

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В БАКТЕРИЦИДНОМ МОДУЛЕ

Смирнов Д.А.

Научный руководитель: канд. техн. наук Смирнов Н.Н.

ИГЭУ им. В.И. Ленина, г. Иваново

Аннотация

В последнее время, в связи с ростом числа заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем и обладающих значительным эпидемическим масштабом, особенно актуальными являются вопросы, связанные с обеззараживанием воздуха. Смешивание потоков наружного и вытяжного воздуха в камерах смешения является одним из энергоэффективных мероприятий в системах вентиляции и кондиционирования. Воздух, поступающий из помещений с массовым пребыванием людей, обладает значительным количеством вредоносных микроорганизмов. Поэтому, целесообразно его обрабатывать ультрафиолетовым излучением в определенном диапазоне в бактерицидной ячейке перед подачей в камеру смешения. Следствиями вышеперечисленных мероприятий являются достижение энергосберегающего эффекта в системе вентиляции и выполнение требований по охране физического здоровья обслуживающего персонала. Однако, в процессе работы бактерицидные лампы выделяют большое количество тепловой энергии, в результате температура поверхности бактерицидных ламп в стационарном состоянии составляет 65-70°C. Добавление данного источника теплоты в систему вентиляции может увеличить температуру вытяжного воздуха. Также, дугообразные лампы, устанавливаемые внутри бактерицидной ячейки, являются местными сопротивлениями, вызывающими падение давления в модуле. В данной работе выполнено моделирование аэродинамических и теплообменных процессов, происходящих внутри вмонтированного бактерицидного модуля в существующую систему кондиционирования воздуха в помещении БЦУ АЭС ИГЭУ (А-169, А-170).

Ключевые слова: обеззараживание, моделирование, кондиционирование, вентиляция, бактерицидный модуль

MATHEMATICAL MODELING OF AERODYNAMIC AND HEAT EXCHANGE PROCESSES IN A BACTERICIDAL MODULE

Dmitrii Smirnov

Supervisor: Candidate of Technical Sciences Nikolai N. Smirnov

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, Ivanovo

Abstract

Recently, in connection with the growing number of airborne diseases that open up possibilities for epidemic proportions, issues related to air disinfection have become particularly relevant. Mixing of outside and exhaust air flows in mixing chambers is one of the energy-efficient measures in ventilation and air conditioning systems. Air coming from rooms with a large number of people has a significant number of harmful microorganisms. Therefore, it is advisable to treat it with ultraviolet radiation in a certain range in a bactericidal cell before feeding it into the mixing chamber. The consequences of the above measures are the achievement of an energy-saving effect in the ventilation system and the fulfillment of requirements for the protection of the physical health of service personnel.



However, during operation, bactericidal lamps emit a large amount of thermal energy, as a result of which the surface temperature of bactericidal lamps in a stationary state is 65-70°C. Adding this heat source to the ventilation system can increase the temperature of the exhaust air. Also, arc-shaped lamps installed inside the bactericidal cell are local resistances causing pressure drops in the module. In this work, aerodynamic and heat exchange processes occurring inside the built-in bactericidal module in the existing air conditioning system in the room of the main control room of the Ivanovo Nuclear Power Plant (A-169, A-170) are simulated.

Keywords: disinfection, modeling, conditioning, ventilation, bactericidal module

Введение

В случае многочисленных заболеваний работников промышленных предприятий, уменьшается количество производимой продукции, что приводит к дальнейшему снижению прибыли. Для сохранения физического здоровья персонала существует возможность установки бактерицидного модуля в систему кондиционирования воздуха. Однако, дугообразные лампы, установленные внутри обеззараживателя, оказывают влияние на параметры вытяжного воздуха. Для определения степени влияния необходимо провести имитационное моделирование теплообменных и аэродинамических процессов с использованием средств COMSOL Multiphysics.

Материалы и методы

Методология: в процессе исследования данного вопроса были использованы методы моделирования, сравнения и анализа.

Результаты

Для выбора бактерицидного модуля необходимо знать количество обрабатываемого воздуха в час, а также требуемую бактерицидную эффективность [1]. Помещение тренажера БЩУ относится к бытовым помещениям промышленных зданий с большим скоплением людей при длительном пребывании, поэтому требуемая бактерицидная эффективность должна составлять не менее 90%.

В воздуховоде приточной вентиляции невозможно установить бактерицидный модуль в связи с его геометрическими размерами. Так как обеззараживатель планируется установить в систему вытяжной вентиляции, необходимо знать расход вытяжного воздуха.

Для этого были составлены балансы по теплоте и влаге, и с использованием $h-d$ диаграммы построен процесс обработки воздуха в холодный период года в рабочее время. Построения представлены на рис. 1.

Расход приточного воздуха, необходимого для организации схемы воздухообмена «сверху-вниз» составил: $L^p = 5386,6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Для борьбы с потерями теплоты на нагрев инфильтрационного воздуха, количество вытяжного воздуха на один воздухообмен меньше, чем количество приточного [2].

Расход вытяжного воздуха, удаляемого из помещения тренажера БЩУ может быть определен как:

$$L_{\text{выт}} = L^p - \Delta L, \quad (1)$$

где ΔL – разность между расходами приточного и вытяжного воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$:

$$\Delta L = n_{\text{в}} \cdot V_{\text{в}} = 1 \cdot 598 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где $n_{\text{в}}$ – кратность воздухообмена, принимаемая равной $n_{\text{в}} = 1 \text{ ч}^{-1}$; $V_{\text{в}}$ – объем воздуха в помещении БЩУ, $V_{\text{в}} = 598 \text{ м}^3$.



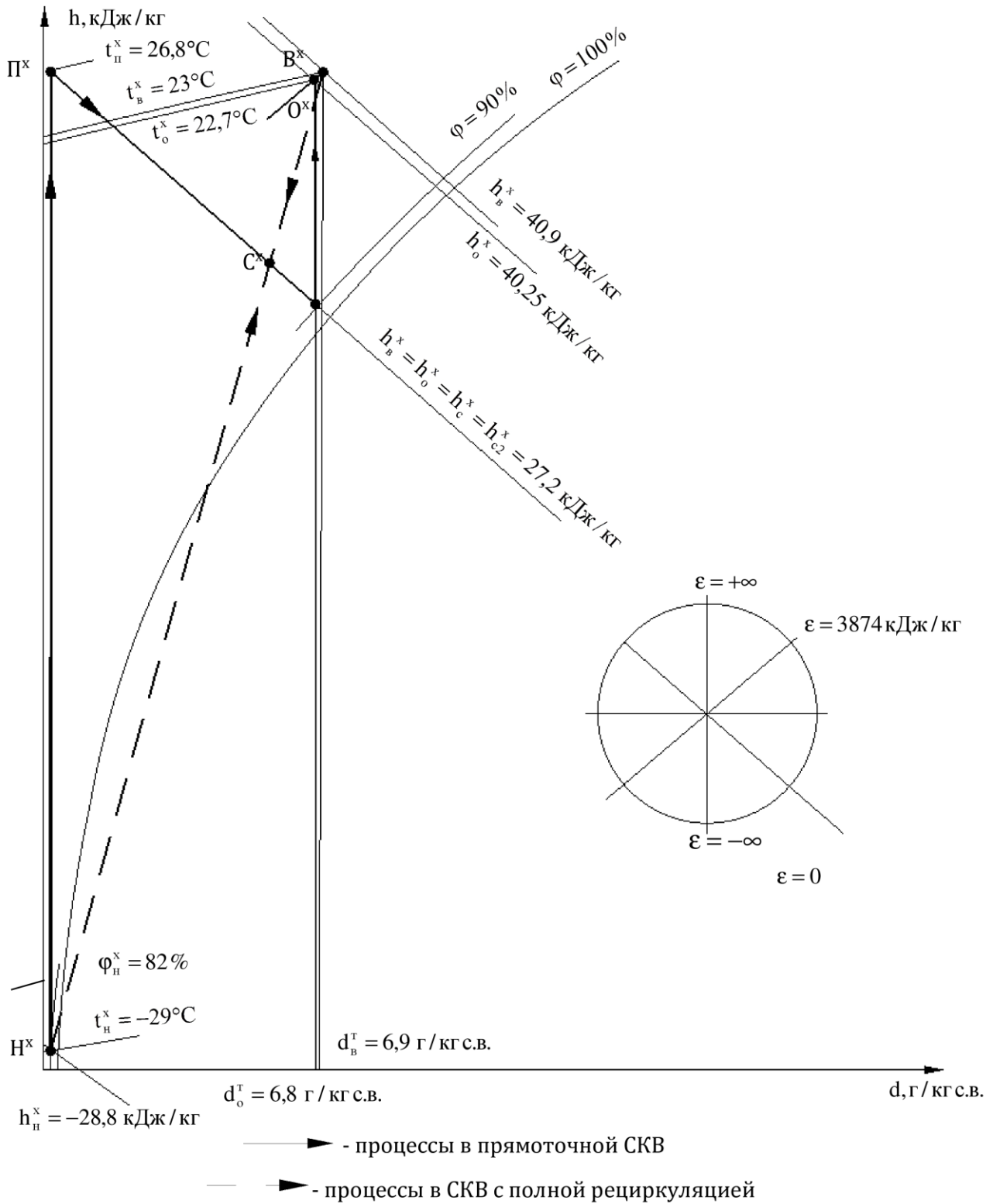


Рис. 1 Процесс обработки воздуха в холодный период года в рабочее время



Таким образом

$$L_{\text{выт}} = 5386,6 - 598 = 4788,6 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

В качестве бактерицидной ячейки была выбрана модель «Мегалит-5». Данный модуль способен дезинфицировать 6300 кубометров воздуха в час с бактерицидной эффективностью 90%. Модуль представлен на рис. 2.

Бактерицидная ячейка серии «Мегалит-5» имеет следующие характеристики:

- а) производительность обеззараживания воздуха при бактерицидной эффективности 90% составляет 6300 м³/ч;
- б) электрическая мощность – 1500 Вт;
- в) мощность бактерицидного УФ излучения – 450 Вт;
- г) срок службы амальгамных ламп – 16000 часов;
- д) масса бактерицидного модуля – 32,5 кг;
- е) габаритные размеры:
 - высота – 740 мм;
 - ширина – 915 мм;
 - длина – 1000 мм;
- ж) корпус секции из нержавеющей стали [1].

В модуле находится:

- 1) 5 амальгамных бактерицидных ламп типа АНЦ 300/144-П2 с электрической мощностью по 300 Вт каждая;
- 2) 5 ЭПРА;
- 3) панель индикации;
- 4) настенный пульт управления;
- 5) контроллер перегрева;
- 6) таймер наработки времени ламп.

На рис. 2 представлена геометрия лампы АНЦ 300/144-П2.

Имитационное моделирование аэродинамических и теплообменных процессов было проведено в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

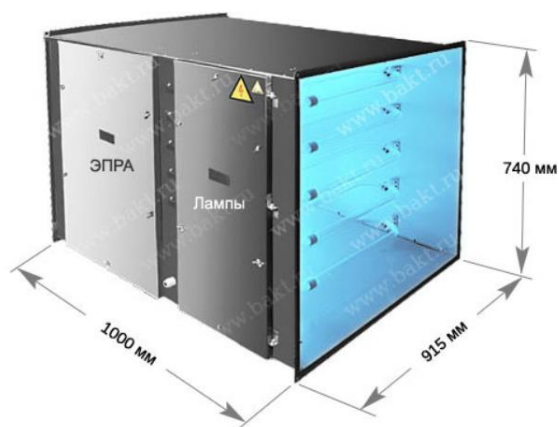


Рис. 2. Бактерицидная ячейка «Мегалит-5»



Рис. 3. Бактерицидная лампа типа АНЦ 300/144-П2

Расчетной областью или геометрией объекта является модель бактерицидной ячейки, для которой проводится численное моделирование [3]. Геометрия обеззараживателя в соответствии с реальными размерами построена в 3D с использованием доступных в COMSOL Multiphysics геометрических объектов и инструментов:

- 1) блок (block);
- 2) прямая линия (line segment);



- 3) кривая Безье (quadratic Bezier);
- 4) рабочий план (work plane);
- 5) вращение (sweep);
- 6) цилиндр (cylinder);
- 7) выдавливание (extrude).

Корпус обеззараживателя создан объектом блок. Прямые линии и кривые Безье использованы для дальнейшего создания бактерицидных ламп с помощью функции sweep. Рабочий план использован для изображения трапеций с целью их дальнейшего выдавливания для создания электронных пускорегулирующих аппаратов (ЭПРА).

Созданная геометрия бактерицидного модуля представлена на рис. 4.

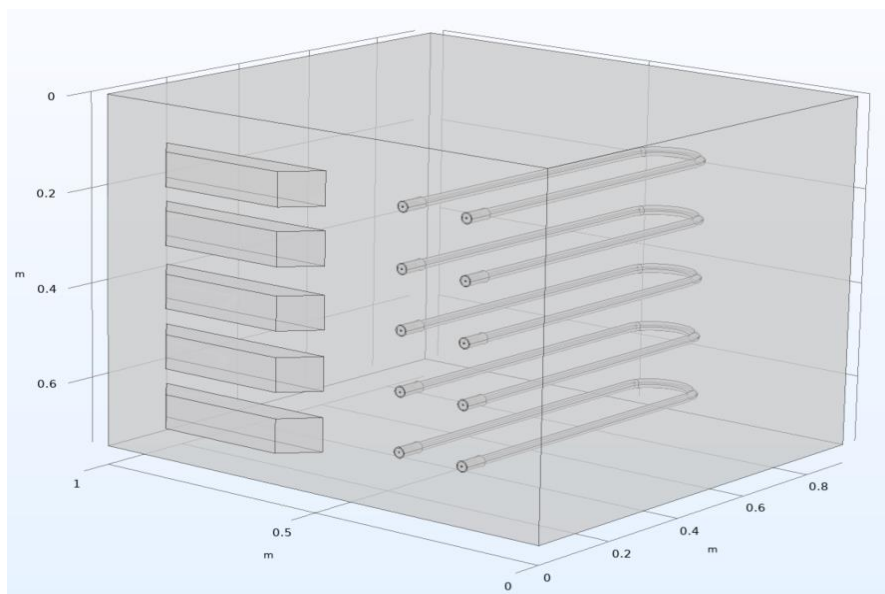


Рис. 4. Геометрия бактерицидного модуля

В модели обеззараживателя воздуха были заданы следующие материалы:

- воздух;
- кварцевое стекло (колба лампы);
- керамика (цоколь лампы);
- нержавеющая сталь (корпус модуля).

При моделировании были выбраны следующие модули:

- Turbulent flow, k-ε (турбулентный поток);
- Heat transfer in fluids (теплообмен в текучих средах).

На входе (inlet, inflow) в обеззараживатель заданы следующие начальные условия:

- температура $T = 23^{\circ}\text{C}$ (температура удаляемого из помещения воздуха);
- скорость, определенная из уравнения неразрывности потока [4]:

$$v = \frac{L}{F} = \frac{4877,6}{0,74 \cdot 0,5 \cdot 3600} = 3,59 \text{ м/с.} \quad (3)$$

На выходе из обеззараживателя заданы следующие начальные условия:

- скорость, равная скорости на входе в бактерицидный модуль $v = 3,59 \text{ м/с}$;
- избыточное давление на выходе, создаваемое вытяжным вентилятором, $p = -30 \text{ Па}$.

Для бактерицидных ламп заданы следующие условия:

- количество тепловой энергии, выделяемое одной лампой, $Q = 150 \text{ Вт}$;
- степень черноты поверхности лампы, для кварцевого стекла $\varepsilon = 0,93$.



На рис. 5 представлены поля скоростей и линии токов воздуха. В среднем, скорость воздуха на поверхности ламп составила $v = 0,65$ м/с. На рис. 6 представлены поля давлений. Среднее значение давления на входе в обеззараживатель составило $p_{вх} = -27,65$ Па.

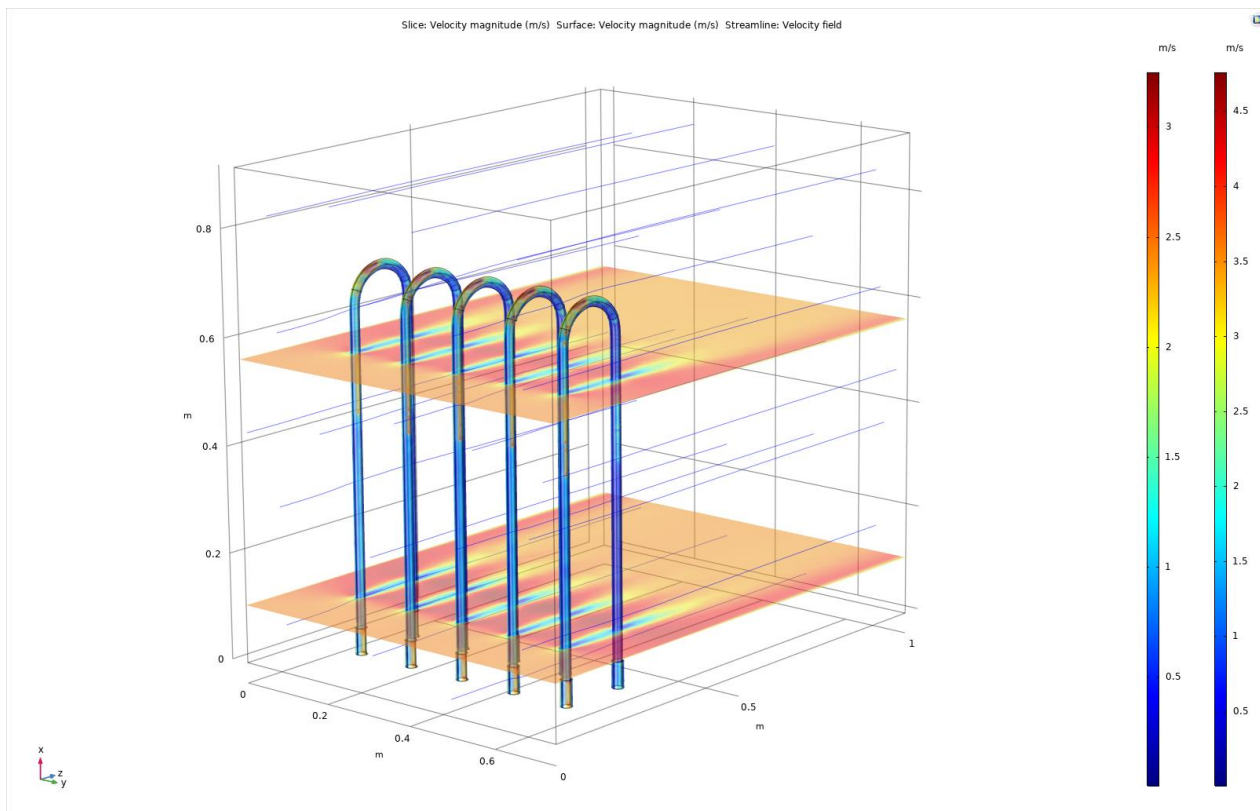


Рис. 5. Поля скоростей и линии токов воздуха в обеззараживателе

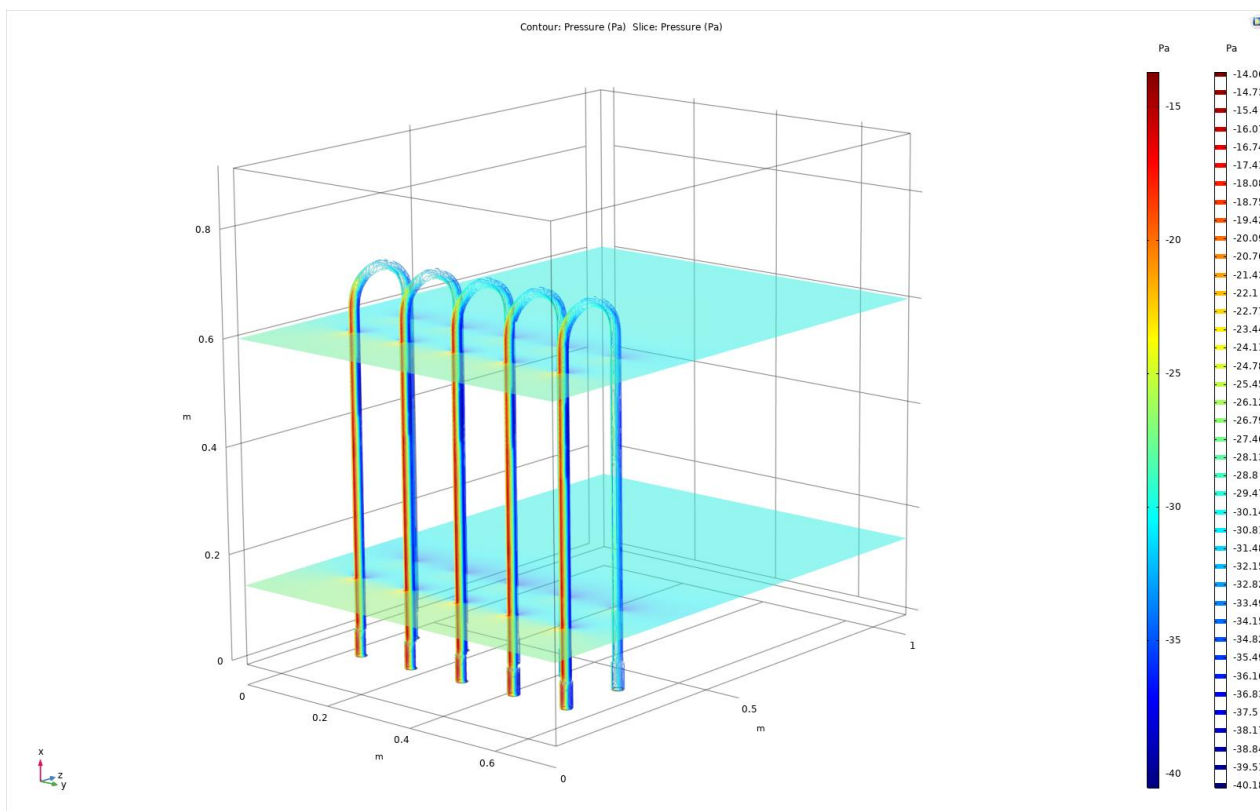


Рис. 6. Поля давлений



Определим полное падение давления в модуле:

$$\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}} = -27,65 - (-30) = 2,35 \text{ Па} \quad (4)$$

Падение давления на трение составляет:

$$\Delta p_{\text{тр}} = 0,34 \text{ Па.}$$

Таким образом, потери давления на местное сопротивление составляют:

$$\Delta p_{\text{мс}} = 2,35 - 0,34 = 2,01 \text{ Па.}$$

Среднее значение давления на поверхности ламп составило -31,52 Па.
На рис. 7 представлены поля температур.

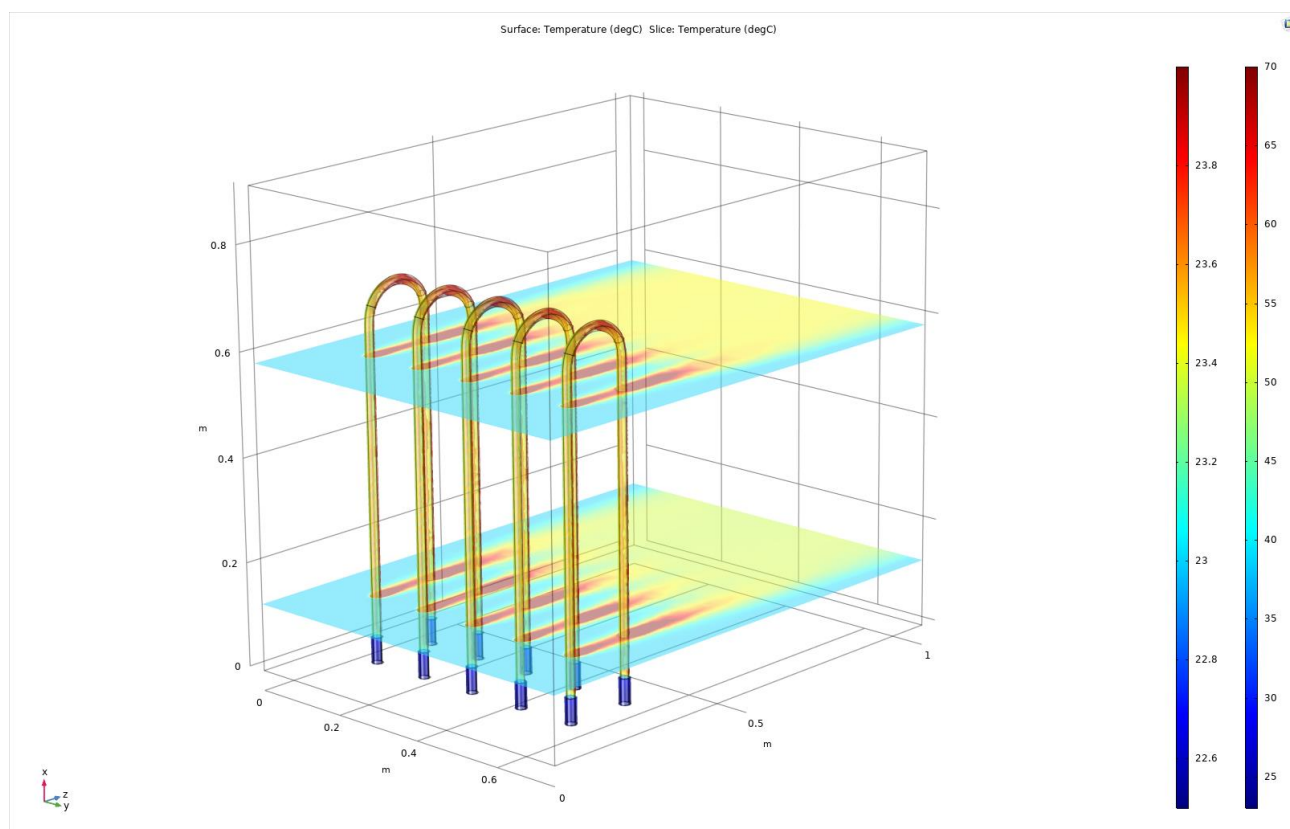


Рис. 7. Температурные поля

Среднее значение температуры на поверхности ламп составляет $T_{\text{пов}} = 58,04^\circ\text{C}$ (лампы охлаждаются потоком вытяжного воздуха). Среднее значение температуры на выходе из обеззараживателя составило $T_{\text{вых}} = 23,25^\circ\text{C}$.

Таким образом, разница температур составляет:

$$\Delta T = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}} = 23,25 - 23 = 0,25 \text{ }^\circ\text{C.} \quad (5)$$

Следствием увеличения температуры вытяжного воздуха является смещение точки смешения потоков, что вызовет пренебрежительно малое увеличение расхода воды на увлажнение воздуха в камере орошения.



Выводы

В ходе выполнения данной научной работы с помощью средств COMSOL Multiphysics было проведено моделирование процессов в бактерицидном модуле и установлено, что бактерицидные лампы оказывают малое влияние на параметры удаляемого из помещения воздуха.

Библиографический список

1. Мегалит (каталог) [Сайт]: Долгопрудный: ООО НПО «ЛИТ». URL: <https://lit-uv.ru/catalog/products/vozdukh-i-poverkhnosti/megalit-section/> (дата обращения 01.06.2025).
2. **Пыжов В.К.** Энергетические системы обеспечения жизни и деятельности человека: Учебник. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – 524 с.
3. **Парфенов Г.И., Смирнов Н.Н., Пыжов В.К.** Повышение эффективности работы систем по поддержанию динамического микроклимата в зданиях с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон // Энергосбережение - теория и практика. – М.: Изд. дом МЭИ, 2018. – С. 113-120. EDN: [YSPHX](#).
4. **Бухмиров В.В.** Тепломассообмен: Учебник в 2-х томах. – Т. 1. – Иваново: ИГЭУ, 2023. – 364 с. EDN: [NIJZMF](#)

Сведения об авторах

1. Смирнов Николай Николаевич, канд. техн. наук, кафедра промышленной теплоэнергетики (ПТЭ), ИГЭУ, SPIN-код: [5001-3261](#).
2. Смирнов Дмитрий Александрович, студент.

Ссылки для цитирования

Смирнов Д.А. Математическое моделирование аэродинамических и теплообменных процессов в бактерицидном модуле // Энергетические системы. 2025. – № 2. – С. 67-74.

Smirnov, D. (2025). Mathematical modeling of aerodynamic and heat exchange processes in a bactericidal module. *Energy Systems*, 2, 67-74. <https://doi.org/10.34031/es.2025.2.07>

