

Курындин Егор Андреевич

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

**CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЧАСТИЦ
ПОЛИДИСПЕРСНОГО ПРИПОЙНОГО АЭРОЗОЛЯ И
ОБОСНОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОЙ ПАЙКИ**

Аннотация. Методом вычислительной гидродинамики (CFD) в среде SolidWorks Flow Simulation выполнено моделирование воздушных течений и траекторий полидисперсных частиц припойного шлака в рабочей камере установки селективной пайки. Выявлено, что штатная вытяжная вентиляция не обеспечивает улавливания частиц диаметром менее 10 мкм, которые переносятся конвективными потоками в зону дыхания оператора. На основе моделирования разработана конструкция двухбортового щелевого отсоса, адаптированного к подвижному тиглю; определены его аэродинамические параметры. Численный эксперимент с внедрённым отсосом показал, что все расчётные фракции частиц захватываются непосредственно в источнике и не покидают камеру. Предложенное решение позволяет прогнозируемо снизить концентрацию свинца ниже уровня ПДК_{сс.рс} и перевести условия труда из вредного класса 3.1 в допустимый класс 2.0.

Ключевые слова: селективная пайка, CFD-моделирование, припойный шлак, бортовой отсос, вентиляция, траектории частиц.

Abstract. Computational fluid dynamics (CFD) in SolidWorks Flow Simulation was used to simulate air flows and trajectories of polydisperse solder slag particles in the working chamber of a selective soldering unit. It was found that the standard exhaust ventilation system fails to capture particles smaller than 10 μm in

diameter, which are carried by convective currents into the operator's breathing zone. Based on the simulation, a double-sided slotted exhaust system adapted to a moving crucible was designed, and its aerodynamic parameters were determined. A numerical experiment with the integrated exhaust system demonstrated that all calculated particle fractions are captured directly at the source and do not leave the chamber. The proposed solution allows for predictable reduction of lead concentrations below the MACss.rs level and upgrades working conditions from hazardous class 3.1 to permissible class 2.0.

Keywords: selective soldering, CFD-modeling, solder dross, side-board ventilation exhaust, ventilation, particle's trajectory.

Введение

Местная вытяжная вентиляция (МВВ) является основным техническим средством нормализации воздушной среды на участках пайки [1]. Однако практика эксплуатации установок селективной пайки показывает, что их штатные вентиляционные системы не всегда эффективны в отношении мелкодисперсных аэрозолей [2]. Основными причинами недостаточной эффективности являются значительное удаление всасывающих отверстий от источника, наличие аэродинамических теней от элементов конструкции и периодическое нарушение герметичности камеры при техническом обслуживании [3]. Вследствие этого частицы размером менее 10 мкм, не обладающие заметной инерцией, увлекаются восходящими конвективными потоками и выносятся в зону дыхания оператора.

Экспериментальные замеры, выполненные авторами на установке AST SEL-31D, подтвердили, что концентрация свинца в воздухе рабочей зоны оператора в 2,64 раза превышает ПДКсс.рс. Одним из перспективных инструментов для анализа сложных аэродинамических течений и дисперсных потоков является вычислительная гидродинамика (CFD). Ее применение позволяет визуализировать траектории частиц, выявить застойные зоны и

обосновать параметры локальных отсосов без проведения дорогостоящих натурных экспериментов [7].

Методика CFD-моделирования

Построение геометрической модели.

Модель установки создана в системе SolidWorks и импортирована в модуль Flow Simulation. В расчётной области учтены все значимые внутренние узлы (рис. 1): два тигля с расплавом припоя, сопла с кольцами подачи азота, конвейер, модули верхнего и нижнего инфракрасного нагрева, штатные вытяжные отверстия. Элементы, не оказывающие существенного влияния на аэродинамику (кабель-каналы, оси приводов), исключены для снижения вычислительной сложности.

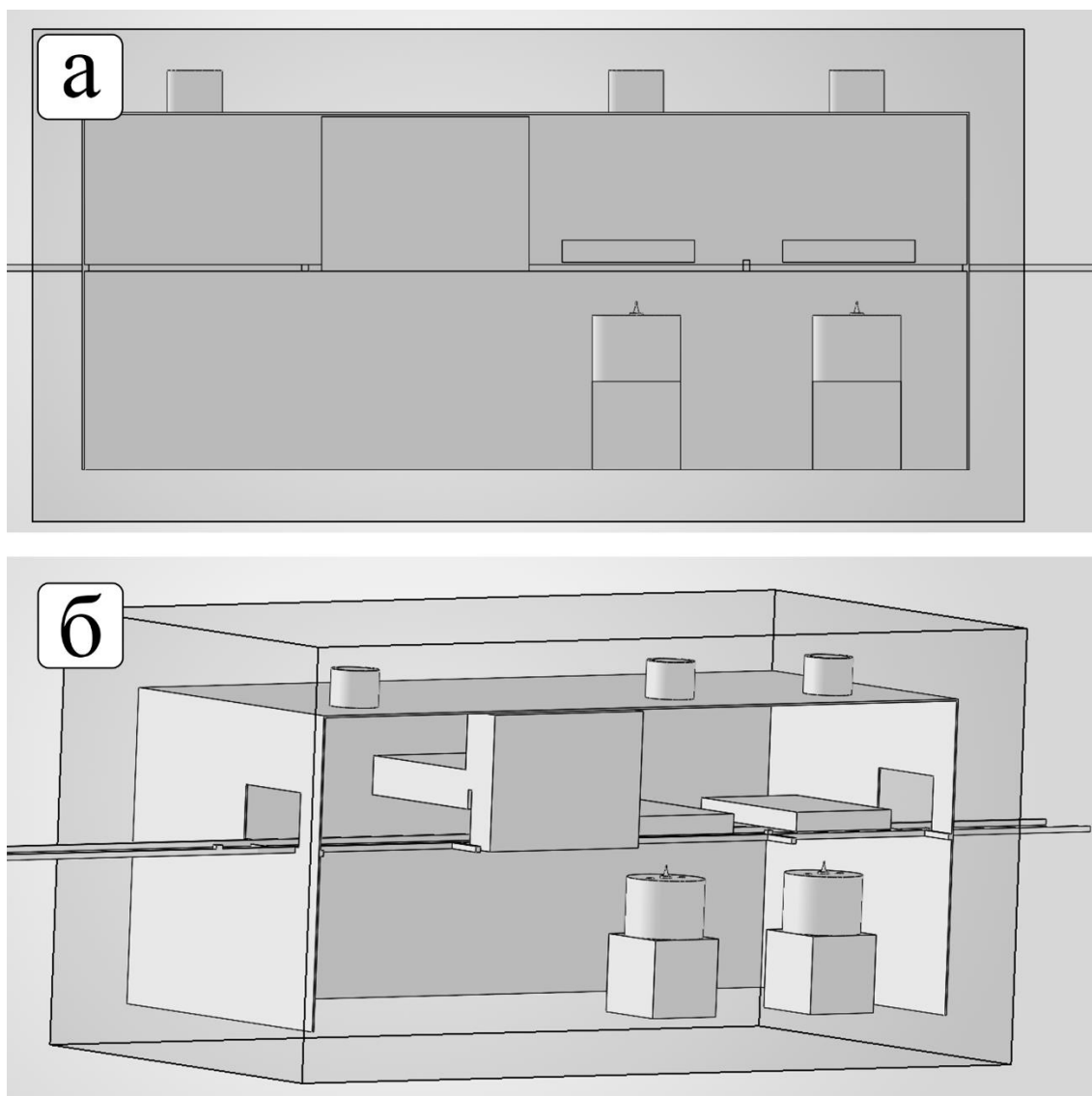


Рис. 1. – CFD-модель установки AST SEL-31D: а – вид спереди, б – вид в диметрической проекции

Граничные условия и параметры моделирования.

Задача решалась в стационарной постановке для воздушной среды (несжимаемая жидкость) с учётом тепловых эффектов. Турбулентность описывалась k-ε моделью. Граничные условия приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Граничные условия CFD-модели

Элемент	Параметр	Значение
Стенки тиглей	Температура	260 °C
	Поступательно движение вдоль оси x	0,5 м/с
Нижние грани модулей нагрева	Температура	120 °C
Внутренние грани колец для подачи азота	Скорость на входе	1,4 м/с
Штатные вытяжные отверстия	Скорость на выходе	2,9 м/с

Температура была измерена с помощью термопары Lutron-902C.

Скорость азота, а также скорость воздуха на выходе штатной вытяжки измерены с помощью анемометра LINI-T UT363.

Моделирование поведения частиц.

Частицы впрыскивались из двух зон: (1) отверстия в крышках тиглей для добавления припоя, где происходит интенсивное накопление шлака, и (2) верхняя грань сопла, где при контакте расплава с платой наблюдаются «микродетонации» флюса, приводящие к разбрызгиванию припоя. Массовый расход частиц определён на основе балансовых расчётов и составил 112 мг/ч для одного модуля, плотность частицы была определена как плотность используемого припоя марки ПОС-61 и составляет 8500 кг/м³. Для анализа дисперсной динамики рассматривались четыре характерные фракции (табл. 2).

Таблица 2 – Характеристики моделируемых частиц

Фракция	Диаметр, мкм	Примечание
Крупные частиц	100	Быстро оседают, малая дальность переноса.
Средние частицы	10	Умеренная седиментация, влияние инерции при переносе.
Мелкие частицы	1	Следуют течению воздушных потоков, не седиментируют.
Субмикронные частицы	0,1	В движение вносит вклад броуновская диффузия, однако при воздействии тепловых воздушных потоков конвекция доминирует.

Результаты моделирования воздушных потоков и поведения частиц при работе штатной вытяжной вентиляции

На рис. 2 представлены траектории воздушных потоков в камере при работающей штатной вытяжке. Анализ поля скоростей выявляет обширные застойные зоны в углах камеры и над конвейером, а также выраженные вихревые структуры вблизи подвижных тиглей.

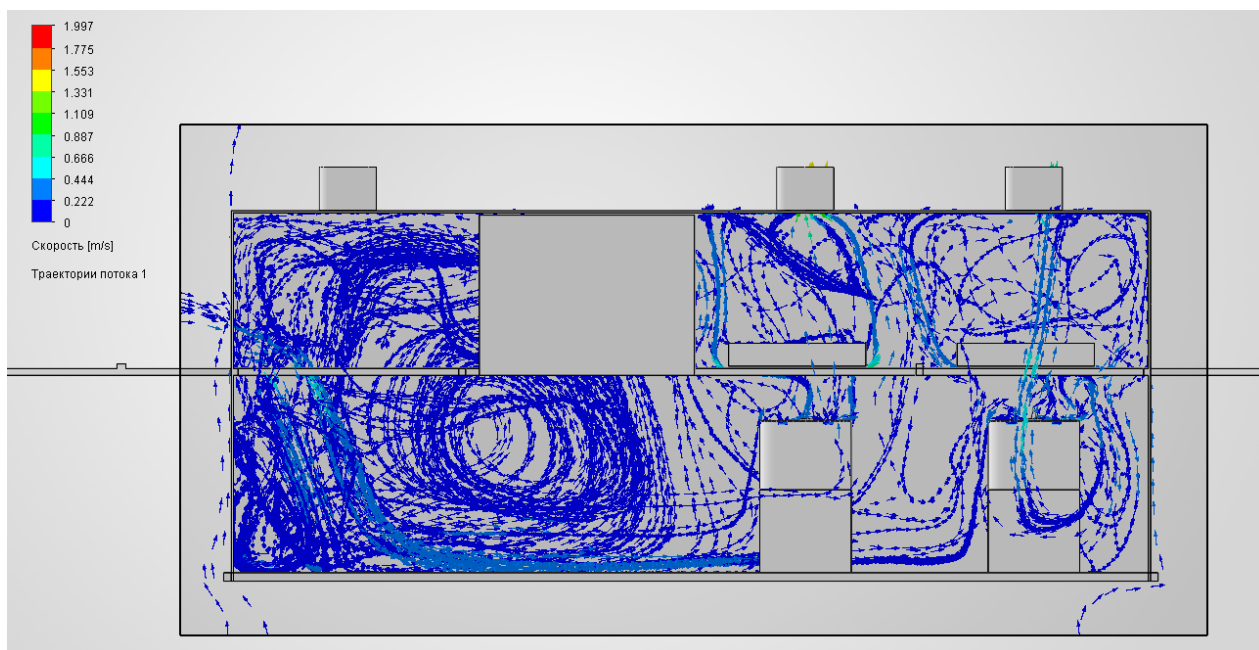


Рис. 2 – Траектории воздушного потока в камере при штатной вентиляции

Траектории частиц различных фракций показаны на рис. 3.

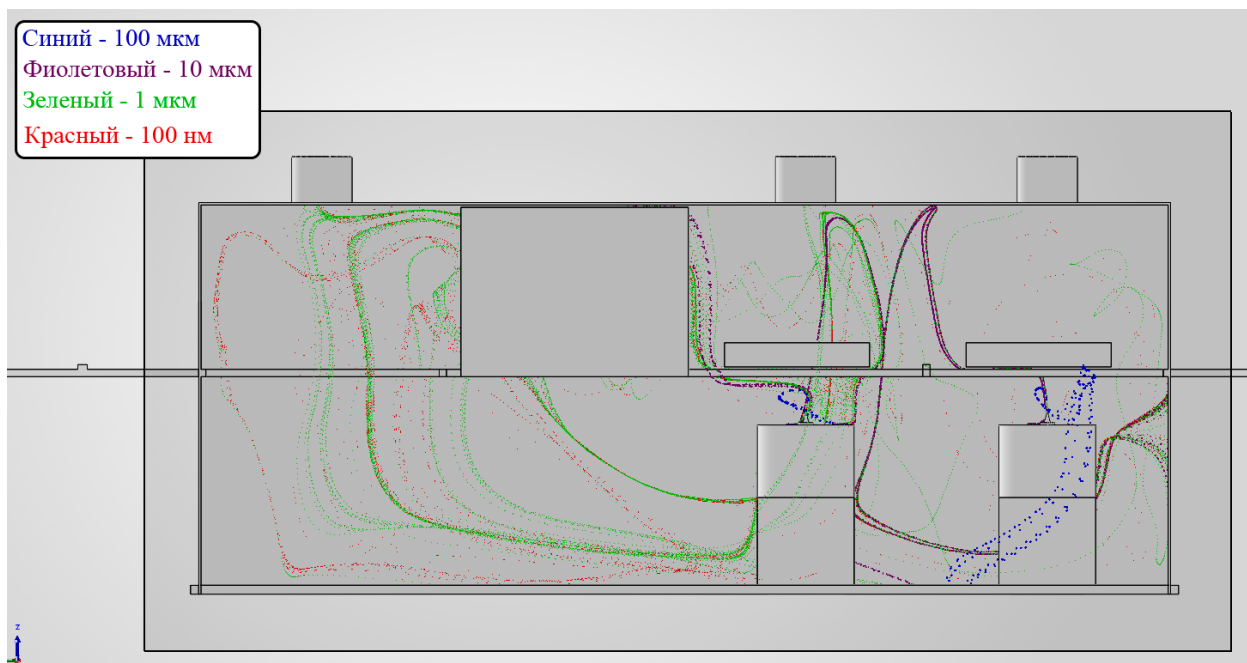


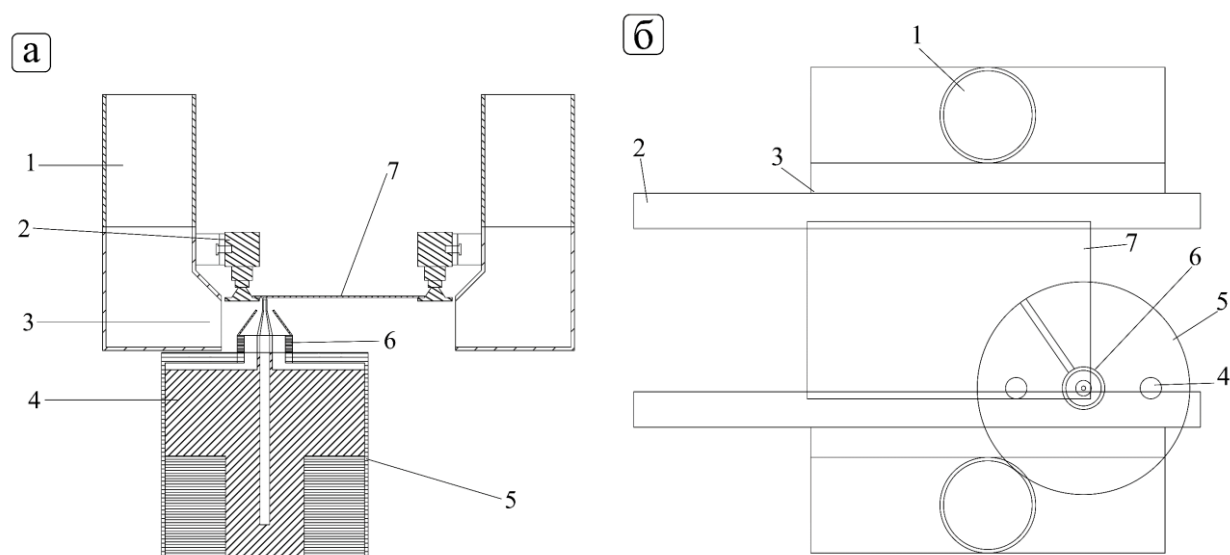
Рис. 3 – Траектории частиц при штатной вентиляции: где различные фракции отмечены соответствующими цветами.

Крупные частицы (100 мкм) интенсивно седиментируют: в течение 1–2 с они оседают на поверхности конвейера и стенках камеры, не достигая

верхней зоны. Средние частицы (10 мкм) движутся по баллистическим траекториям, частично увлекаются конвективными потоками. Мелкие (1 мкм) и субмикронные (0,1 мкм) частицы практически не седиментируют, следуют линиям тока и выходят из камеры, формируя устойчивый аэрозольный фон в рабочем помещении. Именно эти фракции ответственны за зафиксированное превышение ПДК свинца.

Разработка и аэродинамический расчет местного вытяжного устройства

Анализ результатов моделирования штатной системы показал, что эффективное улавливание аэрозоля возможно только при размещении всасывающих отверстий в непосредственной близости от источника: на расстоянии не более 50–70 мм. С учётом геометрии камеры рассматриваемой установки селективной пайки, наличия подвижного тигля и ограниченного пространства была предложена конструкция двухбортового щелевого отсоса (рис. 4).



1 – вытяжные патрубки; 2 – конвейер; 3 – вытяжная щель; 4 – расплав припоя в ванне; 5 – стенки ванны; 6 – кольцо для подачи азота; 7 – печатная плата

Рис. 4 – Конструктивная схема двухбортового щелевого отсоса: а – вид сбоку в разрезе, б – вид сверху

Каждый модуль пайки оснащается двумя симметричными щелевыми камерами, закреплёнными на боковинах конвейера. Щели длиной $l = 0,5$ м и шириной $b = 0,06$ м располагаются на расстоянии $x = 0,05$ м от крайнего бокового положения тигля. Подключение к вытяжной системе осуществляется через патрубки диаметром 125 мм.

Для эффективного захвата частиц необходимо, чтобы скорость воздуха v_x , создаваемая отсосом на уровне источника, как минимум вдвое превышала скорость восходящего конвективного потока $v_{\text{конв}}$ [4, 5]. По данным прямых измерений анемометром, $v_{\text{конв}}$ на уровне конвейера составляет 0,4 м/с. Принимаем $v_x = 0,8$ м/с.

Средняя скорость в плоскости щели v_0 определяется по эмпирической формуле Далла Валле для щелевого отверстия [4]:

$$v_0 = v_x \cdot \left[1 + 7.7 \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Подставив значения, получим

$$v_0 = 0,8 \cdot \left[1 + 7.7 \left(\frac{0,05}{0,07} \right)^2 \right] = 3,94 \text{ м/с}$$

Объемный расход воздуха через одну щель можно найти по формуле (2)

$$L = 3600 \cdot v_0 \cdot F_0 = 3600 \cdot v_x \cdot \left[1 + 7.7 \left(\frac{x}{b} \right)^2 \right] \cdot l \cdot b, \quad (2)$$

где F_0 – площадь всасывающего отверстия, м^2 .

$$L = 3600 \cdot v_0 \cdot F_0 = 3600 \cdot 3,94 \cdot 0,5 \cdot 0,06 = 425,52, \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Тогда объемный расход воздуха для четырех щелей $n = 4$ с учетом коэффициента запаса на неплотности $K_{\text{зап}} = 1,2$ и тепловое давление будет равно

$$L_{\text{расч}} = K_{\text{зап}} \cdot n \cdot L = 1,2 \cdot 4 \cdot 425,52 = 2042,5, \text{ м}^3/\text{ч}$$

Режим течения в щели характеризуется числом Рейнольдса. Гидравлический диаметр $d_{\text{г}}$ для прямоугольного канала:

$$d_{\text{г}} = \frac{2lb}{l+b} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 0,06}{0,5 + 0,06} = 0,107$$

Тогда

$$Re = \frac{3,94 \cdot 0,107}{1,6 \cdot 10^{-5}} \approx 26384$$

Поскольку $Re > 10^4$, течение в щели является устойчиво турбулентным, что способствует эффективному перемешиванию и захвату частиц аэрозоля [6].

Результаты CFD-моделирования с внедренным отсосом

После интеграции двухбортового отсоса в CFD-модель выполнено повторное моделирование. Траектории воздушных потоков представлены на рис. 5.

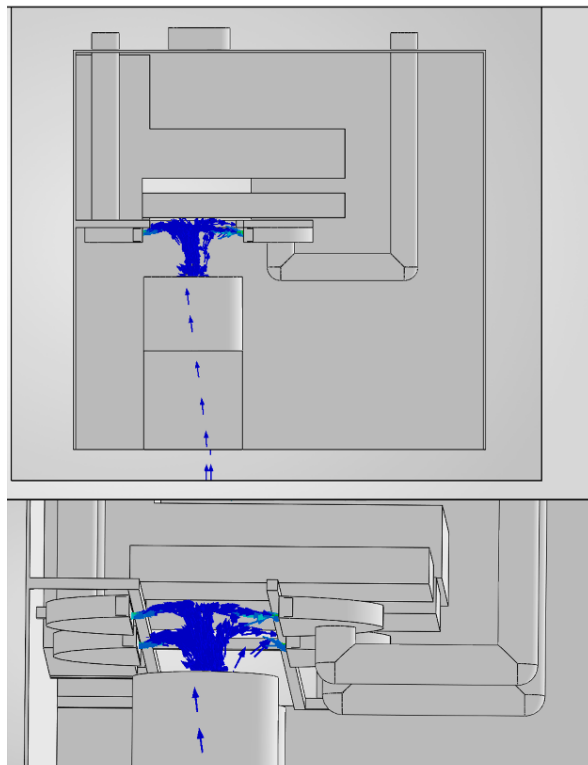


Рис. 5 – Траектории воздушных потоков в камере с внедрённым
двухбортовым отсосом

Поле скоростей качественно изменяется: всасывающие факелы формируют устойчивый встречный поток, перехватывающий восходящие конвективные струи от нагретых поверхностей. Застойные зоны практически отсутствуют.

Траектории частиц различных фракций показаны на рис. 6 - 8

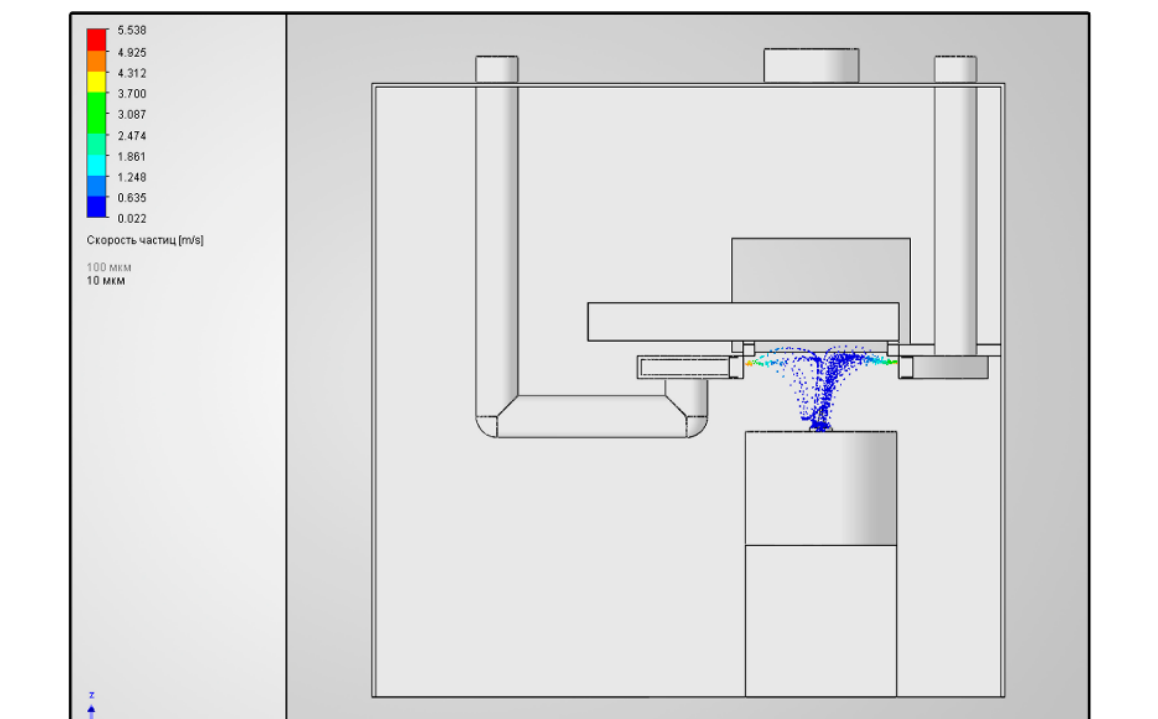


Рис. 6 – Траектории частиц размером 10 мкм

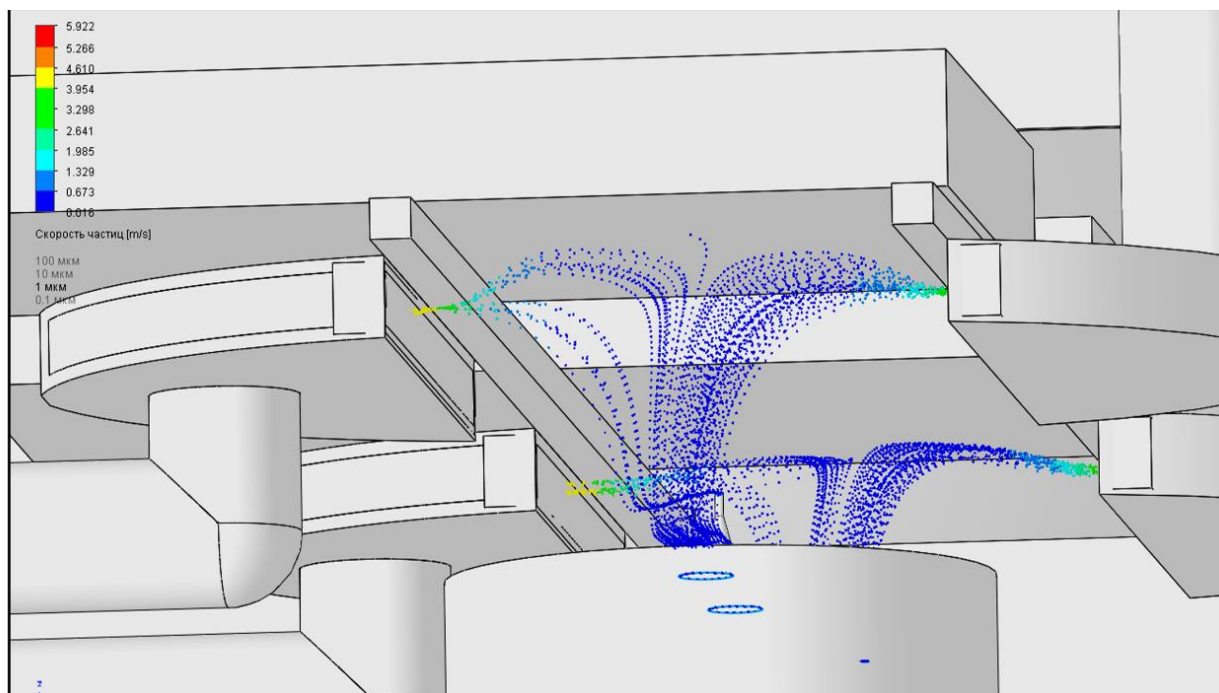


Рис. 7 – Траектории частиц размером 1 мкм

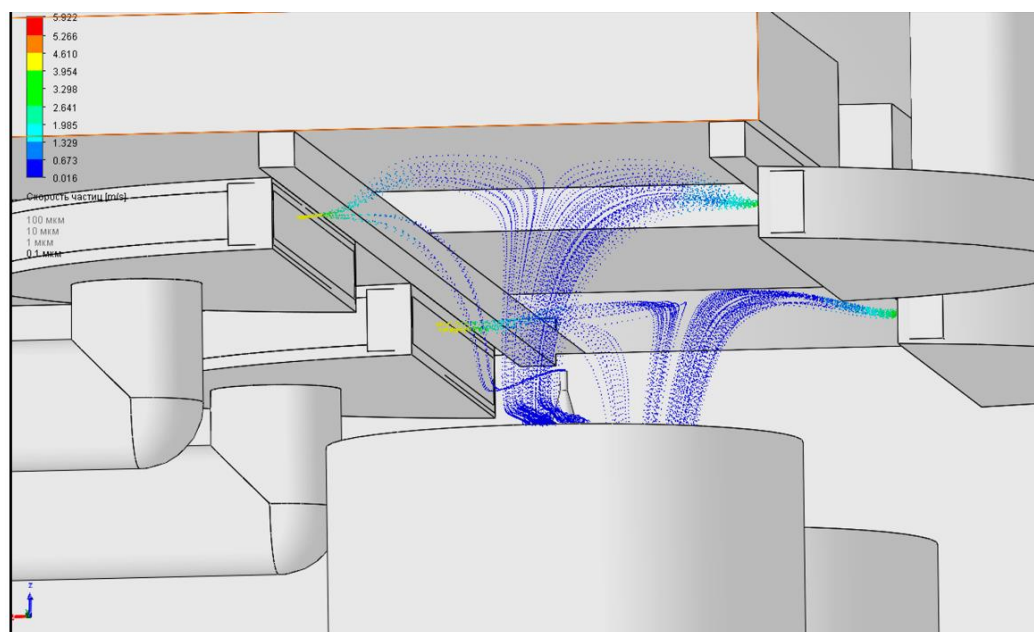


Рис. 8 – Траектории частиц размером 0,1 мкм

Частицы всех фракций, включая субмикронные, захватываются непосредственно вблизи источника. Даже наиболее «лёгкие» частицы 0,1 мкм не достигают верхней границы камеры, полностью удаляясь в вытяжные патрубки. Исключение составляют лишь единичные крупные частицы (100

мкм), которые, как и ранее, седиментируют, но при этом оседают в непосредственной близости от тигля, не покидая зоны действия отсоса.

Оценка эффективности

Прогнозное снижение массовой концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны можно оценить, пересчитав балансовые значения с учётом увеличения общего расхода удаляемого воздуха. Исходный расход штатной вытяжки $V = 375 \text{ м}^3/\text{ч}$; суммарный расход после модернизации $V_{\text{сумм}} = 375 + 2042 = 2417 \text{ м}^3/\text{ч}$. Концентрация обратно пропорциональна расходу, следовательно, ожидаемые значения составят:

$$C_{Pb} = \frac{0,132 \cdot 375}{2417,5} = 0,020, \text{ мг/м}^3$$

$$C_{SnO_2} = \frac{0,206 \cdot 375}{2417,5} = 0,032, \text{ мг/м}^3$$

Полученная концентрация свинца в 2,5 раза ниже ПДКсс.рс ($0,05 \text{ мг/м}^3$), что соответствует допустимому классу условий труда 2.0 [9, 10]. Таким образом, внедрение двухбортowego щелевого отсоса обеспечивает снижение концентрации свинца в 6,6 раза и полное устранение превышения гигиенического норматива.

Заключение

CFD-моделирование штатной системы вентиляции установки выявило, что частицы припойного шлака размером менее 10 мкм не улавливаются и выносятся в зону дыхания оператора, что подтверждает данные натурных замеров [7, 8].

Разработана конструкция двухбортowego щелевого отсоса, адаптированная к подвижному тиглю. Определены его геометрические параметры: длина щели 0,5 м, ширина 0,06 м. Установлены режимные характеристики: скорость в щели 4 м/с, суммарный расход 2042 м³/ч.

Численное моделирование подтвердило, что предложенная система формирует устойчивое поле скоростей, перехватывает конвективные потоки и обеспечивает захват частиц всех фракций непосредственно в источнике. Прогнозируемое снижение концентрации свинца до 0,020 мг/м³ (в 6,6 раз) переводит условия труда из вредного класса 3.1 в допустимый класс 2.0 [9, 10].

Список литературы

1. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. — Москва: Стандартинформ, 2021.
2. ГОСТ 12.3.003-86. Система стандартов безопасности труда. Работы электросварочные. Требования безопасности. — Москва: Изд-во стандартов, 1986.
3. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. — Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2016.
4. Талиев, В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Талиев. — Москва: Стройиздат, 1979. — 295 с.
5. Калинушкин, М.П. Вентиляторные установки / М.П. Калинушкин. — Москва: Высшая школа, 1962. — 294 с.
6. Логачев, И.Н. Аспирационные установки для очистки воздуха от пыли / И.Н. Логачев, К.И. Логачев. — Москва: Машиностроение, 2010. — 320 с.
7. ГОСТ Р 54597-2011. Воздух рабочей зоны. Ультрадисперсные аэрозоли, аэрозоли наночастиц и наноструктурированных частиц. Определение характеристик и оценка воздействия при вдыхании. — М.: Стандартинформ, 2012.
8. ГОСТ Р ИСО 13138-2014. Согласованные нормативы при отборе проб для оценки осаждения частиц аэрозоля в дыхательных путях человека. — Москва: Стандартинформ, 2015.

9. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. — Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021.

10. Р 2.2.3969-23. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. — Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2023.