

УДК 543.251:628.8-403

Березин А.А., студент МП-40

Березина Н.В., доцент

Рябышенков А.С., доцент

Национальный исследовательский университет «Московский институт
электронной техники»
г. Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Микро- и нанотехнологии представляют собой совокупность методов и технических средств (оборудования, инструментов, используемых материалов), применяемых для исследования, разработки и производства сверхминиатюрных приборов и устройств, элементы которых имеют микро- и нанометровые размеры. Это означает, что сложность инженерных систем чистых помещений (ЧП) для производства таких изделий непрерывно возрастает, и к воздушной среде предъявляются все более высокие требования.

Микрозагрязнения проникают в ЧП из окружающей среды, выделяются технологическим оборудованием (ТО), веществами, используемыми в технологическом процессе, а также производственным персоналом. В микроэлектронике на технологический процесс приходится 25% микрозагрязнений, на оборудование — 25%, технологические газы и химикаты — 8%, воздух — 8%, персонал — 35%, причем влияние персонала снижается с внедрением изолирующих технологий.

Наружный покров кожи человека состоит из множества пластинок с размерами примерно в единицы и десятки микрометров. Они постоянно отделяются с поверхности кожи таким образом, что каждые несколько дней наружный кожный покров полностью обновляется. Отделившись, они дробятся на более мелкие частицы. В спокойном, неподвижном состоянии человек выделяет в минуту примерно $2 \cdot 10^5$ частиц с размерами 0,5 мкм и более. Скорость отделения частиц и бактерий в воздухе помещений прямо пропорциональна активности персонала. Оператор, не производящий движений, может генерировать примерно 10^5 частиц размером более 0,5 мкм в минуту. При движении головы, рук и тела генерируется около 10^6 таких же частиц в минуту. Во время ходьбы оператор выделяет уже до $5 \cdot 10^6$ частиц размером более 0,5 мкм в минуту. Даже небольшие движения и трение тела об спецодежду приводят к резкому увеличению сброса частиц до нескольких миллионов в минуту. При интенсивном движении человек выделяет примерно 10^7 частиц в минуту. В среднем человек выделяет около

10 г частиц в день. На два миллиона частиц приходится около 160 частиц, на которых находятся микроорганизмы.

Спецодежда для ЧП должна служить специфическим барьером, а скорее - фильтром, который, в конечном счете, определяет чистоту воздуха в функционирующем ЧП. В зависимости от класса чистоты в пододежном пространстве должны задерживаться 60-95% частиц определенного размера, которые генерирует человек.

Частицы, отделившись от человека, подхватываются постоянно восходящим вверх естественным конвекционным потоком воздуха, окружающим человека. Далее они распространяются по всему объему помещения и оседают на оборудовании, материалах, продукте, ограждающих конструкциях, других работниках и т.д.

Поэтому в чистом помещении не допускается легкомысленное поведение; движения работающих не должны быть порывистыми, все движения персонала должны быть целенаправленными и осмысленными. Быстрая ходьба и резкие движения не допускаются, поскольку они возмущают воздушные потоки, приводят к повышенному выделению частиц и попаданию их в воздух.

Для персонала регламентируются направление передвижений, темп и характер жестов, положение тела по отношению к рабочему месту и т. п. Необходим контроль соблюдения протоколов для минимизации нежелательного воздействия персонала на выпускаемую продукцию или процессы, проводимые в чистом помещении. Уровень компетентности персонала, определяемый знанием механизмов пылегенерации и умением следовать спланированному алгоритму работы, может значительно повысить эффективность ЧП.

Поскольку полностью вывести человека из производственного процесса представляется возможным далеко не всегда, для оптимизации алгоритма производственных процедур необходимо четко представлять, как параметры ЧПП (ламинарность потока, скорость движения воздуха, кратность воздухообмена) влияют на процесс перемещения и распределения воздушных загрязнений [1].

Целью представленной работы является выбор путем математического моделирования оптимальной скорости приточного воздуха на рабочем месте в ЧП, при которой частицы загрязнений, генерируемые оператором, не успевают осесть на рабочей поверхности и полностью удаляются системой кондиционирования воздуха.

С этой целью было исследовано модель помещения – полностью укомплектованное ЧП класса 4 ИСО с размерами 4*3*2,7 м. В помещении установлено технологическое оборудование с размерами 1*1*1 м и манекены, имитирующие персонал. Манекен представляет собой

объединение двух параллелепипедов: $0,3 \times 0,2 \times 1,7$ м (тело) и $0,5 \times 0,1 \times 0,7$ (руки) (рисунок 1). Моделируется дыхание персонала и движение руками, причем второе имитируется посредством периодического перемещения воздуха через условные поверхности рук.

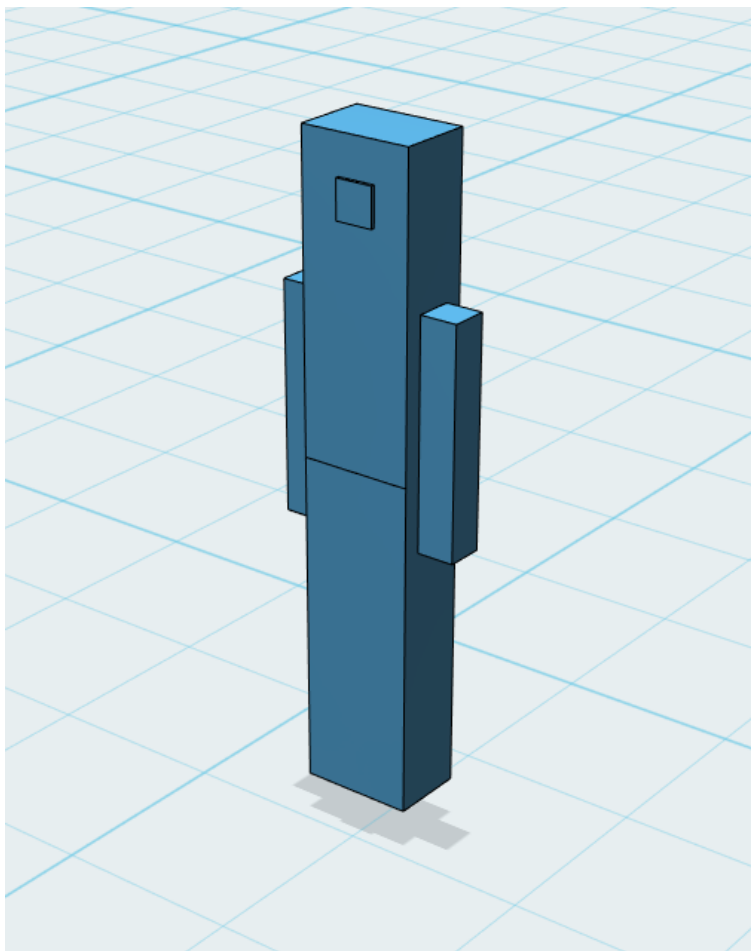


Рисунок 1 - Манекен – модель оператора ЧП

Физические параметры воздуха стандартные. Параметры пыли:
плотность $\rho = 100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, кинематическая вязкость $\eta = 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

Предполагается, что в ЧП доминирует вертикальный ламинарный поток.

В качестве граничных условий выбираем: потолок ЧП: входная область для воздуха с вертикальной скоростью $(-v)$ (исследования проводились для значений $v = 0,1; 0,35; 0,45; 0,5; 0,6$ м/с) и концентрацией загрязняющих частиц 10^5 частиц/м³ (в соответствии со стандартом 4 ИСО [2]). Фальшпол ЧП: выходная область для воздуха. «Лица» манекенов: входная область для воздуха с переменной скоростью $v = -0,05 \cdot \cos(t)$ и

концентрацией загрязняющих частиц 10^6 частиц/м³. Передние поверхности рук центрального манекена: входная область для воздуха с переменной скоростью $v = -\cos(t)$ и концентрацией загрязняющих частиц 10^6 ч/м³. Для остальных поверхностей принимаем условия отсутствия скольжения и нулевое значение скорости [3].

Для описания ламинарной модели движения воздуха был использован *метод объёма жидкости* — численный метод аппроксимации свободной поверхности. Он относится к классу методов Эйлера, характеризующихся сеткой, которая является стационарной или движется согласно изменяющейся форме поверхности по заданному закону. Алгоритм отслеживает форму и положение поверхности в целом, но не является автономным. Используем систему уравнений Навье-Стокса [4]:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5.11)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial w}{\partial t} = 0.$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} = 0$$

где p — давление воздуха; u, v, w — составляющие скоростей воздушного потока.

Уравнения системы (1) описывают движение потоков и должны быть решены по отдельности, что характерно для всех других алгоритмов адвекции.

Основой метода объёма жидкости является так называемая дробная функция C — интеграл характеристических функций жидкости в конечном объёме (назовем его ячейкой). Если ячейка пуста (нет жидкости), C равна нулю; если ячейка полная, то $C=1$; для промежуточных состояний $0 < C < 1$. ∇C является вектором нормали к поверхности жидкости.

Дробная функция линейна и, пока жидкость перемещается со скоростью

$$v = (u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)),$$

в трёхмерном пространстве \mathbf{R}^3 , каждая частица находится в заданной фазе и не меняет ее. Производная дробной функции должна быть равна нулю:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = v * \nabla C + \nabla(C(1 - C)U_r) = 0,$$

Последнее слагаемое проявляется только на поверхности и «сжимает» эту область с помощью искусственного поля U_r [5].

С использованием программного пакета «SimScale» проведено компьютерное моделирование ЧП класса 4 ИСО с ламинарной моделью течения воздушного потока и с различными скоростями воздуха (0,1 м/с; 0,35 м/с; 0,45 м/с; 0,5 м/с; 0,6 м/с). В результате получено распределение частиц пыли на поверхностях объектов описанного помещения (рисунок 2-б).

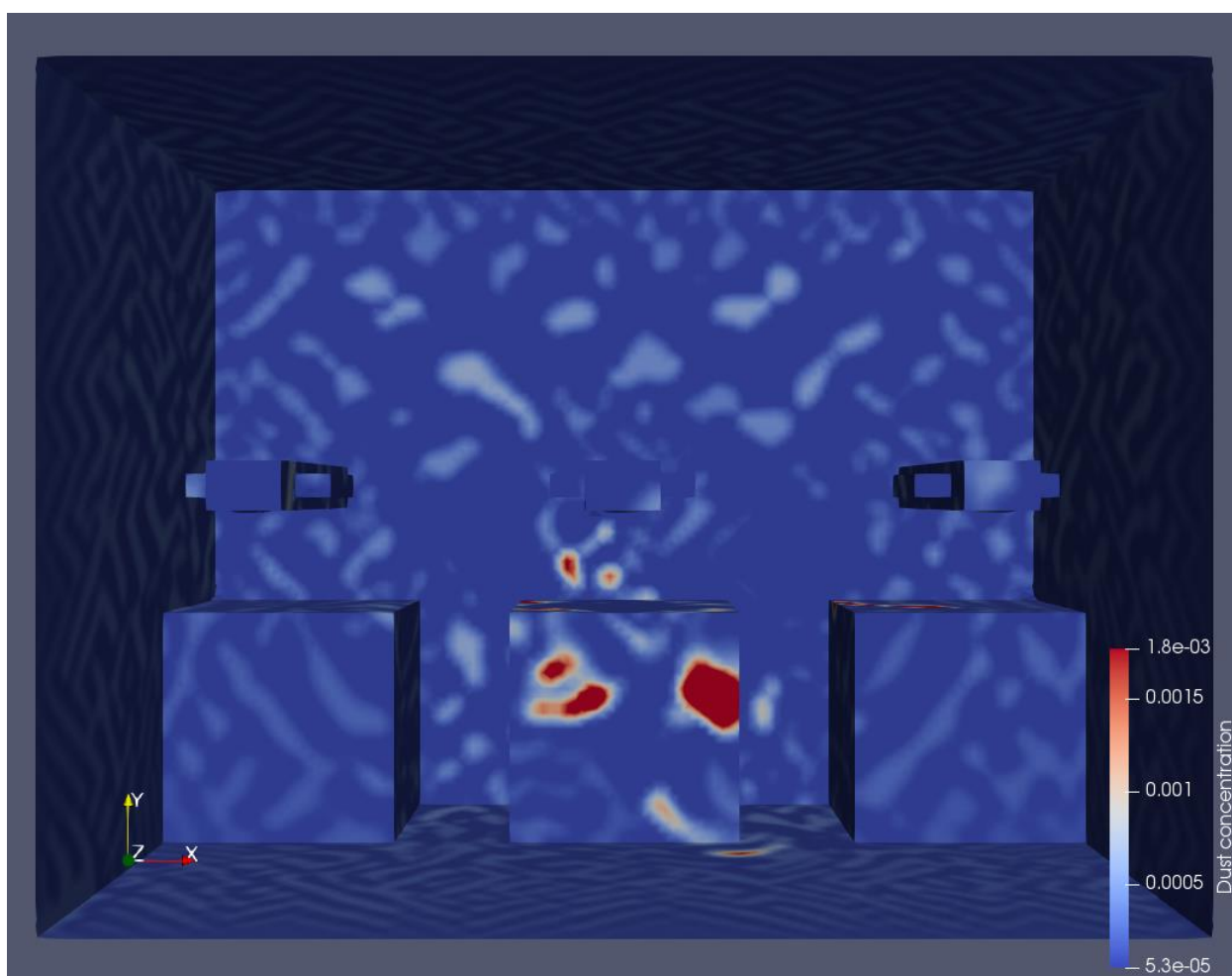


Рисунок 2. Распределение пылевых частиц на поверхностях ТУ, персонала и ФП ЧП при скорости потока $v = 0,1 \frac{м}{с}$, вид сверху

Как можно видеть из рисунка 2, при скорости воздушного потока $v = 0,1 \frac{м}{с}$ подавляющее количество частиц остается в пределах рабочего места.

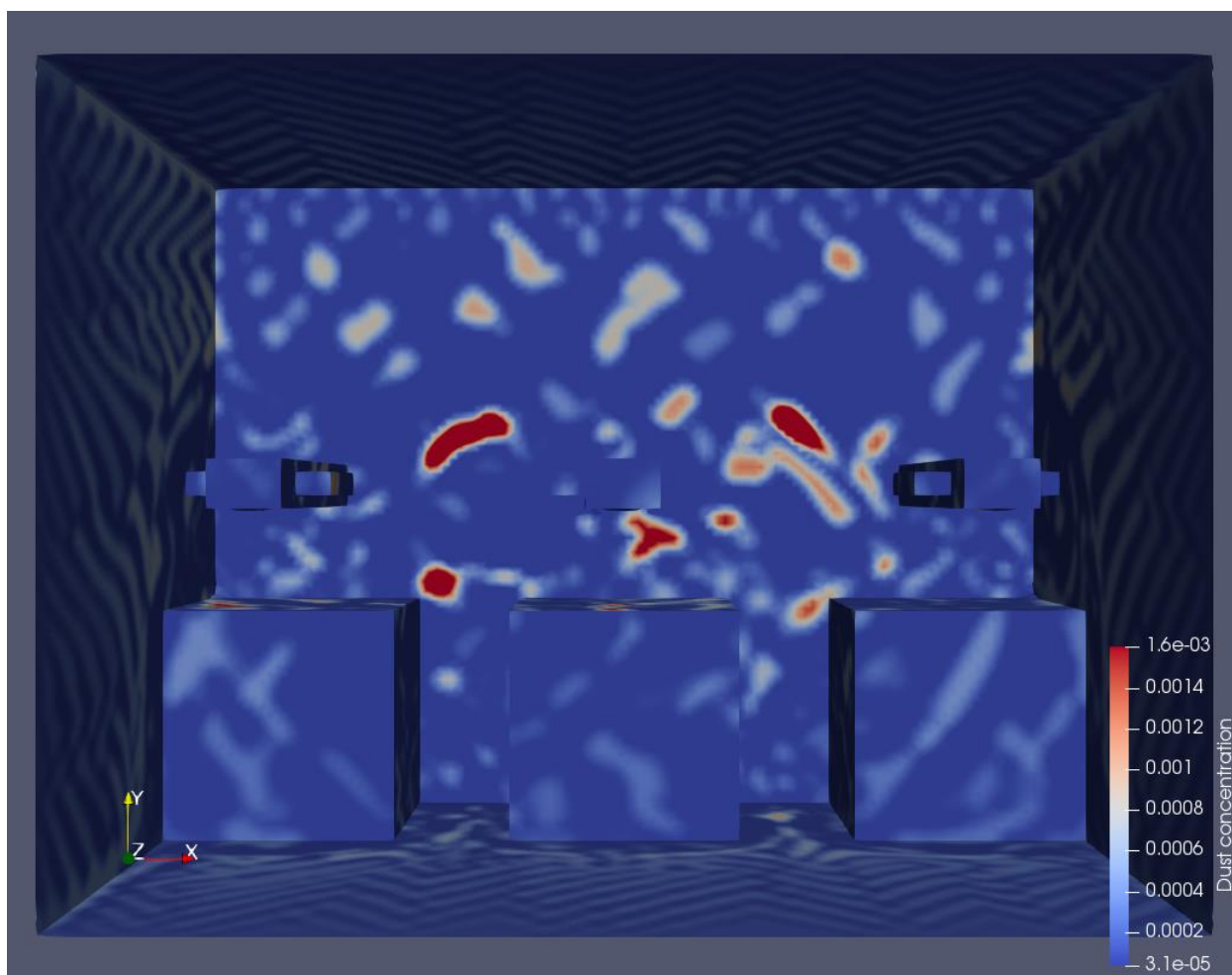


Рисунок 3. Распределение пылевых частиц на поверхностях ТО, персонала и ФП ЧП при скорости потока $v = 0,35 \frac{M}{c}$, вид сверху

На рисунке 3 основная масса частиц покинула область рабочей поверхности, но распределилась по поверхности фальшпола.

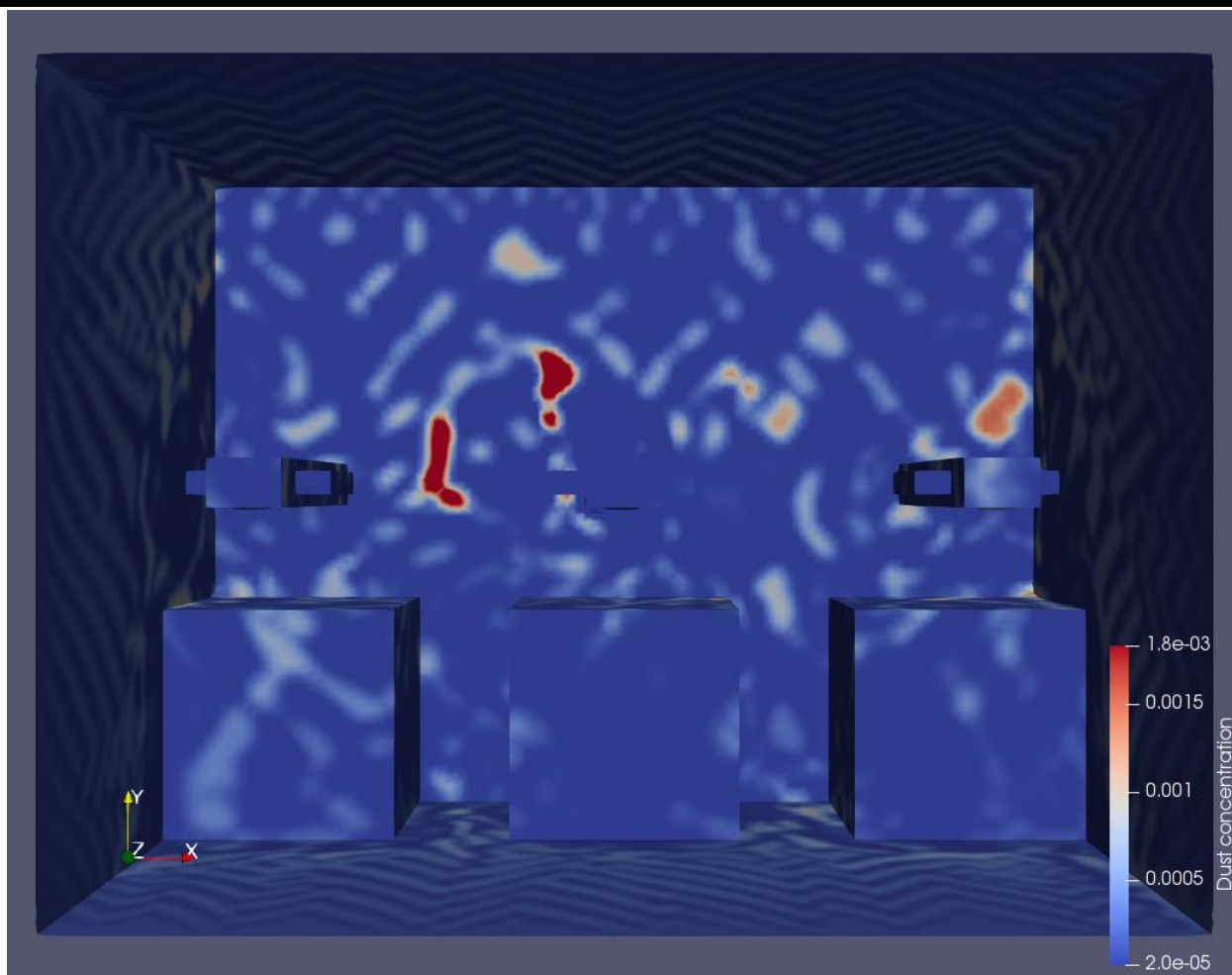


Рисунок 4. Распределение пылевых частиц на поверхностях ТО, персонала и ФП ЧП при скорости потока $v = 0,45 \frac{м}{с}$, вид сверху

На рисунке 4 концентрация частиц на рабочем месте не превышает допустимого значения [6].

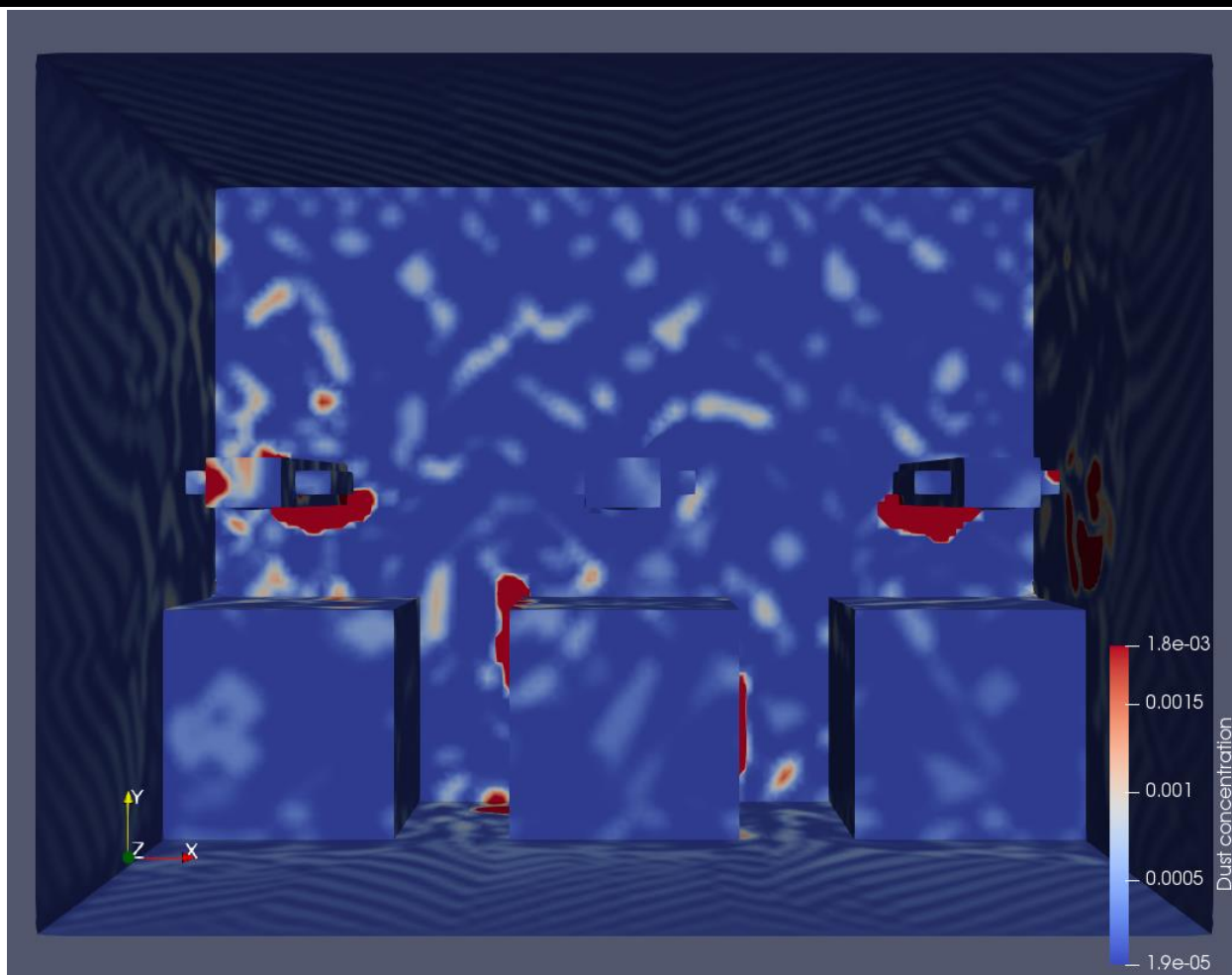


Рисунок 5. Распределение пылевых частиц на поверхностях ТО, персонала и ФП ЧП при скорости потока $v = 0,5 \frac{M}{c}$, вид сверху.

На рисунке 5 видно, что при скорости потока, превышающей $v = 0,45 \frac{M}{c}$, не успевшие покинуть помещение частицы перераспределяются по фальшполу, возвращаясь в том числе и к рабочему месту, что повышает вероятность их захвата обувью и спецодеждой оператора.

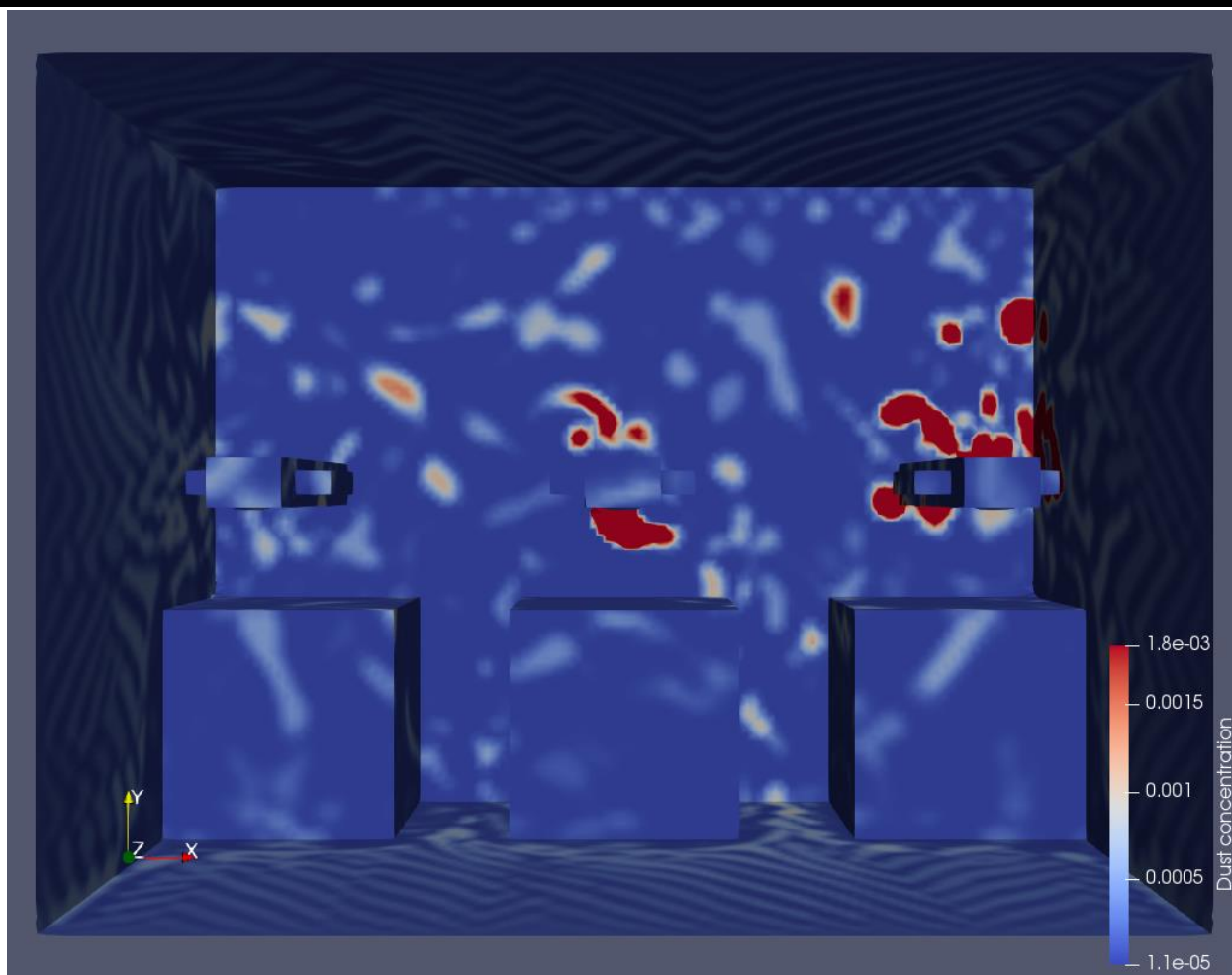


Рисунок 6. Распределение пылевых частиц на поверхностях ТО, персонала и ФП ЧП при скорости потока $v = 0,6 \frac{м}{с}$, вид сверху.

Как показано на рисунке 6, большая часть частиц оседает на спецодежде и обуви операторов.

В результате компьютерного моделирования воздушных потоков в ЧП, было установлено, что концентрация частиц на высоте 1 м от фальшпола при оптимальной скорости воздушного потока 0.45 м/с соответствует стандарту [6] класса 4 ИСО и не превышает 10^5 ч/м³, то есть данная скорость является оптимальной. При отклонении скорости потока от данной величины концентрация пылевых частиц достигает 10^7 частиц/м³, выходя за рамки стандартных значений.

Список литературы

1. Чистые помещения. Под ред. *А. Е. Федотова*. – М.: Изд-во Асником, 2003.
2. ГОСТ Р ИСО 14644-1: «Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды».
3. *Уайт В.* Проектирование чистых помещений. – М.: Клинрум, 2004.
4. *Прандтль Л.* Гидроаэромеханика. – М.: - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – С. 147.
5. *Chen S., Raad D.B.* The surface marker and micro-cell method. - International Journal For Numerical Methods in Fluids, 1997.

ISO 14644-1:2015 // Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle