуидния поток и по-специално от продължителността на въздействие на ултравиолетовото лъчение. Пътят на експониране на въздуха е с дължина 0,063 m (63mm) и потокът на флуида има средна скорост през зоната на облъчване от около 0,5 m/s, продължителността на експозицията е изчислено като:

$$S = V \cdot t \rightarrow t = \frac{S}{v} = \frac{0.0063}{0.5} = 0.126 \text{ s}$$

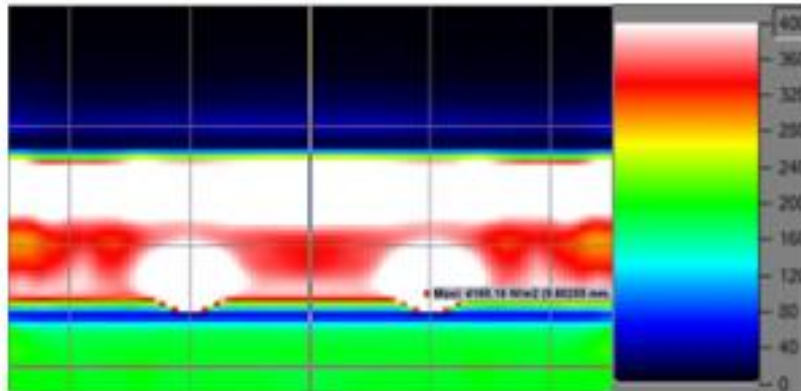
Въз основа на лъчева оптична симулация може да се определи, че зоната на плътността на облъчване през повечето сензори е в диапазона 380-400 W/m² и повече. Тогава изчислената радиационна експозиция е както следва:

$$H_e = E_e \cdot T = 380 \cdot 0.126 = 47.88 \frac{J}{m^2}$$

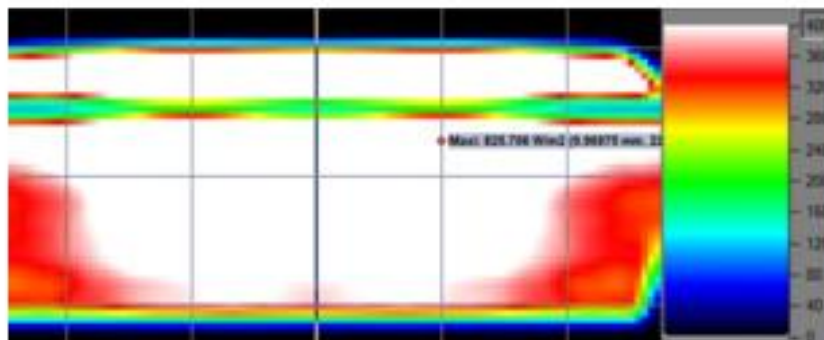
Тази стойност на експозицията потвърждава необходимата ефективност на третирането на флуидния поток и по-специално от продължителността на въздействие на ултравиолетовото лъчение, необходимо за стерилизацията.



Фигура 6. 8: Облъчване чрез три сензора в надлъжна равнина



Фигура 6. 9: Облъчване през коронален сензор на предната равнина



Фигура 6. 10: Облъчване през сензор в напречна равнина

6.2 Изводи от ГЛАВА 6

Въз основа на проведените CFD и оптични симулации могат да се направят следните заключения:

- Предложен е иновативен дизайн на корпуса улесняващ доброто преминаване на въздушния поток в цялата UV-C облъчена зона. Геометрията на проточната част е детайлно моделирана, така че да осигурява необходимата експозиция за постигане на ефективност на третирането на флуидния поток и по-специално да осигури дозата ултравиолетово лъчение, необходимо за стерилизацията като същевременно не позволява появата на светлина извън активната камера.

- Доказано е, че избраните UVC LED се представят отлично и произвеждат излъчване (плътност на потока), което покрива целия обем с над 380 W/m^2 .

- С извършените числени симулации е изчислена радиационната експозиция на минимум $47,88 \text{ J/m}^2$ за целия обем, което е по-високо от посочените в литературата изисквания за UVGI за постигане на LD90 (между 20 и 37 J/m^2) за SARS-CoV-2 и други корона и грипни вируси и така се доказва ефективността на стерилизацията.

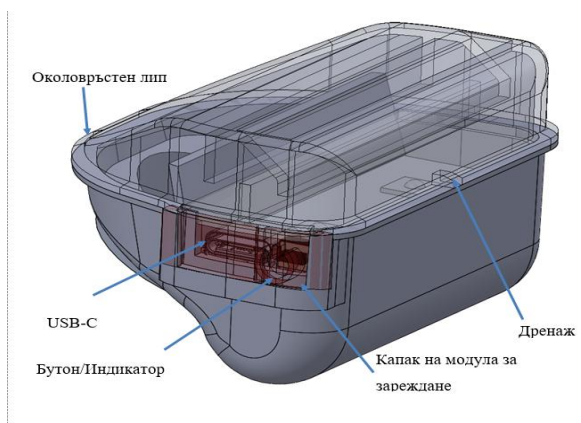
7. ОЧИСТВАНЕ И ИНФОРМИРАНЕ НА ПОТРЕБИТЕЛЯ С ВИЗУАЛЕН, ЗВУКОВ ИЛИ ВИБРОТАКТИЛЕН НАЧИН ЗА НАМАЛЕН/ИЗЧЕРПАН ЗАРЯД НА ЕЛЕКТРОЗАХРАНВАНЕТО

Представеният виртуален прототип на Фиг.7.1 дава възможност да се изследват ергономичните функционалности на UV-C LED модула. В него са интегрирани светодиодите, преграда корпусите, както и електрическите компоненти. Относно тегловия баланс, който е представен в Таблица 7.1. Целият модул има ниска маса от около 60гр, което има пряко отношение към ергономията и не би довело до неудобство при носене за по-дълги периоди от време.

Таблица 7.1: Теглови баланс

Компонент	Маса, g
Горен капак	6.4
Долен капак	8.8
Преграда	5.3
Платка+източници	7
Батерия	30
Общо	57,5

На представения виртуален прототип се вижда и деформируемото капаче показано в червен цвят, което има за цел да изолира кухината в която е поставен UV-C LED модула когато устройството не е в режим на зареждане. В долният корпус на кутията е оформен контурен профил където самото капаче да може да се подпъхне и да гарантира херметичност. След като измине един цикъл на разряд и е необходимо да се зареди батерията, капачето се изплъзва от предната си част, която се намира откъм предната част на кутията. Това позволява да се открие достъп до зареждащия порт на устройството и чрез кабел тип USB Type-C да се зареди батерията. В зареждащата секция на платката е добавена и функцията „бързо зареждане”, което също така да допринесе до по-лесната употреба на устройството чрез съкращаване на времето за изчакване между зарежданията. Друг вариант който също е възможен, е да се извади UV-C LED модула от самата маска и да се подмени физически батерията със заредена такава.



Фигура 7.1: UV-C LED модул, ергономия

При продължителна употреба на устройството и особено при променящи се условия на експлоатация (запрашеност, влажност, температурни разлики и т.н.) това неминуемо ще доведе до замърсяване на UV-C LED модула. Работата в такива условия ще намали значително ефективността от гледна точка на замърсени отразяващи повърхности, натрупване на влага и частици по преградата между източника и останалата част от устройството. Лесното почистване е една от важните характеристики, която е заложена още на етап концепция на модула. За тази цел е избегнато използването на крепежни елементи в конструкцията, като всички части се държат сглобени от околовръстният лип по меката част на маската. При сглобяването на двете части от модула преградата, която изолира UV-C източникът се закопчава между тях и после се подпъхват заедно в тялото на меката част на маската. Това гарантира еластично притискане и елиминира възможността да се разглобят двете половини.

При експлоатацията на маската при ниски температури и когато условията са подходящи да се кондензира влага, е поставен дренажен канал в задната част на горния корпусен елемент. Това гарантира изтичането на каквато и да е налична влага от вътрешността на респираторната част.

7.1 Експериментално изследване за оценяване на физически изработен прототип с формообразуващ инструмент

Целта е да се тества сглобката между каналът оформен във формообразуващия инструмент, дренажната система на маската и интерфейсна в зоната на бутона за управление на активната функция.

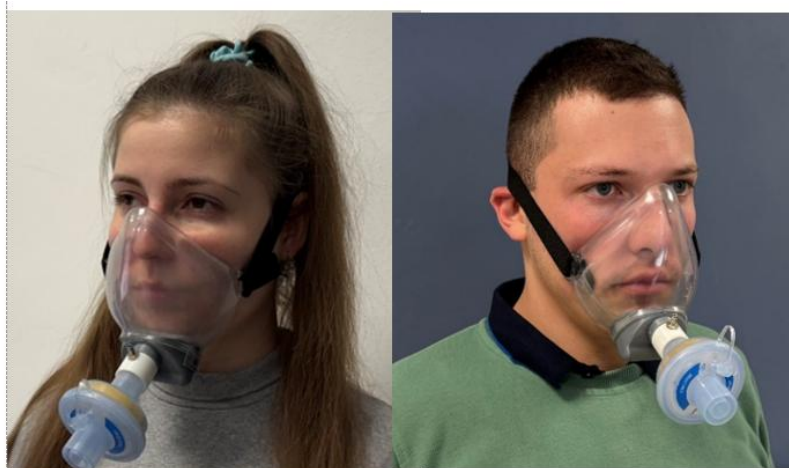
На Фиг.7.4 е показана сглобена предпазната маска с филтриращият елемент, като към вече индустриално произведените защитни маски е добавена и системата за активна стерилизация чрез UVGI модула.



Фигура 7. 1: Сглобена маска

7.2 Провеждане на анкета за тестване на ергономичността на защитна маска

Изграждането на физическия продукт чрез индустриална технология за средносериенно производство на защитната маска цели валидация на естетическите изисквания на маската да приляга оптимално върху различна лицева топология на максимален брой потребители. За целта е съставена анкета за дизайн и ергономия на защитна маска за лице, както и влиянието на добавения UV-C стерилизиращ модул, която да изгради представителна извадка за функционалността и дизайна на защитната маска. Всеки участник поставя предпазната маска върху лицето си (Фиг.7.5), като усилието за уплътняване, което беше експериментално установено в предходната глава на работата от 3.15 N се гарантира чрез еластична лента. При проведеното допитването са участвали общо 16 потребители, от които 14 са мъже и 2 жени (Фиг.7.5), които чрез отговаряне на въпроси и също допълнително поле със свободен отговор да оценят обективно реализираното изделие. Анкетната карта е разделена на две части, като първата е отнесена към ергономията, а втората влиянието на добавеният UV-C модул за стерилизация:



Фигура 7. 5: Снимка на поставената маска при провеждането на анкета

Удовлетворени ли сте от ергономичните функции?

- Как оценявате комфорта при носенето на защитната маска?
- Как оценявате уплътнението на маската по вашето лице?
- Как оценявате удобството при носенето на защитната маска върху вашето лице?

Как оценявате добавеният стерилизиращ UV-C модул?

- Как оценявате комфорта при вдишване/издишване?
- Как оценявате зрителното поле при употреба на маската?

Отговорите на въпросите са представени на следващите фигури, като графиките са представени заедно за всички анкетирани в това число мъже и жени. Резултатите са представени чрез процентно отношение на отговорите.

Въпрос №6 „Как общо оценявате представената защитна маска с вградена защитна функция?“ от анкетата представлява свободен текст, който участниците могат да споделят впечатленията си относно защитната маска. Получената обратна връзка е представена в точки:

- Добра е ! Ластикът може да бъде малко по-комфортен;
- Да се добави втора връзка;
- Отлична е.;
- Качеството е отлично! Изработена е перфектно!;
- Отлично.;
- Доста добре, но ластикът излиза лесно.;
- Добра идея.;



Фигура 7. 2: Участващи лица в анкетата по пол



Фигура 7. 3: Въпрос №1 от анкетата

Материалът, от който е произведен пробната серия защита маска е PVC, който притежава ограничена еластичност.

На база извършеното проучване, може да се състави представителна оценка за дизайн и ергономия на защитната маска за лице. Относно ергономията средните резултати както се виждат на представените графики е оценена като много добра, при дамите резултата е под-средната оценка. След анализ и в разговор с анкетирания беше установено, че използваната еластична лента трябва да се подобри, като при дамите тя не благоприятства плътното уплътнение по лицето. Това са и основните бележки при въпрос №6 от анкетата относно промени при еластичната лента и необходима допълнителна в тази зона, за да се подобри представянето.

Относно добавеният модул за UV-C стерилизация масово мненията са насочени, че не затруднява дихателната функция на потребителите, както и не ограничава зрителното поле.

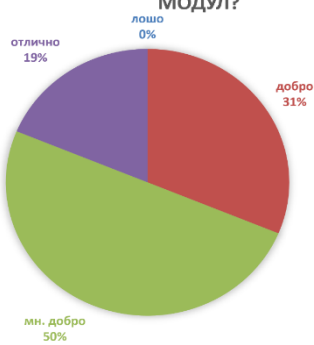


Фигура 7. 4: Въпрос №2 от анкетата



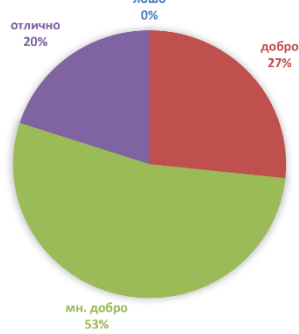
Фигура 7. 5: Въпрос №3 от анкетата

КАК ОЦЕНЯВАТЕ ДОБАВЕНИЯТ СТЕРИЛИЗИРАЩ UV-C МОДУЛ?



Фигура 7. 6: Въпрос №4 от анкетата

КАК ОЦЕНЯВАТЕ ЗРИТЕЛНОТО ПОЛЕ ПРИ УПОТРЕБА НА МАСКАТА?



Фигура 7. 7: Въпрос №5 от анкетата

7.3 Изводи от ГЛАВА 7

- Развитата геометрична концепция и реализация избягва специални крепежи за присъединяване на двете части на корпуса и тялото на маската, като така се постига висока функционалност и присъединяването при почистване се осъществява само с ръце, без инструмент в гъвкавата част на маската, където се подпъхва лесно и удобно целият модул;
- Чрез проведена анкета с използване на гъвкавата част на маската изработена с формообразуващ инструмент (финален дизайн и технология) се доказва, че голямата част от респондентите оценяват реализацията като такава с много добри ергономични показатели (**удобство на поставяне, носене, обзор контактно прилепване и силово натоварване**).
- С флуидната система на движение на вдишван/издишван въздух е постигнато удобство на употреба без да се предизвика затрудняване на дишането на потребителя;
- Захранването с енергия е така изградено, че се осигурява светлинен мониторинг на оставащия заряд и се гарантира лесна и бърза замяна на батерията, което е критично важно в експлоатационни условия;
- Бързата и лесна разглобяемост на системата позволява и стерилизация при необходимост.

ОБЩИ ИЗВОДИ

- Значимостта на проблема е изключително голяма с оглед на възможни пандемични ситуации, но в същото време открива нови области на изследване, свързани с възможността за активна защита и превенция в борбата срещу вирусни и бактериални заплахи (включително биологични оръжия, бедствия и аварии и др.).
- Разработването на UV-C LED активни очила ще окаже значително влияние върху защитата на специалистите, както и на всички попаднали в пандемична среда.
- С постигнатият опростен дизайн, разработените в дисертационният труд предпазни маска/очила имат потенциал да се превърнат в ново поколение с "активна" технология за UV-C защита.
- UV-C LED модула е разработен с оптимизирани показатели, както по отношение на степента на пречистване в лабораторни условия, така и по отношение на консумацията на енергия, за да се захранва от предложената или друга по-усъвършенствана по отношение на тегло и размери батерия.
- Изследванията по отношение на изграждането на формата и стилистиката (един от акцентите на докторската тема) отговарят много добре на ергономичните изисквания.
- Тестовите с изготвена от формообразуващ инструмент лицева част на маската с 30 реални потребители показва, че предложено тук решение се оценява като ергономично, елегантно, удобно и безопасно.

- На основата на над 90 бързи сканирания е осъществено антропометрично изследване на формата, разглеждащо вариацията на формата между мъжка и женска глава.
- Установено е, че основната разлика между мъжката и женската форма на главата имат общи размери или обеми на главата и е възможно да се предвиди формата на женски скалп с модел на мъжки или обратно. Това доказва, че моделът на антропометричната форма може да се използва за точно намиране на вариации на формата между различните популации.
- Анализирани и препоръчани са оптимален материал за основата на маската с възможности за дезинфекция и стерилизация, с добра еластичност и устойчивост, както и за прилагането на покритие или добавки с антибактериален ефект за подобряване на биосъвместимостта.
- Чрез избора на материали са постигнати отлични оптични качества (прозрачност, ниска дифузия, без изкривяване на изображението) при технологични критерии от гледна точка на себестойност и цена на производството.
- Извършените измервания по отношение на дозата на облъчване за дезинфекция и показателите за комфорт при дишане могат да се използват в следващите етапи и дейности в практиката.
- Чрез осъществени изследвания на различни маски по отношение на тяхната пропускливост е установено, че те винаги затрудняват дишането, което позволява да се издигне хипотеза за създаването на безфилтърни системи и то с максимално ниско съпротивление на проходимост на обема въздух при вдишване и издишване.
- Експериментално е измерена мощността на UV-C радиация, на наличен уред за дезинфекция на помещения и защита от инфекциозни заболявания чрез придвижване на UV-C чувствителния сензор по протежението на линейна скала, стартираща от центъра на UV-C излъчвателя. Резултатите от измерването показваха, че максималната мощност, която постига уреда е 2.3 mW/cm^2 и намалява експоненциално с отдалечаване от източника.
- Реализирани са три фази от методологията за развитие на нов продукт с фокус на ергономията: Дефиниране – Идейна фаза – Валидация чрез прототип. Така се улеснява и подобрява процеса на създаването на иновативен продукт който е с показатели над тези на съществуващите на пазара конкурентни продукти.
- Прилагането на Виртуален Прототип – Презентация на Виртуален Прототип – Материализация и физически тест, доказано подобрява проектирането и прототипирането на „ергономични“ устройства, отговарящи на потребителските оценки и очаквания, за които са предназначени.
- Изследвани и валидирани са стъпките от методологията, като свързващ елемент: Експериментиране – Научено – Изграждане – Измерване
- Разработената методология спомага за анализ на ергономични фактори и изисквания, като типизирана лицева топология и физическа ергономия за усъвършенстване на процесите на разработка на ергономични устройства за по добри условия на работа за потребителя и боравенето му с маската.
- Изследвани са и вариантно са развити концепции на системата за стерилизация чрез подробна валидации на всяка вариантна концепция и след стъпково модифициране на част от компонентите е достигнато до удовлетворително решение с баланс на теглото и видимостта.
- На основата на най-добрия селектиран вариант е изградена детайлна геометрична форма за UVGI модула с оптимално интегрирана контролна платка с предвидени изводи за зареждане и бутон за включване/изключване;
- Имплементиран е и индикатор за заряда на батерията, което е особено важно при влизане в заразени среди, за да се планира възможното време за престои. Развит и геометрично е определен с подходяща метрика модул за управление (платка) на UVC LED елементите
- Интегрирането на ултравиолетовите светодиоди в проточната част с оглед на най-ефективно третиране на преминаващия въздух е от ключово значение за постигането на успешна стерилизация от 99.9%.
- За постигането на висока ефективност е моделиран, изследван и в резултат на симулациите е оформен оптимален път на въздушните потоци през корпуса на маската за постигане на максимална експозиция от светлината на UVC LED за третиране на преминаващия поток.
- Въз основа на проведените CFD и оптични симулации могат да се направят следните заключения:

- ✓ Предложеният UV-C дизайн на корпуса не затруднява преминаването на въздушния поток в цялата зона облъчена с UV-C светлина. Геометрията не позволява излъчването на светлина извън активната камера.
- ✓ Избраните UV-C светодиоди се представят отлично и генерират излъчване (плътност на потока), което покрива целия обем с над 380 W/m^2 .
- ✓ Въз основа на извършените числени симулации радиационната експозиция е изчислена на минимум $47,88 \text{ J/m}^2$ за целия обем, което е по-високо от посочените в литературата изисквания за UVGI за постигане на LD90 (между 20 и 37 J/m^2) за SARS-CoV-2 и други корона и грипни вируси.
- Развитата геометрична концепция не включва специални крепежи за присъединяване на двете части на корпуса, като за висока функционалност присъединяването се осъществява само чрез специално оформен канал в гъвкавата част на маската, където целият модул ще се подпъхва, с което се осигурява високо удобство при почистване;
- Предложената геометрична концепция е с много добри ергономични показатели (удобство на поставяне, носене, обзор и силово натоварване).

ПРИНОСИ

Научно-приложни приноси

1. Надградена е методология за развитие на нов продукт с фокус на ергономията: Дефиниране/Идейна фаза –Виртуален Прототип/Презентация на Виртуален Прототип – Материализация и Физически тест и е доказано, че се подобрява отчитането на ергономичните фактори и изисквания, като типизирана лицева топология и физическа ергономия за усъвършенстване на процесите на разработка и за по добри условия на работа за потребителя и боравенето му с маската.
2. Предложена и тримерно вариантно е моделирана иновативна концепция за предпазна маска (защитена с полезен модел) с интегрирана система за стерилизация и възможност за интеграция на неделими предпазни очила;
3. Изследвани са вариантни концепции на системата за стерилизация чрез валидации на всяка генерична концепция и след стъпково модифициране на части от компонентите е достигнато до оптимизирано унифицирано решение;
4. Доказан чрез мултифизична симулация е оптимален път на въздушните потоци през корпуса на маската постигащ ниво на максимална експозиция на *UV-C LED* светлината за третиране на преминаващия поток и е потвърдена висока ефективност на стерилизация чрез постигнатата експозиция;
5. Разработен е антропометричен модел на топологията на мъжката и женската форма на главата и е установено, че е възможно да се унифицира с определена девиация форма на женски скалп с модел на мъжка форма или обратно;
6. Доказано е, че моделът на антропометричната форма позволява намиране на “компромисна еластична” контактна форма на маската между различните популации – много важна основа за създаване на “унисекс” и “унисайз” еластична система на маската.

Приложни приноси

1. Предложена е оптимална селекция на материал за основата на маската с възможности за дезинфекция и стерилизация, с добра еластичност и устойчивост, както и за прилагането на покритие или добавки с антибактериален ефект за подобряване на биосъвместимостта.
2. Обоснована е хипотеза за използване на безфилтърни системи с максимално ниско съпротивление на проходимост на обема въздух при вдишване и издишване.
3. Изградена е детайлна 3D геометрична концепция за *UV-C LED* модула с оптимално интегрирана контролна платка на модула с изводи за зареждане и херметизирано включване/изключване и индикатор за заряда на батерията, което е особено важно за влизане в заразени среди и планиране на възможното време за престой;
4. Изследван в резултат на симулациите е доказан оптимален път на въздушните потоци през корпуса на маската за постигане на максимална експозиция на *UV-C LED* светлината за третиране на преминаващия поток.
5. Въз основа на извършените числени симулации с валидираната проточна част е определена радиационната експозиция от минимум $47,88 \text{ J/m}^2$ за целия обем, което е по-високо от посочените в литературата изисквания за UVGI за постигане на LD90 (между 20 и 37 J/m^2) за SARS-CoV-2 и други корона и грипни вируси.
6. Експериментално е тествано присъединяване на двете части на корпуса без крепежи за висока функционалност и стерилизация при необходимост - постигнато е удобство при почистване чрез бързата и лесна разглобяемост на системата.
7. Чрез финален дизайн на маската, изработена със серийна технология е проведена анкета с потребители и са доказани планираните ергономични показатели (удобство на поставяне, носене, обзор и силово натоварване).
8. Предложена е иновативна концепция на захранване с включен светлинен мониторинг на оставащия заряд и с лесна и бърза замяна на батерията без инструменти, което е критично важно в експлоатационни условия на заразена среда.

SUMMARY

EXPLORING THE POSSIBILITIES FOR DEVELOPING PERSONAL PROTECTIVE EYEWEAR WITH AN INTEGRATED FUNCTION FOR ULTRAVIOLET (UV-C) STERILIZATION OF INHALED AIR MEng. Denitsa Ivanova

The dissertation work is focused on the field of research into the possibility of providing active protection through additional functions for UV-C sterilization of the air that is inhaled and exhaled in the conditions of infected environments. Thus, innovative personal protective equipment with an integrated mask with functions for effective ultraviolet (UV-C) sterilization of inhaled air are aimed at preventing COVID-19 and other viral and bacterial infections. An innovative approach is proposed that is effective in the development of complex multiphysical systems, through the application of which the development process can be accelerated, while at the same time increasing the level of credibility of the developed virtual and physical prototypes and their validation.

The presented work is focused on the field of modern mechanical engineering with a focus on the applicability of the technologies for virtual prototyping of complex multiphysical systems, which are difficult to assess at the design stage.

A methodology for developing a new product with a focus on ergonomics has been upgraded. Variant concepts of the sterilization system have been studied through validations of each generic concept and after stepwise modification of parts of the components, an optimized unified solution has been reached. Through multiphysics simulation, an optimal path of air flows through the mask body has been achieved, achieving a level of maximum exposure to UV-C LED light. An anthropometric model of the topology of the male and female head shape has been developed and it has been established that it is possible to unify, with a certain deviation, the shape of a female scalp with a model of a male shape or vice versa. It has been proven that the anthropometric shape model allows finding a “compromise elastic” contact shape of the mask between different populations – a very important basis for creating a “unisex” and “unisex” elastic mask system. As a result of the developed methodology three different and novelty concepts for electrical machines were developed first as virtual prototypes then validated with the help of physical prototypes. The high level of correspondence between the virtual and physical prototypes as well as the innovative designs of a novelty axial flux asynchronous machine and a highly efficient brushless synchronous machine are the basis for the introduction of new products by Arexim AD.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторът изказва специални благодарности на научните ръководители – проф. д-н инж. Николай Николов и доц. д-р инж. Явор Софронов, за безценната помощ и съвети по отношение на експерименталната част в настоящата работа, както и за съдействието при оформянето на дисертацията;

- На Фонд Научни изследване към МОН, Договор № КП-06-Н47/9
- „Изследване на възможностите за разработване на „АКТИВни“ Персонални защитни Очила с интегрирана маска с функции за ефективно ултравиолетово (UV-C) стерилизиране на вдишвания въздух – АКТИВ ПРО UV”
- На моите приятели – целия екип на лаборатория „CAD/CAM/CAE в индустрията“, ФИТ, ТУ-София, които непрекъснато ме подкрепяха и помагаша в хода на работата по труда;
- На проф. д-н инж. Георги Тодоров, чл.-кор. (декан на ФИТ) за подкрепата и съдействието на всяка стъпка от работата по дисертацията;