

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет»
Министерства образования и науки РФ

На правах рукописи

ИЛЬИН Егор Александрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО РЕЖИМА ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

**Специальность: 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор В.М. Уляшева

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОРГАНИЗАЦИЯ ВОЗДУХООБМЕНА ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ.....	12
1.1 Описание технологии фармацевтических производств.....	12
1.1.1 Особенности производства лекарственных форм	12
1.1.2 Производство твёрдых лекарственных форм.....	14
1.2 Снижение рисков образования перекрестной контаминации в процессе гранулирования сухих порошков	17
1.2.1 Методы борьбы с запыленностью воздуха помещений.....	22
1.2.2 Применение местной вытяжной вентиляции для предотвращения перекрестной контаминации в процессе гранулирования сухих порошков.....	30
1.2.3 Приточные струи в пространстве чистых помещений.....	34
1.2.4 Нормативные требования при проектировании систем вентиляции и кондиционирования чистых помещений фармацевтических производств.....	41
1.2.5 Классификация чистых помещений фармацевтических производств .	43
1.3 Методы исследований воздушной среды чистых помещений фармацевтических производств.....	47
1.4 Выводы	47
2 ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИТОЧНОЙ СТРУИ И ГРАНУЛЯТОРА	49
2.1 Использование уравнения Навье-Стокса для задач численного моделирования распространения воздушного потока в пространстве чистого помещения	50
2.2 Лагранжева и Эйлера многофазность и их применимость к задачам расчета взвешенных частиц чистых помещений	51
2.3 Численное моделирование взаимодействия приточной струи и гранулятора .	55
2.3.1 Построение геометрии модуля чистого помещения в программном комплексе SolidWorks	55

2.3.2 Построение и обоснование выбора расчетной сетки методом сеточной сходимости.....	57
2.3.3 Выбор физической модели для решения задачи «взаимодействия приточной струи с фармацевтическим гранулятором».....	59
2.3.4 Задание граничных условий	60
2.4 Результаты численного моделирования взаимодействия приточной струи и гранулятора	62
2.5 Выводы	72
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИТОЧНОЙ СТРУИ И ГРАНУЛЯТОРА	74
3.1 Постановка задачи проведения экспериментальных исследований натекания приточной струи на гранулятор.....	74
3.2 Описание экспериментальной установки.....	77
3.3 Планирование эксперимента.....	80
3.3.1 Характеристики средств измерений скорости движения воздуха и концентрации взвешенных частиц	80
3.3.2 Методика измерений скорости движения воздуха.....	85
3.3.3 Результаты измерений скорости движения воздуха	87
3.3.4 Планирование эксперимента.....	93
3.3.5 Методика измерений концентрации взвешенных частиц.....	97
3.3.6 Результаты измерений концентрации взвешенных частиц	98
3.4 Выводы	106
4 АНАЛИЗ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДУШНОГО РЕЖИМА ЧИСТОГО ПОМЕЩЕНИЯ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	107
4.1 Анализ влияния приточной струи на формирование воздушного режима чистого помещения фармацевтического производства.....	108
4.2 Оценка эффективности использования технологического отсоса (гранулятора), активированного приточной струей.....	113
4.2.1 Оценка влияния гранулятора (местного отсоса) на эффективность общеобменной вентиляции	113

4.2.2 Оценка эффективности улавливания пыли технологическим отсосом (гранулятором).....	115
4.3 Рекомендации по проектированию, монтажу систем вентиляции и кондиционирования чистых помещений фармацевтических производств.....	117
4.4 Экономическое обоснование использования приточной струи.....	120
4.5 Выводы	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	126
СПИСОК ТЕРМИНОВ	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	210
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	217

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В эпоху пандемии COVID-19 вырос уровень значимости системы здравоохранения и фармацевтики. Для предотвращения многих заболеваний обе системы работают совместно для обеспечения благополучия населения. Приоритетные направления развития фармацевтического производства в Российской Федерации включают в себя поддержку исследований для ускорения технологического развития фармацевтической отрасли; производство качественной, эффективной и безопасной фармацевтической продукции, предотвращение оборота фальсифицированных, контрафактных и несоответствующих требованиям товаров, а также развитие национальной фармацевтической отрасли при реализации федеральных и региональных программ государственных гарантий бесплатного оказания медицинской помощи гражданам.

Производство лекарственных препаратов – область, где предъявляется ряд требований не только к изготовлению продукции, но и к проектированию, монтажу, эксплуатации систем вентиляции и кондиционирования воздуха. При подготовке лекарств в воздух выделяются взвешенные частицы, которые влияют на итоговый продукт, поступающий потребителю. Разработка технических средств, исключающих перекрестное загрязнение фармацевтической продукции в чистых помещениях, способствующих снижению потерь исходных лекарственных препаратов и создающих комфортные условия для работающих, является актуальной задачей в области совершенствованию воздушного режима помещений фармацевтического производства.

На примере производства твердых лекарственных форм предложено использовать в качестве технического средства для уменьшения потерь исходных лекарственных препаратов – приточную струю от общеобменной вентиляции совместно с фармацевтическим гранулятором для создания эффекта местного отсоса.

Исходя из основных положений аэродинамики помещений выдвинута рабочая гипотеза – использование приточной струи для обеспечения стабильного потока порошкообразного лекарственного препарата на входе в гранулятор, снижения потерь препарата и запыленности рабочей зоны помещения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами формирования микроклимата чистых помещений, организации воздухообмена, а также теоретической и методологической основой исследования воздушных течений занимались многие отечественные и зарубежные учёные: М.И. Гримитлин, А.М. Гримитлин, К.И. Логачев, О.А. Аверкова, А.М. Зиганшин, Т.А. Дацюк, А.С. Семиненко, Г.М. Позин, Ю.С. Краснов, В.М. Уляшева, И.С. Кузнецов, А.К. Ставаш, А.Е. Федотов, А.О. Сыромясов, Е.В. Черняков, W. Whyte, S.C. Hu, T. Xu, L. Zeng и др.

Цель исследования заключается в совершенствовании воздушного режима чистых помещений фармацевтических производств за счет использования приточной струи для интенсификации улавливания лекарственных препаратов.

Задачи исследования:

- проанализировать нормативные требования к воздушному режиму чистых помещений фармацевтических производств, сравнив отечественные требования с зарубежными;
- разработать численную модель взаимодействия изотермической приточной струи и соосно расположенного открытого технологического отсоса (гранулятора) для производства твёрдых лекарственных форм (далее – ТЛФ);
- разработать лабораторную установку фрагмента чистого помещения с гранулятором (технологическим отсосом) и выполнить экспериментальные исследования распределения скорости движения воздуха и концентрации взвешенных частиц;
- на основе сравнительного анализа результатов численного моделирования и лабораторного эксперимента установить аэродинамическую схему приточной струи, определить закономерности начального и основного участков при

взаимодействии изотермической приточной струи с технологическим отсосом (гранулятором);

- выявить зависимости изменения концентрации взвешенных частиц и дисперсного состава от времени осаждения, установить зависимость коэффициента эффективности улавливания технологического отсоса (гранулятора), активированного приточной струей;

- на основе проведенных исследований разработать рекомендации по проектированию и монтажу систем вентиляции в чистых помещениях фармацевтических производств.

Объект исследования – чистое помещение с гранулятором для производства ТЛФ.

Предмет исследования – взаимодействие приточной струи с технологическим отсосом (фармацевтическим гранулятором).

Методологической основой диссертационного исследования являются основные положения теории аэродинамики в помещениях; методы математической статистики планирования эксперимента; теория численного моделирования турбулентных течений.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.3. – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: п. 4. «Разработка математических моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности» и п. 5. «Разработка и развитие экспериментальных методов исследований, анализа и обработки экспериментальных данных, процессов в системах теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума, зданий и сооружений».

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- разработана численная модель взаимодействия изотермической приточной струи с открытым технологическим отсосом (гранулятором) при их соосном расположении;

- установлена аэродинамическая схема приточной струи, закономерности начального и основного участков при взаимодействия изотермической приточной струи с технологическим отсосом (гранулятором);

- доказано влияние приточной струи на снижение концентрации взвешенных частиц в рабочей зоне помещения в процессе получения твердых лекарственных форм;

- установлена зависимость коэффициента эффективности улавливания технологического отсоса (гранулятора), активированного приточной струей.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается:

- в разработке численной модели с использованием k - ϵ модели турбулентности для чистого помещения с технологическим отсосом (гранулятором), активированным приточной струей;

- установлении зависимостей параметров приточной струи при взаимодействии с технологическим отсосом (гранулятором).

Практическая значимость диссертационного исследования заключается:

- в возможности применения приточной струи для интенсификации улавливания мелкодисперсных лекарственных препаратов и других взвешенных частиц местными и технологическими отсосами;

- снижении потерь лекарственного сырья и перекрестной контаминации;

- снижении запыленности рабочей зоны;

- в усовершенствовании инженерного метода расчета приточной струи в ограниченных условиях при взаимодействии с технологическим отсосом (гранулятором);

- в разработке рекомендаций по проектированию, монтажу систем вентиляции и кондиционирования воздуха «чистых» помещений фармацевтических производств;

- во внедрении результатов в практику компаний и учебный процесс представленные в приложении Ж: ООО «НТФФ «ПОЛИСАН» (Акт внедрения от 26.02.2025 г.), ООО «Мостэк» (Акт внедрения от 25.02.2025 г.), ООО «ЭМС» (Справка об использовании результатов 25.02.2025 г.), ФГБОУ ВО СПбГАСУ (Акт внедрения от 27.01.2025 г.).

Положения, выносимые на защиту:

- численная модель взаимодействия изотермической приточной струи с открытым технологическим отсосом (гранулятором) при их соосном расположении;
- лабораторная установка модуля чистого помещения с технологическим отсосом (гранулятором), активированным изотермической приточной струей;
- аэродинамическая схема приточной струи, закономерности начального и основного участков при взаимодействия изотермической приточной струи с технологическим отсосом (гранулятором);
- зависимость, определяющая влияние приточной струи на снижение концентрации взвешенных частиц в рабочей зоне помещения в процессе получения твердых лекарственных форм;
- зависимость коэффициента эффективности улавливания технологического отсоса (гранулятора), активированного приточной струей.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследования обеспечивается современными средствами научных исследований, использованием фундаментальных положений аэродинамики, применением математических методов планирования эксперимента и статистической обработки результатов, использованием теории математического моделирования, отсутствием в полученных результатах противоречий с общепризнанными научными положениями, удовлетворительной сходимостью результатов аналитических расчётов с результатами экспериментальных исследований..

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались и докладывались на региональных, всероссийских и международных

конференциях: Международная научно-практическая конференция «Проектирование, строительство и инфраструктурное обеспечение объектов инновационной медицины» Proceedings of ECSF 2021, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 19–21 мая 2021 г.; Всероссийская научно-практической конференция «Современные проблемы развития Европейского Севера», Ухта, Ухтинский государственный технический университет, 8–9 июня 2023 г.; IV Международная научно-практическая конференция «Методология безопасности среды жизнедеятельности: архитектура и строительство», Симферополь, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, 4–6 октября 2023 г.; LXXVI Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 17–20 октября 2023 г.; LXXVII Международная научно-практическая конференция «Архитектура-строительство-транспорт-экономика», Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 22–23 ноября 2023 г.; Всероссийская конференция по теплогазоснабжению и вентиляции, посвященная 70-летию со дня образования БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, Белгородский государственный технологический университет (БГТУ) им. В.Г. Шухова 14 апреля 2024 г.; LXXVIII Международной научно-практической конференции «Архитектура-строительство-транспорт-экономика», Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 21-22 ноября 2024 г.

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 5 печатных работах (2,52 п.л.), из которых 3 статьи в научных журналах (1,37 п.л.), рекомендованных ВАК, 1 публикация (0,75 п.л.), индексируемая базами данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает: введение, четыре главы, заключение, список литературы из 155 наименований работ отечественных и зарубежных авторов и 5 приложений. Работа изложена на

144 страницах основного текста и 73 страницах приложений, содержит 15 таблиц, 71 рисунок и 47 формул.

Автор выражает благодарность А.Г. Глазову, К.В. Кочарьянц, В.А. Пухкалу, К.А. Ставашу, Д.А. Густареву, всем коллегам за помощь и поддержку.

1 ОРГАНИЗАЦИЯ ВОЗДУХООБМЕНА ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

1.1 Описание технологии фармацевтических производств

В Российской Федерации более 50 фармацевтических производств по всей стране и с каждым годом это количество растет. Самыми крупными производителями продукции являются: «Полисан», «Фармстандарт-УфаВИТА», «Московская фармацевтическая фабрика (МосФарма)», «Биокад», «Эвалар» и многие другие.

В рамках государственной программы «Развитие фармацевтической и медицинской промышленности», а также национальных проектов «Здравоохранение» и «Демография» государством направлено на увеличение объемов производства отечественных лекарственных средств и медицинских изделий в денежном выражении в 2 раза к 2030 году по сравнению с 2021 годом, планомерное достижение которой будет способствовать и достижению национальной цели «Сохранение населения, здоровье и благополучие людей» [2, 3, 80, 127].

Каждое производство специализируется на изготовлении определенных препаратов, но разделить данные препараты можно по лекарственной форме, что значительно упрощает анализ каждого производства в отдельности [26, 39, 42, 56, 58, 49, 84, 98, 139-141].

1.1.1 Особенности производства лекарственных форм

Технология фармацевтических препаратов различается в зависимости от лекарственной формы, которую необходимо получить. Классификационный признак производства лекарственных форм представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификационный признак

Уровень	Классификационный признак			
1	Лекарственные формы по агрегатному состоянию			
	Твердые	Жидкие	Мягкие	Газообразные
2	Лекарственные формы по типу дисперсной системы			
	гомогенные	гетерогенные		комбинированные
3	Лекарственные формы по пути введения			
	Для приема внутри	Для наружного применения	Для местного применения	Для парентерального применения
4	Лекарственные формы по типу высвобождения			
	С обычным высвобождением		С модифицированным высвобождением	

В зависимости от агрегатного состояния и дисперсности системы происходит технологическое проектирование производства лекарства. Определяются стадии производства от сырья до выпуска готового сертифицированного продукта, разрабатывается технологическая карта производства с последовательной расстановкой оборудования, предъявляются требования к помещению, персоналу и др. [12, 26, 30, 53].

Для проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха принимаются исходные данные, определяемые технологией производства, а также учитывается влияние других инженерных систем. Принимаются во внимание факторы, зависящие от технологии производства (тепловыделения, влаговыведения, пылевыведения от оборудования, людей; требования к условиям труда, параметры микроклимата и др.) и факторы, не зависящие от технологии производства (географическое расположение объекта, влияющее на работу оборудования и др.) [81, 140-141, 146].

Любые фармацевтические разработки ведутся в специально оборудованных помещениях, группе помещений или производственных линий [38]. Важнейшую роль в соблюдении микроклимата и стерильности воздушного пространства играют системы обеспечения микроклимата воздуха. К таким системам относятся

системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Для дополнительной изоляции пространства от взвешенных частиц, пыли, бактерий используют системы создания чистых помещений.

Фармацевтическое производство обычно включает научно-исследовательскую лабораторию, производственную корпорацию, коммерческую службу. Основная деятельность фармацевтических компаний заключается в разработке, выпуске, продвижении и продажах новых лекарственных препаратов. Постоянной разработкой новых препаратов занимается научно-производственная лаборатория. Области разработки лекарственных препаратов могут быть представлены в следующих направлениях: кардиология, инфекционные болезни, гериатрия, онкология, гастроэнтерология, ангиология, реанимация и др.

1.1.2 Производство твёрдых лекарственных форм

К твёрдым лекарственным формам (ТЛФ) относятся таблетки (с пленочным покрытием и без покрытия), капсулы (твердые или мягкие) и порошки (простые или комплексные смеси) [42, 71].

Производство твердых лекарственных форм включает перенос порошковых материалов в упакованную лекарственную форму в четко ограниченных шагах технологического процесса [140, 141]. Однако, в связи с тем, что перерабатываются в большинстве случаев порошковые материалы, могут возникнуть проблемы, связанные с контролем порошковых частиц и потенциальной перекрестной контаминацией [71]. Схема технологии производства (ТЛФ) указана на рисунке 1.1.

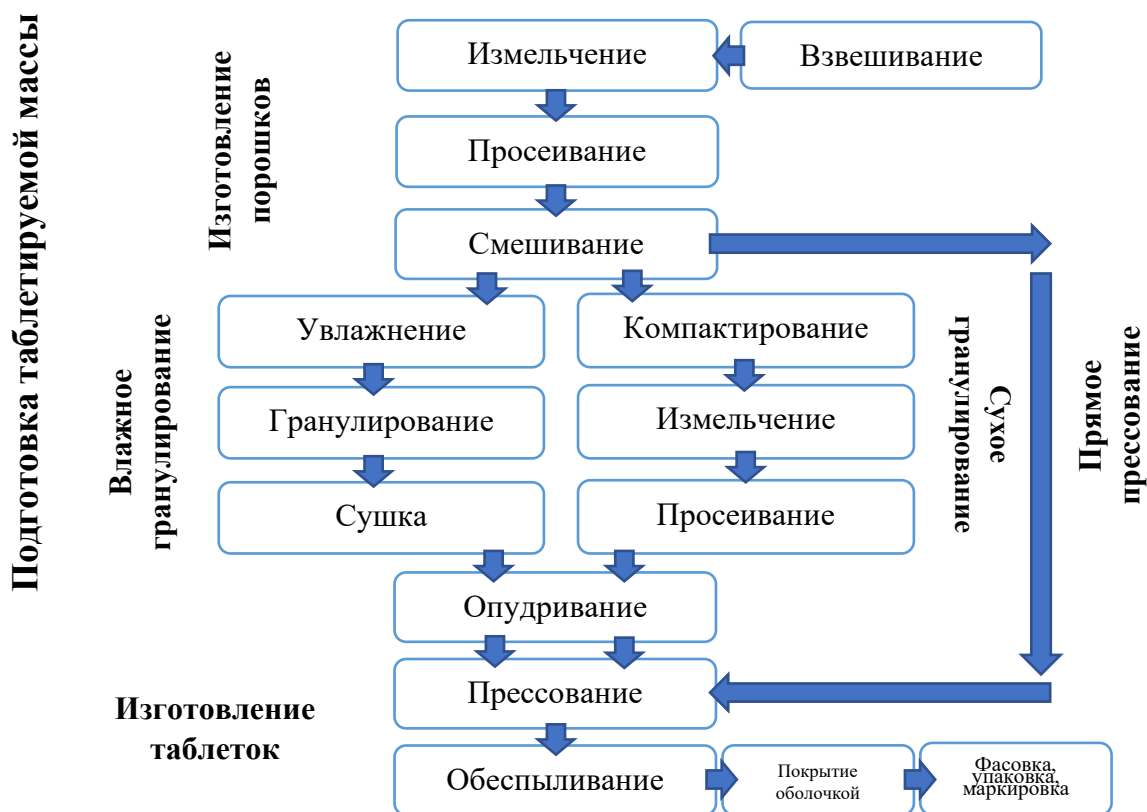


Рисунок 1.1 – Схема процесса производства ТЛФ

На рисунке 1.2 представлена последовательность расположения и наименование оборудования производства ТЛФ [139].



1 – высокоскоростной гранулятор мокрого смешивания; 2 – сушилка в псевдокипящем сжиженном слое; 3 – опудриватель; 4 – вибрационный сито; 5 – высокоскоростной смеситель для сухой и влажной грануляции; 6 – фармацевтический подъемник; 7 – фасовочное оборудование.

Рисунок 1.2 – Расположение технологического оборудования

На рисунке 1.3 представлено образование пылевого облака от оборудования в чистом помещении опытного участка производства твердых лекарственных форм научно-технологического центра «Полисан».

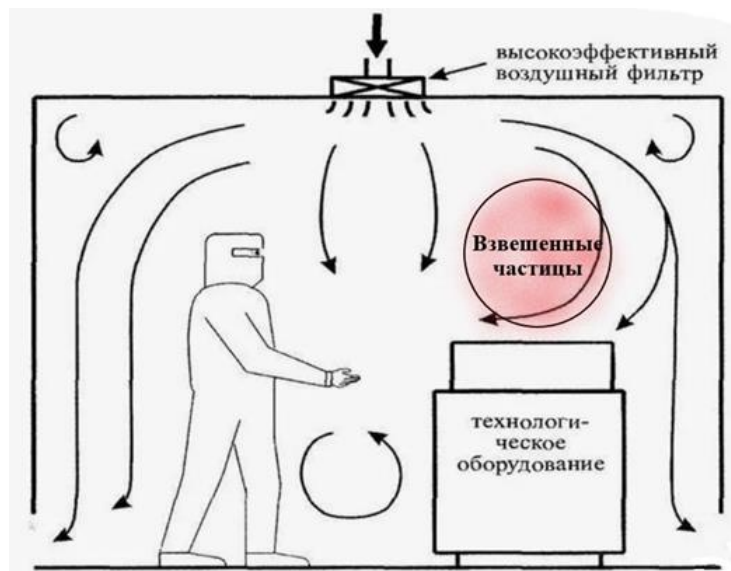


Рисунок 1.3 – Образование пылевого облака от фармацевтического оборудования

Перенос взвешенных частиц связан с открытым производством, а именно с процессом гранулирования [11, 119, 139]. На рисунке 1.4 представлен вид сверху расположения оборудования и последовательность операций.

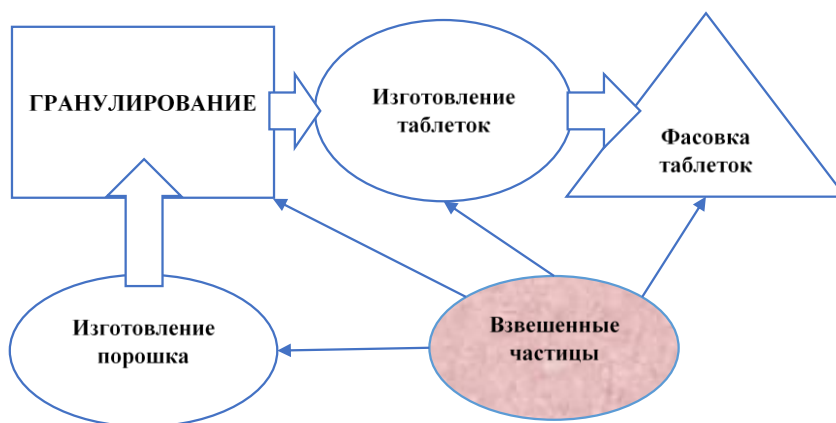


Рисунок 1.4 – Вид сверху расположения оборудования и последовательность операций

Необходимо проследивать фактор образования риска загрязнения воздуха взвешенными частицами, в следствие чего правильно организовывать систему общего воздухообмена, а также предусматривать местную систему вентиляции в местах скопления пылевых облаков [3, 9, 44, 48].

Главные факторы, которые следует принять во внимание при предотвращении образования пыли [4, 79, 125, 129]:

- перерабатываемые материалы (микрочастицы, порошки);
- кратность воздухообмена;
- перепады давления между чистым и грязным помещением;
- скорости и направления потоков воздуха;
- применение местных отсосов или центральной системы вентиляции;
- параметры микроклимата (температура, относительная влажность, скорость движения воздуха);
- использование одежды операторов.

1.2 Снижение рисков образования перекрестной контаминации в процессе гранулирования сухих порошков

Главный источник контаминации от среды в ходе производства твердой лекарственной формы – это производимая продукция. Современные закрытые процессы позволяют уменьшить данную проблему, но местные источники пыли требуют отдельного решения. Главный риск контаминации прослеживается в процессе **гранулирования** [139, 152]. Следует тщательно взвесить, как защитить продукцию от среды и операторов. Там, где требуется наличие **контролируемой среды** (t – температура, φ – относительная влажность), следует проводить мониторинг таких параметров и сформировать сигналы тревоги.

Процесс гранулирования, в первую очередь, улучшает сыпучесть порошкообразного материала (дебетируемой массы), а также предотвращает расслаивание смесей сыпучих материалов (дебетируемой массы, массы для наполнения капсульных оболочек) [10, 11, 107, 139].

На рисунке 1.5 представлен процесс преобразования порошка в гранулы и дальнейшее просеивание в монодисперсные гранулы.

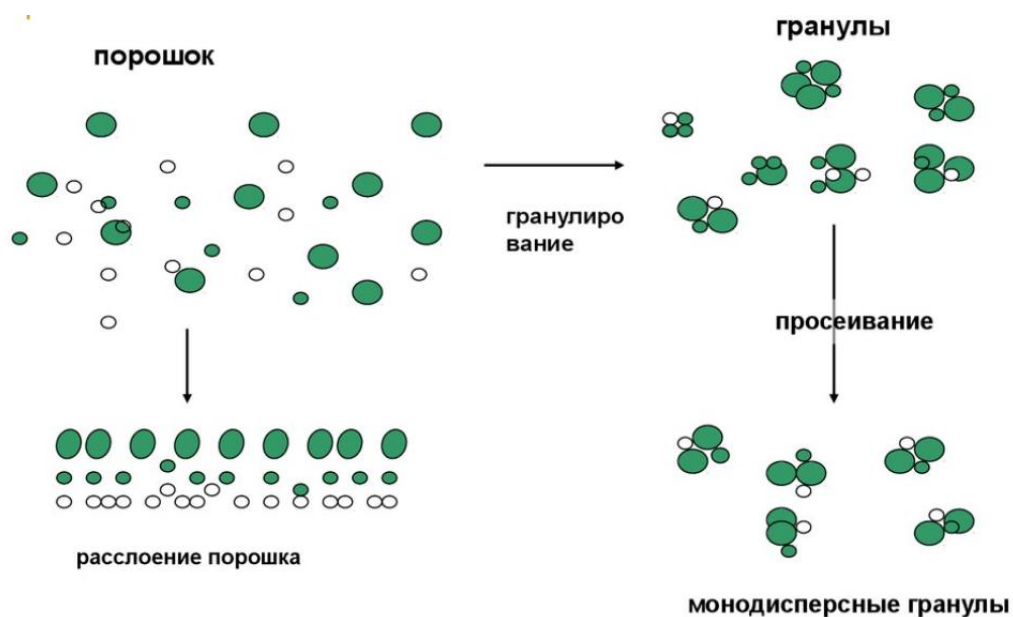


Рисунок 1.5 – Гранулирование для предотвращения расслаивания порошка

Для предотвращения перекрестного загрязнения следует предусмотреть необходимые технические и организационные меры, например [28, 70, 124, 135]:

- производство в выделенных зонах или разделение циклов производства во времени с соответствующей уборкой помещения и оборудования между циклами;
- организация воздушных шлюзов и вытяжных устройств;
- сведение к минимуму риска загрязнения, вызываемого рециркуляцией или повторным поступлением необработанного обработанного воздуха;
- использование высокоэффективных методов очистки и обработки с целью исключения недостаточной очистки, часто являющейся причиной перекрестного загрязнения;
- использование «закрытых систем» производства.

При открытой работе оборудования использование рециркуляционного воздуха не рекомендуется, если же при производстве используются закрытые системы, то можно задействовать рециркуляцию воздуха при наличии достаточного контроля и соответствующих фильтров. Воздух, который отсасывается из возможных источников пыли или, например, центральной вакуумной системы, не должен циркулировать [146].

Вытяжные системы в производственных операциях имеют важную роль с точки зрения улучшения производимой продукции, а именно предотвращая перекрестную контаминацию. При создании проекта местных вытяжных устройств необходимо обратить внимание на работу гранулятора и обеспечить эффективную очистку воздушного пространства над оборудованием. Важным неизученным фактором является электризация взвешенных частиц на поверхности оборудования и местных отсосов, а также влияние конвективных потоков на движение взвешенных частиц в сторону местного отсоса [120]. Необходимо исследовать каждый фактор в отдельности и при их одновременном действии.

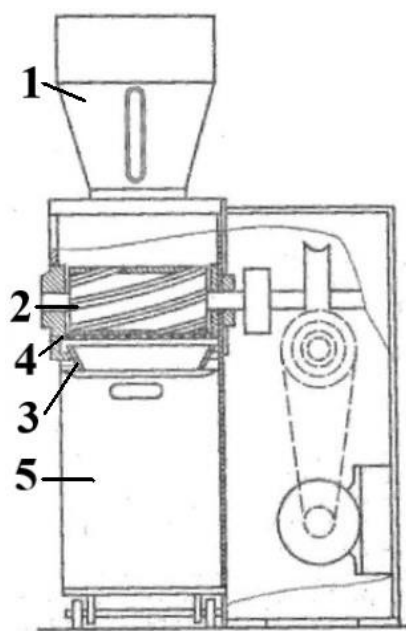
В фармацевтической промышленности тремя наиболее распространенными процессами грануляции для производства твердых лекарственных форм являются влажное гранулирование, сухое гранулирование и прямое смешивание [33, 139]. Учитывая важность грануляции в производстве пероральных лекарственных форм, наиболее мелкие фармацевтические соединения требуют грануляции для улучшения их текучести и технологических свойств перед таблетированием. Очевидным преимуществом сухой грануляции является то, что влага не участвует в этом процессе, что делает данный способ идеальным для обработки соединений, которые физически или химически нестабильны при воздействии влаги. Кроме того, при использовании сухого способа нет необходимости высушивать гранулы и, следовательно, процесс гранулирования становится более энергоэффективным [33].

Формирование гранул без влаги включает уплотнение и снижение размера смеси, чтобы произвести гранулированную сыпучую смесь одного размера [33, 39]. Таким образом, первичные частицы порошка агрегируются под высоким давлением с использованием качающихся или высокоскоростных смесителей-грануляторов. Сухая грануляция может быть выполнена двумя способами: либо большая таблетка производится в тяжелом прессе, либо порошок зажат между двумя роликами для получения листа материалов. Когда пресс используется для сухого гранулирования, порошки могут не обладать достаточной плотностью, чтобы полностью заполнить форму, в результате чего получаем различную

плотность материала. Каток грунтовый использует систему шнековой подачи, которая последовательно поставляет порошок равномерно между двумя прижимными роликами. Порошки прессуются в виде ленты или маленьких гранул между этими роликами и измельчаются с помощью мельницы с низким усилием сдвига. Когда продукт уплотнен должным образом, он может быть затем пропущен через мельницу и конечную смесь перед прессованием таблетки.

В процессе производства сухих порошков в открытой производственной линии в грануляторе происходит измельчение, далее порошок прессуют в брекеты, которые затем разламывают, получая крупку. После отсеивания от пыли крупку таблетуют. В качестве измельчителя используют простые порошки или комплексные смеси, которые оператор засыпает открытым способом [33, 39, 42].

На рисунке 1.6 представлен универсальный гранулятор маятникового типа.



1 – бункер; 2 – рабочий орган; 3 – направляющий бункер; 4 – гранулирующая сетка; 5 – передвижная ёмкость.

Рисунок 1.6 – Гранулятор маятникового типа

Универсальный гранулятор маятникового типа используется для влажного и сухого гранулирования [60]. Рабочий орган аппарата состоит из шнека и шести прочных стержней, это позволяет перемещать гранулируемый материал в осевом направлении. Принцип работы: в бункер (1) загружают сухую массу или брикеты, которые, попадая в рабочую зону, с помощью рабочих органов (2) механизма,

вращающихся в противоположных направлениях, продавливаются через жестко установленную гранулирующую сетку (4). Зазор между рабочим органом механизма и гранулирующей сеткой должен быть в пределах от 1,1 до 1,5 мм. Протертый гранулят по направляющему бункеру (3) падает вниз в передвижную емкость (5), герметизированную в процессе работы с корпусом гранулятора. Данную установку при необходимости обеспечения непрерывности процесса используют с элеваторами для загрузки бункера и отвода готового гранулята к месту потребления. Процесс загрузки сухого материала в бункер (1) показан на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Загрузка сухого материала (порошок)

Основная проблема при работе с порошком на начальном этапе связана с его неконтролируемым движением в воздушном пространстве. На беспрепятственное удаление взвешенных частиц влияют следующие факторы: расстановка оборудования, движение оператора, перепад давления между чистыми помещениями, конвективные потоки, формирующиеся вблизи нагретых поверхностей оборудования и оператора, электризация взвешенных частиц, застойные зоны и др. [132, 133, 135].

1.2.1 Методы борьбы с запыленностью воздуха помещений

Технологические процессы многих производственных объектов связаны с выделением разнообразных вредностей [7, 8, 78]. Учитывая негативное влияние вредных производственных выделений на организм человека и окружающую среду, значительное количество работ посвящено изучению способов локализации вредностей, общие принципы которых представлены в работах [127, 83]. Исследования особенностей движения воздуха вблизи вытяжных отверстий, выполненные в работах известных отечественных и зарубежных ученых [134, 138, 144, 34], стали основой разработки многочисленных конструктивных решений местных и технологических отсосов для различных производственных объектов. Анализ конструктивных особенностей технических решений локализирующих устройств выполнен в [37, 136, 94].

Разнообразие физических свойств выделяющихся вредностей и аэродинамических особенностей воздушных потоков в помещениях [116, 92, 121], способствовали созданию методов расчета местных отсосов различного типа, обобщенные в работах В.Н. Посохина, М.И. Гримитлина, Г.М. Позина, А.М. Гримитлина, А.Г. Сотникова [95, 36, 110], в том числе на основе известного метода системного анализа А.А. Рымкевича [103]. В работе [110] выполнен анализ методов оценки эффективности разных типов местных отсосов в зависимости от конструктивных, аэродинамических и режимных параметров.

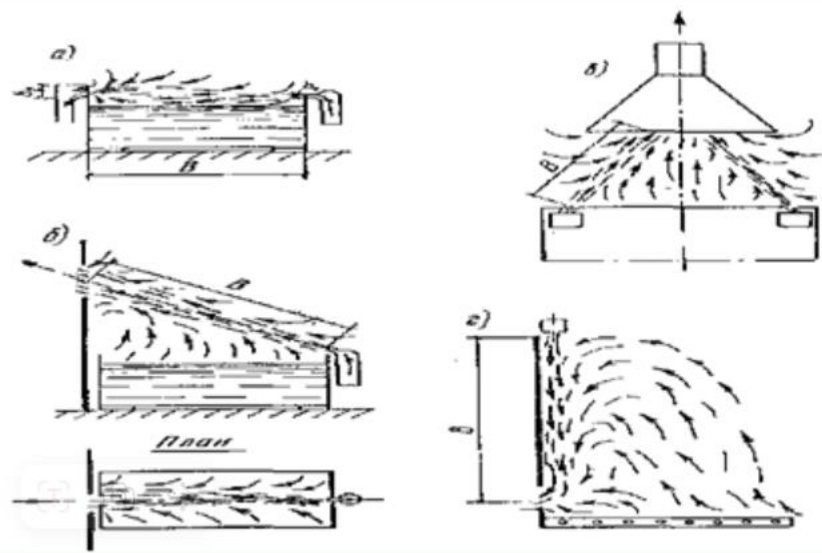
Теоретические исследования особенностей движения потоков вредных выделений, обусловленные различными факторами, такими как влияние геометрических размеров и формы источника вредностей и локализирующих укрытий; совместное действие естественных и механических сил для удаления вредностей представлены в работах [130, 15, 148, 46, 20]. На основе теоретических исследований разработаны разнообразные инженерные методы расчета и конструкции местных отсосов [82, 55, 67], активированных приточными струями [95, 16], с применением устройств местной приточной вентиляции [45, 19, 88], рециркуляционных агрегатов [102, 89], в том числе с использованием пористых материалов, предложенных

к применению в приточных системах вентиляции [73], использованием дополнительных конструктивных элементов. Например, в работе [82] для снижения расхода вентиляционного воздуха и концентрации вредных выделений в рабочей зоне авторами предложено дополнительное укрытие над гальванической ванной в виде шторы, намотанной на барабан.

Для обеспечения эффективности улавливания пылевых частиц в системах аспирации использованы различные конструкции отсосов-раструбов, выравнивающих устройств в аспирационных воронках и устройств, генерирующих вихревые течения в местных отсосах [18, 44, 20].

Приточная струя в активированных бортовых отсосах гальванических ванн влияет на эффективность улавливания вредных паров, равномерность распределения скоростного поля, снижает поступление вредных выделений в цех [6, 17, 63].

Значительное количество исследований посвящено удалению вредных выделений от промышленных ванн [17, 63, 6, 93], для повышения эффективности локализации разработаны конструкции и методы расчета местных отсосов, активированных приточными струями [13, 85, 5]. В основном, рассмотрены бортовые (боковые) отсосы, реже соосные [85] (рисунки 1.8-1.9).



а — бортового; б.— панельного со сдувом компактной струей; в — зонта;

г — панельного со щелевым поддувом вдоль панели.

Рисунок 1.8 – Схемы местных отсосов, активированных приточной струей

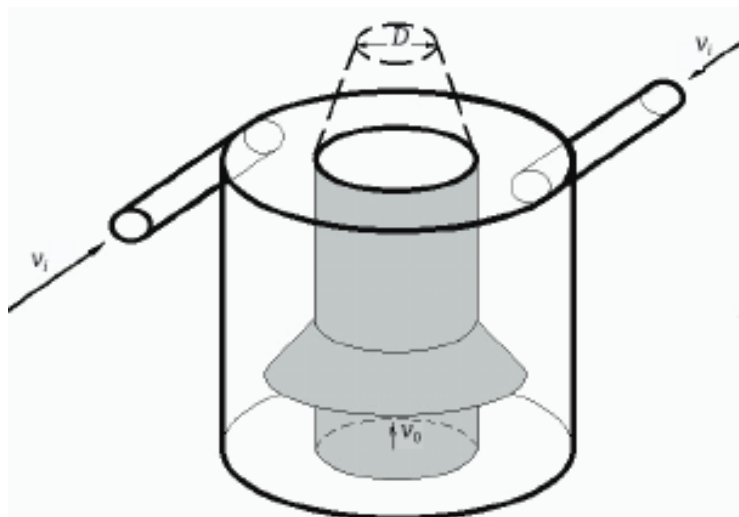


Рисунок 1.9 – Схема вихревого местного отсоса

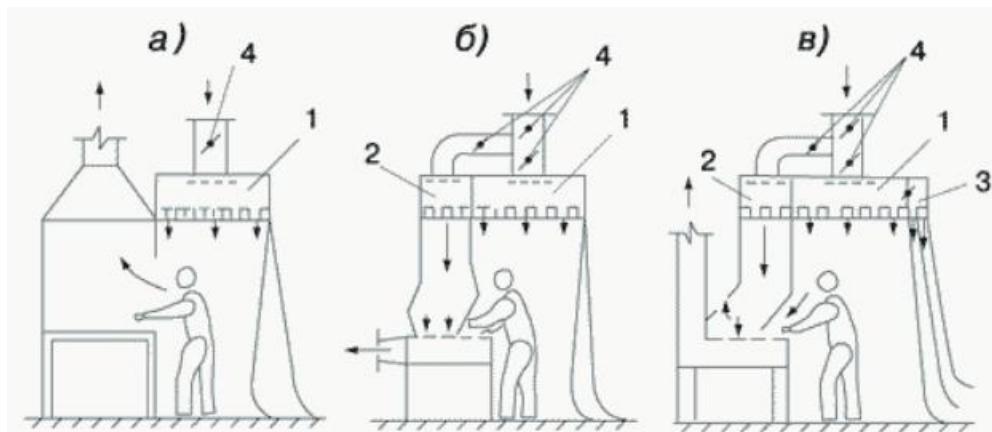
В методиках расчета учитываются геометрические размеры промышленных ванн и высота раствора, температурные условия, токсичность вредных выделений.

Обеспечение нормируемых параметров микроклимата на рабочих местах является основной задачей формирования воздушного режима. В фармацевтическом производстве предъявляется ряд требований для обеспечения не только комфортного пребывания на рабочих местах, но и для предотвращения загрязнения конечной продукции, обеспечения нормируемой чистоты помещения. Снизить перекрестную контаминацию и обеспечить нормируемые параметры микроклимата в чистом помещении необходимо на этапе проектирования систем вентиляции [146, 151].

Многие исследователи решали задачи рационального способа подачи воздуха для обеспечения нормируемых параметров воздуха за счет подачи приточной струи в рабочую зону.

Для повышения эффективности местного отсоса и обеспечения чистоты воздуха М.И. Гримитлиным и Р.Б. Знаменским разработано техническое решение (рисунок 1.10), включающее местный отсос и устройство местной приточной вентиляции, для реализации которого могут быть использованы низкоскоростные воздухораспределительные панели, например, производства ООО «Арктос». Результаты исследований показали, что наибольший эффект получен при превышении расхода

приточного воздуха над вытяжным ($L_{пр}/L_v > 1,1$). Эффективность устройства 94-99%.



а) с вытяжным шкафом и воздухораспределителем; б) с фронтальной завесой и нижним отсосом; в) с фронтальной и боковыми завесами, боковым и нижним отсосом
1 - воздухораспределитель; 2 - воздухораспределитель с фронтальной завесой; 3 - боковые завесы; 4 - регулирующие заслонки

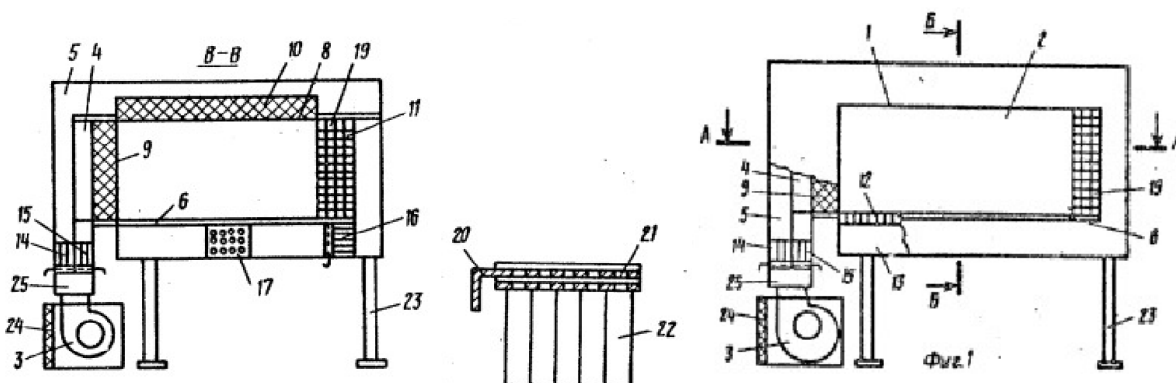
Рисунок 1.10 – Принципиальные схемы местной приточно-вытяжной вентиляции

В СССР проводились разработки по предотвращению запыленности на рабочих местах производств химической, фармацевтической, деревообрабатывающей и др. отраслях промышленности.

При выделении различных видов пыли в производственных помещениях средствами общеобменной вентиляции невозможно обеспечить нормируемые параметры воздушной среды, во многих случаях приходится ограничивать скорость в приточных струях. Так, например, в текстильной промышленности, учитывая, что повышенная скорость движения воздуха может помешать естественному процессу оседания пылевых частиц, возможны случаи повторного подъема уже осевшей пыли. Таким образом, в помещениях с пылевыведениями любой физической природы для эффективной борьбы с пылью рекомендуется использовать местные отсосы.

В настоящее время подробный анализ конструктивных особенностей и методов расчета местных отсосов аспирационных систем в зависимости от особенностей технологических процессов рассмотрен в работах К.И. Логачева, А.М. Зиганшина, О.А. Аверковой.

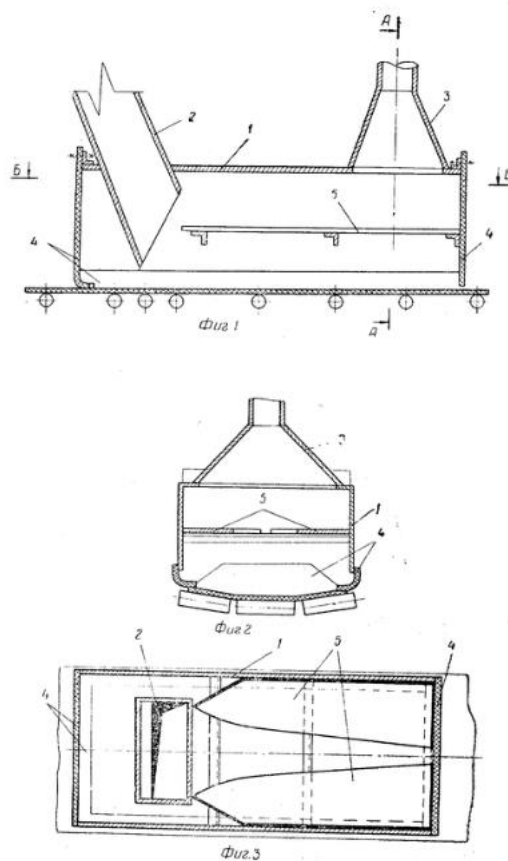
Одной из таких разработок является «пылезащитная камера для рабочего стола». В отличие от местных отсосов, которые удаляют большую часть вредных из рабочего пространства локально в одном направлении, защитная камера имеет два потока, один из которых горизонтальный – расположенный над плоскостью рабочего стола, а другой – вертикальный – расположенный в плоскости рабочего стола представлена на рисунке 1.11 [86].



1 – кожух, 2 – открытый проем, 3 – вентилятор, 4 и 5 – воздуховоды, 6 – плоскость рабочего стола, 7 и 8 – воздухораспределители, 9 и 10 – фильтры, 11 и 12 – вытяжные решетки, 13 – вытяжная камера, 14-18 – заслонки для регулирования подаваемого и отводимого воздуха, 19 – сотовая спрямляющая решетка, 20 – перфорированный шибер, 21 – перфорированное основание, 22 – сотовая воздухораспределительная решетка, 23 – опоры, 24 – фильтр грубой очистки, 25 – напорная камера, 26 – патрубок.

Рисунок 1.11 – Пылезащитная камера для рабочего стола

Другая запатентованная разработка – аспирационное укрытие, которое состоит из корпуса, уплотнителей и системы воздуховодов, отличающиеся тем, что, с целью повышения эффективности, оно снабжено двумя трапецевидными пластинами, жестко прикрепленными к боковым стенкам внутри корпуса и расположенными в плоскости, параллельной верхнему основанию [87]. Воздух эжектируется перегружаемым материалом и поступает в укрытие через воздуховод по каналу, образованному пластинами с постоянной по сечению канала скоростью, и поступает в аспирационную стенку (рисунок 1.12).



1 – корпус, 2 – загрузочный желоб, 3 – отсасывающий воздуховод, 4 – эластичный уплотнитель,
5 – две трапециевидные пластины.

Рисунок 1.12 – Аспирационное укрытие

Для повышения эффективности локальной вентиляции возможна активация плоскими или компактными приточными струями, которые захватывают окружающий воздух и направляют его к всасывающему отверстию [100].

Бортовой отсос активируют приточными струями, вытекающими из щелей у борта отверстия, противоположного борту со щелью отсоса, панельный отсос с высокорасположенным всасывающим отверстием можно активировать компактной струей, зонты активируют приточным воздухом по периметру, панельные отсосы с удалением воздуха на уровне верха источника активируют вдоль панели сверху [100]. На рисунке 1.8 изображены схемы местных отсосов с поддувом.

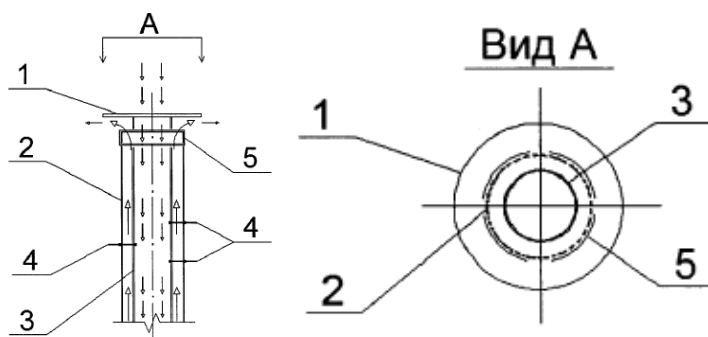
Устойчивость системы «приточная струя — местный отсос» относительно неорганизованных потоков воздуха, возникающих в помещении, определяется

скоростью на оси воздушного потока в «критическом сечении», в котором влияние приточной струи уже ослаблено, а действие местного отсоса еще не велико [100].

Достигнуть увеличение эффективности местного отсоса за счет увеличения скорости захвата загрязняющих веществ, используя внешнюю закрученную струю предлагается в работе [44]. На рисунке 1.9 представлена схема конструкции вихревого местного отсоса.

Круглый отсос помещается соосно во внешний цилиндрический кожух, в котором происходит закрутка воздушного потока за счет тангенциального подвода в кожух двух приточных струй. Образуется вихревой купол, способствующий повышению эффективности такого вихревого отсоса.

Другая полезная модель под названием «Коаксиальное воздухораспределительное устройство с торцевой раздачей потока для вентиляционных систем» предназначена для удаления вредностей из рабочей зоны помещения, а также непосредственно от источников выделения вредностей [90]. На рисунке 1.13 изображено устройство полезной модели.



1 – диффузор-ограничитель; 2, 3 – трубопроводы; 4 – направляющая; 5 – насадка-регулятор.

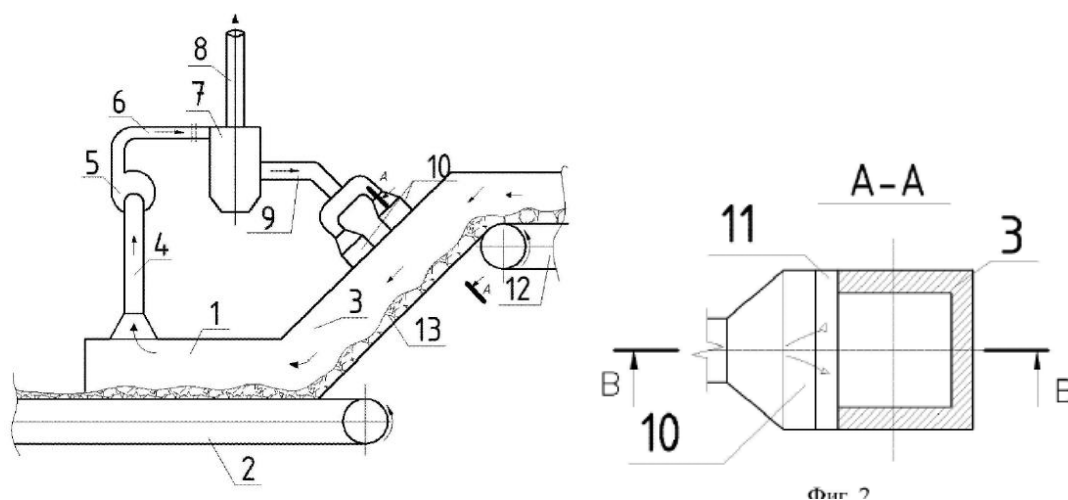
Рисунок 1.13 – Схема коаксиального воздухораспределительного устройства с торцевой раздачей потока для вентиляционных систем

Принцип работы полезной модели основывается на совершенствовании процесса удаления вредных выделений или загрязненного воздуха в объеме помещений или в рабочей зоне за счет рациональной конструкции устройства, имеющего коаксиальную компоновку с диффузором-ограничителем, что позволяет

повысить эффективность удаления вредных веществ из воздуха в объеме помещений.

В промышленности строительных материалов, металлургической, горнорудной проблема обеспыливания воздуха может решаться за счет снижения расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом как это представлено в разработке [91].

На рисунке 1.14 представлена схема полезной модели «узел перегрузки с рециркуляцией аспирируемого воздуха».



1 – короб; 2 – конвейерная лента, 3 – перегрузочный желоб; 4 – аспирационный патрубок; 5 – вентилятор; 6 – напорный патрубок; 7 – пылеочистительное приспособление; 8 – патрубок; 9 – обводная труба; 10 – распределитель воздушно-пылевого концентрата; 11 – Коандовский воздушный канал; 12 – верхний конвейер; 13 – перегружаемый сыпучий материал.

Рисунок 1.14 – Схема узла перегрузки с рециркуляцией аспирируемого воздуха

Увеличение эффективности работы аспирационного укрытия, вследствие высокого расхода воздуха, эжектируемого сыпучим материалом при движении по течке обеспечивается за счет того, что узел перегрузки с рециркуляцией аспирируемого воздуха, включающий короб (1), имеющий возможность соединения с вентилятором (5) и пылеочистительным приспособлением (7) соответствующими патрубками, распределитель воздушно-пылевого концентрата (10), содержащий воздушные каналы (11), выполненные таким образом, что их форма обеспечивает возникновение эффекта Коанда – Коандовские воздушные каналы.

Для обнаружения движения взвешенных частиц и их осаждения в чистом помещении разработана программа для ЭВМ «ClearView» [106]. Программа предназначена для моделирования движения частиц пыли, осаждаемых в чистом помещении. Программа позволяет определять оптимальную компоновку технологического оборудования и регламент поведения персонала чистых помещений высокотехнологических производств. Программа использует модель распространения частиц пыли в чистом помещении. Данная модель основана на использовании уравнения Навье-Стокса, описывающем движение воздушных потоков, переносящих частицы пыли, которые осаждаются на поверхностях технологического оборудования и элементах конструкций.

Приточная струя в аспирируемых укрытиях обеспечивает формирование устойчивого пылевоздушного потока и повышает эффективность улавливания взвешенных частиц. В фармацевтической отрасли при выполнении операций с порошкообразными лекарственными препаратами образуются зоны загрязнений рабочего пространства мелкодисперсной пылью размерами 0,5-1 мкм. Учитывая представленный выше анализ, обеспечение необходимой чистоты воздуха в помещениях производства фармацевтической продукции требует изучения аэродинамических процессов вблизи технологических отсосов (грануляторов) для производства ТЛФ.

1.2.2 Применение местной вытяжной вентиляции для предотвращения перекрестной контаминации в процессе гранулирования сухих порошков

Рассмотрим системы местных отсосов для чистых помещений с избыточным пылевыведением как способ решения проблемы. На рисунке 1.15 представлены конструкции местных отсосов [14, 43, 99, 111, 117, 118].



1 – локальный местный отсос; 2 – подвесное вытяжное устройство; 3 – мобильное вытяжное устройство; 4 – вентиляционный зонт

Рисунок 1.15 – Местные отсосы

Оборудование должно быть установлено так, чтобы, по возможности, исключить риск загрязнения или выполнения ошибочных действий. В фармацевтической промышленности используют локальную вытяжку на местах при работе с порошками, комплексными смесями и опасными компонентами [146].

Над оборудованием возможно размещение местных отсосов, подвесных вытяжные устройства, улавливающих воронок и зонтов для вытяжных устройств, вытяжных катушек, а также мобильные вытяжные устройства.

На рисунке 1.14 (1) изображено подвесное вытяжное устройство. Преимущество данного местного отсоса связано с его мобильностью и доступностью к местам возникновения пыли, а также возможностью оперативного удаления взвешенных частиц. Локальная вытяжка предотвращает электризацию частиц на оборудовании, а также ассимилирует часть теплоты от гранулятора. Теплоизбытки дополнительно компенсируются общеобменной приточной вентиляцией с воздухораспределителями, образующими однонаправленные потоки воздуха [111].

Недостатком использования вытяжного устройства являются значительные размеры и расход воздуха. Вытяжные устройства с диаметром воздуховода 160 мм рассчитаны на объем удаляемого воздуха 1000–1200 м³/ч; производительность устройств с диаметром воздуховода 200 мм достигает 2000–3000 м³/ч. Подобные расходы применимы для производств сварочных цехов, для фармацевтической промышленности расход воздуха при диаметре 160 мм должен быть менее 100 м³/ч. Для таких расходов, как правило, применяют локальные местные отсосы (рисунок 1.14, поз.2), которые устанавливаются над местом выделения вредностей. Преимуществом использования вытяжного устройства является его небольшой размер и мобильность, установка предусматривается непосредственно под местом загрязнения [135]. Однако, учитывая малый диапазон расходов при малых скоростях, при использовании данного устройства имеет место ограниченная зона действия, что снижает его эффективность.

Применение мобильного вытяжного устройства с фильтровентиляционной установкой (Рисунок 1.15, поз. 3), несмотря на простоту использования и экономичность, наиболее целесообразно при отсутствии стационарных рабочих мест, например, в сварочных и деревообрабатывающих цехах, учитывая большие габариты и высокий уровень шума.

В некоторых случаях для удаления мелкодисперсной пыли могут быть использованы вентиляционные зонты (Рисунок 1.15, поз.4), если отсутствует возможность применения более эффективных устройств [62, 111].

При изучении технологического процесса для производства ТЛФ, известных методов и средств локализации различных вредностей выявлена невозможность использования какого-либо типа местного отсоса. Таким образом, на основе анализа конструкций местных вытяжных устройств было принято решение разработки технического решения, учитывающего особенности функционирования гранулятора, как технологического отсоса, активированного приточной струей. При этом, как отмечено в работе [36], может быть использован рециркуляционный воздух. В

этом случае производительность по воздуху технологического отсоса (гранулятора) не влияет на производительность общеобменных систем приточной и вытяжной вентиляции.

Анализ подходов к оценке эффективности местных отсосов, представленный в работах [92, 36, 110], предлагает применять используемый ранее коэффициент улавливания (коэффициент эффективности улавливания), представляющий отношение количества вредностей, удаленных местным отсосом, к общему количеству вредностей:

$$K_{ул} = \frac{G_{МО}}{G_{вр}}, \quad (1.1)$$

и коэффициент эффективности, представляющий собой отношение концентраций вредностей в удаляемом местным отсосом воздухе и в рабочей зоне, где концентрация принимается равной ПДК:

$$K_{эф} = \frac{q_{МО}}{ПДК}. \quad (1.2)$$

Учитывая недостатки этих зависимостей, авторами [92, 36] предложена зависимость коэффициента эффективности, включающая формулы (1.1) и (1.2):

$$K_{эф} = 1 + K_{ул} \frac{G_{вр}}{L_{МО} ПДК}, \quad (1.3)$$

где $L_{МО}$ – расход воздуха, удаляемого местным отсосом, $м^3/ч$.

Однако, в работах [110, 111] предложено использовать коэффициент улавливания вредностей (эффективность улавливания), определяемый по (1.1). В результате обобщения многочисленных опытных данных местных отсосов в виде укрытий, боковых отсосов от источников теплоты, одно- и двухстороннего бортового отсоса, отсоса с передувом, вытяжного зонта, приточно-вытяжного зонта, встроенного отсоса в сварочную горелку отсоса получена экспоненциально-степенная зависимость вида:

$$K_{ул} = 1 - \exp[-(av_{МО})^n], \quad (1.4)$$

где a , n – опытные значения множителя и показателя степени;

$v_{МО}$ – скорость всасывания, $м/с$.

Авторами предложен новый термин эквивалентно-эффективная скорость (ЭЭС) – $av_{МО}$.

Учитывая незначительное количество работ, направленных на изучение коэффициента улавливания, для каждого типа местного и технологического отсоса исследователям предстоит определять коэффициенты улавливания, поскольку этот коэффициент представляет новый инструмент для прогнозирования характеристик вытяжных систем.

1.2.3 Приточные струи в пространстве чистых помещений

Исследованию приточных вентиляционных струй посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных ученых, обобщенных в монографии Г.Н. Абрамовича и др. [122], которая является основой разработанных методов и инженерных методик расчета приточных струй. В работах [134, 121] исследовано влияние приточных струй в формировании воздушного режима помещений. Методическое обеспечение исследований аэродинамики помещений основано на исследованиях, выполненных М.И. Гримитлиным [35]. Влияние стесненных условий изучено в работе [69], анализ результатов данных исследований важен для исследования взаимодействия приточной струи с технологическим отсосом (гранулятором) в научно-техническом центре «Полисан».

Общая площадь научно-технологического центра (далее – НТЦ) «Полисан» 4800 м², также НТЦ включает 3 функциональных блока: лабораторный, технологический и центр стабильности.

В чистых помещениях участка приготовления экспериментальных образцов лекарственных препаратов на 1 этаже обеспечивается заданный класс чистоты, избыточное давление между помещениями и требуемое направление потока воздуха между чистыми помещениями. Требуемый класс чистоты определен для чистых помещений в соответствии с требованием [97, 128, 142]. Для чистых помещений в соответствии с классификацией класса чистоты осуществлена трехступенчатая фильтрация (M5, F9, HEPA H13), а минимальная кратность

воздухообмена для помещений класса d составляет 10 ч^{-1} , персональные шлюзы, материальный шлюз 12 ч^{-1} . Соседние помещения разных классов чистоты имеют перепад давления в пределах 10-15 Па.

Основные параметры внутреннего воздуха (температура, влажность, скорость потока) и количество наружного воздуха приняты в соответствии с технологическими требованиями и требованиями [21, 104]. Во всех проектируемых помещениях, для обеспечения на рабочих местах определённого класса чистоты, обеспечена высокая кратность воздухообмена, обеспечиваемая системой кондиционирования, которая одновременно обеспечивает оптимальные параметры (температура и влажность) воздуха. Большинство систем предусмотрено с полной рециркуляцией или частичной.

Участок приготовления экспериментальных образцов лекарственных препаратов обеспечивает следующие параметры воздуха:

- минимальный расход $60 \text{ м}^3/\text{ч}$ наружного воздуха на 1 человека по [114];
- в исследуемом помещении 104 (Помещение ТЛФ) обеспечивается влажность воздуха 10-35% (при температуре 20°C) и температура $19-24^\circ\text{C}$. В случае работы с веществами, которые не требуют сухого воздуха, обеспечивается температура $19-24^\circ\text{C}$ и влажность 35-55 %, класс чистоты d.

Участок приготовления экспериментальных образцов лекарственных препаратов обслуживается одной приточно-вытяжной системой, которая обеспечивает систему чистых помещений, в том числе отдельной веткой воздуховодов исследуемое помещение 104. Система обеспечивает безопасную работу с веществами класса опасности 3-4 по классификации [21, 22].

В помещении 104 подача воздуха осуществляется из верхней зоны, а удаление из нижней зоны. На вытяжке из помещений установлен фильтр F9 [30].

На рисунке 1.16 представлена схема организации воздухообмена в исследуемом помещении 104.

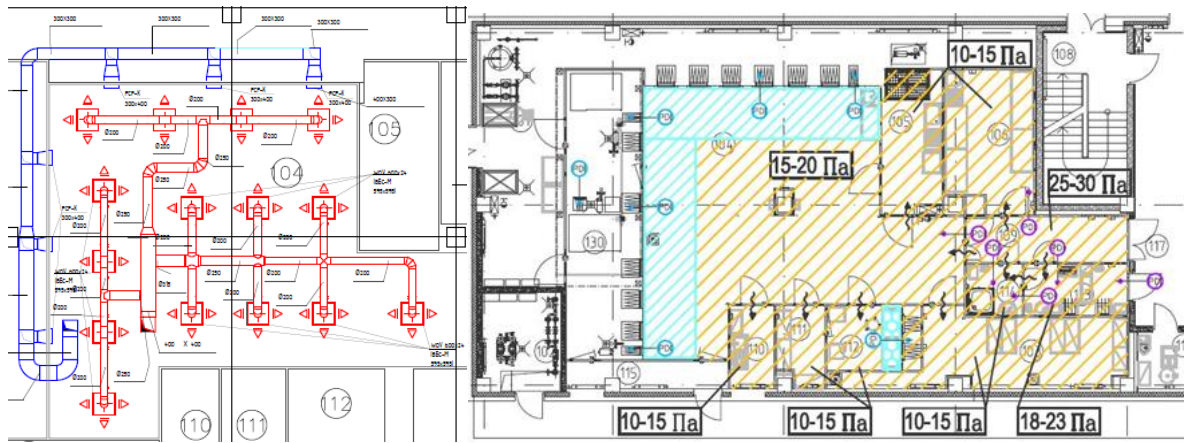
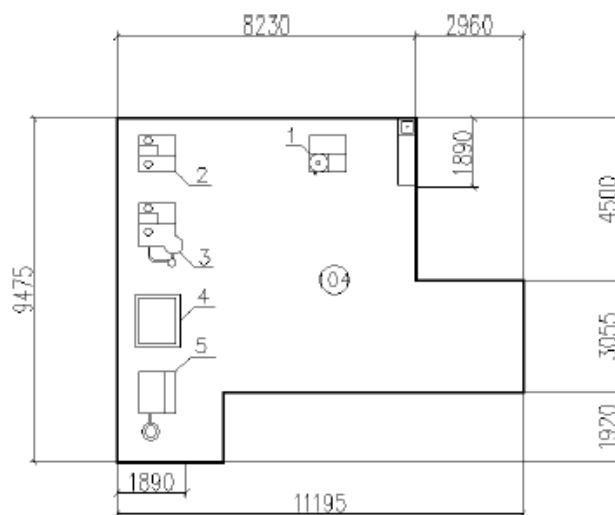


Рисунок 1.16 – Схема организации воздухообмена в помещении 104

В помещении 104 (помещение ТЛФ) обеспечена ассимиляция тепловыделений от технологического оборудования – 4 кВт (гранулятор с кипящим слоем, однопуансонный эксцентриковый пресс, мельница-дробилка, вибросито, лабораторная сушилка-гранулятор, высокоскоростной смеситель для сухой и влажной грануляции, оператор и др.). На рисунке 1.17 представлена схема расположения технологического оборудования.



1 – мельница-дробилка; 2 – лабораторная сушилка-гранулятор; 3 – гранулятор с кипящим слоем; 4 – высокоскоростная мешалка; 5 – высокоскоростной смеситель для сухой и влажной грануляции.

Рисунок 1.17 – Расположение технологического оборудования

Зона расположения технологического оборудования отделена от зоны постоянного нахождения персонала ПВХ завесами. Данное решение обусловлено требованиями обеспечения нормируемых параметров в разных зонах и санитарных норм (запыленности на рабочем месте оператора), выделением чистых зон, а также условиями для бесперебойной работы оборудования и производимых технологических операций.

В зоне работы оборудования обеспечивается однонаправленный воздушный поток со скоростью воздуха 0,07-0,2 м/с для равномерного распределения воздушного потока, что способствует наилучшему удалению взвешенных частиц и предотвращению осаждения взвешенных частиц на поверхности технологического оборудования и одежде оператора [104].

В зоне нахождения персонала воздухообмен осуществляется неоднаправленными воздушными потоками, за счет чего обеспечиваются нормируемые параметры микроклимата.

Метод подачи смешанными потоками изолирует зоны подачи воздуха, разделяя однонаправленный и неоднаправленный потоки, используя их по назначению. На рисунке 1.18 представлена схема организации воздухообмена смешанными потоками воздуха.

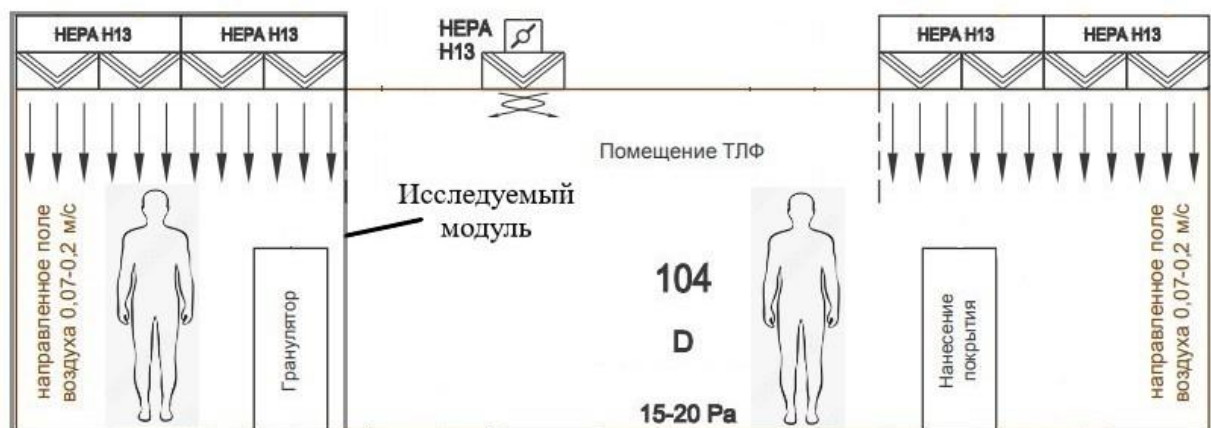


Рисунок 1.18 – Схема организации воздухообмена смешанными потоками воздуха

Расход воздуха в каждой зоне обеспечивает оптимальные параметры микроклимата, предотвращение запыленности на рабочем месте, удаление теплоизбытков. Расчет расхода воздуха для каждой зоны выполняется отдельно –

по теплоизбыткам для зоны смешанных потоков по [114] и для зоны однонаправленного потока для обеспечения требуемой чистоты зоны и требуемого времени восстановления воздушного потока по [26].

Требуемый расход по избыткам явной теплоты определяют по формуле (1.5):

$$L_{\text{я.тепл.}} = \frac{3,6 \cdot Q_{\text{я.тепл.}}}{c_{\text{в}} \cdot (t_{\text{у}} - t_{\text{пр}})}, \quad (1.5)$$

где $Q_{\text{я.тепл.}}$ – избыточные явные тепловые потоки в помещении, Вт;

$t_{\text{у}}$ – температура удаляемого воздуха вне обслуживаемой (рабочей) зоне n -го помещения, °С;

$t_{\text{пр}}$ – температура приточного воздуха, °С;

$c_{\text{в}}$ – удельная массовая теплоемкость воздуха, равная 1,2 кДж/(м³·°С);

$\Delta t_{\text{р}}$ – рабочая разность температур воздуха $\Delta t_{\text{р}} = t_{\text{в}} - t_{\text{п}}$.

Требуемый расход для обеспечения чистоты помещения и времени восстановления определяют по формуле (1.6):

$$L_{\text{п}} = \frac{E \cdot 60}{C}, \quad (1.6)$$

где C – средняя концентрация частиц в воздухе в 1 м³;

E – суммарная эмиссия частиц в чистом помещении, мкм в мин (для класса чистоты d для частиц с размерами ≥ 5 мкм $E = 5 \cdot 10^6$);

60 – число минут в часе;

$L_{\text{п}}$ – расход приточного воздуха, м³/ч.

В исследуемом модуле, т.е. в более чистой зоне, где находится оборудование и одновременно оператор, расчет может быть произведен как по теплоизбыткам, так и по обеспечению требуемой чистоты зоны и времени восстановления воздушного потока.

Подробный расчет воздухообмена для исследуемого модуля представлен в приложении А.

В ограниченном пространстве исследуемого модуля приточная струя сталкивается с постоянным препятствием в виде технологического оборудования, расположенного на постоянной основе. Нахождение оператора в более чистой зоне временное для производства технологических операций, например засыпания

сырья в гранулятор. Воздушная струя испытывает стеснение в момент соприкосновения с технологическим оборудованием.

Инженерный метод расчета выполняется в соответствии с методикой компании Арктос [114]. Максимальные параметры воздуха на основном участке компактной струи на расстоянии x от ВР определяются:

$$V_x = \frac{m \cdot L_0}{x \cdot \sqrt{F_0}} \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_H, \quad (1.7)$$

где m – скоростной коэффициент воздухораспределителя (ВР);

L_0 – объемный расход воздуха через ВР;

x – расстояние от истечения до места входа струи в рабочую зону по аэродинамической оси;

F_0 – площадь расчетного сечения воздухораспределителя;

K_C – коэффициент стеснения;

K_B – коэффициент взаимодействия;

K_H – коэффициент неизотермичности.

С ситуацией неконтролируемого перемещения пылевоздушного потока в рабочей зоне помещений сталкиваются различные сферы производства такие, как металлургия, деревообработка, электроника и др. [47]. В этом случае пылевоздушный поток необходимо приводить к скоростному равновесию и векторы скорости направлять в сторону рационального удаления взвешенных частиц.

Исследования, проведенные в КГАСУ [96], отмечают необходимость учитывать, в первую очередь, геометрические факторы при расчете воздушно-струйных течений, используемых для защиты от выделений газов, что важно и для удаления мелкодисперсной пыли различного состава.

В работе [108] рассмотрено влияние соотношении геометрических параметров на эффективность и стабильность коаксиального отсоса, активированного приточной струей, для удаления высокотемпературных газов.

Для расчета местных отсосов, активированных приточными струями, в работе [111] предложено использовать интегральный метод, базирующийся на законах сохранения импульса, массы и энергии.

Краткий анализ исследований местных отсосов показывает, что для эффективного удаления взвешенных частиц пыли необходима локализация пылевоздушных потоков с помощью приточных струй.

Одним из способов создания нормируемых параметров микроклимата является создание однонаправленного воздушного потока с использованием различных воздухораспределителей на основе воздухораздающего блока ВБ.

ВБ адаптирован к конструкции несущего каркаса потолочной ячейки чистых помещений и препятствует эжектированию воздуха из запотолочного пространства. При замене фильтра (при снятой воздухораздающей панели) отсутствует проникновение загрязнений в «чистую зону» за счёт плотности соединения корпуса ВБ и потолочных ограждающих конструкций в соответствии с нормами GMP [97].

На рисунке 1.19 представлены съемные панели с перфорированными и сотовыми ячейками.

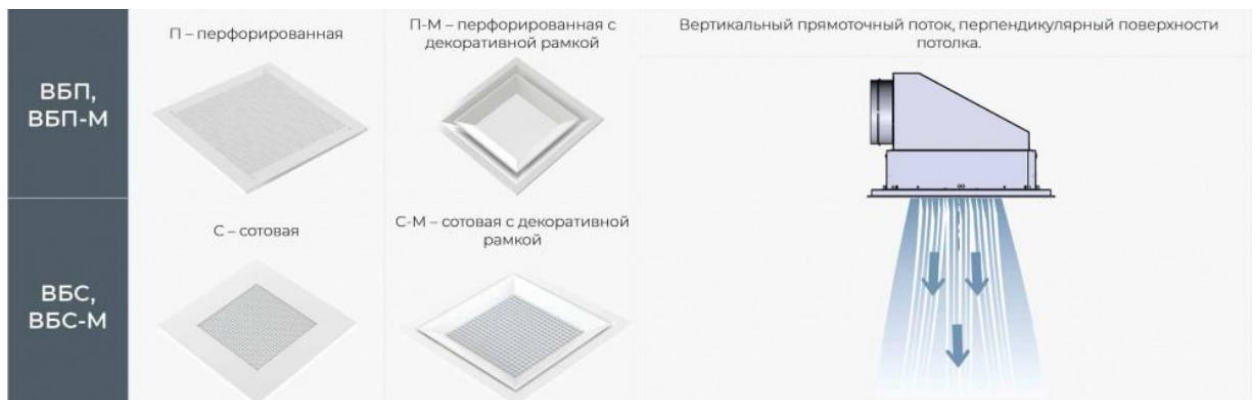


Рисунок 1.19 – Панели типа ВБП, ВБП-М, ВБС, ВБС-М

При использовании местных отсосов, активированных приточной струей, необходимо знать закономерности возникающего течения при ее взаимодействии с отсосом и необходимый расход приточного воздуха. В работе [1] разработана методика расчета необходимого расхода воздуха при перегрузке сыпучего материала.

Как отмечено в работе [95], на начальном участке струя может расширяться как свободная. Но по мере приближения ко входному отверстию отсоса расширение приточной струи становится менее интенсивным, происходит торможение и сужение приточной струи. В зависимости от производительности местного отсоса может происходить полный захват струи, что соответствует минимально необходимому расходу местного отсоса (полному улавливанию струи). В случае производительности отсоса меньше расхода приточного воздуха, струя частично будет обтекать местный отсос, попадая в помещение. Если производительность отсоса больше расхода приточного воздуха, то помимо струи в местный отсос будет поступать воздух из помещения.

В большинстве случаев задача исследования заключается в обеспечении полного улавливания приточной струи. Однако, при расходе приточной струи больше производительности отсоса, струя может использоваться для создания необходимых параметров микроклимата на рабочем месте. При использовании приточной струи для удаления пыли при засыпке порошкообразного лекарственного препарата в гранулятор необходимо выявить условия предельного улавливания струи.

1.2.4 Нормативные требования при проектировании систем вентиляции и кондиционирования чистых помещений фармацевтических производств

В фармацевтическом производстве чистые помещения различаются в зависимости от производственных операций (ТЛФ, МЛФ, ГЛФ, ЖЛФ) и класса чистоты (a , b , c , d) [64, 87, 97]. Чистые зоны при производстве стерильных лекарственных средств подразделяются на четыре типа:

Класс a — локальная зона для проведения операций, представляющих высокий риск для качества продукции, например, зоны наполнения, укупорки;

зоны, где ампулы и флаконы находятся в открытом состоянии и выполняются соединения частей оборудования в асептических условиях. Как правило, в таких зонах используют однонаправленный (ламинарный) поток воздуха, обеспечивающий в незамкнутой чистой зоне однородную скорость 0.36—0.54 м/с (рекомендуемое значение) [104]. Поддержание однонаправленности воздушного потока должно быть подтверждено при аттестации (испытаниях). В закрытых изолирующих устройствах и перчаточных боксах допускается использовать однонаправленный поток воздуха с меньшей скоростью;

Класс *b* — зона, непосредственно окружающая зону *a* и предназначенная для асептического приготовления и наполнения;

Классы *c* и *d* — чистые зоны для выполнения менее ответственных стадий производства стерильной продукции.

Чистые помещения и чистые зоны следует классифицировать согласно [31, 32].

Твёрдые лекарственные формы в основном производят в помещениях класса *c* и *d*. Чистые помещения делятся на три состояния [70]:

- построенное — монтаж помещения завершен, системы все подключены, но отсутствует оборудование, мебель, материалы или персонал;
- оснащенное — помещение укомплектовано оборудованием и действует по соглашению между заказчиком и исполнителем, но персонал отсутствует;
- эксплуатируемое — помещение функционирует установленным образом с работающим оборудованием и заданным числом персонала.

Оборудование системы вентиляции и кондиционирования воздуха в помещениях должно обеспечить:

- отвод тепловыделений;
- кратность воздухообмена, приток свежего наружного воздуха, избыточное давление, требуемое направление потока воздуха между чистыми помещениями;
- параметры микроклимата в чистых помещениях;
- местные отсосы от технологического оборудования.
- заданные классы чистоты.

В таблице 1.2 представлена нормативная документация для проектирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха чистых помещений для фармацевтических производств [21-22, 22-32, 97, 104, 105, 112-114].

Таблица 1.2 – Нормативная документация, применяемая при проектировании чистых помещений фармацевтических производств

Обозначение нормативного документа	Название нормативного документа	Примечания
Приказ Минпромторга России от 14.06.2013 №916 (Зарегистрировано в Минюсте России 10.09.2013 N 29938)	Об утверждении Правил организации производства и контроля качества лекарственных средств	Общие требования к проектированию инженерных систем
ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017	Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха	Класс чистоты
ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002	Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 4. Проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию	Общие требования к проектированию инженерных систем
СанПин 1.2.3685-21	Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. Санитарные правила и нормы"	Температура воздуха на рабочих местах
СП 50.13330.2024	Тепловая защита зданий	
СП 60.13330.2020	Отопление, вентиляция и кондиционирование	
СП 118.13330.2022	Общественные здания и сооружения	
СП 56.13330.2021	Производственные здания	

1.2.5 Классификация чистых помещений фармацевтических производств

В таблице 1.3 приводятся значения максимально допустимого числа частиц. Класс зависит от содержания концентрации взвешенных частиц определенного размера, как правило, в диапазоне от 0,5 мкм до 5 мкм в 1 м³ и состояния помещения [31, 32, 97, 140-142].

Таблица 1.3 – Допустимая концентрация аэрозольных частиц

Максимально допустимое количество частиц в 1 м ³ воздуха при размере частиц, равном или большем										
Стандарты GMP Китая (2010 г.) и стран ЕС					Стандарты Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов США (FDA)			Стандарт ISO 14644		
	В оснащённом состоянии		В эксплуатируемом состоянии			В эксплуатируемом состоянии				
Класс чистоты	0,5 мкм	5,0 мкм	0,5 мкм	5,0 мкм	Класс чистоты	0,5 мкм	5,0 мкм	Класс чистоты	0,5 мкм	5,0 мкм
A	3520	20	3520	20			—	4		20
B	3520	29	352000	2900	100	3520	—	5	3520	29
—	—	—	—	—	1000	35200	—	6	35200	293
C	352000	2900	3520000	29000	10000	352000	—	7	352000	2930
D	3520000	29000	—	—	100000	3520000	—	8	3520000	29300

По формуле 1.8 определяется классификация чистых помещений [31].

$$C_n = 10^N \cdot \left(\frac{0,1}{D}\right)^{2,08}, \quad (1.8)$$

где C_n – максимальная допустимая концентрация частиц (1 м³ воздуха), размер которых равен или больше указанного в классификации;

N – класс по ISO, не превышающий 9. Допускаются промежуточные классы с минимальным интервалом 0,1 N ;

D – рассматриваемый размер частиц в мкм;

0,1 – постоянная величина, с размерностью мкм.

С помощью данной формулы можно рассчитать предельно допустимую концентрацию взвешенных частиц.

Необходимость определения количества, а также классификации взвешенных частиц в чистом производстве связана с понятием стерильности и асептичности [70, 135]. В зависимости от назначения помещения и производимой операции рекомендуют использовать классы чистоты, указанные в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Операции производства

Класс	Стерильные операции
A	Наполнение продукции, которую нельзя подвергать риску контаминации
C	Приготовление растворов, которые нельзя подвергать риску контаминации. Наполнение продукции
D	Приготовление продукции
Класс	Асептические условия
A	Асептическое приготовление и наполнение
B	Приготовление растворов, подлежащих фильтрации
D	Операции с материалами после мойки

В составе воздуха, помимо пыли, могут содержаться химические, биологические компоненты. Состав данных компонентов зависит от категории производства фармацевтических веществ, которые в свою очередь зависят от

воздействия фармацевтического вещества на систему жизнеобеспечения человека [53].

В чистых помещениях по производству твердых лекарственных форм с однонаправленной подачей воздуха в рабочую зону предъявляются следующие требования к параметрам микроклимата, которые представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Параметры микроклимата чистых помещений

Характеристика	Значение		Нормативный документ
Класс чистоты	с и d		Приказ Минпромторга России от 14.06.2013 N916; ГОСТ Р ИСО 14644-1
Перепад давлений между чистым и грязным помещением	10-15 Па		Приказ Минпромторга России от 14.06.2013 N916
	Холодный период	Теплый период	
Температура воздуха в рабочей зоне, °C	21,0-23,0	22,0-24,0	СанПиН 1.2.3685-2021.
Влажность воздуха, %	10-55	10-55	СанПиН 1.2.3685-2021.
Скорость воздуха, м/с	0,1-0,2	0,1-0,3	СанПиН 1.2.3685-2021.

Основные параметры внутреннего воздуха (температура, влажность, скорость потока) и количество наружного воздуха принимаются в соответствии с технологическими требованиями и требованиями [104].

При выборе параметров микроклимата важно учесть нормативные требования [104], где представлены значения температуры, влажности, скорости воздуха в зависимости от назначения помещения и категории работ. В свою очередь требования к параметрам воздушной среды зависят от назначения чистого помещения и задаются заказчиком [140, 141].

После определения категории производства, класса чистоты можно приступать к определению параметров микроклимата помещения.

Температура внутреннего воздуха, относительная влажность, скорость воздуха определяются в зависимости от категории работ по уровню энергозатрат, как правило, для чистых помещений фармацевтических производств Iб (140-174 Вт) [104].

В целях экономии энергии задаются нижние и верхние границы допустимых величин параметров микроклимата.

1.3 Методы исследований воздушной среды чистых помещений фармацевтических производств

В настоящее время широко используются следующие методы для определения состояния характеристик воздушной среды чистых помещений фармацевтических производств:

- метод численного моделирования (программные комплексы Star CCM+, Ansys CFD и др.);
- инженерный метод (определение аналитическим путем характеристик микроклимата);
- лабораторный метод исследования (создание условий аналогичных реальному производственному процессу);
- натурный эксперимент (эксперимент, который проводится на реальных объектах в естественных условиях их существования).

1.4 Выводы

Динамика развития производства фармацевтической промышленности растёт, а вместе с этим растёт актуальность использования чистых помещений. На примере изготовления твёрдых лекарственных форм показана проблема перекрестной контаминации, а именно запыленности помещения на этапе

грануляции, что влечет за собой загрязнением выпускаемой продукции на разных этапах производства.

Для предотвращения перекрестной контаминации в чистом помещении необходимо разработать:

- схему лабораторной установки и план проведения эксперимента, в связи с недостаточным исследованием пылеобразования при изготовлении ТЛФ;

- численную модель экспериментальной установки для выявления особенностей взаимодействия приточной струи и фармацевтического гранулятора;

- на основании результатов численного моделирования создать лабораторную установку для имитации фрагмента чистого помещения с гранулятором в натуральном размере и провести ряд исследований с целью снижения распространения взвешенных частиц в чистом помещении.

2 ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИТОЧНОЙ СТРУИ И ГРАНУЛЯТОРА

В чистом помещении эксплуатационные затраты превышают капитальные затраты в несколько раз, а одним из основных потребителей энергии в действующих производствах являются системы вентиляции и кондиционирования воздуха (более 40 % от всей потребляемой энергии) [133]. Исследования микроклимата в чистых помещениях направлены на снижение стоимости монтажа и эксплуатации систем вентиляции и кондиционирования воздуха.

В настоящее время наибольшее распространение получили методы численного моделирования различных физических процессов, в том числе тепломассообменных и аэродинамических процессов в помещениях гражданских и производственных зданий. Математическое моделирование процессов микроклимата получило широкое распространение относительно недавно с появлением программ STARCCM+, STAR-CD, FLUENT, CFX, Ansys и др. Принцип работы данных программ опирается на численное решение исходной системы дифференциальных трехмерных уравнений Навье-Стокса [40, 63, 66, 154].

Численные исследования позволяют обосновать наиболее рациональный вариант организации воздухообмена и воздухораспределения без трудоемких многочисленных лабораторных и натурных экспериментов. Подробные поля распределения параметров воздуха, в частности концентрации взвешенных частиц, дают возможность спрогнозировать динамику пылевоздушных потоков для разработки эффективных конструкций вытяжных устройств.

2.1 Использование уравнения Навье-Стокса для задач численного моделирования распространения воздушного потока в пространстве чистого помещения

Все вентиляционные течения делятся на три типа, которые описываются соотношением зависимости сил инерции и тяжести, т.е. числом Ричардсона. Если $R_i \ll 1$, то преобладает вынужденная конвекция, как правило течение в воздуховодах, если $R_i \gg 1$, то преобладают естественно конвективные потоки, как правило, это восходящие потоки над нагретыми источниками, например, при вытесняющей вентиляции, если $R_i \approx 1$, то преобладают смешанно-конвективные течения [40].

Неизотермические течения описываются следующими уравнениями:

- уравнение сохранения массы;
- уравнение сохранения импульса;
- уравнение состояния;
- уравнение сохранения энергии.

Для нахождения характеристик турбулентности используются различные модели, например, k - ε , k - ω и т.д. Для решения дифференциальных уравнений осуществляется переход к алгебраическим уравнениям, которые решаются методом контрольного объема.

В основе численного моделирования лежит решение системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса, неразрывности, энергии и примесей [65]:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{u}_i + \overline{\rho' u'_i}) = S_m, \quad (2.1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \frac{-\partial \bar{P}}{\partial x_j} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau'_{ij}}{\partial x_j} + S_i, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} a)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} a \bar{u}_i)}{\partial x_j} = \frac{-\partial (\overline{\rho u'_j a'})}{\partial x_j} + \bar{J}_a, \quad (2.3)$$

где t – время;

ρ – плотность;

μ – коэффициент динамической вязкости;

$\overline{u_j}$ – компоненты вектора осредненной скорости по осям координат;

τ_{ij} – турбулентные напряжения (дополнительные напряжения Рейнольдса);

u'_i, u'_j, T', C' – локальные пульсации скорости, температуры и примеси потока;

$\overline{a}$ – осредненные значения удельной плотности скалярной величины;

S_m, S_i – интенсивность источников массы и импульса;

$\overline{J_a}$ – интенсивность источников примеси;

$\overline{P}$ – давление.

В данной работе для замыкания системы уравнений использована стандартная k-ε модель турбулентности.

2.2 Лагранжева и Эйлера многофазность и их применимость к задачам расчета взвешенных частиц чистых помещений

Для решения задач, связанных с многофазными потоками и взаимодействием между ними используется многофазный Лагранжевый и Эйлеровый потоки [9, 11].

Различия между Лагранжевой и Эйлеровой механикой заключается в координатах движения частиц (x, y, z). В Лагранжевой механике координаты частиц в среде являются переменными, а в Эйлеровой механике координаты частиц фиксированы и через эти частицы проходит поток среды [72].

Модели многофазного потока по Лагранжу в STAR-CCM+ предназначены для моделирования и отслеживания траектории потока дисперсных частиц в непрерывной фазе, включая связанные с этим явления тепло- и массопереноса, такие как испарение капель, осаждение и витание взвешенных частиц. Лагранжевы численные методы могут быть использованы

в сочетании с эйлеровскими численными методами для описания ситуаций, когда динамика отдельных частиц влияет на решение в масштабе, который определяется в эйлеровом поле. Как правило, для описания эволюции отдельных частиц по мере их перемещения по области используется лагранжева система отсчета. Уравнения изменения записываются для каждой отдельной частицы. Частицы не распределяются по эйлерову полю, они представляют собой подсеточку, и взаимодействие между фазами моделируется [76].

Если поток ламинарный, то каждая частица, вылетающая из точки, движется по плавной уникальной траектории, то есть движение частицы является детерминированным. Если частицы попадают в турбулентный несущий поток, то каждая из них имеет свой собственный случайный путь из-за взаимодействия с изменяющимся турбулентным полем скоростей.

В приложениях с высокой объемной долей частиц, таких как псевдооживленные слои, насадочные слои или пневмотранспорт, важен эффект взаимодействия частиц друг с другом. Для этих целей STAR-CCM+ предлагает метод дискретных элементов (DEM), который встроен в многофазную систему Лагранжа. DEM специально разработан для моделирования гранулированных материалов. В общем, частицы DEM — это твердые частицы, которые испытывают дополнительные контактные силы, которые входят в уравнения лагранжева импульса. В дополнение к линейному уравнению импульса для частицы DEM должно выполняться условие сохранения углового момента [77, 137].

STAR-CCM+ предоставляет основу для моделирования, которая способна охватить все вышеперечисленные явления. Система основана на лагранжево-эйлеровском подходе, в котором уравнения сохранения массы, импульса и энергии для дисперсной фазы записываются для каждой отдельной частицы в лагранжевой форме. Этот подход позволяет рассчитать траекторию каждой отдельной частицы. Основные уравнения для сплошной фазы выражены в эйлеровой форме и модифицированы с учетом присутствия

дисперсной фазы. Для потоков, содержащих небольшое количество дисперсных частиц, можно решить систему уравнений Лагранжа для каждой частицы [76].

Многофазные потоки Эйлеровской механики, при которых в интересующей области протекает несколько жидкостей, играют важную роль в различных областях промышленного применения. Как правило, мы ассоциируем фазы с газами, жидкостями или твердыми телами, и поэтому вот несколько простых примеров многофазных потоков: пузырьки воздуха, поднимающиеся в стакане с водой, частицы песка, переносимые ветром, капли дождя в воздухе. Определение фазы может быть обобщено и применено к другим характеристикам жидкости, таким как размер, форма, плотность и температура [123].

Численное моделирование таких потоков более сложно по сравнению с моделированием однофазного потока из-за наличия границы раздела фаз, на которой происходит скачок свойств жидкость-флюид, а также происходит обмен массой, импульсом и теплотой между фазами. В целях моделирования такие потоки могут быть классифицированы на основе увеличения пространственных масштабов границы раздела фаз на дисперсные (пузырьковый, капельный поток), смешанные/прерывистые (струйный поток, бессвязный поток) и разделенные/ стратифицированные (пленочный, кольцевой, горизонтальный стратифицированный поток).

С другой стороны, частицы, которые попадают в турбулентный несущий поток, имеют свою собственную случайную траекторию из-за взаимодействия с флуктуирующим турбулентным полем скоростей. Для объяснения этого явления предлагается модель турбулентного рассеяния.

Если в их движении преобладают взаимодействия частиц со сплошной фазой, а не друг с другом, дисперсные фазы разрезаются. Для таких потоков разработана многофазная модель Лагранжа [49, 120].

Точно так же, как модели выбираются для физических континуумов, модели, которые предоставляются для прогнозирования состояния каждого

участка, могут быть выбраны для каждой фазы. Можно моделировать как (реальные) материальные частицы, так и (виртуальные) безмассовые частицы. Доступны модели материалов для представления однокомпонентных газов, одно- или многокомпонентных жидкостей и однокомпонентных твердых тел, а также уравнения состояния с постоянной плотностью или полиномиальной плотностью. Уравнение сохранения импульса управляет потоком материальных частиц и может дополнительно включать сопротивление, виртуальную массу и силы, определяемые пользователем. Аналогичным образом можно решить уравнение сохранения энергии, включая конвективный теплообмен и дополнительный источник энергии, определяемый пользователем. Специальные модели для капель в газовой среде (аэрозоли) включают уравнение сохранения массы, учитывающее изменение массы капель в результате испарения или конденсации. Они также включают модели первичного распыления и вторичного разрушения.

Если поток непрерывной фазы ламинарен, то частица, выпущенная из точки в данный момент времени, следует по плавной уникальной траектории, то есть движение является детерминированным. С другой стороны, частицы, попадающие в турбулентный несущий поток, имеют свою собственную случайную траекторию из-за взаимодействия с изменяющимся полем турбулентных скоростей. Для объяснения этого явления предлагается модель турбулентной дисперсии.

Лагранжева и Эйлерова многофазность в численном моделировании позволяет эффективно изучать сложные системы, так как комбинирует преимущества отслеживания индивидуальных траекторий частиц с описанием непрерывных физических полей, обеспечивая более точное моделирование турбулентных процессов и динамики взаимодействующих сред. Данный подход является ресурсоёмким, так как обусловлен необходимостью одновременной обработки огромных массивов данных, выполнения сложных вычислений, многократных итераций, что требует значительных вычислительных мощностей и длительного времени моделирования.

2.3 Численное моделирование взаимодействия приточной струи и гранулятора

2.3.1 Построение геометрии модуля чистого помещения в программном комплексе SolidWorks

В рассматриваемом модуле чистого помещения фармацевтического производства класса d по GMP расположен гранулятор с открытым бункером, в которой с периодичностью засыпается порошок оператором для последующего таблетирования [38, 42]. На производственный процесс оказывают влияние параметры микроклимата, в нашем случае это скорость движения воздушного потока при натекании и обтекании гранулятора.

Рассмотрим геометрию модуля чистого помещения, которая была построена в программе Solid Works [66]. На рисунке 2.1 изображен модуль чистого помещения. При расчете приняты размеры, соответствующие натурным условиям к предполагаемому лабораторному эксперименту. Поскольку в реальных условиях температура подачи воздуха в помещение составляет близкую к температуре внутреннего воздуха 19°C , то приняты изотермические условия [104].

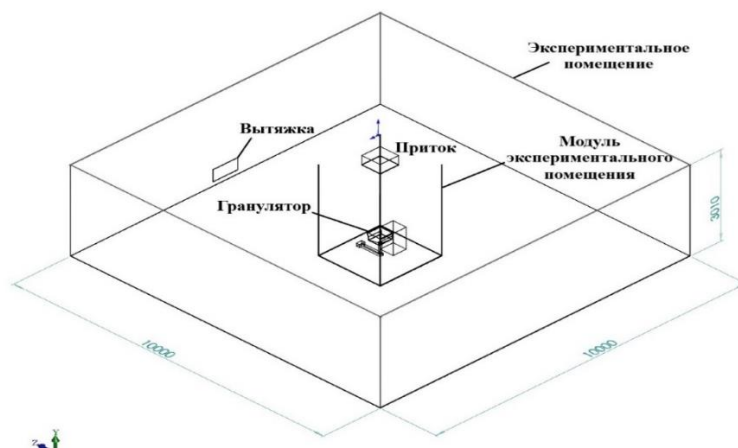
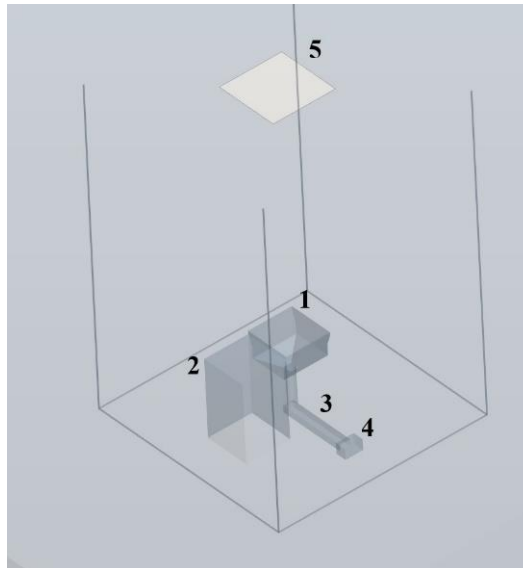


Рисунок 2.1 – Модуль чистого помещения

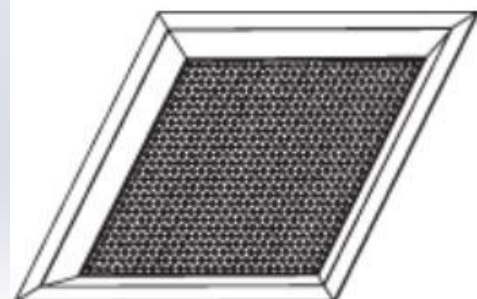
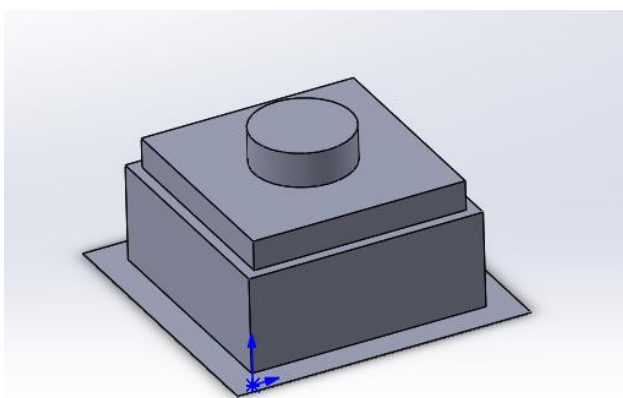
В самом модуле располагается каркас, на котором установлен прямоточный воздухораспределитель с сотовой панелью, зона вытяжки находится ниже рабочей зоны на расстоянии 100 мм от пола, гранулятор имеет открытый бункер [149]. На рисунке 2.2 приведена подробная компоновка экспериментального модуля.



1 – гранулятор; 2 – рабочий привод гранулятора; 3 – канал, отводимый пыль; 4 – вентилятор; 5 – воздухораспределитель

Рисунок 2.2 – Экспериментальный модуль

В качестве воздухораспределителя используется камера статического давления и решетка с сотовой панелью (ВБС-М), а также НЕРА-фильтр для выравнивания воздушного потока в рабочей зоне [59]. На рисунке 2.3 изображена модель воздухораспредающего блока.



Сотовая панель
(ВБС-М)

Рисунок 2.3 – Модель воздухораспредающего блока с сотовой панелью

В качестве экспериментального объекта принят гранулятор для сухого гранулирования порошков YR-90 [60, 119, 139]. Технические характеристики гранулятора, подробные значения размеров геометрии моделирования приведены на рисунках Б.1-Б.9 и в таблице Б.1 в приложении Б. На рисунке 2.4 изображена 3D модель гранулятора.

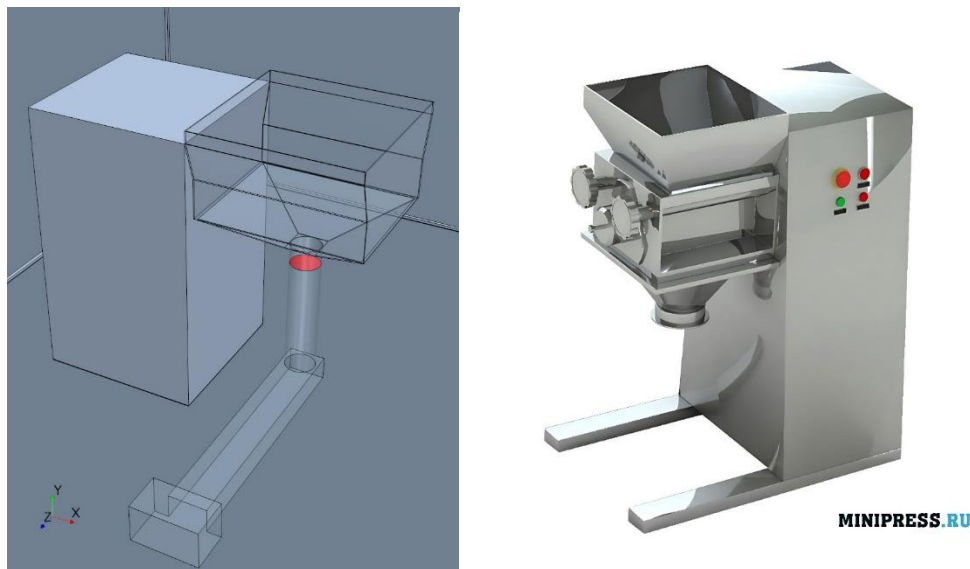


Рисунок 2.4 – 3D-модель и реальный гранулятор

2.3.2 Построение и обоснование выбора расчетной сетки методом сеточной сходимости

Для расчёта поставленной задачи используется метод контрольного объёма. В отличие от метода конечных разностей преимущество метода заключается в обеспечении консервативности численной схемы, что позволяет получить решение на относительно грубых сетках и на менее мощных вычислительных машинах [41, 145].

Принцип метода контрольного объёма заключается в разбивки расчётной области на элементарные объёмы с расчетной точкой в каждом объеме. Совокупность элементарных объемов называется расчетной сеткой. Центр каждого объема несёт в себе физические значения (температура, скорость, объем, давление и др.) [147].

Интегрирование дифференциальных уравнений производится по каждому элементарному объему. Интегралы вычисляются с использованием интерполяционных формул, при помощи которых определяют значения искомых переменных между расчетными точками. В результате получают дискретный аналог исходных уравнений, который отражает закон сохранения изучаемых переменных в каждом конечном объеме [149].

Для точного расчета и передачи физических значений среды в программе строится неструктурированная расчетная сетка. В отличие от других форм сеток данная сетка имеет простую геометрическую форму, возможность оперативного расчета, передачи информации от ячейки к ячейке и подходит для решения задач микроклимата помещения [155].

Для анализа введена вертикальная плоскость для считывания значений скорости при взаимодействии приточной струи и гранулятора. Базовые размеры ячеек приняты от 0,01-0,05 м. Измельчение сетки в области приточной струи вблизи бункера составляет 12,5 %. Для каждого значения размера сетки был произведен 3D расчёт.

По итогам сеточной сходимости определен базовый размер ячейки 0,05 м, а также определены зоны введения объемного контроля для локального измельчения сетки в приграничных зонах. На рисунке 2.5 представлен вариант сетки для проверки на сеточную сходимость.

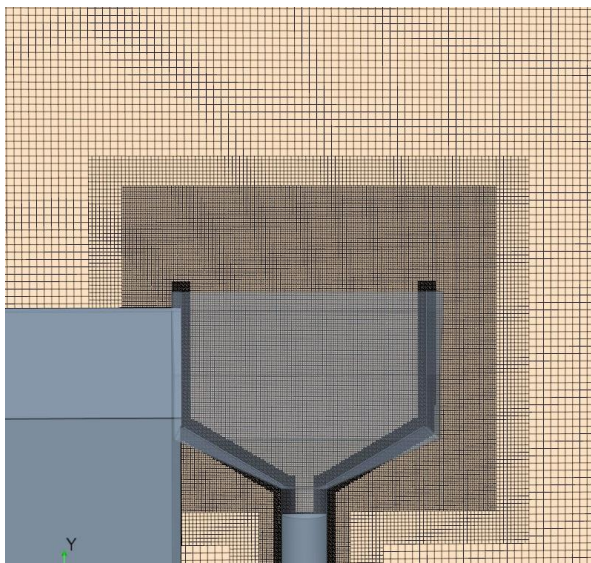


Рисунок 2.5 – Расчётная сетка для сеточной сходимости

Оптимальное количество ячеек и количество итераций позволяет использовать персональные компьютеры с небольшой вычислительной мощностью, но при этом достигать точных значений [153]. На рисунке 2.6 представлен вариант сетки для численного моделирования.

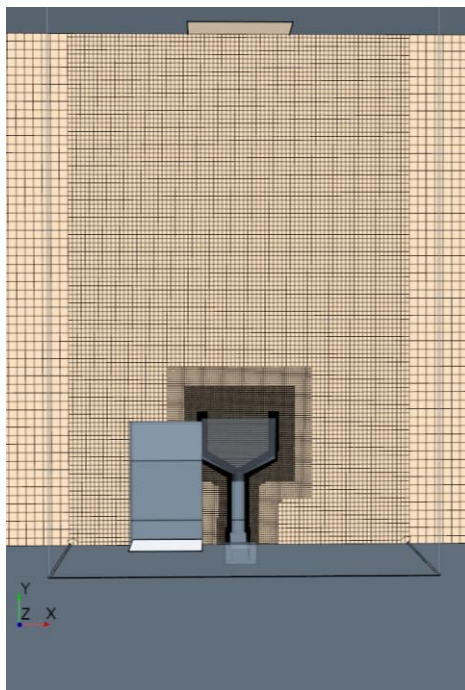


Рисунок 2.6 – Расчётная прямоугольная сетка

2.3.3 Выбор физической модели для решения задачи «взаимодействия проточной струи с фармацевтическим гранулятором»

Основное отличие моделей $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ заключается в их области применения. Модель $k-\varepsilon$ предназначена для течений вдали от границ (стен), например, в области свободного потока. Она полезна для течений в слоях свободного сдвига с относительно небольшими градиентами давления, а также в ограниченных потоках. Модель $k-\omega$ лучше подходит для области течения вблизи стен, где развивается обратный градиент давления. В отличие от модели $k-\varepsilon$, для неё не требуется введение дополнительных пристеночных функций. Таким образом, $k-\varepsilon$ модель хорошо предсказывает вдали от границ,

а $k-\omega$ модель — вблизи них. Выбор между этими моделями зависит от конкретной задачи и условий моделирования [150, 154].

Для исследования области скоростей приточной струи в рабочем пространстве выбрана модель $k-\epsilon$ [109]. Значения физических параметров приведены рисунке 2.7.

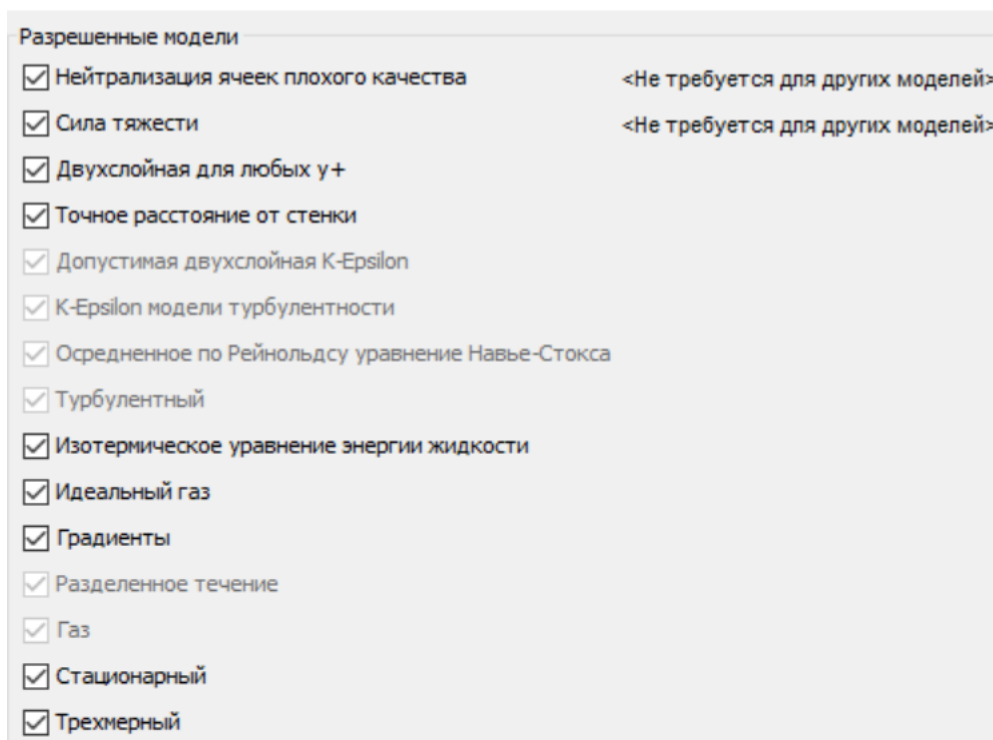


Рисунок 2.7 – Параметры физической модели

2.3.4 Задание граничных условий

В качестве граничных условий заданы значения массового расхода на входе, выходе в экспериментальный модуль через приточный воздухораспределитель и вытяжную решетку, а также расход на вытяжке (на входе в гранулятор). Режим изотермический при постоянной температуре подачи воздуха. На рисунке 2.8 изображены границы, на которых заданы физические условия для притока и вытяжки.

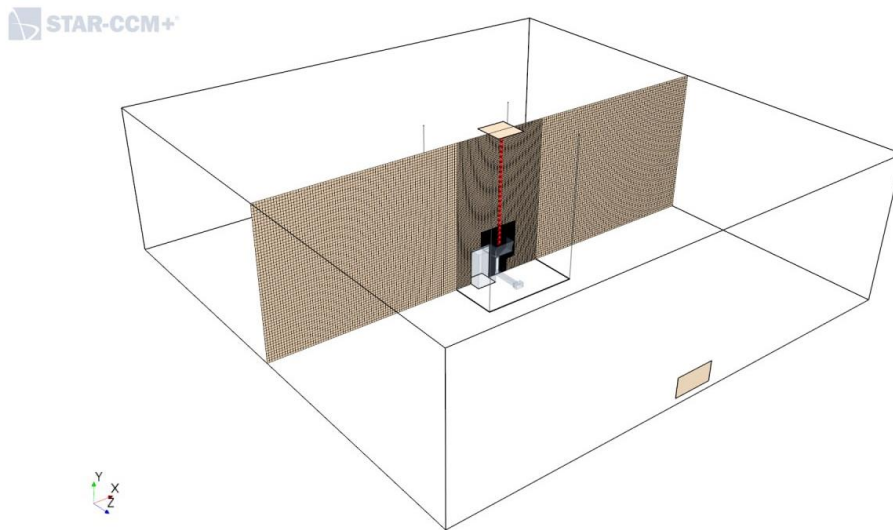


Рисунок 2.8 – Граничные условия для моделирования

Численное моделирование экспериментального модуля осуществлялось для двух расходов приточного и вытяжного воздуха и для трех режимов работы гранулятора. Приняты расходы в размере $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ для приточного и вытяжного воздуха. Данные значения расходов выбраны, исходя из условий минимального и максимального воздухообмена ($150 < L_{\text{п}} < 300$, $\text{м}^3/\text{ч}$) в приложении А, формулы А.2 и А.3. Расход для гранулятора на всасывание принят для трех режимов работы исходя их технических требований производителя ($0 \text{ м}^3/\text{ч}$, $30 \text{ м}^3/\text{ч}$, $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ – для расхода $300 \text{ м}^3/\text{ч}$; $0 \text{ м}^3/\text{ч}$, $15 \text{ м}^3/\text{ч}$, $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ – для расхода $150 \text{ м}^3/\text{ч}$). Для каждого расхода количество итераций составляло от 4000-4400. Количество итераций изображено на рисунке 2.9 и 2.10.

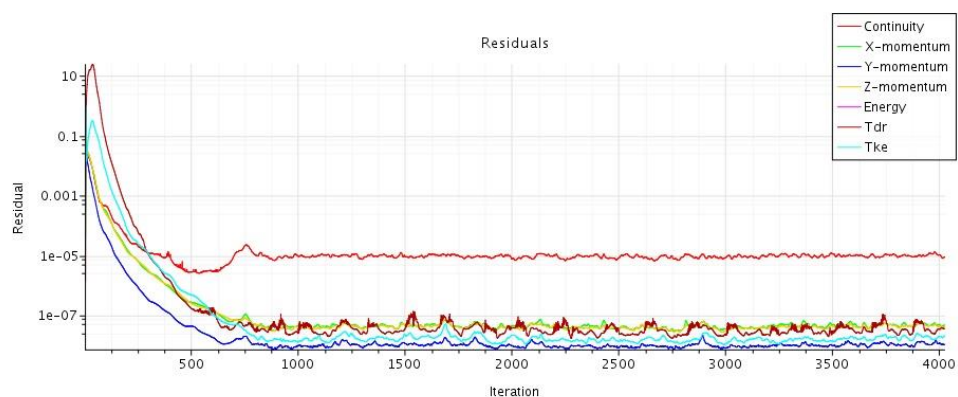


Рисунок 2.9 – График Residuals для расхода $0,108 \text{ кг/с}$

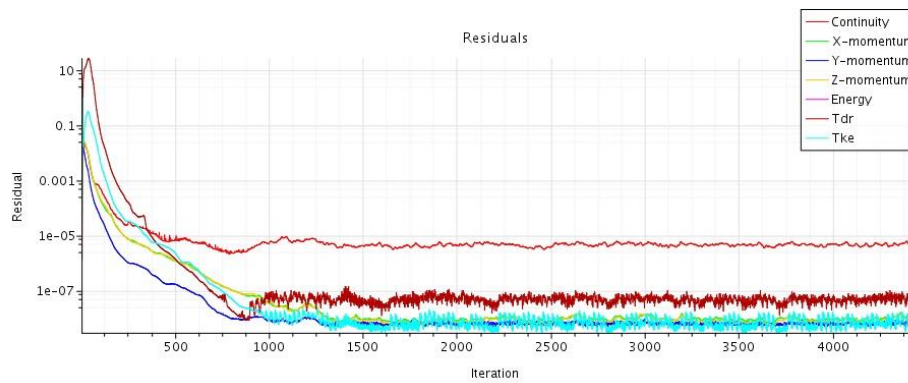


Рисунок 2.10 – График Residuals для расхода 0,055 кг/с

Для оценки значений скорости на аэродинамической оси с шагом 100 мм определены точки измерений для лабораторного эксперимента, а также плоскость измерения, на которой располагаются данные точки (рисунок 2.11).

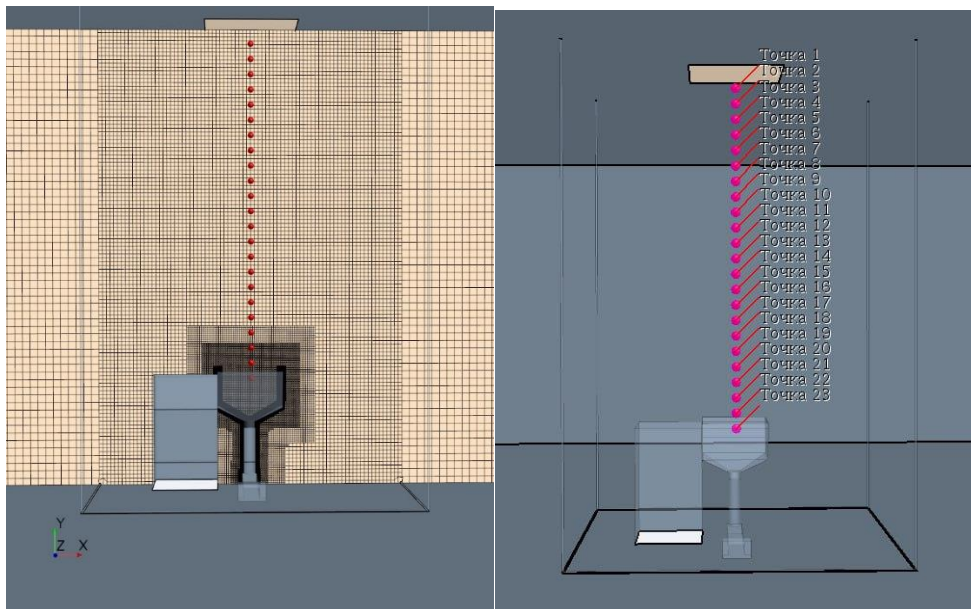
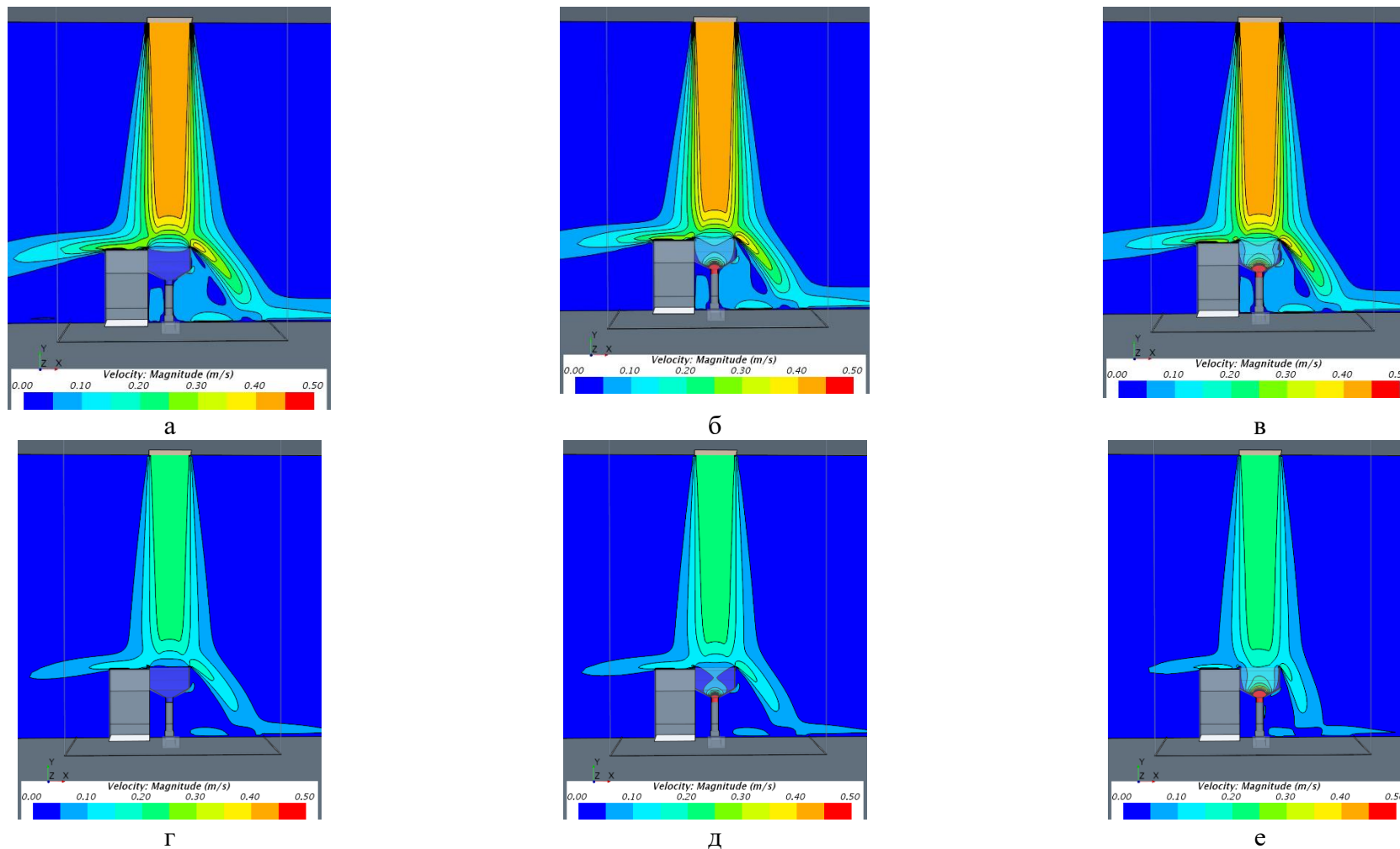


Рисунок 2.11 – Точки измерений на плоскости аэродинамической оси

2.4 Результаты численного моделирования взаимодействия приточной струи и гранулятора

На рисунках 2.12 представлены поля распределения скорости движения воздуха в пространстве над гранулятором и в зоне дыхания оператора, полученные в результате численного эксперимента.



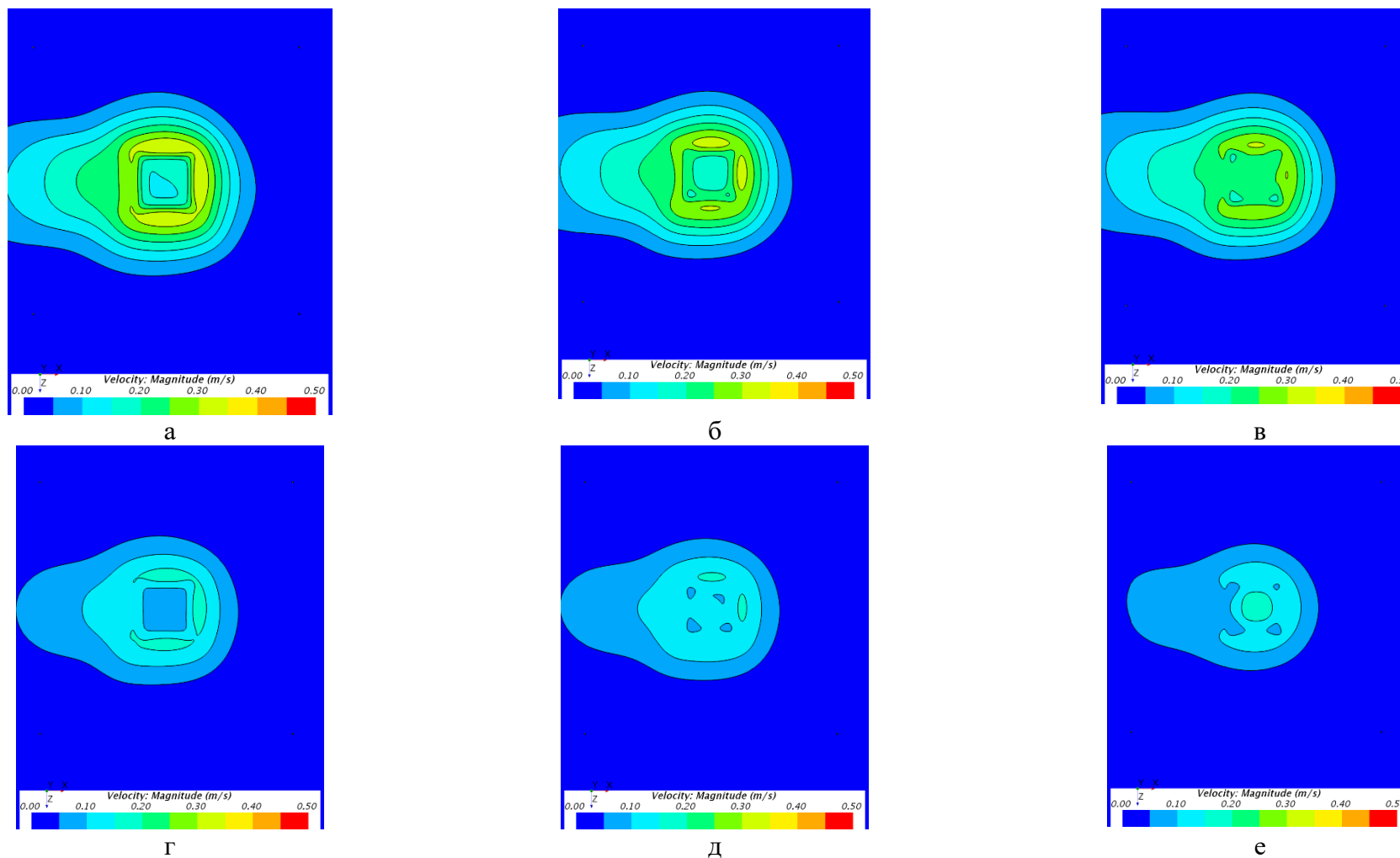
а – расход притока $300 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход гранулятора $0 \text{ м}^3/\text{ч}$ (далее $300/0 \text{ м}^3/\text{ч}$); б – $300/30 \text{ м}^3/\text{ч}$; в - $300/50 \text{ м}^3/\text{ч}$; г – $150/0 \text{ м}^3/\text{ч}$;
 д – $150/15,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; е – $150/50 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 2.12 – Вертикальное поле скоростей

На рисунке 2.12 видно, что на расстоянии 0,3 м от гранулятора струя начинает испытывать влияние препятствия (гранулятора), происходит торможение и поворот струи. Струя обтекает гранулятор, создавая при этом несимметричные зоны распределения скоростей на рабочем месте оператора из-за наличия вспомогательного оборудования (блока электропривода гранулятора). При этом скорости не превышают нормируемых значений. Максимальное значение при срыве струи в правой части при расходе максимальном всасывании гранулятора до 0,3 м/с. Одновременно в правой части образуется зона с малыми скоростями, способствующая формированию ниспадающей струи. Частично воздух поступает в бункер гранулятора. В левой части поля скоростей наблюдается затухание струи, что связано с наличием препятствия (блока электропривода), соразмерного с гранулятором.

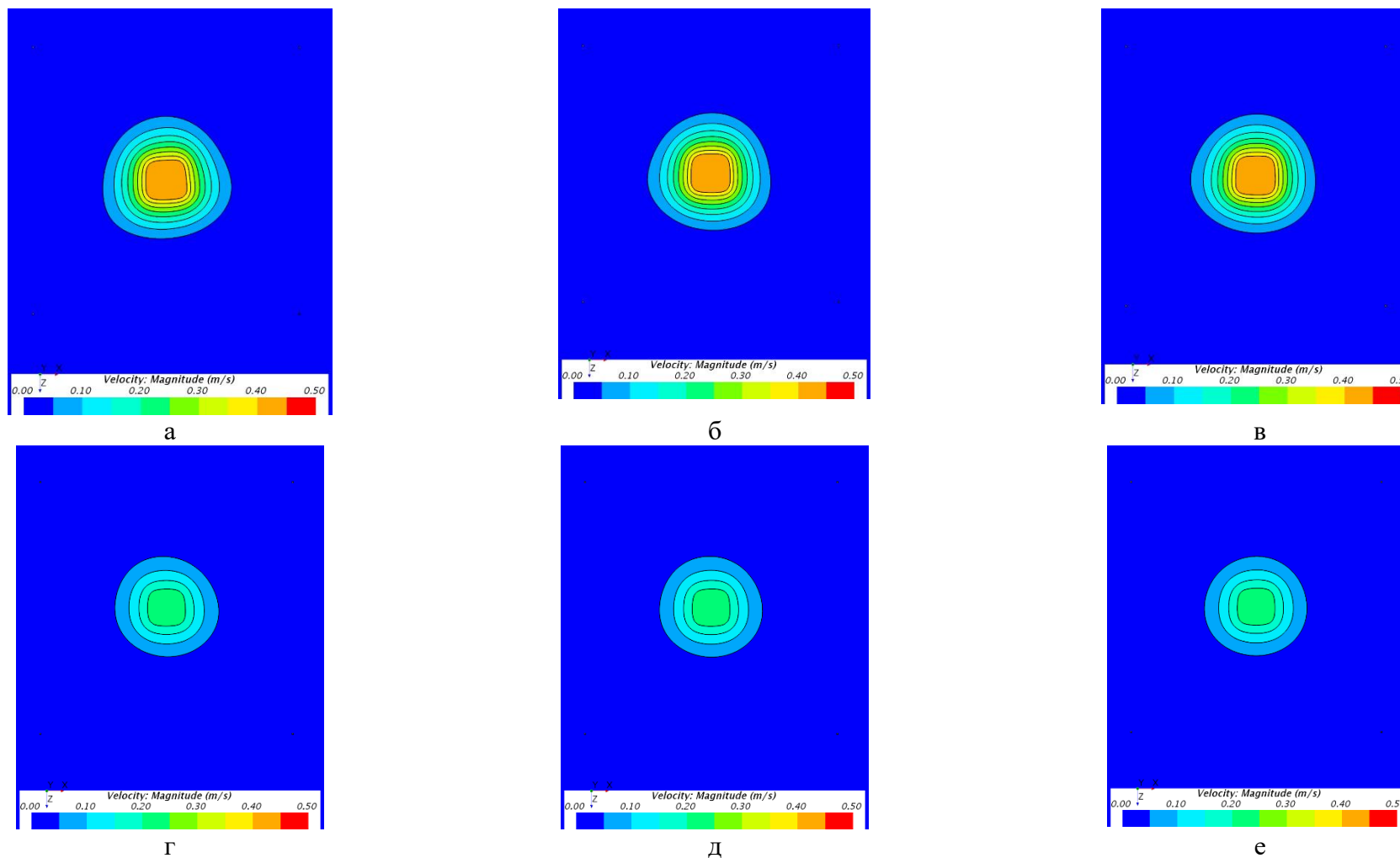
При увеличении расхода воздуха на входе в гранулятор поле скоростей над поверхностью гранулятора выравнивается. За счет выравнивания поля скоростей наблюдается наилучшая локализация взвешенных частиц как описано в работах [76, 106, 107].

На рисунках 2.13 и 2.14 представлены поля распределения скоростей над поверхностью гранулятора и в зоне дыхания оператора.



а – расход притока $300 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход гранулятора $0 \text{ м}^3/\text{ч}$ (далее $300/0 \text{ м}^3/\text{ч}$); б – $300/30 \text{ м}^3/\text{ч}$; в – $300/50 \text{ м}^3/\text{ч}$; г – $150/0 \text{ м}^3/\text{ч}$;
 д – $150/15,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; е – $150/50 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 2.13 – Горизонтальное поле скоростей над гранулятором

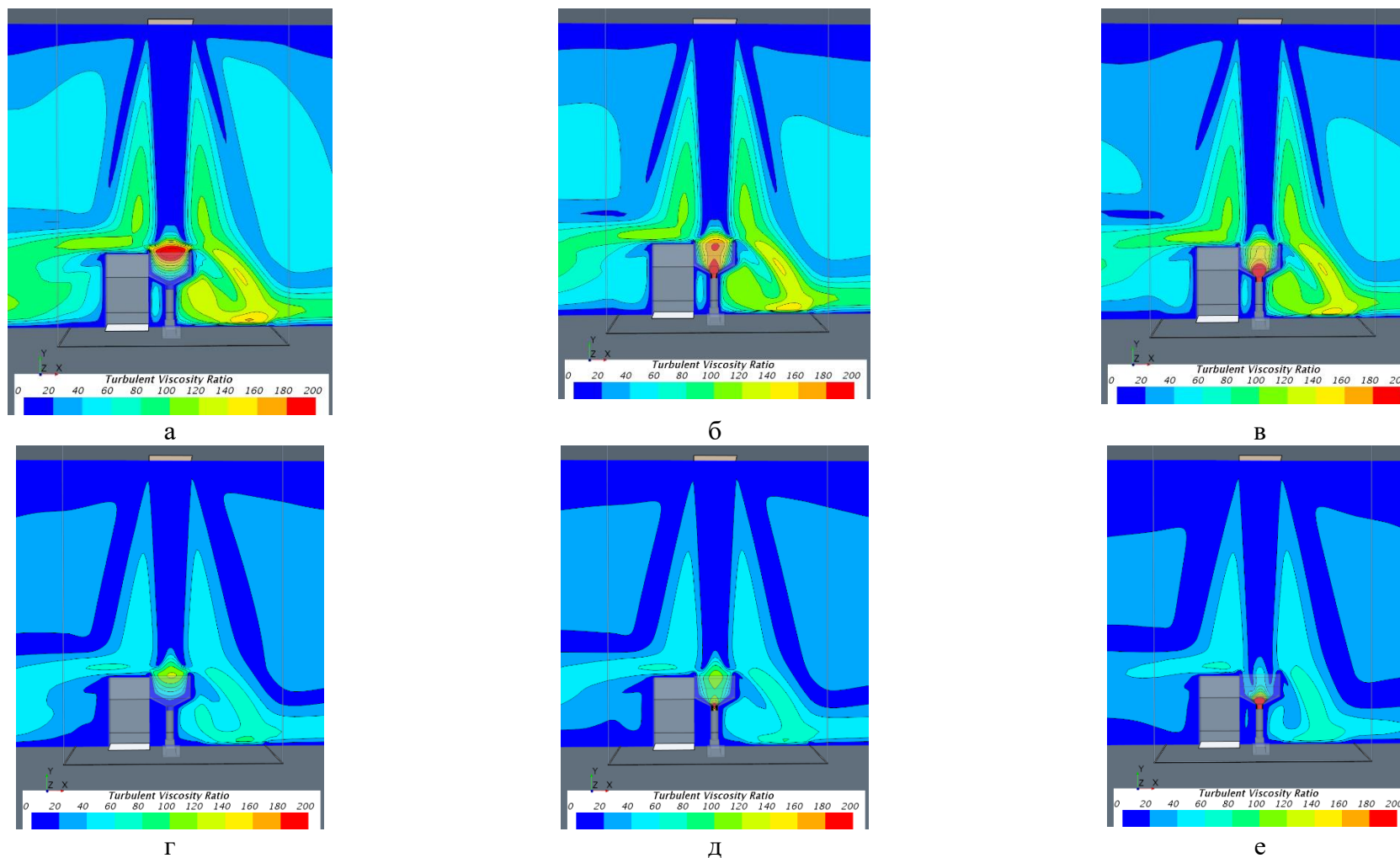


а – расход притока $300 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход гранулятора $0 \text{ м}^3/\text{ч}$ (далее $300/0 \text{ м}^3/\text{ч}$); б – $300/30 \text{ м}^3/\text{ч}$; в – $300/50 \text{ м}^3/\text{ч}$; г – $150/0 \text{ м}^3/\text{ч}$;
 д – $150/15,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; е – $150/50 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 2.14 – Горизонтальное поле скоростей в зоне дыхания оператора

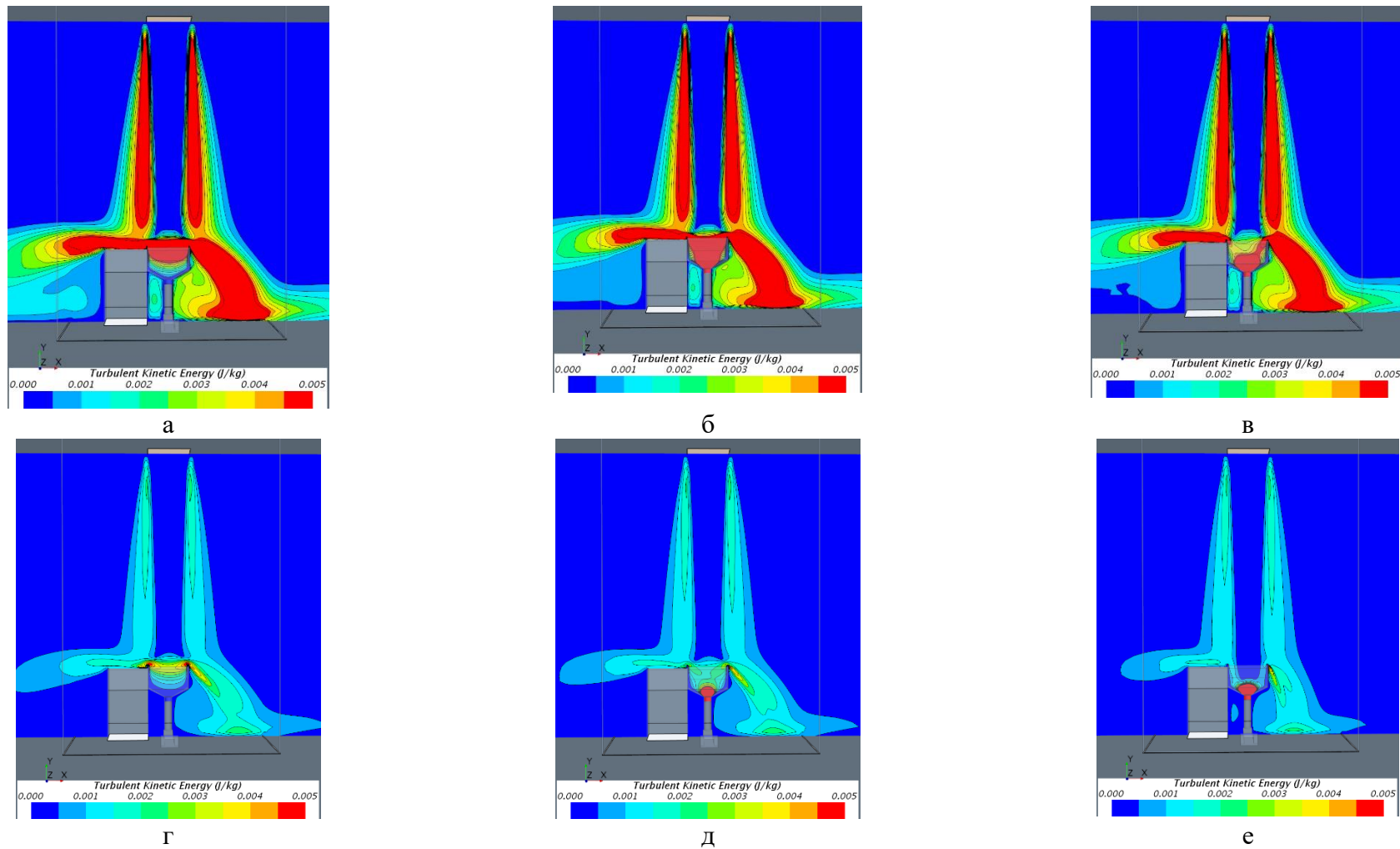
Над поверхностью гранулятора (100 мм) и в зоне дыхания оператора (650 мм) наблюдается равномерное распределение поля скоростей. Над поверхностью бункера для расхода 300 м³/ч в диапазоне 0,1-0,3 м/с и для 150 м³/ч в диапазоне 0,1-0,2 м/с. В зоне дыхания оператора для расхода 300 м³/ч в диапазоне 0,1-0,45 м/с и для расхода 150 м³/ч в диапазоне 0,1-0,2 м/с. Значение скорости уменьшается ближе к центру бункера. Равномерное распределение скорости обеспечивает локализацию взвешенных частиц, что способствует всасыванию их в пространство бункера.

На рисунках 2.15 и 2.16 изображены поля распределения «Turbulent Viscosity Ratio» (Коэффициент турбулентной вязкости) и «Turbulent Kinetic Energy (J/kg)» (Кинетическая энергия турбулентности (Дж/кг)), полученные в результате численного моделирования. Анализ данных рисунков 2.15 показывает, что коэффициент турбулентной вязкости изменяется в диапазоне от 20 до 200. Как известно, увеличение коэффициента турбулентной вязкости указывает на возрастание турбулентного перемешивания, которое сопровождается переносом через границу между слоями жидкости импульса. Можно сделать вывод, что наиболее интенсивное перемешивание имеет место в верхней части бункера гранулятора. При этом, с увеличением расхода всасываемого воздуха зона более интенсивного турбулентного перемешивания сдвигается в нижнюю часть бункера. Значения кинетической энергии турбулентности, как первой переменной k в модели турбулентности k - ϵ , достигают значений 0,005 Дж/кг (рисунок 2.16) в области верхней части бункера даже при отсутствии всасывающего потока. Максимальные значения кинетической энергии турбулентности наблюдаются также и при обтекании гранулятора. Имеет место несимметричное распределение поля вследствие наличия препятствия. Полученные поля k позволяют также выявить границы потоков – приточной струи и смешанного потока у всасывающего отверстия гранулятора. Особенно важное значение для дальнейших расчетов имеет зона с $k \rightarrow 0$, которая подтверждает наличие ядра в струе и эффекта торможения при натекании струи на гранулятор.



а – расход притока $300 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход гранулятора $0 \text{ м}^3/\text{ч}$ (далее $300/0 \text{ м}^3/\text{ч}$); б – $300/30 \text{ м}^3/\text{ч}$; в - $300/50 \text{ м}^3/\text{ч}$; г – $150/0 \text{ м}^3/\text{ч}$;
 д – $150/15,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; е – $150/50 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 2.15 – Распределение коэффициента турбулентной вязкости



а – расход притока $300 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход гранулятора $0 \text{ м}^3/\text{ч}$ (далее $300/0 \text{ м}^3/\text{ч}$); б – $300/30 \text{ м}^3/\text{ч}$; в – $300/50 \text{ м}^3/\text{ч}$; г – $150/0 \text{ м}^3/\text{ч}$;
 д – $150/15,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; е – $150/50 \text{ м}^3/\text{ч}$

Рисунок 2.16 – Распределения кинетической энергии турбулентности (Дж/кг)

Особенности взаимодействия приточной струи и гранулятора с точки зрения распределения скорости необходимы для исследования режима функционирования оборудования при загрузке порошкообразного исходного материала с размерами 0,5-5,0 мкм. Линии тока на рисунке 2.17 и граница приточной струи на рисунке 2.18 показывают, что приточная струя расширяется незначительно по сравнению с размером воздухораспределителя до момента натекания струи на гранулятор. При натекании струи на гранулятор струя заполняет бункер гранулятора, частично обтекает его и удаляется через вытяжное отверстие (рисунок 2.17).

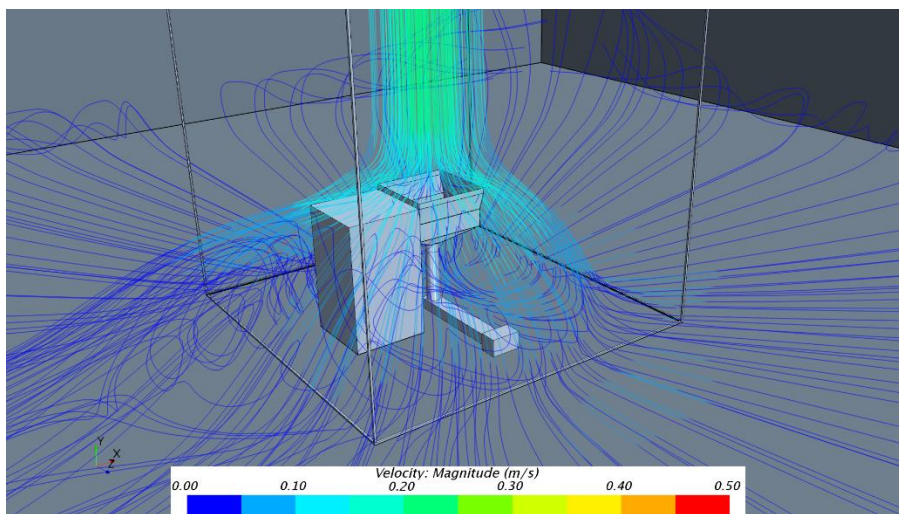


Рисунок 2.17 – Движение воздушных потоков в исследуемом модуле

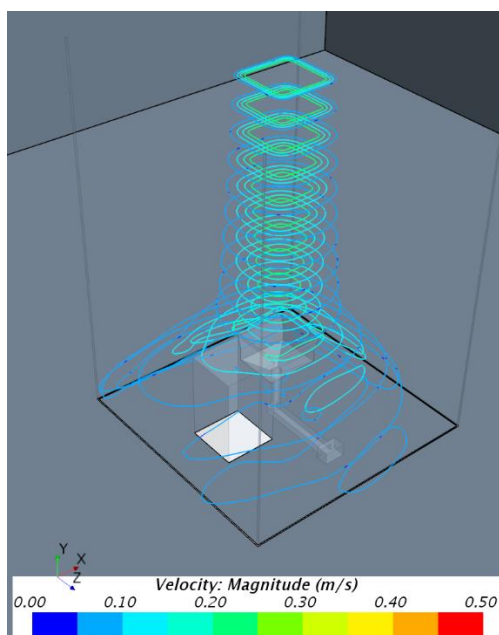


Рисунок 2.18 – Граница приточной струи

По результатам численного моделирования построен график распределения скорости по оси приточной струи для расходов 300 м³/ч и 150 м³/ч для трех режимов работы гранулятора на всасывании (0 м³/ч, 30 м³/ч, 50 м³/ч – для расхода 300 м³/ч; 0 м³/ч, 15 м³/ч, 50 м³/ч – для расхода 150 м³/ч) (рисунок 2.19 и 2.20).

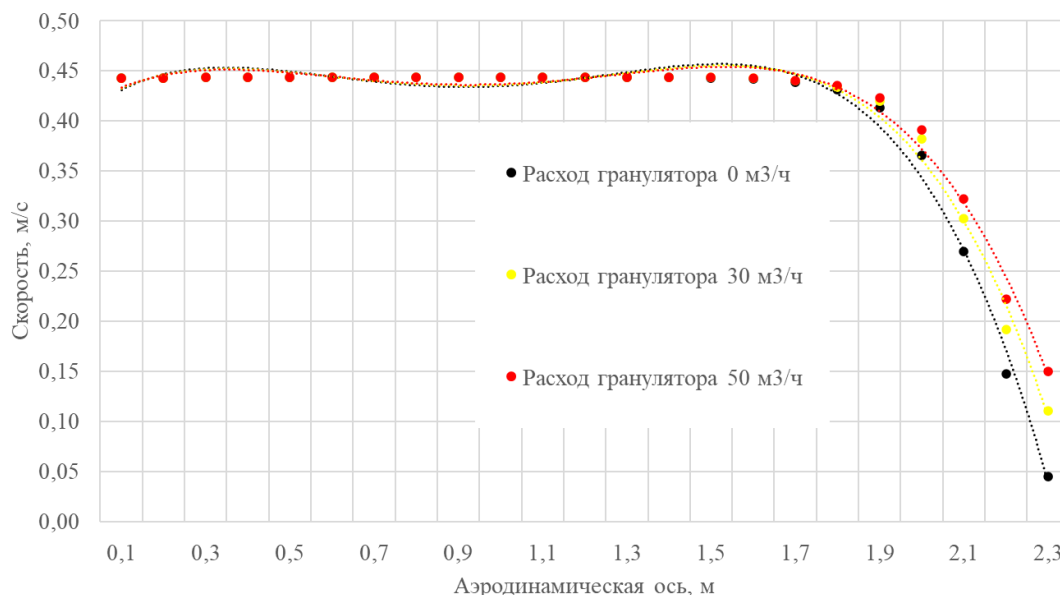


Рисунок 2.19 – Распределение осевой скорости приточной струи при расходе 300 м³/ч

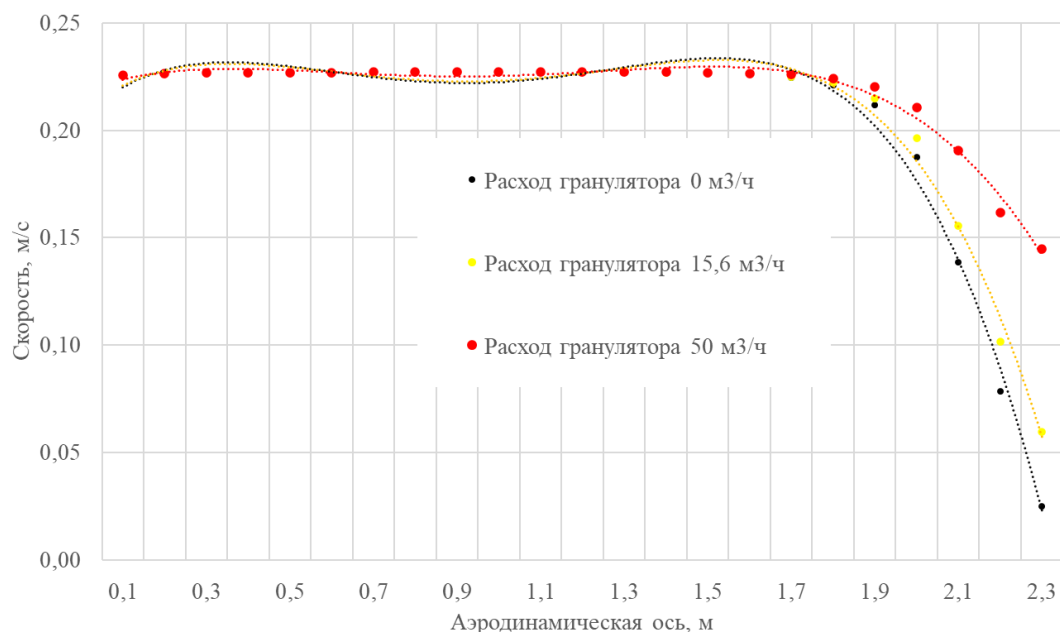


Рисунок 2.20 – Распределение осевой скорости приточной струи при расходе 150 м³/ч

Приточная струя по мере удаления от воздухораспределителя до 1,6-1,7 м развивается как свободная. Участок до 1,6-1,7м можно рассматривать как начальный участок, в пределах которого осевая скорость практически сохраняет свое начальное значение. Затем происходит затухание струи, т.е. уменьшение осевой скорости, при этом более интенсивно происходит при отсутствии организованного удаления воздуха через гранулятор. При увеличении расхода темп уменьшения осевой скорости замедляется вследствие взаимодействия с всасывающим потоком гранулятора. Чем больше расход удаляемого воздуха через гранулятор, тем больше значение осевой скорости струи непосредственно над входным отверстием гранулятора

Результаты численного моделирования показывают, что для лабораторного эксперимента необходимо провести измерения осевой скорости приточной струи над поверхностью гранулятора для выбора рационального расхода воздуха, удаляемого через гранулятор, учитывая по рекомендациям [101]. Исходя из технических требований производителя максимальный расход на всасывании гранулятор не должен превышать 10 % от объема приточного воздуха [60].

2.5 Выводы

По результатам численного моделирования взаимодействия приточной струи и технологического отсоса (гранулятора) получены следующие результаты:

- построена геометрическая модель чистого помещения с приточным и вытяжным устройством, технологическим отсосом (гранулятором), активированным приточной струей;
- по результатам сеточной сходимости выявлены рациональный размер базовой ячейки и зоны локального измельчения сетки;
- для исследования аэродинамики воздушных потоков в пространстве обоснован выбор физической модели $k-\epsilon$;

- разработана численная модель взаимодействия изотермической приточной струи с открытым технологическим отсосом (гранулятором) при их соосном расположении;
- установлена аэродинамическая схема приточной струи при взаимодействии изотермической приточной струи с технологическим отсосом (гранулятором);
- получены экспериментальные зависимости распределения скорости для расходов $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $150 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- обоснована целесообразность создания лабораторной установки для исследования процесса взаимодействия приточной струи с гранулятором, схема размещения точек измерения параметров воздуха для разработки плана эксперимента.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИТОЧНОЙ СТРУИ И ГРАНУЛЯТОРА

3.1 Постановка задачи проведения экспериментальных исследований натекания приточной струи на гранулятор

Процесс сухого гранулирования вальцеванием с последующим прессованием представляет собой выдавливание порошковой смеси между вращающимися цилиндрами с превращением её в твердые брикеты. В последующем продукт измельчают и просеивают для получения гранул, которые более пластичны, чем первоначальная порошковая смесь. На рисунке 3.1 изображена схема роллерной установки.

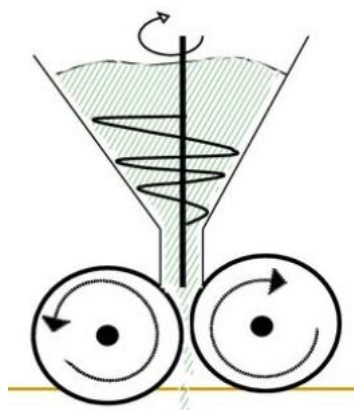


Рисунок 3.1 – Схема роллерной установки для получения компактов

При сухом гранулировании происходит уплотнение в точках контакта, затем некоторые из них разрушаются на более мелкие и заполняют поры между частицами, способствуя дальнейшему уплотнению прессуемой массы. Образование взвешенных частиц в пространстве вблизи гранулятора происходит в момент засыпания сырья и уплотнения прессуемой массы. Некоторые частицы, не попадая в образующиеся поры, начинают перемещаться в окружающее пространство [50, 119].

В рамках исследования процесса локализации рассеивания мелкодисперсных частиц пыли лекарственных порошков при взаимодействии гранулятора с приточной струей рассматривается гранулятор с производительностью сухой грануляции (при размере ячейки сита 1 мм) – 100 кг в час [60]. Гранулятор применим для работы с любым видом металлических сеток. Размер гранул от 0,5 мм до 5 мм. Корпус гранулятора – литой чугунный, полностью обшит листами пищевой нержавеющей стали. В бункере из нержавеющей стали на направляющих закрепляется и натягивается полотно сита. В качестве сита используются полосы сетки из нержавеющей стали или латуни с размером ячейки от 0,5 мм до 5 мм. Лопастей в количестве 5 штук протирают порошок через ячейки сита. Конструкцией гранулятора исключено попадание посторонних частиц в порошок. Конструкция позволяет производить быструю замену сита с разными диаметрами ячейки.

Для выбора расчетных расходов воздуха необходимо предварительно определить скорость витания частицы порошка. Скорость витания частиц - средняя скорость восходящего потока воздуха, при которой твёрдая частица находится во взвешенном состоянии. Она равна скорости свободного падения частицы в среде с сопротивлением, при которой сила веса частицы уравнивается силой сопротивления среды. Для определения скорости витания можно воспользоваться известными зависимостями [38, 57, 64, 115, 117], представленными в таблице 3.1. В отличие от метода определения скорости витания, когда давление движущегося воздуха противоположно весу частицы, в данном случае действие сил инерции и гравитации совпадает. Таким образом, скорость всасывания (улавливания) в грануляторе, создаваемая совместным действием приточной струи и разрежения за счет всасывания в гранулятор, должна быть не меньше скорости витания во избежание зависания взвешенных частиц и образования пылевого облака. Для расчетов принята частица диаметром 5 мкм ($5 \cdot 10^{-6}$ м) плотностью 50 кг/м³. Максимальное значение скорости витания принято равным 0,082 м/с.

Расходы приточного воздуха по избыткам явной теплоты от гранулятора и оператора приняты в размере 300 м³/ч (верхний предел) и 150 м³/ч (нижний предел) по технологическим требованиям для уменьшения распространения

взвешенных частиц (приложение А). Расходы, приведённые в приложении А, использованы при исследовании приточной струи

Таблица 3.1 – Определение скорости витания частиц шарообразной формы

№ п/п	Автор	Формула для определения скорости витания	Критерий Re	Скорость витания, м/с
1.	Гринев К.М. [23]	$v_s = 5,7 \sqrt{d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}}}$ при $Re = 5000$	617	0,082
2.	Страхович К.И. [79]	$w_s = 5,0 \sqrt{d \rho_{\text{ч}}}$	557	0,079
3.	Клячко Л.С. [45]	$w_s = 4,7 \sqrt{d \rho_{\text{ч}}}$ при $Re < 1000$	592	0,074
4.	Спиваковский А.О. [78]	$w_s = \sqrt{28,4 d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}}}$	578	0,077
5.	Калинушкин М.П., Орловский З.Э., Сегаль И.С. [39]	$w_s = 3,62 \sqrt{d \frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{г}}}}$	391	0,052

Экспериментальные исследования состоят из следующих этапов:

- предварительные измерения полей скорости движения воздуха при выбранных расходах воздуха в приточной струе для определения распределения скорости в характерных точках и зоны влияния струи на скорость движения воздуха на рабочем месте оператора гранулятора;
- исследование взаимного влияния приточной струи и разрежения, создаваемого вентилятором, имитирующим работу гранулятора;
- визуализация процесса засыпания порошка;
- измерение скорости движения воздуха в области непосредственно у гранулятора при засыпании порошка до полного его всасывания с контролем скорости и концентрации на рабочем месте оператора.

3.2 Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка, имитирующая технологический процесс грануляции и локализации пылевых частиц лекарственных препаратов, создана в производственной лаборатории завода «Арктос» (рисунок 3.2 и 3.3).

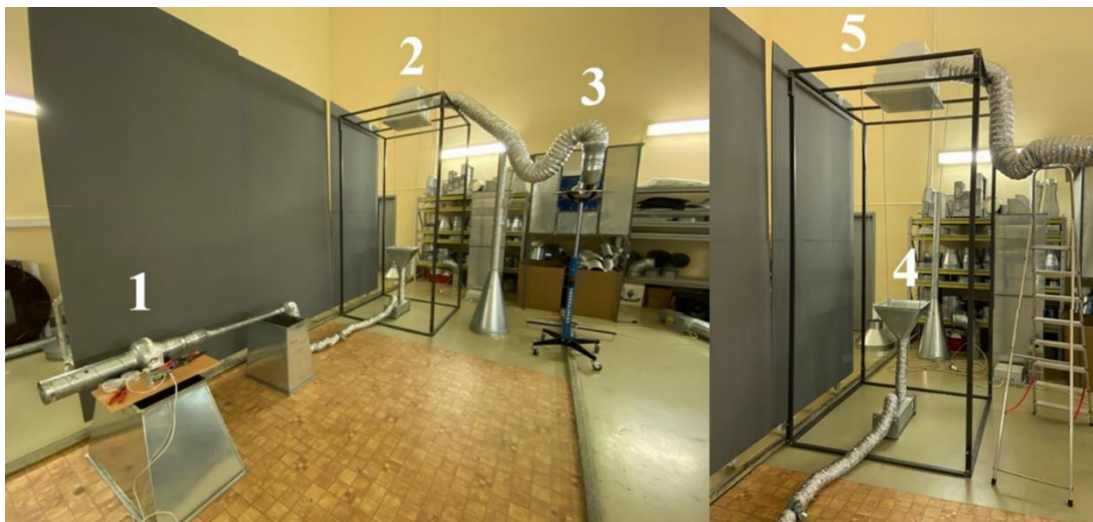
Часть помещения с экспериментальной установкой соответствует производственной зоне обслуживания гранулятора в реальном помещении (модулю чистого помещения для процесса гранулирования). Установка соответствует геометрической модели, разработанной для численного моделирования.

В качестве гранулятора использован вентиляционный короб-переходник (4) в виде усеченной пирамиды размерами 420х420, соответствующий размерам реального гранулятора. Короб подвешен на шпильках под прямоточным воздухораспределителем ВБС-М 595х595 (5). Под коробом на полу размещен воздуховод размерами 200х150 для сбора пыли с возможностью ее извлечения во избежание попадания пыли в вентилятор и далее в чистое помещение.

Для создания разрежения внутри гранулятора использован канальный вентилятор (1), создающий за счет разрежения на входе в короб необходимую скорость всасывания. Вентилятор соединен с коробом вентиляционного перехода гибким воздуховодом.

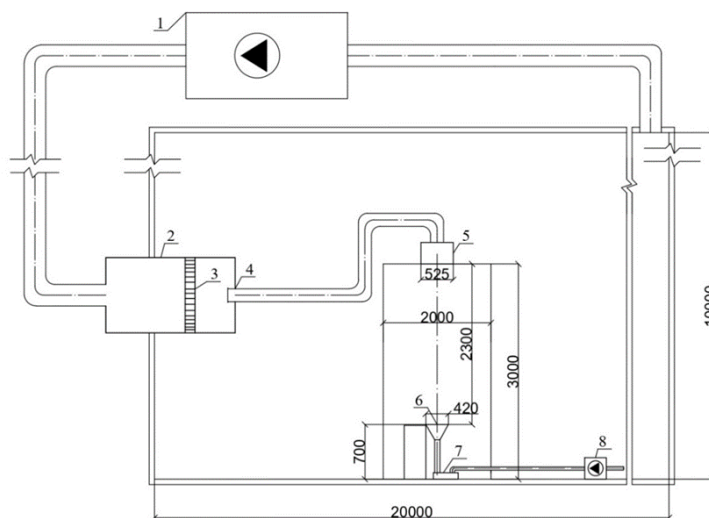
Для создания приточной струи используются приточная установка (3), представленная на рисунке, и воздухораспределитель ВБС (5). Приточная установка является частью аэродинамического стенда производственной лаборатории завода. Воздухораспределитель, предназначенный для подачи воздуха с температурой, равной температуре воздуха помещения, размещен на подставке с возможностью изменения высоты. В процессе исследований расход подаваемого воздуха регулировался при помощи компьютерной программы, при этом осуществлялся контроль нормируемой скорости воздуха в рабочей зоне оператора при засыпании порошка в гранулятор. Детализовка и характеристика элементов

лабораторной установки представлена на рисунках Б.1-Б.8 и в таблице Б.1 в приложении Б.



1 – канальный вентилятор; 2 – воздухоподдающий блок; 3 – вентиляционная установка;
4 – гранулятор; 5 – воздухораспределитель.

Рисунок 3.2 – Лабораторная установка



1 – вентиляционная установка; 2 – камера статического давления; 3 – выпрямитель; 4 –
профилированное сопло (коллектор);
5 – воздухоподдающий блок; 6 – гранулятор; 7 – воздуховод для сбора порошка; 8 – канальный
вентилятор

Рисунок 3.3– Схема лабораторной установки

Лабораторный метод исследования основывается на измерении скорости воздуха в пространстве модуля чистого помещения, а также определении числа

взвешенных частиц. Используется измерительная система лабораторного стенда завода «Арктос».

Для определения скорости движения воздуха использована измерительная система AirDistSys 5000 лабораторного стенда завода «Арктос». Измерительная система для определения скорости движения воздуха представлена на рисунке 3.4 Система измерений включает 8 датчиков скорости движения воздуха на стойке, расстояние между датчиками 100 мм.



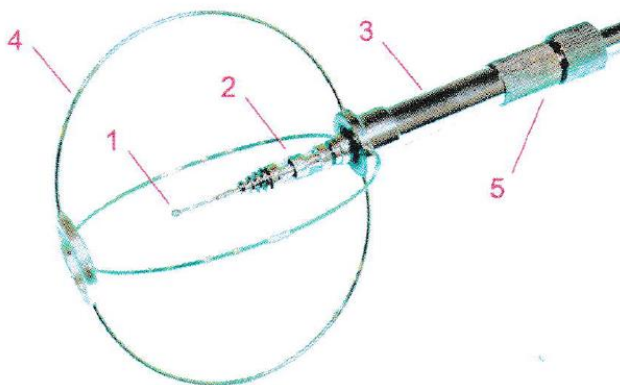
Рисунок 3.4 – Система измерений скорости воздуха с датчиками

3.3 Планирование эксперимента

В качестве предварительного исследования взаимодействия струи и гранулятора выполнены измерения скорости движения в пространстве между воздухораспределителем и гранулятором при работе только приточной установки. Исходя из проектных расчетов и натурных условий реального производства, приняты расходы воздуха 300 и 150 м³/ч. Первоначальная высота размещения воздухораспределителя принята 3.000 м от пола.

3.3.1 Характеристики средств измерений скорости движения воздуха и концентрации взвешенных частиц

Для измерения скорости воздушного потока использованы датчики «sensor» с погрешностью в показаниях $\pm 0,02$ м/с $\pm 1,5\%$. Чувствительным элементом датчика скорости движения воздуха является резистор, установленная на конце датчика (рисунок 3.5). Показания фиксируются компьютерной программой «AirDistSys5000», в которой осуществляется статистическая обработка результатов.



1 – датчик скорости; 2 – датчик температуры; 3 – экранизирующая трубка; 4 – ажурная корзина;
5 – зажимной винт

Рисунок 3.5 – Датчик скорости «Sensor»

Технические характеристики средств измерений представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Характеристики средств измерений

Наименование средства измерений	Наименование характеристик	Значения
Основные средства измерения		
Система датчиков «Sensor»	диапазон, м/с	0,05-5
	класс точности	$\pm 0,02 \text{ м/с} \pm 1,5\%$ от показаний
	цена деления	0,01
Вспомогательные средства измерения		
Термоанемометр mp200p	Рабочая температура, °C	от 0 до 600 °C
Трубка Пито	Допустимое избыточное давление, Па	$\pm 500 \text{ Па}$: 250 мбар

Концентрация взвешенных частиц в пространстве работы гранулятора измеряется – счетчиком аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» (рисунок 3.6).

Эргономичный, обладающий небольшой массой счётчик Handheld 3016 IAQ является новейшим и наиболее совершенным ручным счётчиком частиц, позволяющим измерять массовую концентрацию аэрозольных частиц. Имея 6 размерных каналов, счётчик Handheld 3016 IAQ может выводить результаты измерений в дифференциальной и интегральной формах, а также данные датчика температуры и влажности, на цветном сенсорном экране. Прибор может хранить до 3000 записей результатов измерений и до 50 записей настроек. Счётчик частиц Handheld 3016 IAQ позволяет надёжно и точно измерять концентрацию аэрозольных частиц даже в тех местах куда сложно добраться и невозможно работать двумя руками. Технические характеристики средств измерений представлены в таблице 3.3.



Рисунок 3.6 – Счётчик аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» с изокинетическим пробоотборником

Таблица 3.3 – Характеристики средств измерений концентрации взвешенных частиц

Наименование средства измерений	Наименование характеристик	Значения
Основное средство измерения		
Счётчик аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» с изокинетическим пробоотборником	Диапазон размеров частиц, мкм	0,3-10,0
	Скорость отбора проб, л/мин	2,83
	Размерные каналы	6
Вспомогательное средство измерения		
Секундомер	Время, с	

Для имитации технологического процесса на расстоянии 100 мм на 8 уровнях от поверхности бункера высыпался порошок из мерного стакана емкостью 250 мм. В качестве экспериментального сырья использовался порошок Аэросил 300 (рисунок 3.7). Свойства порошка приведены в таблице 3.4 [23].



Рисунок 3.7 – Мерный стакан (250 мл) и аэросил 300

Высокодисперсный, высокоактивный, аморфный, пирогенный диоксид кремния (SiO_2), получаемый пламенным гидролизом четыреххлористого кремния (SiCl_4) высокой чистоты — ценный наполнитель для каучуков. Его применяют для приготовления различных смазок, красок и лаков, для стабилизации суспензий, а загущенную способность используют при получении гелей для мазевых основ. Адсорбционные свойства Аэросила используют с целью стабилизации сухих экстрактов (уменьшается их гигроскопичность). В порошках применяют при изготовлении гигроскопичных смесей и как диспергатор. Очень легкий микронизированный порошок с выраженными адсорбционными свойствами.

Аэросил 300 и сухая фармацевтическая смесь используются в различных областях и имеют разные функции, но оба они включают коллоидный диоксид кремния. Сравнительный анализ порошков представлен в таблице 3.4.

Физические характеристики Аэросил 300 идентичны характеристикам порошка для изготовления твердых лекарственных форм.

Физические характеристики Аэросил 300 идентичны характеристикам порошка для изготовления твердых лекарственных форм (таблица 3.5).

Таблица 3.4 – Сравнительный анализ сухой фармацевтической смеси и Аэросил 300

Характеристики	Сухая фармацевтическая смесь	Aerosil 300
Состав	Включает различные компоненты, такие как ацетилсалициловая кислота, целлюлоза, кукурузный крахмал, стеариновая кислота.	Гидрофильный, неуплотненный коллоидный диоксид кремния.
Применение	Используется для производства твердых лекарственных форм, таких как таблетки и капсулы.	Используется в фармацевтической промышленности в качестве глиссанта для твердых лекарственных форм и идеального загустителя фармацевтических масел.
Преимущества	Уменьшение стандартного отклонения веса таблеток, что повышает точность дозирования.	Улучшает сыпучесть порошковых смесей; повышает точность дозирования; применяется в процессах прямого прессования и влажной грануляции как адсорбент влаги.
Свойства	Комбинация различных фармацевтических ингредиентов, улучшенная способность к смешиванию и прессованию.	Белый мелкодисперсный аморфный порошок; легко оседает на поверхностях и др.

Таблица 3.5 – Сравнительная характеристики порошков

Наименование порошка	Наименование характеристик	Значения
Сухая фармацевтическая смесь [49]	Диаметр частиц, мкм	0,5-50
	Плотность, г/л (г/дм ³) или кг/м ³	10-100
Аэросил 300 [12]	Плотность, г/л (г/дм ³) или кг/м ³	50
	Диаметр частиц, мкм	5

3.3.2 Методика измерений скорости движения воздуха

До начала проведения экспериментальных исследований скоростей движения воздуха в пространстве между воздухораспределителем и гранулятором предварительно проверено соосное расположение воздухораспределителя и гранулятора.

Первый уровень размещения датчика выбран на высоте 100 мм от поверхности гранулятора, так как на этой высоте производится засыпка сырья в гранулятор (рисунок 3.8, 3.9). Далее устанавливаются 8 уровней с шагом 100 мм и 2 уровня с шагом 750 мм от 8-миуровневого датчика (рисунок 3.10).

Во время проведения экспериментальных исследований гребенка с датчиками устанавливались в двух положениях: в вертикальной плоскости, так чтобы датчики находились на аэродинамической оси струи, и в горизонтальной плоскости. При этом с датчиков была демонтирована защитная корзина для исключения ее влияния на характер развития струи. Размещении гребенки в вертикальной плоскости производилось в трех положениях, при которых нижние датчики находились на расстоянии 100 мм от гранулятора.



Рисунок 3.8 – Измерения скоростей движения воздуха на аэродинамической оси

Датчики в горизонтальной плоскости установлены также с шагом 100 мм (рисунок 3.9).

На рисунке 3.10 представлены варианты расположения датчиков при выполнении измерений по оси воздухораспределителя и гранулятора и над поверхностью бункера.



Рисунок 3.9 – Измерения скоростей воздуха по горизонтальной поверхности



1 положение



2 положение



3 положение



4 положение



5 положение



6 положение



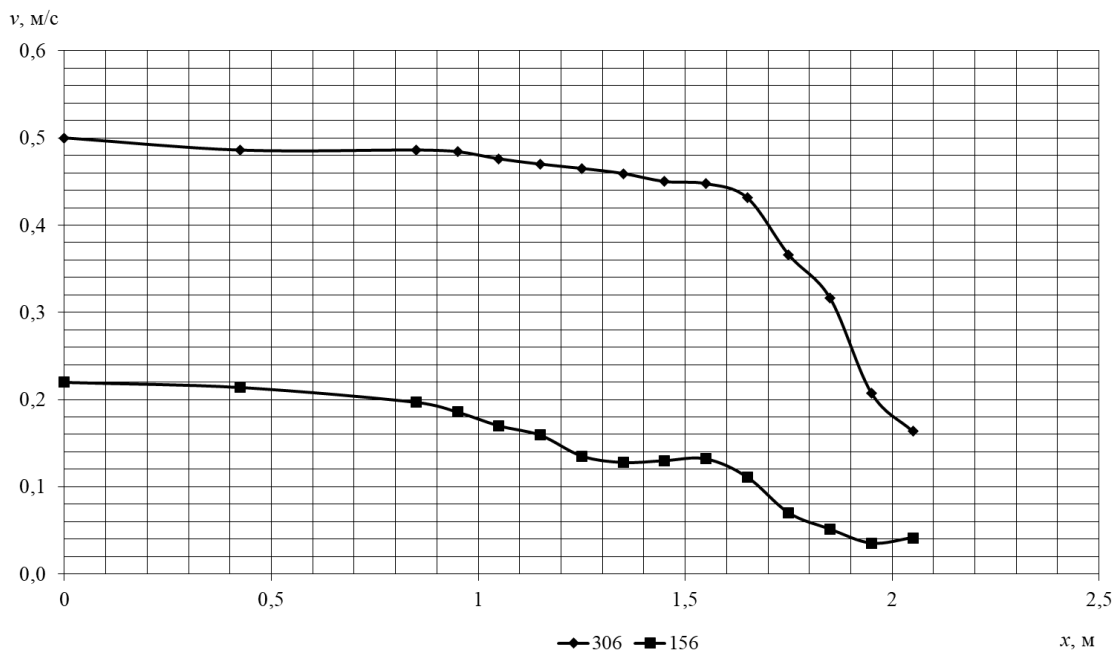
7 положение

1-3 положения – измерения на аэродинамической оси; 4-7 положения – измерения над пространством гранулятора.

Рисунок 3.10 – Расположение датчиков «Sensor»

3.3.3 Результаты измерений скорости движения воздуха

Результаты измерений представлены на рисунках 3.11 - 3.15 в виде графиков распределения скорости по оси приточной струи для принятых расходов воздуха и распределения скоростей в непосредственной близости (на расстоянии 100 мм) над поверхностью гранулятора. Расход воздуха, удаляемого из гранулятора, равен 0,1 от расхода воздуха в приточной струе.



Обозначения: v – скорость воздуха на оси струи, м/с; x – осевое расстояние от
воздухораспределителя, м

Рисунок 3.11 – График распределения скорости по аэродинамической оси при расходе подаваемого воздуха 306 и 156 $\text{м}^3/\text{ч}$

Результаты измерений представлены в приложении Г (таблицы Г.1-Г.15). Скорости находятся в диапазоне от 0,2 до 0,04 м/с для расхода 156 $\text{м}^3/\text{ч}$ и от 0,5 до 0,16 м/с для расхода 306 $\text{м}^3/\text{ч}$ [52]. На расстоянии 1,7 м от воздухораспределителя начинается снижение скорости воздуха на оси струи, что объясняется влиянием гранулятора.

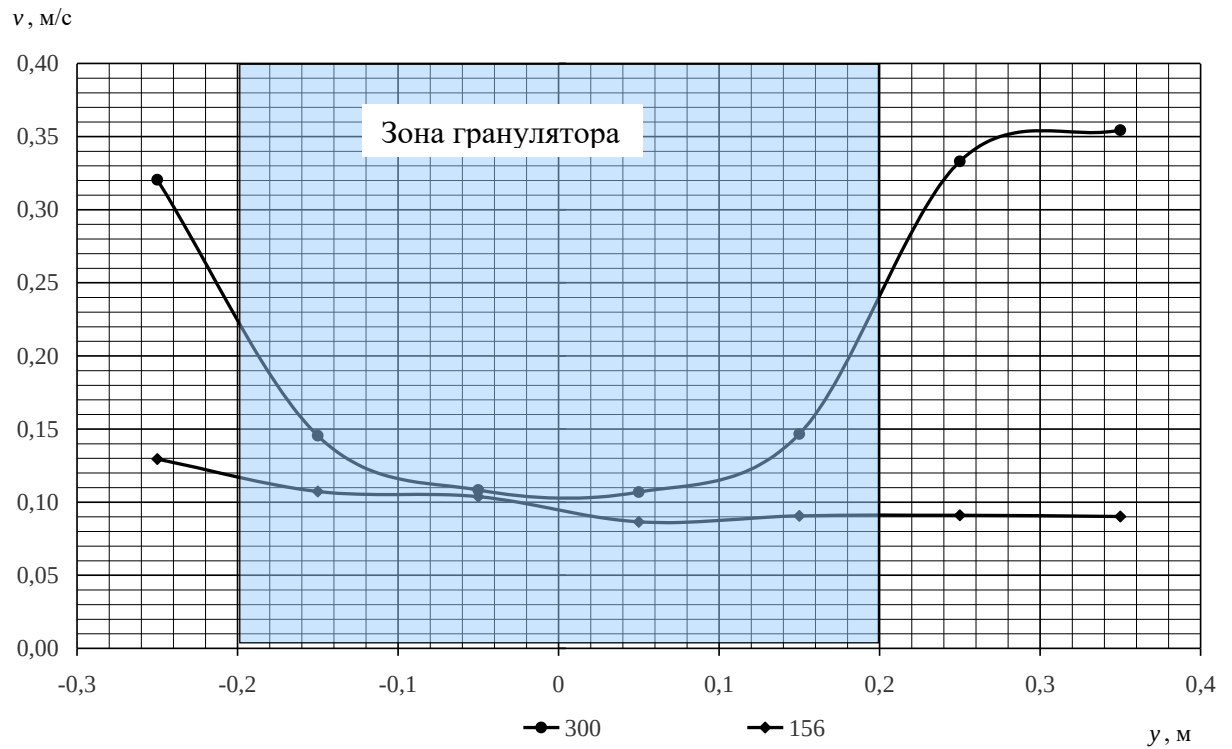


Рисунок 3.12 - Распределение скорости на высоте 100 мм над гранулятором (положение датчиков 4) при расходе 306 и 150 м³/ч

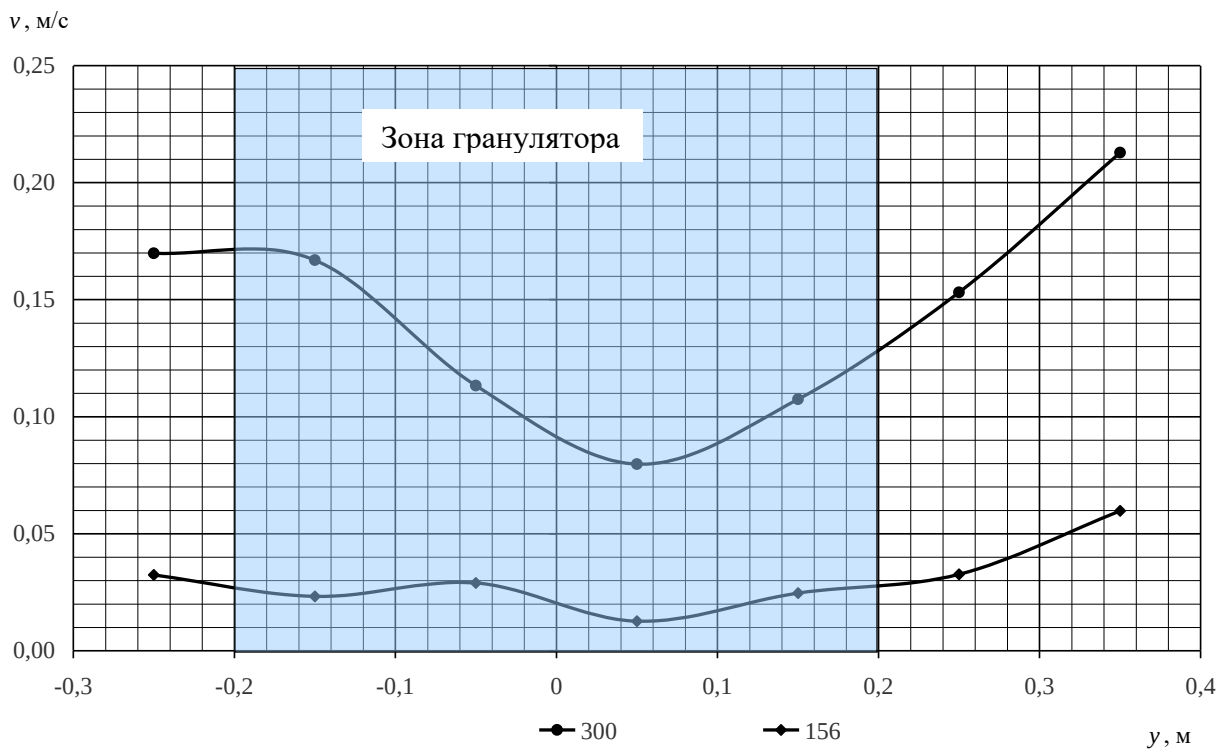


Рисунок 3.13 - Распределение скорости на высоте 100 мм над гранулятором (положение датчиков 5) при расходе 306 и 150 м³/ч

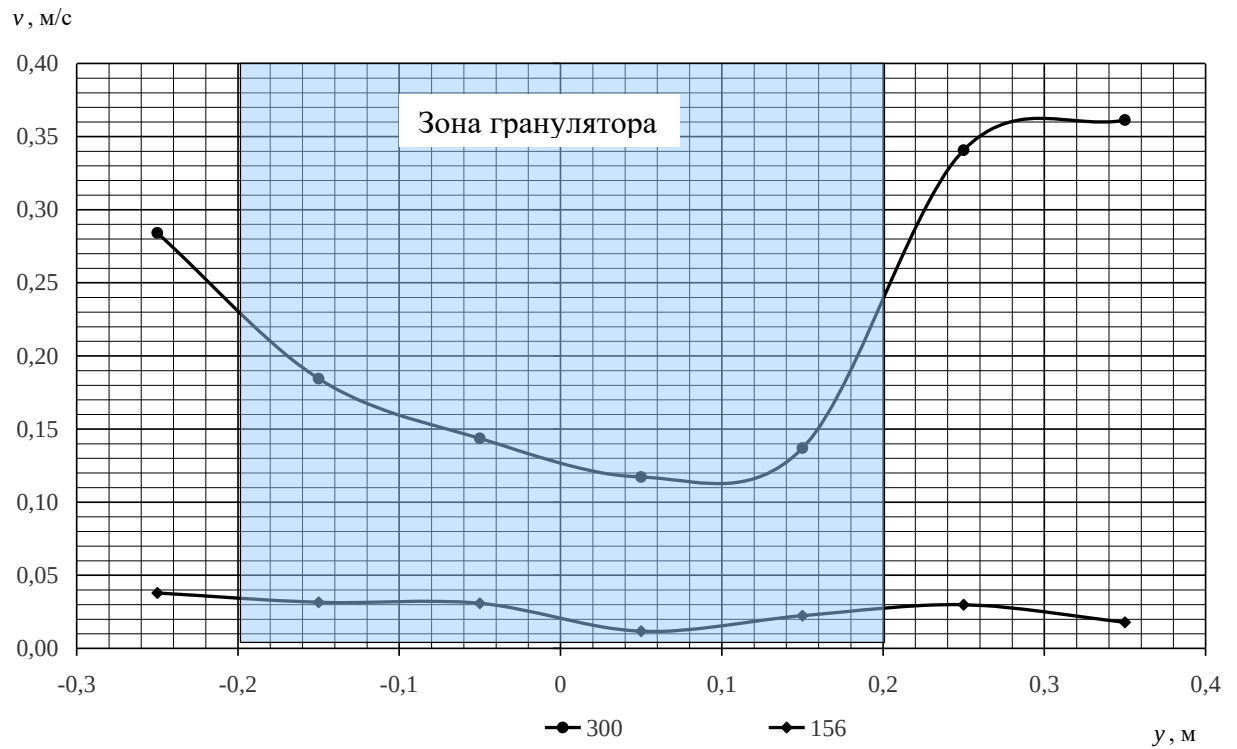


Рисунок 3.14 - Распределение скорости на высоте 100 мм над гранулятором (положение датчиков 6) при расходе 306 и 150 м³/ч

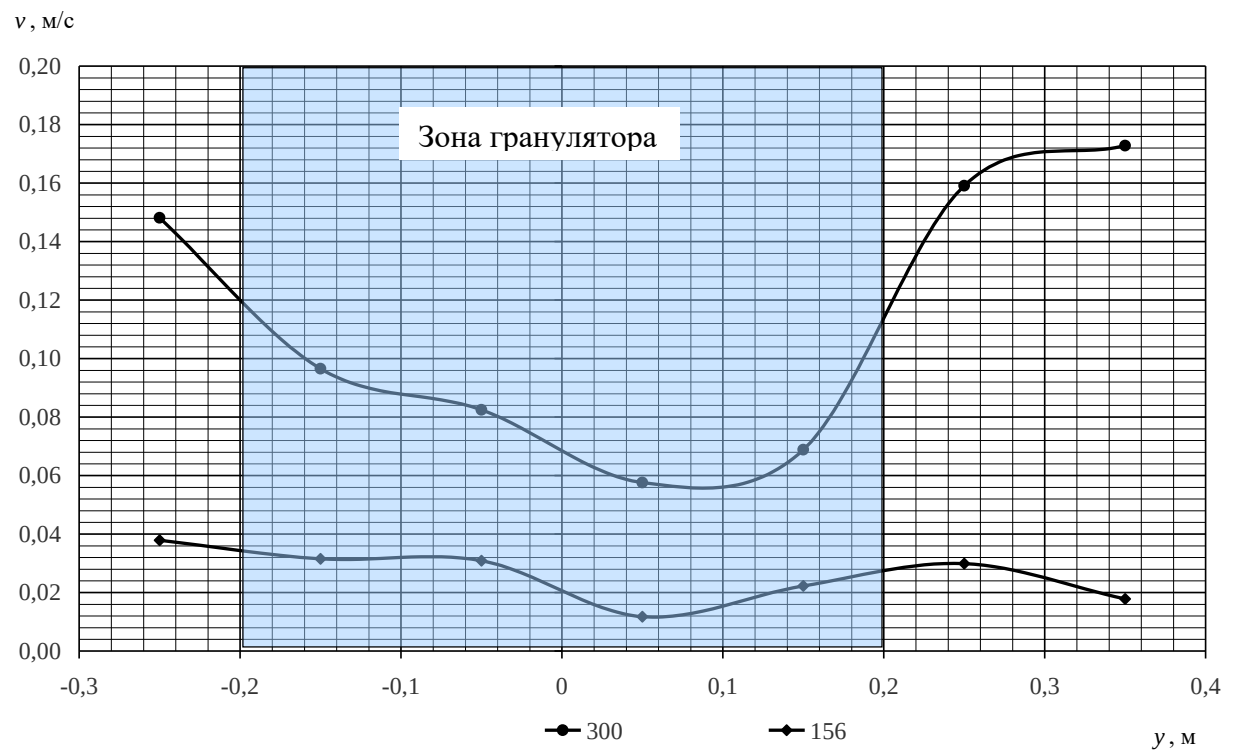
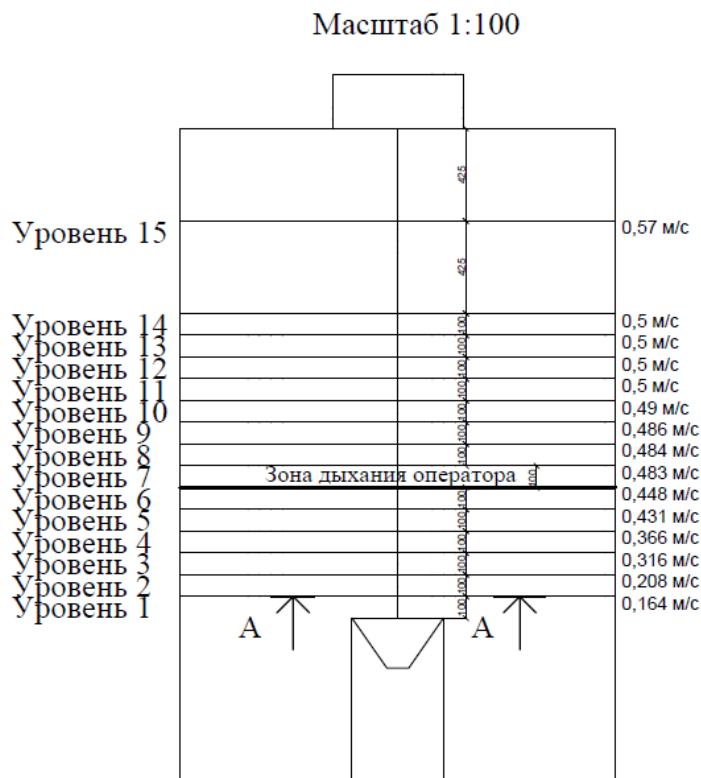


Рисунок 3.15 - Распределение скорости на высоте 100 мм над гранулятором (положение датчиков 7) при расходе 306 и 150 м³/ч

Точка пересечения осей абсцисс и ординат характеризует середину поверхности бункера гранулятора. Расстояния $-0,25$ и $0,25$ на оси абсцисс соответствуют пространству за гранулятором. В середине гранулятора в каждом из положений наблюдается самая низкая скорость, так как в этой точке струя частично проникает во внутрь гранулятора, остальная часть обтекает гранулятор, перетекая в окружающее пространство [52, 54].

На рисунках 3.16 и 3.17 представлены значения скоростей по оси воздухораспределителя и гранулятора и поля скоростей в горизонтальной плоскости над гранулятором.

а)



б)

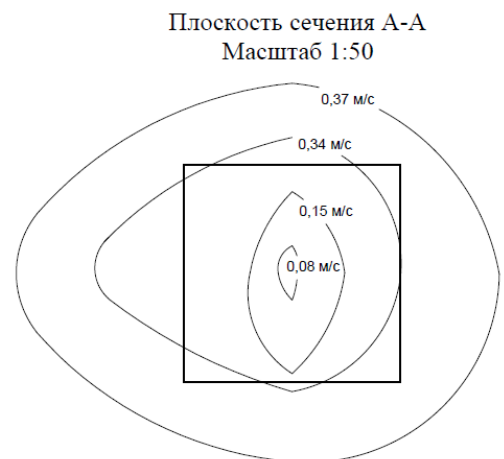
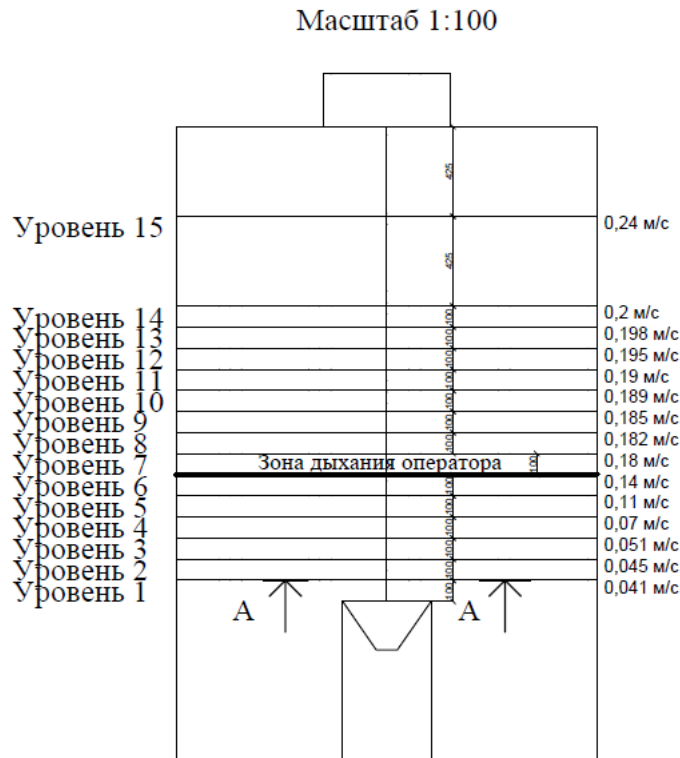


Рисунок 3.16 – Данные измерений скорости движения воздуха в вертикальной плоскости по уровням (а) и распределение в горизонтальной плоскости на уровне 100 мм при расходе 306 м³/ч (б)

а)



б)

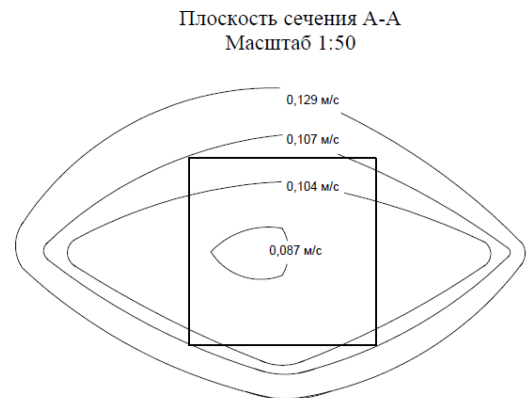


Рисунок 3.17 – Данные измерений скорости движения воздуха в вертикальной плоскости по уровням (а) и распределение в горизонтальной плоскости на уровне 100 мм при расходе 156 м³/ч (б)

Анализ экспериментальных исследований струй [35] показал, что результаты измерений могут быть представлены в безразмерном виде

$$\bar{v}_x = f(\bar{x}), \quad (3.1)$$

где $\bar{v}_x = v_x/v_0$ – относительная скорость воздуха на оси струи, здесь v_0 – скорость воздуха в расчетном сечении воздухораспределителя при истечении, м/с;

$\bar{x} = x/d_0$ – относительная координата по оси x ; при истечении из квадратных или близких к ним по форме отверстий принимается эквивалентный по площади диаметр $d_0 = d_{\text{экв}} = \sqrt{4F_0/\pi} = 1,13\sqrt{F_0}$, здесь F_0 – площадь воздухораспределителя в расчетном сечении, м².

Расчетная схема струи, истекающей из затененного отверстия, приведена на рисунке 3.18 [35].

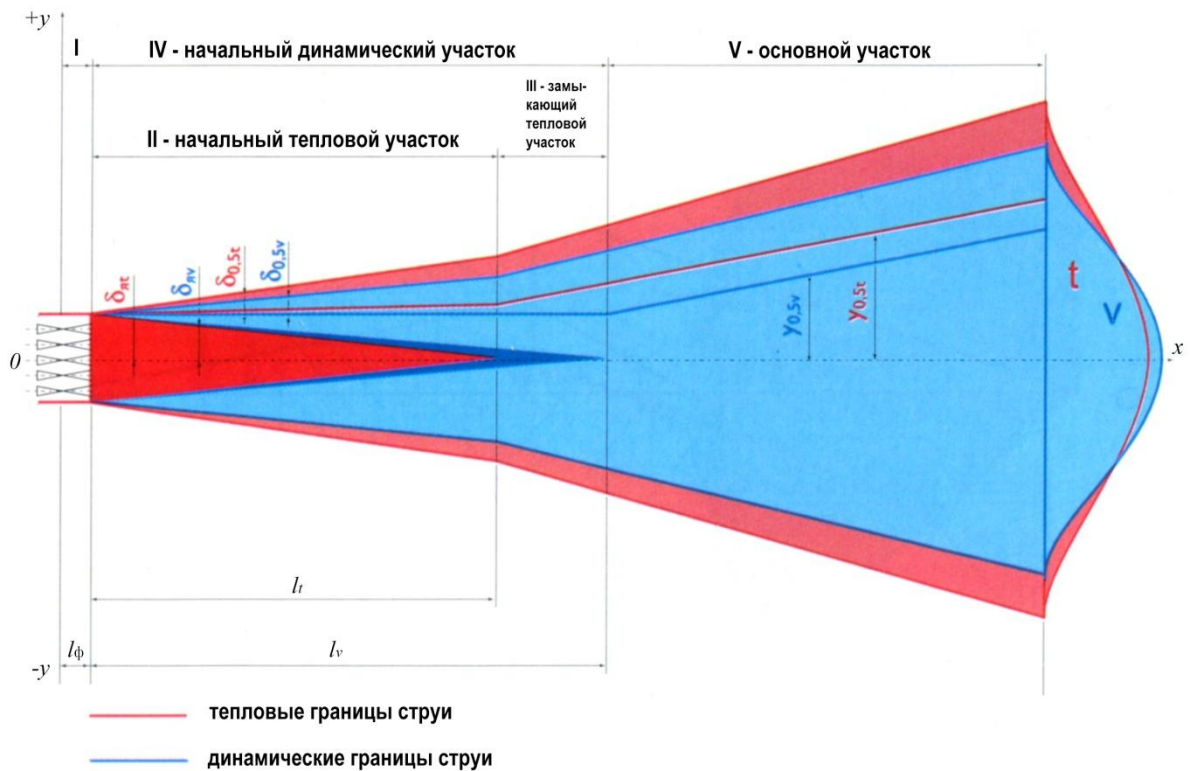


Рисунок 3.18 – Расчетная схема струи, истекающей из затененного отверстия [35]

По результатам численного и лабораторного эксперимента можно выделить следующие участки струи:

- участок формирования струи - участок, на котором происходит слияние отдельных струек в сплошной поток;
- начальный участок струи - на начальном участке струя состоит из ядра постоянных скоростей, окруженного пограничным слоем; на этом участке происходит трансформирование струи в круглую;
- основной участки струи.

Между начальным и основным участком находится короткий переходный участок, который в настоящей работе отнесён к основному участку. Участок формирования струи отнесён к начальному участку.

Установлено, что технологический отсос (гранулятор) находится в пределах основного участка струи.

Длина начального участка;

$$l_n = 3,4d_0, \text{ м.} \quad (3.2)$$

Относительная скорость воздуха на оси приточной струи в пределах начального участка

$$\bar{v}_x = \frac{v_x}{v_0} = 1. \quad (3.3)$$

Диаметр ядра постоянных скоростей на начальном участке струи

$$d_{яв} = d_0(1 - 0,187\bar{x}). \quad (3.4)$$

Относительная скорость на оси струи в пределах основного участка

$$\bar{v}_x = \frac{v_x}{v_0} = m \frac{\sqrt{F_0}}{x}, \quad (3.5)$$

где m – коэффициент изменения осевой скорости в струе.

Коэффициент m является переменной величиной и зависит от относительной координаты по оси x :

$$m = 13,541 - 2,698\bar{x}. \quad (3.6)$$

3.3.4 Планирование эксперимента

Планирование эксперимента с целью получения регрессионной зависимости для осевой скорости пылевоздушного потока на входе в гранулятор выполнено в соответствии с [47, 74]. Основной целью исследований на экспериментальной установке является определение влияния расхода приточного воздуха (L , м³/ч), высоты установки воздухораспределителя (h , м) и количества засыпаемого порошка (g , г/с) на осевую скорость пылевоздушного потока на входе в гранулятор (v , м/с) при условии визуальной устойчивости потока без зависания пылевых частиц при функционировании вытяжной системы с постоянным расходом воздуха.

Количество засыпаемого порошка принято, исходя из характеристики гранулятора 50-100 кг/ч, что составляет 14-28 г/с. Для удобства факторы варьирования представлены в виде безразмерных величин: расход приточного воздуха (x_1), высота установки воздухораспределителя (x_2) и количество засыпаемого порошка (x_3):

$$x_1 = \frac{L-225}{75}; x_2 = \frac{h-2,0}{0,2}; x_3 = \frac{g-21}{7} . \quad (3.7)$$

За функцию отклика принята скорость улавливания (всасывания) пыли гранулятором, м/с. В таблице 3.6 приведены уровни варьирования факторов.

Таблица 3.6 – Уровни варьирования факторов

Фактор	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
расход приточного воздуха (x_1), м ³ /ч	150	225	300	75
высота установки воздухораспределителя (x_2)	1,8	2,0	2,2	0,2
количество засыпаемого порошка, г/с (x_3)	14	21	28	7

Составлена матрица планирования полного трехфакторного эксперимента 2^3 , т.е. необходимо выполнить 8 экспериментов (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Матрица полного трехфакторного эксперимента

№ опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	-	-	+	-
3	+	+	-	+	-	+	-	-
4	+	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	+	-	+	-	-	-
6	+	-	+	-	-	+	-	+
7	+	+	-	-	-	-	+	+
8	+	-	-	-	+	+	+	-

Оценка дисперсии воспроизводимости с учетом количества параллельных измерений ($n=3$) выполнена по следующему алгоритму:

- определены средние арифметические значения параллельных измерений:

$$\bar{y} = \frac{y_1+y_2+y_3+...+y_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} , \quad (3.8)$$

- квадраты разностей между y_i и суммы их квадратов $\sum_{i=1}^3 (y_i - \bar{y})^2$. Сумма квадратов равна 0,0074.

- дисперсия воспроизводимости каждой серии опытов:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{f}, \quad (3.9)$$

где f – число степеней свободы. Число степеней свободы $f=n-1$, $f=3-1=2$;

y_i – текущее значение случайной величины.

Дисперсия воспроизводимости равна 0,34.

Дисперсия четвертого опыта превышает значение дисперсий остальных опытов. Следовательно, любой из них следует проверить на однородность дисперсий:

$$G_{\text{оп}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (3.10)$$

где S_{max}^2 – максимальная дисперсия воспроизводимости, 0,0025;

$\sum_{i=1}^n S_i^2$ – сумма дисперсий воспроизводимости опытов, 0,0074.

Полученное значение 0,34 сравнивается с табличным значением при $m = 8$ для числа степеней свободы $f = 2$, $\nu = N - 1$ и выбранной доверительной вероятности $P = 0,95$ [51]. Табличное значение критерия Кохрена 0,51. Отсюда, дисперсия считается однородной, результаты 4-го опыта отбрасывать нельзя.

Средняя дисперсия воспроизводимости:

$$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i^2}{m} = \frac{0,0074}{2} = 0,0037, \quad (3.11)$$

где m – число сравниваемых частот (т.е. два значения скорости засыпки).

Для проверки адекватности принято значение искомой скорости 0,082.

Искомая скорость обозначена $v_{\text{п}}$. Определен квадрат разности между опытными ($v_{\text{изм}}$) и расчетными значениями и их сумма, дисперсия, характеризующая неадекватность экспериментальных данных результатам расчетов по формуле:

$$S_{\text{лс}}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n (v_{\text{изм}} - v_{\text{п}})^2}{f} = \frac{3 \cdot 0,02}{7} = 0,009, \quad (3.12)$$

где m – число отдельных серий измерений $m=8$;

$f = m - g$ – число степеней свободы $f = 8 - 1 = 7$;

g – число коэффициентов регрессии $g = 1$.

Вычисляем опытное значение F – критерия Фишера и сравниваем его с критическим $F_{кр}$:

$$F_{оп} = \frac{S_{Le}^2}{S_e^2} = \frac{0,0037}{0,0074} = 0,5, \quad (3.13)$$

По результатам расчетов опытное значение критерия Фишера $F = 0,5$ меньше критического, равного 3,48, т.е. подтверждена адекватность экспериментальных данных результатам расчетов.

Уравнение регрессии можно записать в виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (3.14)$$

Значения коэффициентов регрессии по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{m}, \quad (3.15)$$

где x_i – знак фактора в соответствующем ему столбце (таблица 3.6);

$$b_0 = 0,07; b_1 = 0; b_2 = 0,007083; b_3 = -0,01625; b_{12} = 0,00175; b_{13} = -0,002917; b_{23} = 0,012083; b_{123} = -0,002917.$$

Значимость коэффициентов регрессии определена с учетом средней дисперсии воспроизводимости:

$$S_e^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 S_i^2}{m} = \frac{0,0074}{8} = 0,00092, \quad (3.16)$$

Вычисляем дисперсию коэффициентов регрессии:

$$S^2(b) = \frac{S_e^2}{m} = \frac{0,00092}{8} = 0,000115. \quad (3.17)$$

Значимость коэффициентов регрессии оценивается с помощью t -критерия. Определяем опытные значения t -критерия по выражению:

$$t_{оп} = \frac{|b_i|}{\sqrt{S^2(b)}}, \quad (3.18)$$

где $S^2(b)$ – дисперсия коэффициентов регрессии.

$$\text{Тогда: } t_1 = -0,94; t_2 = 0,84662; t_3 = 1,94225; t_4 = -2,09165; t_5 = -0,34861; t_6 = 1,444235; t_7 = -0,34861.$$

Опытные значения t -критерия при совместном действии факторов x_1x_2 и $x_1x_2x_3$ меньше критического значения, следовательно, их можно не учитывать.

Уравнение регрессии:

$$\bar{y} = 0,11 + 0,007x_2 - 0,0163x_3 - 0,0029x_1x_3 - 0,012x_2x_3. \quad (3.19)$$

Из уравнения 3.19 видно, что на скорость улавливания наибольшее влияние оказывает количество засыпаемого порошка.

С учётом введенных обозначений $x_1 = \bar{L}$; $x_2 = \bar{h}$; $x_3 = \bar{g}$:

$$\bar{y} = 0,11 + 0,007\bar{h} - 0,0163\bar{g} - 0,0029\bar{L}\bar{g} - 0,012\bar{h}\bar{g}. \quad (3.20)$$

3.3.5 Методика измерений концентрации взвешенных частиц

На расстоянии 100 мм от поверхности бункера, исходя из натуральных условий, происходит засыпка порошка в гранулятор, а на расстоянии 650 мм от поверхности бункера находится зона дыхания оператора (рисунок 3.19).

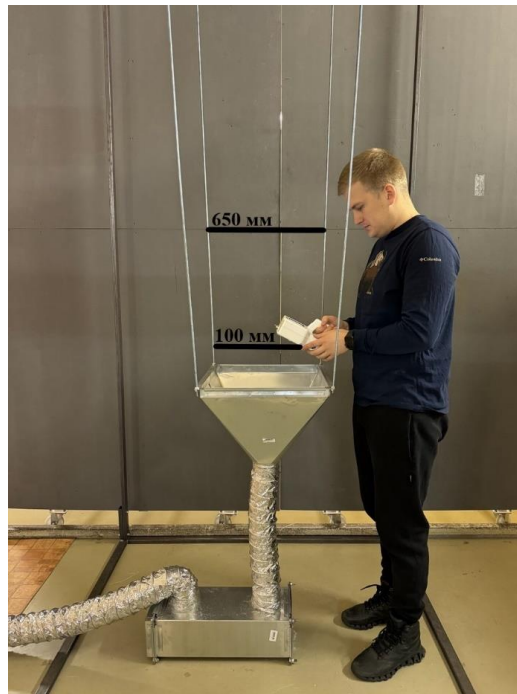


Рисунок 3.19 – План рабочего места с зоной засыпания лекарственного порошка и дыханием оператора

На двух уровнях (100 мм и 650 мм над поверхностью гранулятора) производится отбор проб концентрации взвешенных частиц. Точки отбора проб определены, исходя из методики определения класса чистоты помещения [22, 27, 28, 29].

Алгоритм определения расположения точек отбора проб, следующий [29]:

- определить минимальное число точек отбора проб по таблице А.1 [29];
- разбить чистую зону на равное число секций с одинаковыми площадями;
- указать внутри каждой секции точку отбора проб, которая принимается представительной для всей секции;
- поместить в эти точки пробоотборник счетчика частиц в плоскости рабочих операций или в другой.

Точки расположения отбора проб на высоте 100 мм и 650 мм представлены на рисунке 3.20.

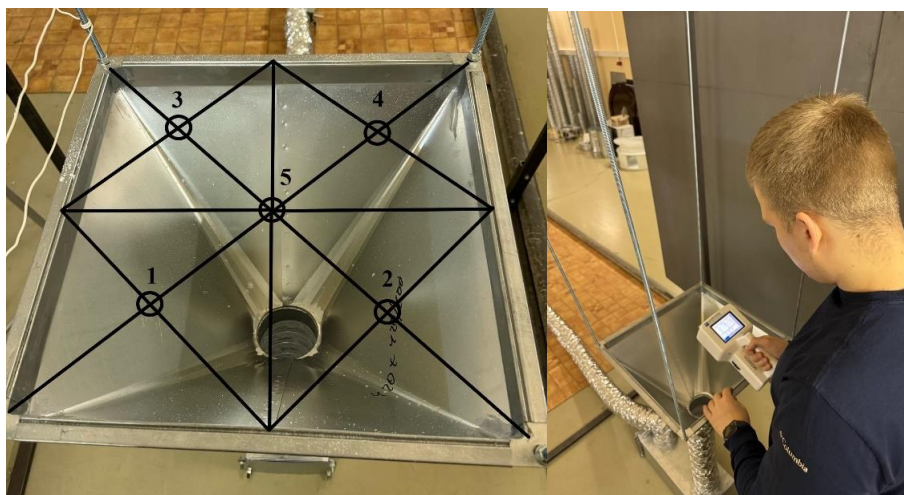


Рисунок 3.20 – Точки расположения отбора проб

Измерения проводились с выключенной и включенной системой вентиляции [51].

3.3.6 Результаты измерений концентрации взвешенных частиц

По результатам измерений представлен дисперсный анализ (распределение размеров частиц, время затухания частиц).

Через 2 секунды после засыпания порошка отобраны пробы в каждой из 5 точек на расстоянии 100 мм и 650 мм над гранулятором. На рисунке 3.21-3.22 представлен дисперсный состав частиц.

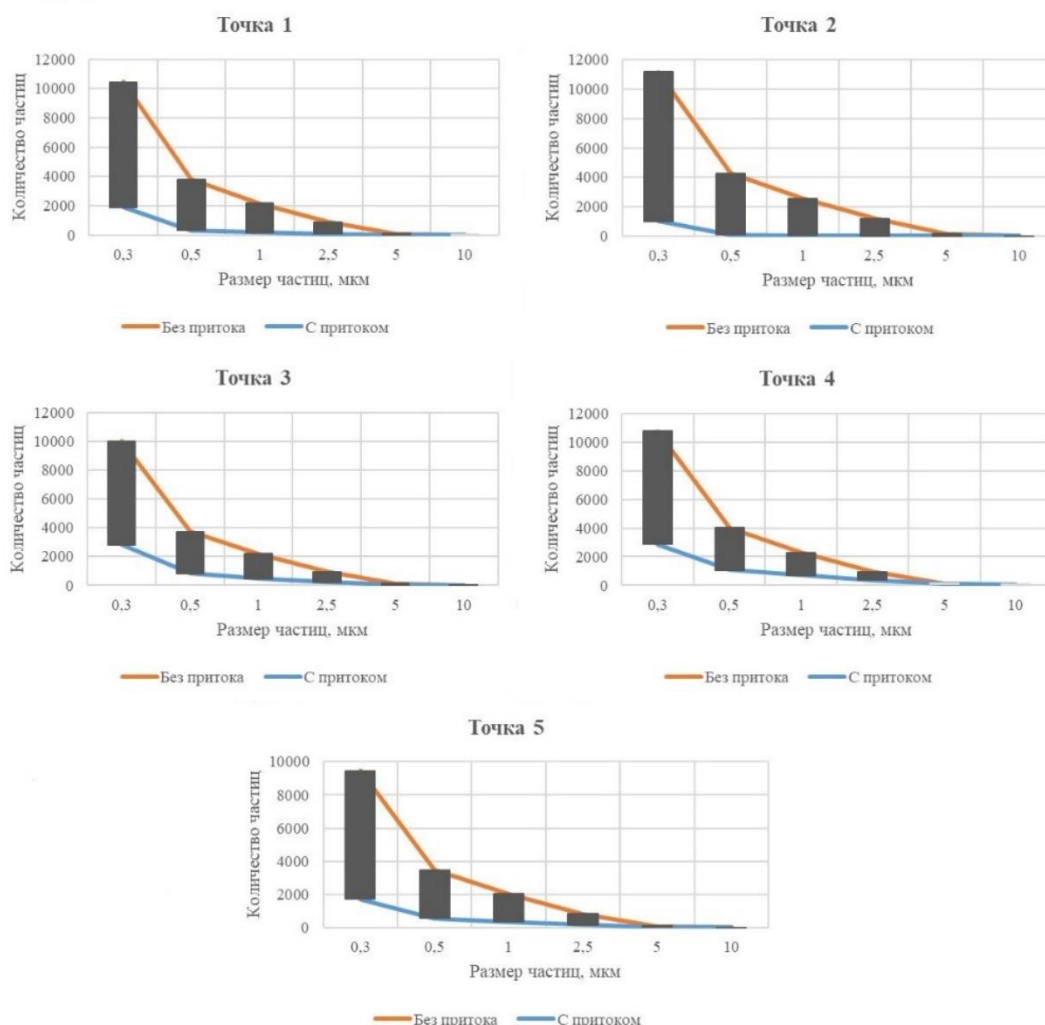


Рисунок 3.21 – Дисперсный состав порошка над гранулятором (1-5 точки отбора проб)

По результатам анализа влияния приточного воздуха на дисперсный состав доказано, что процент снижения распространения взвешенных частиц варьируется от 26% до 100%. Над гранулятором в точках 1,2 (рядом с оператором) и 5 (центр гранулятора) захват частиц наибольший – 1, 2 точки от 39-100 %, 5 точка от 67-84 %. Это объясняется осаждением частиц на одежде оператора, а также способностью всасывания сырья гранулятором. В зоне дыхания оператора наблюдается равномерная тенденция на снижение распространения частиц в точках 1,2,3,5 (15-99%), в точке 4 влияние повышенное (94-99%), это объясняется усилением действия приточной струи за счет внутренних воздушных потоков [51].

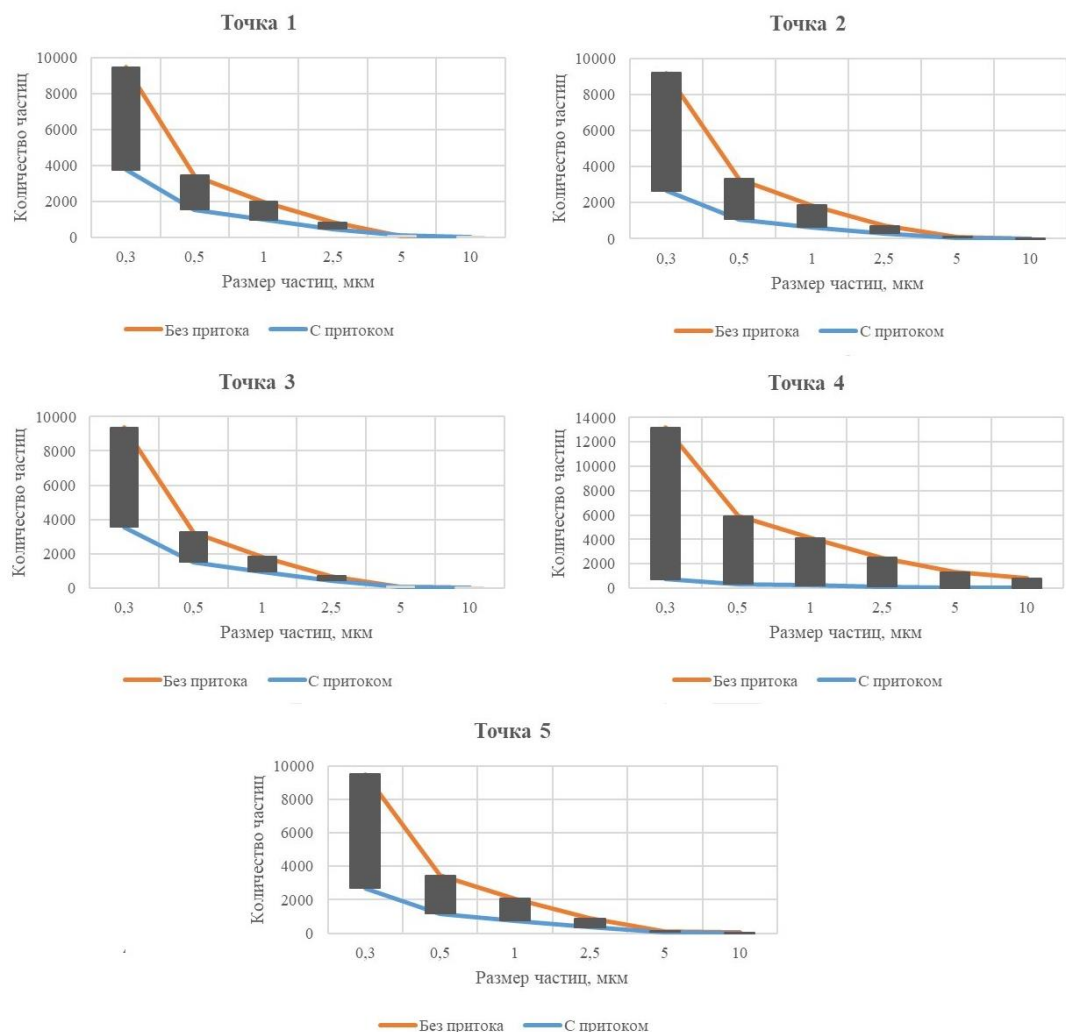


Рисунок 3.22 – Дисперсный состав порошка в зоне дыхания оператора
(1-5 точки отбора проб)

В таблице 3.8-3.9 представлен анализ влияния подачи приточного воздуха на распространение взвешенных частиц.

Для определения класса чистоты, а именно концентрации частиц в кубическом метре используется формула, приведенная в [31]:

$$C_i = \frac{\bar{x}_i \cdot 1000}{V_t}, \quad (3.21)$$

где C_i – концентрация частиц в кубическом метре в i -й точке;

$\bar{x}_i$ – среднее число частиц в i -й точке;

V_t – объем одной пробы, л (2,83 л/мин по паспорту счетчика аэрозольных частиц).

В таблице 3.10 представлен сравнительный анализ влияния приточной струи на класс чистоты.

Таблица 3.8 – Дисперсный состав над гранулятором на расстоянии 100 мм

Размер, мкм	0,3	0,5	1	2,5	5	10
Без притока						
Точка 1	10447	3812	2177	892	94	18
Точка 2	11158	4280	2551	1185	173	23
Точка 3	10003	3720	2180	932	140	15
Точка 4	10766	4028	2300	954	144	75
Точка 5	9463	3465	2020	825	90	22
С притоком						
Точка 1	1906	330	172	101	42	11
Точка 2	1025	99	29	10	3	0
Точка 3	2832	814	453	207	42	11
Точка 4	2880	1066	710	362	99	7
Точка 5	1715	554	341	161	30	6
Процент влияния, %						
Точка 1	82	91	92	89	55	39
Точка 2	91	98	99	99	98	100
Точка 3	72	78	79	78	70	27
Точка 4	73	74	69	62	31	91
Точка 5	82	84	83	80	67	73

Таблица 3.9 – Дисперсный состав над гранулятором на расстоянии 650 мм

Размер, мкм	0,3	0,5	1	2,5	5	10
Без притока						
Точка 1	9485	3472	1991	847	118	50
Точка 2	9203	3312	1864	720	102	21
Точка 3	9357	3263	1825	702	95	29
Точка 4	13195	5917	4105	2510	1323	808
Точка 5	9505	3449	2051	876	118	30
С притоком						
Точка 1	3769	1560	993	479	100	8
Точка 2	2658	1079	644	303	57	16
Точка 3	3576	1528	965	456	70	4
Точка 4	730	340	222	107	25	5
Точка 5	2679	1177	739	344	67	22
Процент влияния, %						
Точка 1	60	55	50	43	15	84
Точка 2	71	67	65	58	44	24
Точка 3	62	53	47	35	26	86
Точка 4	94	94	95	96	98	99
Точка 5	72	66	64	61	43	27

Таблица 3.10 – Данные отбора пробы по частицам $\geq 0,5$ мкм для классов чистоты 7 ИСО и 8 ИСО

Номер точки отбора проб	Средняя концентрация частиц в 1 м ³	Предел класса 8 ИСО по частицам $\geq 0,5$ мкм	Предел класса 7 ИСО по частицам $\geq 0,5$ мкм	Соответствует/ не соответствует (да/нет)
	100 мм над гранулятором			
	Без притока			
1	1346996	3520000	352000	Да/Нет
2	1512367	3520000	352000	Да/Нет
3	1314487	3520000	352000	Да/Нет
4	1423321	3520000	352000	Да/Нет
5	1224381	3520000	352000	Да/Нет
	С притоком			
1	116608	3520000	352000	Да/Да
2	34982	3520000	352000	Да/Да
3	287633	3520000	352000	Да/Да
4	376678	3520000	352000	Да/Да
5	195760	3520000	352000	Да/Да
	650 мм над гранулятором			
	Без притока			
1	1226855	3520000	352000	Да/Нет
2	1170318	3520000	352000	Да/Нет
3	1153004	3520000	352000	Да/Нет
4	2090813	3520000	352000	Да/Нет
5	1218728	3520000	352000	Да/Нет
	С притоком			
1	551237	3520000	352000	Да/Нет
2	381272	3520000	352000	Да/Нет
3	539929	3520000	352000	Да/Нет
4	120141	3520000	352000	Да/Да
5	415901	3520000	352000	Да/Нет

Во всем пространстве модуля чистого помещения площадью 9 м² соблюдается класс чистоты ИСО 8 или класс чистоты d по [128]. Приточная струя обеспечивает снижение класса чистоты над поверхностью бункера за счет процесса всасывания сырья гранулятором, но не снижает в зоне дыхания оператора. Результаты первичных измерений представлены в таблице Г.1 в приложении Г.

Порошок засыпается порционно небольшими партиями равномерно из специальных емкостей объемом 200-300 мл на уровне от 100-200 мм над поверхностью гранулятора при разной интенсивности работы оборудования (максимальная интенсивность 100 кг сырья в час) [119].

Время полного оседания взвешенных частиц составляет 10 секунд (рисунок 3.23).

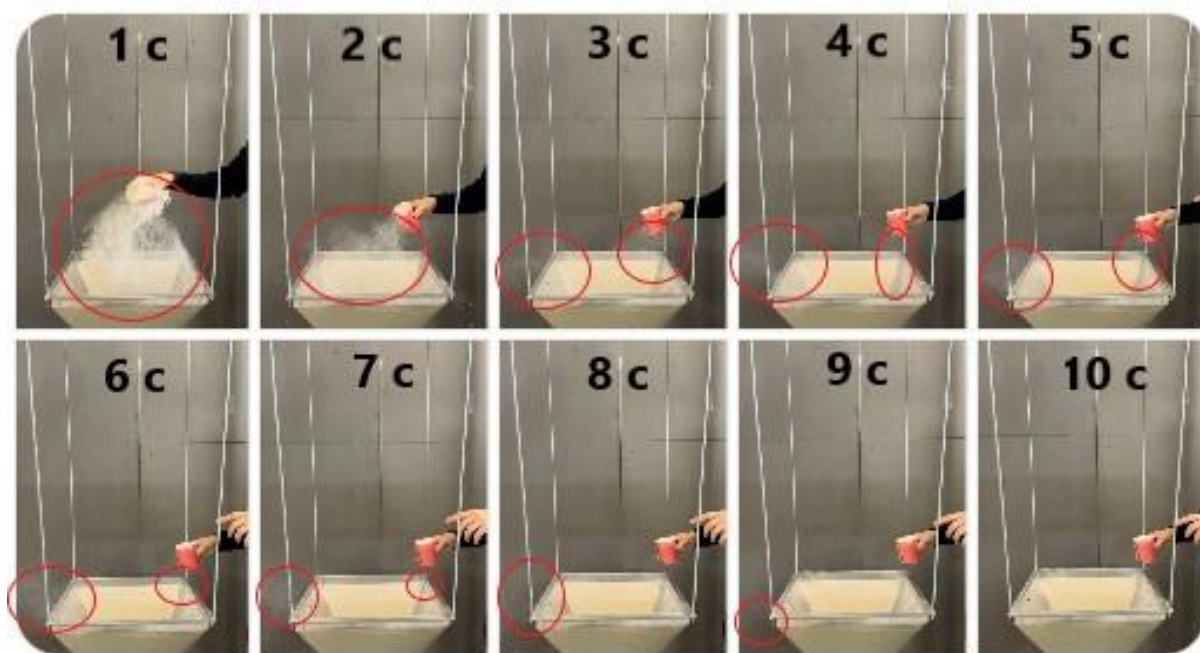


Рисунок 3.23 – Оседание взвешенных частиц

По результатам лабораторного эксперимента выведены экспериментальные зависимости количества частиц от времени (рисунки 3.24 – 3.25):

На расстоянии 100 мм:

с притоком:

$$C = -261,64 * t + 2587,6 , \quad (3.22)$$

без притока:

$$C = -37,045 * t + 4094,3 , \quad (3.23)$$

На расстоянии 650 мм:

с притоком:

$$C = -80,958 * t + 1010,3, \quad (3.24)$$

без притока:

$$C = -68,919 * t + 4109, \quad (3.25)$$

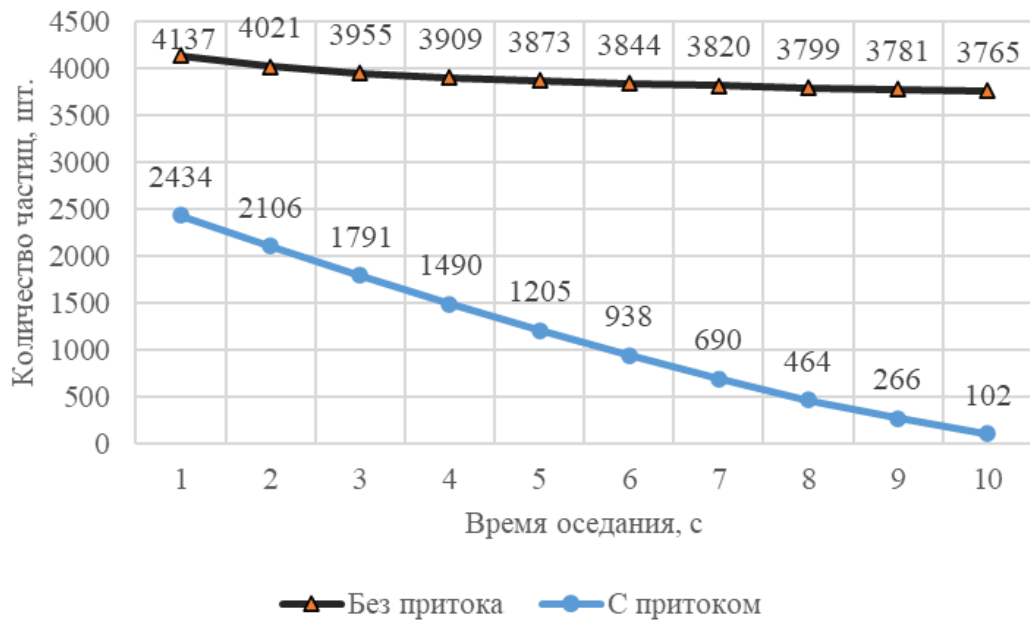


Рисунок 3.24 – Оседание взвешенных частиц над гранулятором на расстоянии 100 мм

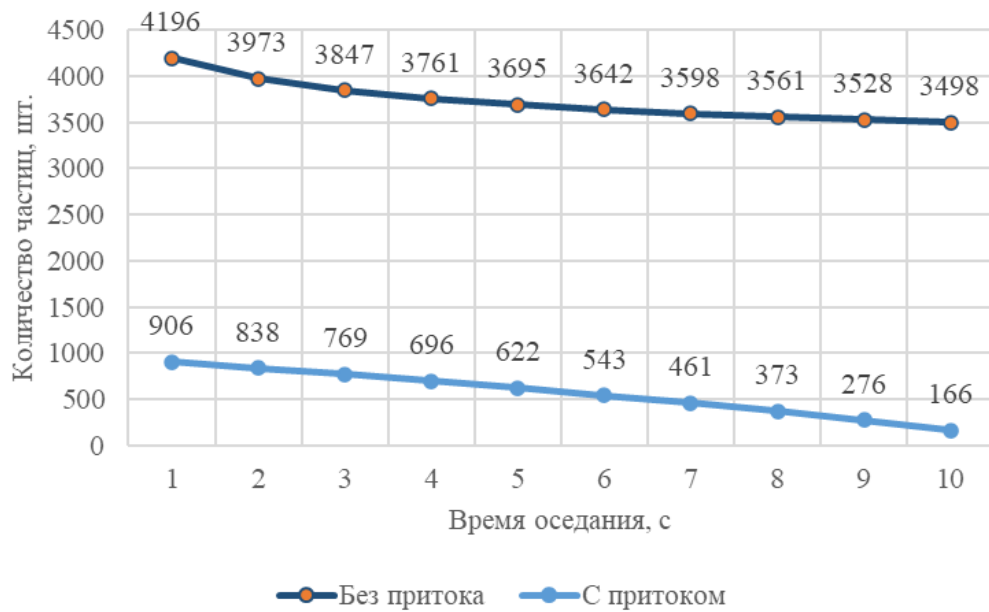


Рисунок 3.25 – Оседание взвешенных частиц над гранулятором на расстоянии 650 мм

Время оседания взвешенных частиц в пространстве чистого помещения показывает, как быстро эти частицы удаляются из воздуха и оседают на поверхности. Этот параметр является важным показателем для оценки эффективности систем вентиляции и фильтрации в чистых помещениях.

Самая большая реактивная способность у взвешенных частиц размером до 5 мкм. Для дыхания человека опасны высокодисперсные мелкие частицы (менее 5–7 мкм). Такие частицы способны достигать лёгочной ткани, состоящей из альвеол, и накапливаясь в ней, провоцируют тяжёлые заболевания органов дыхания. Приточная струя локализует частицы размером до 5 мкм и способствует их удалению с эффективностью до 80 % в отдельных точках.

Приточная струя равномерно локализует над гранулятором частицы размером 0,5 мкм, так как данные частицы участвуют в скреплении материала таблеток.

Стоит отметить, что влияние приточной струи снижает концентрацию взвешенных частиц в зоне дыхания оператора в несколько раз.

Зависимость концентрации частиц в точке от размера показывает распределение частиц по размерам. Эта зависимость влияет на реакционную способность твёрдых веществ и требует строгого контроля на этапе гранулирования во многих фармацевтических производственных процессах.

Зависимость концентрации частиц в точке от времени показывает процесс выравнивания концентрации частиц, который сопровождается их переносом в направлении уменьшения концентрации.

Приточная струя при взаимодействии с взвешенными частицами обладает следующими свойствами:

- оказывает влияние на снижение взвешенных частиц;
- поддерживает параметры класса чистоты чистого помещения;
- снижает время осаждения частиц в рабочей зоне дыхания оператора.

3.4 Выводы

Результаты экспериментальных исследований на разработанной автором лабораторной установке позволяют сделать следующие выводы:

- определена схема приточной струи при соосном расположении воздухораспределителя и технологического отсоса; выделены начальный и основной участки струи;
- для начального участка струи определены: длина начального участка, зависимость диаметра ядра постоянных скоростей на начальном участке струи от относительной координаты по оси x ;
- для основного участка струи определён коэффициент изменения осевой скорости в струе m в зависимости от относительной координаты по оси x ;
- выявлена зона действия приточной струи на уровне загрузки лекарственного порошка;
- получена регрессионная зависимость от расхода воздуха в приточной струе, высоты установки воздухораспределителя и расхода засыпаемого порошка для описания скорости пылевоздушного потока на уровне загрузки лекарственного порошка;
- получены зависимости распределения концентрации взвешенных частиц в зоне дыхания оператора и у поверхности бункера гранулятора;
- определено время оседания взвешенных частиц при взаимодействии приточной струи и гранулятора;
- получены экспериментальные зависимости времени оседания взвешенных частиц для различных расходов.

4 АНАЛИЗ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОЗДУШНОГО РЕЖИМА ЧИСТОГО ПОМЕЩЕНИЯ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

В результате проведенных исследований получены зависимости распределения скорости на оси приточной струн, $v(x)$, распределения концентрации взвешенных частиц, выявлены поля распределения скорости и концентрации взвешенных частиц в характерных сечениях. Каждая зависимость показывает процесс взаимодействия приточной струи с рабочим пространством, с зоной дыхания оператора, с гранулятором, с взвешенной частицей и способностью улавливания взвешенных частиц.

Эффективность приточной струи фармацевтического производства ТЛФ этапа гранулирования можно оценить по двум параметрам:

- по соответствию скорости приточного воздуха нормативным значениям в зоне дыхания оператора;
- по уменьшению количества взвешенных частиц в пространстве дыхания оператора.

При исследовании скорости воздуха и концентрации частиц в воздухе в пространстве над гранулятором выявлен ряд особенностей:

- для инженерного метода расчета скорости приточной струи на расстоянии меняется значение коэффициента стеснения, который зависит от размеров и расположения гранулятора.
- непосредственное расположение воздухораспределителя над поверхностью бункера снижает концентрацию частиц в центральной точке бункера, но увеличивает концентрацию по мере удаления от центра, создавая воздушные завихрения по краям.

При исследовании скорости воздуха и концентрации частиц в воздухе в пространстве над гранулятором выявлен ряд особенностей:

- для инженерного метода расчета осевой скорости приточной струи на расстоянии необходимо выявить коэффициент, учитывающий влияние технологического отсоса (гранулятора).

- соосное расположение воздухораспределителя над поверхностью бункера при ограниченном расходе, удаляемого через технологический отсос (гранулятор), способствует улавливанию пыли меньшим расходом подаваемого воздуха и перетеканию периферийной части струи в помещение, что обеспечивает снижение концентрации частиц лекарственного препарата в рабочей зоне помещения.

4.1 Анализ влияния приточной струи на формирование воздушного режима чистого помещения фармацевтического производства

Для оценки адекватности результатов лабораторного эксперимента выполнено сравнение с известными данными, полученными в работе [95] для случая соосного расположения приточной струи с местным отсосом. В работе выполнены исследования на лабораторной установке с местным отсосом размерам $0,1 \times 0,1$ м, активированной приточной струей, истекающей из профилированного круглого сопла радиусом $0,015$ м. Поскольку имеет место существенная разница в геометрических размерах данной установки и диапазоне скоростей приточной струи, сравнение выполнено в относительных единицах. Как показано в предыдущих разделах, в поле приточной струи при натекании на технологический отсос отсос (гранулятор) формируется начальный и основной участок, что описано и в сравниваемом эксперименте. Однако, в обоих случаях взаимодействие приточной струи с отсосом происходит в пределах основного участка струи, при этом происходит торможение струи.

На рисунках 4.1 и 4.2 представлены зависимости относительной осевой скорости $\overline{v_x}$ от относительной координаты $\bar{x}$.

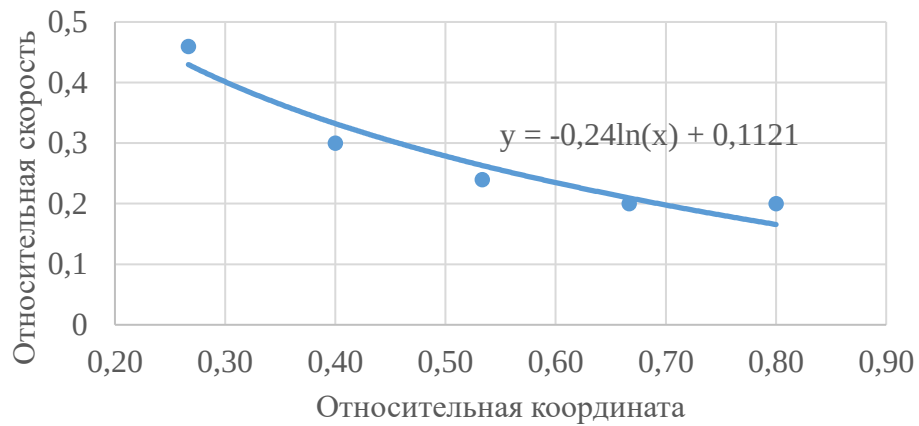


Рисунок 4.1 – Изменение относительной скорости по оси системы струя (основной участок) – отсос по данным работы [95]

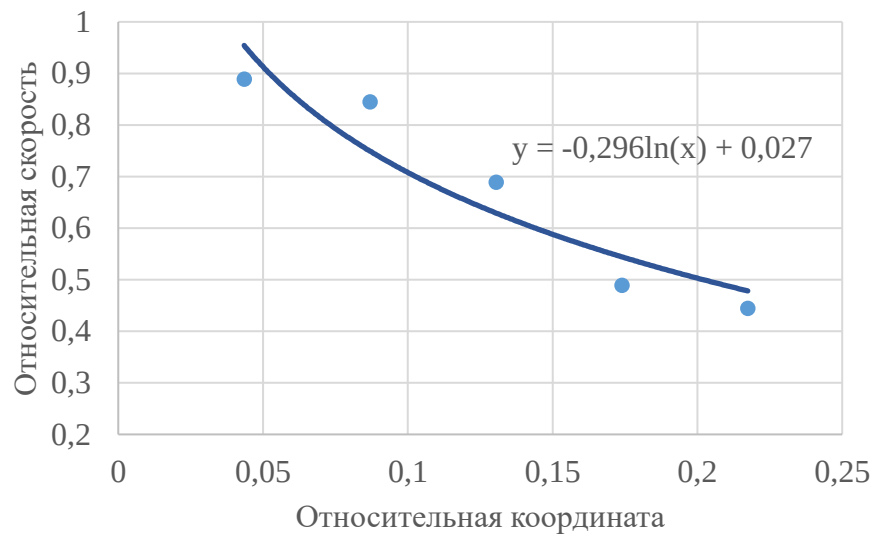


Рисунок 4.2 – Изменение относительной скорости по оси системы струя (основной участок) – отсос по данным лабораторного эксперимента

Получены зависимости:

- по данным работы [16]:

$$\overline{v_x} = -0,24 \ln(\bar{x}) + 0,11. \quad (4.1)$$

- о данным эксперимента:

$$\overline{v_x} = -0,3 \ln(\bar{x}) + 0,03. \quad (4.2)$$

Несмотря на отличие числовых коэффициентов в аппроксимационных формулах, что, несомненно, связано с различиями в постановке эксперимента, имеет

место идентичность формы зависимости. Это подтверждает достоверность выполненных экспериментов.

Поскольку струя испытывает влияние технологического отсоса (гранулятора) на основном участке, в качестве уравнения для нахождения коэффициента, учитывающего это влияние, принята формула, ранее приведенная в Рекомендациях [101], широко используемая в справочной литературе и проектной практике:

$$V_x = \frac{m \cdot L_0}{x \cdot \sqrt{F_0}} \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_H \cdot K \quad (4.3)$$

Кинематический коэффициент принят по данным завода «Арктос» [114] $m = 6$ для веерных струй, образующихся из прямооточных воздухораспределителей ВБС. В расчёте использованы коэффициенты взаимодействия для одиночной струи $K_B = 1$ и неизотермичности $K_H = 1$ для изотермического режима течения воздушной рециркуляционной струи. При распределении струи в ограниченном пространстве необходимо учесть коэффициенты, учитывающие влияние строительных конструкций (коэффициент стеснения), геометрические размеры воздухораспределителя и отсоса, приточной струи, а также соотношения расходов, удаляемого технологическим отсосом (гранулятором) и приточного через воздухораспределитель (коэффициент K).

При использовании табличных значений коэффициента стеснения необходимо знать вспомогательные характеристики [114]:

$$K_c = f\left(\frac{F_0}{(b_o \cdot h)}; \frac{x}{(m \cdot \sqrt{F_0})}\right) \quad (4.4)$$

Здесь F_0 – площадь расчётного сечения воздухораспределителя ($F_0 = 0,192 \text{ м}^2$); b_o – ширина расчетного сечения ВР ($b_o = 0,47 \text{ м}$); h – высота помещения, м ($h = 3,0 \text{ м}$); x – расчётная длина струи до поверхности гранулятора ($x = 2,3 \text{ м}$). Поскольку для условий исследований величина $\frac{F_0}{(b_o \cdot h)} = 0,18$, что вне пределов данных таблицы, то данный коэффициент принят равным 1.

Для нахождения коэффициента K использованы результаты, представленные в разделе 2.

Введены следующие обозначения:

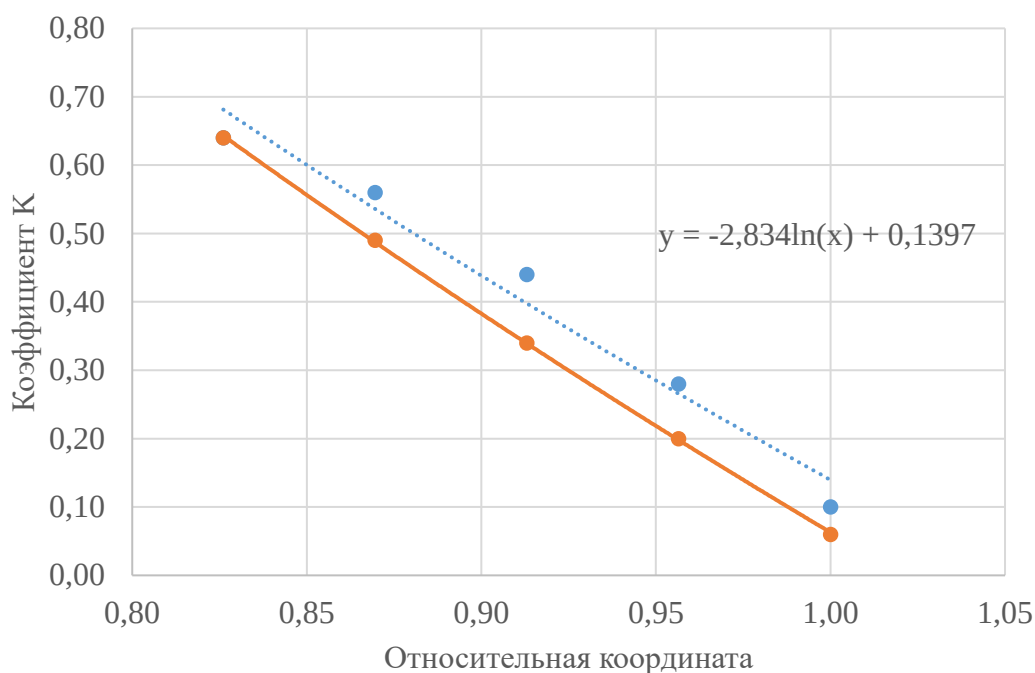
$$\bar{m} = \frac{m\sqrt{F_0}}{a}; \quad \bar{x} = \frac{x}{l_{\text{стр}}}; \quad \bar{b} = \frac{b}{l_{\text{стр}}}; \quad \bar{L} = \frac{L_y}{L_{\text{п}}}$$

где a – размер воздухораспределителя, м; $l_{\text{стр}}$ – длина приточной струи, м; b – размер входного отверстия гранулятора, м; L_y , $L_{\text{п}}$ – соответственно расход удаляемого и приточного воздуха.

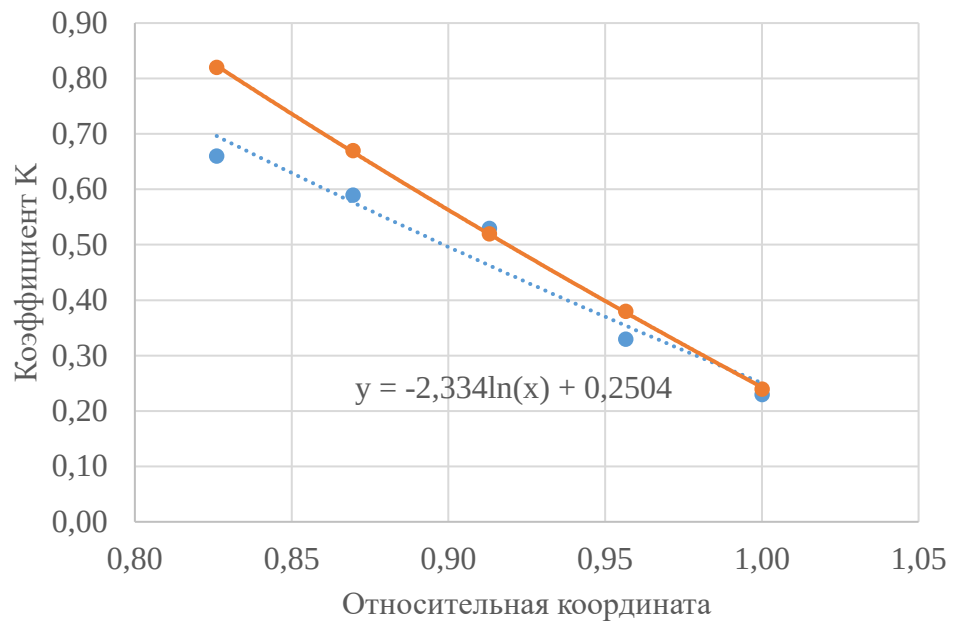
В результате обработки экспериментальных данных для коэффициента K получено выражение в виде, учитывающем все факторы, влияющие на развитие струйного течения вблизи входного отверстия гранулятора:

$$K = -\bar{m}^{0,75} \ln(\bar{x}) + \bar{b}^{1,75} + \bar{L}^{0,75}. \quad (4.5)$$

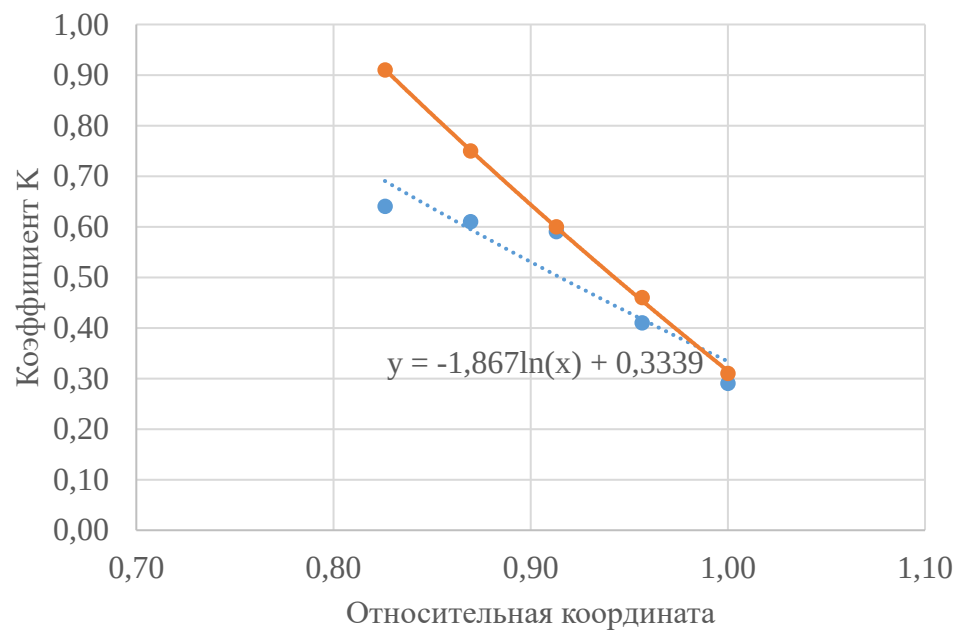
Результаты расчета представлены на рисунке 4.3.



а)



б)



в)

Рисунок 4.3 – Зависимость коэффициента K от относительной координаты
(а- соответствует данным при $\bar{L} = 0$; б – при $\bar{L} = 0,1$; в – при $\bar{L} = 0,17$)

На рисунках сплошной линией показана зависимость по формуле 4.4.

Экспериментальные данные, представленные в разделе 3, и условия технологического процесса позволяют сделать вывод, что наиболее целесообразно использовать вариант с соотношением расходов удаляемого и приточного воздуха $\bar{L} = 0,1$.

Учитывая удовлетворительное соответствие зависимости 4.3, аппроксимирующей зависимости и экспериментальных данных, можно использовать подобный подход для нахождения распределения осевой скорости в других типах соосно расположенных приточных струй для активирования местных отсосов.

4.2 Оценка эффективности использования технологического отсоса (гранулятора), активированного приточной струей

4.2.1 Оценка влияния гранулятора (местного отсоса) на эффективность общеобменной вентиляции

Приточная струя от воздухораспределителя влияет на локализацию и улавливание взвешенных частиц, в том числе повышает эффективность местного отсоса, в нашем случае это работающий гранулятор. По результатам исследований концентрации взвешенных частиц определена эффективность работы общеобменной вентиляции на удаление взвешенных частиц.

Эффективность вентиляции в чистых помещениях определяется по формуле [26]:

$$\varepsilon_v = \frac{C_{\text{выт}} - C_{\text{пр}}}{C_{\text{вн}} - C_{\text{пр}}}, \quad (4.6)$$

где $C_{\text{выт}}$ – концентрация загрязнений в вытяжном воздухе;

$C_{\text{вн}}$ – концентрация загрязнений внутри помещения (в зоне дыхания);

$C_{\text{пр}}$ – концентрация загрязнений в приточном воздухе.

Формула (4.1) учитывает влияние общеобменной вытяжной вентиляции, но не учитывает эффект местного отсоса от гранулятора. Для учёта удаления части

взвешенных частиц гранулятором введем значение $C_{гр}$. Следовательно, общее число взвешенных частиц, которые удаляются полностью из чистого помещения принимает вид:

$$C_{уд} = C_{выт} + C_{гр}. \quad (4.7)$$

Таким образом, формула эффективности вентиляции в чистых помещениях с учетом влияния гранулятора (местного отсоса) принимает вид:

$$\varepsilon_v = \frac{C_{выт} + C_{гр} - C_{пр}}{C_{вн} - C_{пр}}. \quad (4.8)$$

На лабораторной установке определены значения при помощи счётчика аэрозольных частиц ($C_{пр} = 100000$, $C_{выт} = 800000$, $C_{гр} = 202332$, $C_{вн} = 1371943$).

Подставим числовые значения в формулы (4.1 и 4.3):

$$\varepsilon_{v1} = \frac{800000 - 100000}{1371943 - 100000} = 0,55 = 55 \%, \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_{v2} = \frac{800000 + 202332 - 100000}{1371943 - 100000} = 0,7 = 70 \%, \quad (4.10)$$

Взаимодействие гранулятора и приточной струи увеличивает эффективность общеобменной вентиляции на 15% (рисунок 4.6).

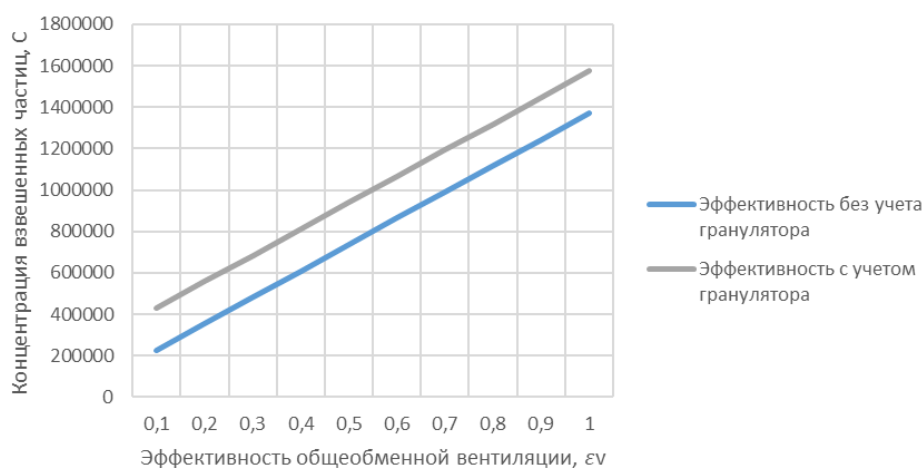


Рисунок 4.4 – Зависимость концентрации взвешенных частиц от эффективности общеобменной вентиляции

4.2.2 Оценка эффективности улавливания пыли технологическим отсосом (гранулятором)

Для оценки коэффициента улавливания местного отсоса в разделе 1.2 предложен ряд формул. Однако, в лабораторных условиях достаточно сложно воспользоваться, например, формулой 1.1, предложенной Г.М. Позиным. Соответственно, затруднительно выполнить необходимые измерения и для использования формул 1.2 и 1.3. Принимая во внимание обобщение исследований разных авторов, выполненное А.Г. Сотниковым и А.А. Боровицким в [110, 111], оценка эффективности улавливания технологического отсоса (гранулятора), активированного приточной струей, выполнена с использованием предложенной формулы 1.4. Подобная формула рассмотрена и в монографии В.Н. Посохина [95]. После преобразований и, используя данные, полученные при определении класса чистоты, формула примет вид:

$$K_{ул} = 1 - \exp[-(\bar{a}\bar{v}_{МО})^{0,25}]., \quad (4.11)$$

где n – опытное значение показателя степени;

$\bar{a}$ – отношение расстояния от воздухораспределителя к его размеру;

$\bar{v}_{МО}$ – относительная скорость всасывания, определяемая как отношение средней скорости воздуха в плоскости всасывания к скорости на выходе из приточного отверстия.

На рисунках 4.5 и 4.6 приведены зависимости $K_{ул}$ от $\bar{a}\bar{v}_{МО}$ и $K_{ул} = f(\bar{a}^{0,25}, \bar{v}_{МО}^{0,25})$.

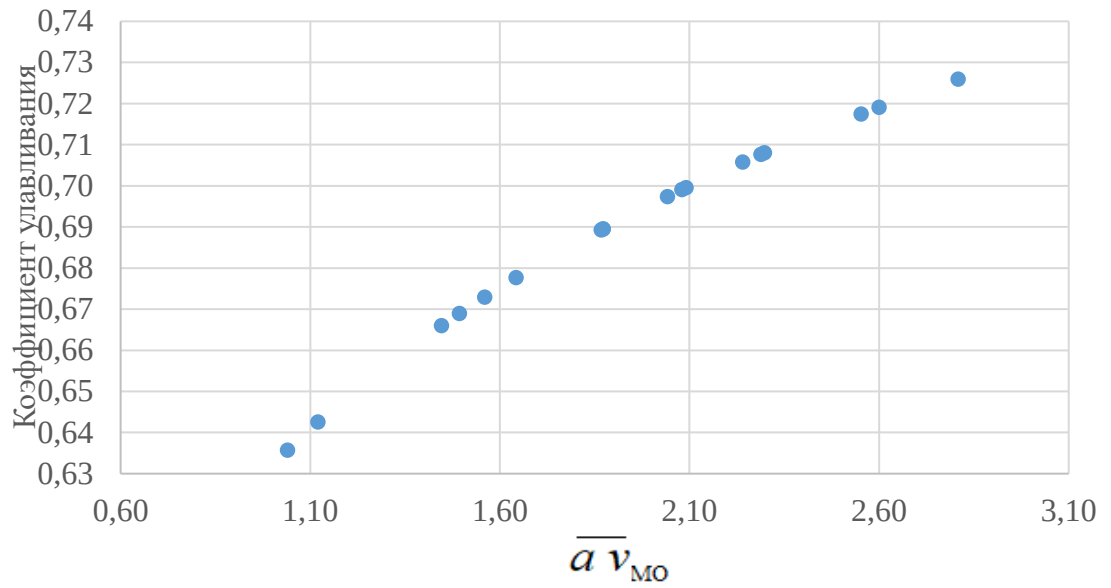


Рисунок 4.5 – Зависимость $K_{yl}=f(\overline{av}_{MO})$

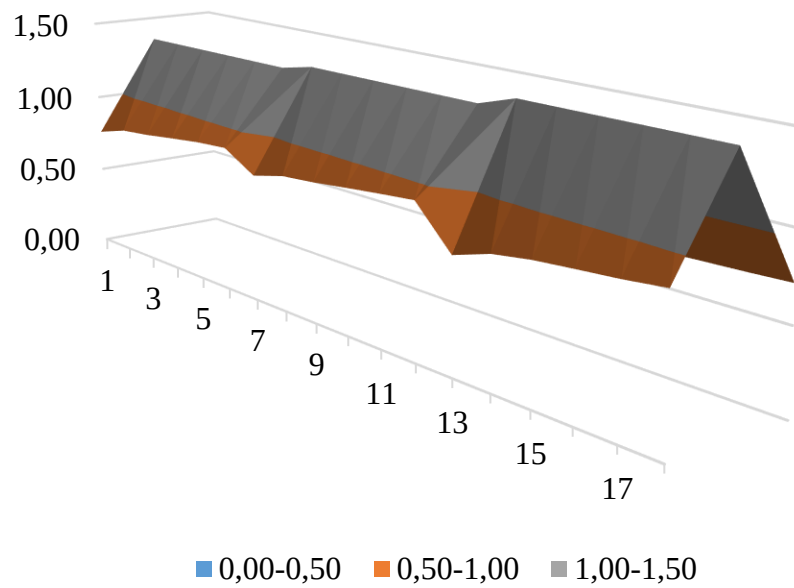


Рисунок 4.6 – Зависимость $K_{yl} = f(\overline{a}^{0,25}, \overline{v}_{MO}^{0,25})$.

Несмотря на отсутствие в выполненном обобщении [110] экспериментальных данных по активированным местным отсосам при вертикальном соосно расположении системы струя-отсос, результаты лабораторного эксперимента соответствуют значениям, представленным в работе [110]. В указанной работе в комплексе

av_{MO} использованы размерные величины, в данной работе предлагается использовать безразмерные величины $\overline{av_{MO}}$, в которые входят те же переменные, что и в работе [110].

При $n=0,25$ и значениях комплекса av_{MO} в пределах $1,2 \div 2,6$ значения $K_{ул}$ находятся в диапазоне $0,68 \div 0,75$. В лабораторном эксперименте $0,64 \div 0,73$, что подтверждено также при оценке класса чистоты помещения.

Таким образом, зависимость 4.10 подтверждает возможность оценки коэффициента улавливания при использовании соотношения скоростей на выходе из приточного отверстия и в плоскости всасывания активированного отсоса, а также относительного расстояния от приточного отверстия.

4.3 Рекомендации по проектированию, монтажу систем вентиляции и кондиционирования чистых помещений фармацевтических производств

Результаты полученных исследований дают возможность пересмотреть подходы к проектированию и монтажу систем обеспечения воздухообмена в чистых помещениях фармацевтических производств, что способствует совершенствованию воздушного режима.

При определении воздухообмена, как правило, расчет производится по тепло и влагоизбыткам, либо по массе, выделяющихся вредных веществ [114]. Основной задачей циркуляции воздуха в помещениях по изготовлению ТЛФ является эффективное удаление взвешенных частиц, а также оперативное восстановление воздушного потока. Методика, описанная в [26], дает возможность рассчитать расход воздуха для обеспечения заданного уровня чистоты и времени восстановления воздушного потока. Приведённые в приложении А расчёты показали, что использование двух методик расчета воздухообмена помещения класса чистоты d, даёт разброс значений в несколько раз.

Таким образом, если проектировщику необходимо задать нижний предел расхода воздуха, то необходимо использовать методику [26], а если верхний, то методику [114].

Исследования показали, что для обеспечения параметров микроклимата, экономически выгодным является методом подачи воздуха смешанными потоками воздуха, но при условии изолирования зон [53]. В зоне постоянного нахождения оператора используется неоднонаправленный поток воздуха, а в зоне временного нахождения оператора при манипуляции с сырьем над гранулятором – однонаправленный поток. За счет разделения зон подачи воздуха, однонаправленный поток обеспечивает охлаждение оборудования, равномерное удаление взвешенных частиц и стабилизацию воздушного потока, а неоднонаправленный поток – комфортное нахождение оператора для обслуживания установок. Разделение зон обеспечивает достижение параметров микроклимата по нормативным значениям для оборудования и оператора [53].

При определении параметров воздушной струи над гранулятором невозможно использовать методику расчета, описанную в [114]. При натекании на гранулятор струя испытывает дополнительное стеснение, что сказывается на неточности при использовании инженерного метода расчета. В 4-ой главе представлен инженерный метод расчёта, учитывающий влияние гранулятора на приточную струю. Введен дополнительный коэффициент K , который учитывает геометрические размеры воздухораспределителя и отсоса, приточной струи, а также соотношения расходов, удаляемого технологическим отсосом (гранулятором) и приточного через воздухораспределитель.

На этапе проектирования необходимо соосно располагать фармацевтические грануляторы открытого типа под воздухораспределительным устройством. Подобное решение минимизирует риск распространения взвешенных частиц, усиливает эффект всасывания частиц гранулятором, а также способствует равномерному распределению полей скоростей в рабочей зоне оборудования.

Анализ рабочей документации систем вентиляции и кондиционирования воздуха чистых помещений научно-технологического центра «Полисан» дает

возможность сформулировать ряд важных рекомендаций по проектированию и монтажу систем обеспечения воздухообмена:

- для обеспечения равномерности полей скорости, быстрой стабилизации воздушного потока необходимо использовать приточно-вытяжную систему вентиляции с однонаправленным потоком чистого воздуха для обеспечения оптимальных параметров микроклимата, а также для локализации взвешенных частиц с последующим их удалением.

- на этапе проектирования предусмотреть расположение воздухораспределителя непосредственно над зоной выделения вредностей, чтобы усилить действие приточной струи;

- осуществлять монтаж воздухораспределителя не выше 3 метров;

- при расчёте рекомендуемой длины приточной струи, необходимо учитывать коэффициент, включающий геометрические размеры воздухораспределителя и отсоса, приточной струи, а также соотношения расходов удаляемого технологическим отсосом (гранулятором) и приточного через воздухораспределитель (коэффициент К);

- необходимо учитывать высоту потолка; при низком расположении потолка и недостаточной длине приточной струи рекомендуется предусмотреть мероприятия по снижению распространения взвешенных частиц путем устройства, например, местных отсосов, локальных рециркуляционных пылеочистных устройств для рабочих мест, бортовых решеток «лабиринтного типа» у места выделения вредностей;

- соблюдение требований стандартов [21-32], [97], а также [146].

- применение фильтров трёх уровней очистки: грубой очистки, тонкой очистки и HEPA/ULPA фильтры для удаления загрязнений, бактерий и микроорганизмов в приточном воздухе в чистое помещение.

4.4 Экономическое обоснование использования приточной струи

Исследования концентрации взвешенных частиц в разных точках показали, что приточная струя улавливает взвешенных частиц над гранулятором. Эффективность улавливания гранулятором взвешенных частиц составляет 75 %.

На рисунке 4.7 на основе стоимости порошка и показателя эффективности улавливания представлены гистограммы, которые показывают экономический эффект за месяц и за год при максимальной загрузке гранулятора в рабочую восьмичасовую смену [10, 33, 42].

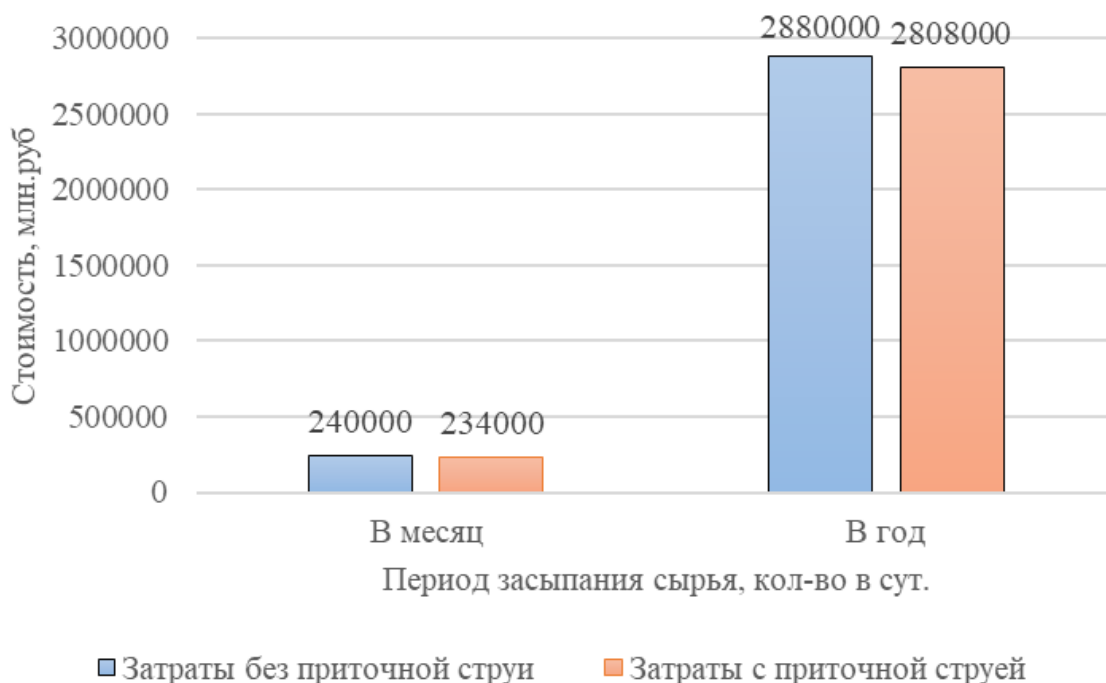


Рисунок 4.7 – Затраты с учетом эффективности улавливания гранулятором

4.5 Выводы

На основе проведенных исследований пространства над гранулятором, рабочей зоны для совершенствования воздушного режима:

- получена зависимость $v(x)$, адекватно описывающая результаты лабораторного эксперимента в виде зависимости относительной осевой скорости

от относительной координаты $\bar{v}_x = -0,3 \ln(\bar{x}) + 0,03$, идентичные результатам расчетов других авторов численного моделирования и инженерного метода расчета, что доказывает достоверность выполненных измерений;

- для учета влияния условий развития струи на основании обработки результатов численного и лабораторного экспериментов предложена зависимость для коэффициента $K = -\bar{m}^{0,75} \ln(\bar{x}) + \bar{b}^{1,75} + \bar{L}^{0,75}$, включающего в безразмерном виде факторы, влияющие на развитие струйного течения в основном участке струи при соосном расположении системы струя - активированный отсос вблизи входного отверстия гранулятора;

- выявлены зависимости $C(t)$, концентрации частиц и распределение их по размеру от времени осаждения;

- установлено, что приточная струя снижает распространение взвешенных частиц, в том числе частиц размером до 5 мкм, уменьшая реакционную способность частиц;

- получено среднее время стабилизации воздушного потока 10 секунд после операции засыпания над поверхностью открытого бункера;

- проведена оценка влияния гранулятора (местного отсоса) на общеобменную вентиляцию, доказано, что использование активированного технологического отсоса (гранулятора) обеспечивает повышение эффективности общеобменной вентиляции на 15%;

- получена зависимость для определения коэффициента улавливания $K_{ул} = 1 - \exp[-(\bar{a}\bar{v}_{м0})^{0,25}]$ с использованием соотношения скоростей на выходе из приточного отверстия и в плоскости всасывания активированного отсоса, а также относительного расстояния от приточного отверстия;

- на основании результатов лабораторных и численных экспериментов, а также оценки класса чистоты помещения доказана эффективность улавливания $0,64 \div 0,73$, что соответствует данным других авторов для активированных местных отсосов;

- разработаны рекомендации по проектированию, монтажу систем вентиляции и кондиционирования чистых помещений фармацевтических производств;

- выполнен расчет ожидаемого экономического эффекта от использования приточной струи при изготовлении ТЛФ, который составил 72000 руб/год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований состояния воздушной среды чистых помещений фармацевтических производств за счет использования приточной струи для интенсификации улавливания лекарственных препаратов при их загрузке в технологический отсос (гранулятор) обеспечено снижение запыленности рабочей зоны, что является одним из основных направлений повышения качества воздушного режима, а также снижение потерь лекарственного сырья и перекрестной контаминации.

В результате доказана возможность повышения эффективности улавливания мелкодисперсных лекарственных препаратов и других взвешенных частиц местными и технологическими отсосами и решены задачи исследования:

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных нормативных требований к воздушному режиму чистых помещений фармацевтических производств.

2. Разработана с использованием k - ϵ модели турбулентности численная модель взаимодействия изотермической приточной струи с открытым технологическим отсосом (гранулятором) при их соосном расположении.

3. Установлена аэродинамическая схема приточной струи, закономерности начального и основного участков при взаимодействии изотермической приточной струи с технологическим отсосом (гранулятором).

4. Получена зависимость кинематического коэффициента $m = 13,541 - 2,698\bar{x}$ для приточной струи в пределах основного участка.

5. Разработана и создана лабораторная установка фрагмента чистого помещения с гранулятором (технологическим отсосом) и выполнены экспериментальные исследования распределения скорости движения воздуха и концентрации взвешенных частиц.

6. Получена зависимость относительной осевой скорости от относительной координаты, адекватно описывающая результаты лабораторного эксперимента, в виде $\overline{v_x} = -0,3 \ln(\bar{x}) + 0,03$, идентичная результатам расчетов

других авторов, численного моделирования и инженерного метода расчета, что доказывает достоверность выполненных измерений.

7. Получена регрессионная зависимость от расхода воздуха в приточной струе, высоты установки воздухораспределителя и расхода засыпаемого порошка для описания скорости пылевоздушного потока на уровне загрузки лекарственного порошка $\bar{y} = 0,11 + 0,007\bar{h} - 0,0163\bar{g} - 0,0029\bar{L}\bar{g} - 0,012\bar{h}\bar{g}$.

8. Доказано влияние приточной струи на снижение концентрации взвешенных частиц в рабочей зоне помещения в процессе получения твердых лекарственных форм, установлена зависимость концентрации частиц от времени осаждения.

9. Получено среднее время стабилизации воздушного потока 10 секунд после операции засыпания лекарственного порошка над поверхностью открытого бункера;

10. Проведена оценка влияния гранулятора (местного отсоса) на общеобменную вентиляцию, доказано, что использование активированного технологического отсоса (гранулятора) обеспечивает повышение эффективности общеобменной вентиляции на 15%.

11. Для учета влияния условий развития струи на основании обработки результатов численного и лабораторного экспериментов предложена зависимость для коэффициента $K = -\bar{m}^{0,75} \ln(\bar{x}) + \bar{b}^{1,75} + \bar{L}^{0,75}$, включающего в безразмерном виде факторы, влияющие на развитие струйного течения в основном участке струи при соосном расположении системы струя - активированный отсос вблизи входного отверстия гранулятора.

12. Установлена зависимость коэффициента эффективности улавливания технологического отсоса (гранулятора), активированного приточной струей в виде $K_{ул} = 1 - \exp[-(\bar{a}\bar{v}_{м0})^{0,25}]$ с использованием соотношения скоростей на выходе из приточного отверстия и в плоскости всасывания активированного отсоса, а также относительного расстояния от приточного отверстия.

13. На основании результатов лабораторных и численных экспериментов, а также оценки класса чистоты помещения доказана эффективность улавливания

0,64÷0,73, что соответствует известным данным для активированных местных отсосов;

14. Разработаны рекомендации по проектированию, монтажу систем вентиляции и кондиционирования чистых помещений фармацевтических производств;

15. Выполнен расчет ожидаемого экономического эффекта от использования приточной струи при изготовлении ТЛФ, который составил 72000 руб/год.

Перспективными направлениями дальнейшего исследования воздушного режима чистых помещений фармацевтических производств являются работы по совершенствованию методик расчета активированных местных отсосов при производстве ТЛФ, МЛФ, ГЛФ, ЖЛФ, что позволит внести ряд изменений в нормативную документацию. Создание численной модели распространения взвешенных частиц, используя Лагранжеву многофазность, позволит изучить зоны распространения взвешенных частиц, зоны локализации взвешенных частиц для создания специальных всасывающих устройств, расположенных над поверхностью гранулятора.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

L_0	-	объемный расход воздуха через воздухораспределитель, м ³ /ч;
$L_{\text{я.тепл.}}$	-	расход воздуха по избыткам явной теплоты, м ³ /ч;
$L_{\text{п}}$	-	требуемый расход для обеспечения чистоты и времени восстановления;
m	-	скоростной коэффициент воздухораспределителя;
$K_{\text{с}}$	-	коэффициент стеснения;
$K_{\text{в}}$	-	коэффициент взаимодействия;
$K_{\text{н}}$	-	коэффициент неизотермичности;
x	-	расчетная длина струи, м;
F_0	-	площадь расчетного сечения воздухораспределителя, м ² ;
C	-	концентрация взвешенных частиц, частиц/м ³ ;
Ri	-	число Ричардсона;
t	-	время, с;
ρ	-	плотность, кг/м ³ ;
μ	-	коэффициент динамической вязкости, Н·с/м ² ;
ν	-	скорость воздуха, м/с;
Re	-	число Рейнольдца;
d	-	диаметр взвешенной частицы, м;
g	-	скорость засыпаемого порошка, г/с.

СПИСОК ТЕРМИНОВ

Перекрыстная контаминация – это загрязнение исходного сырья, материала или продукции другим исходным сырьём, материалом или продукцией. Это явление происходит, когда опасные вещества, микроорганизмы или частицы передаются с одного объекта или поверхности на другие, создавая потенциальную угрозу для здоровья людей, качества продукции или окружающей среды.

Фармацевтический гранулятор – это оборудование, которое превращает порошковые смеси в сыпучие гранулы, используемые в производстве твёрдых доз.

Лекарственная форма – это удобная для практического применения форма лекарственного вещества, необходимая для получения оптимального лечебного или профилактического эффекта (твёрдые, жидкие, мягкие, газообразные, или аэрозоли).

Твёрдые лекарственные формы – это лекарства твёрдой (таблетки, драже, порошки, гранулы, капсулы, брикеты) или плотной (пилюли и болюсы) консистенции, сыпучие (порошки, гранулы), округлые или продолговатые (драже, болюсы, пилюли).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкова О.А., Логачев И.Н., Логачев К.И. Методика расчета необходимого расхода воздуха при перегрузке сыпучего материала на телескопических станциях // Новые огнеупоры, № 10, 2017. – С. 60-65.
2. Акт Правительства Российской Федерации «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Развитие фармацевтической и медицинской промышленности» от 29.12.2021 № 2544 // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2021 г. – № 0001202112310036.
3. Акт Правительства Российской Федерации «Стратегия развития фармацевтической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» от 07.06.2023 № 1495–р // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2023 г. – № 1495–р.
4. Аэродинамические основы аспирации: монография / И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – СПб.: Химиздат, 2005. – 659 с.
5. Баличева М.А. Совершенствование активированного откоса от гальванических ванн: автореферат диссертации ... канд. техн. наук : 05.23.03 / М.А. Баличева;. – С.-П.: СПбГАСУ, 2004. – 23 с.
6. Баранов М.М. Бортовые отсосы от промышленных ванн. – М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1958. - 49 с.
7. Батурин В.В. Основы промышленной вентиляции. – М.: Профиздат, 1990. - 448 с.
8. Батурин В.В., Кучерук В.В. Вентиляция машиностроительных заводов. – М.: Машгиз, 1951. – 392с.
9. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений: учебное пособие / И. А. Белов, С. А. Исаев. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т. СПб, 2001. – 108с.

10. Блынская, Е. В Сравнительное изучение прессуемости таблеточных смесей ГМЛ-1, полученных технологией влажного гранулирования / Е. В. Блынская, Д. В. Юдина, К. В. Алексеев, В. К. Алексеев, С. В. Минаев // Волгоградский научно-медицинский журнал. – 2019. – №2. – С. 52 – 58.
11. Болдов, И. А. Геометрия элементарных частиц // Математическая структура и моделирование. – 2022. – №4. – С. 5 – 21.
12. Борисоглебская, А. П. Лечебно-профилактические учреждения. Общие требования к проектированию систем отопления, вентиляции / А. П. Борисоглебская. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2008. – 142 с.
13. Бройда В.А. Исследование активированных отсосов: автореферат диссертации ... канд. техн. наук : 05.23.03 / В.А. Бройда. – М.: МИСИ, 1979. – 18 с.
14. Бройда, В. А. Зависимости для расчета воздушно-струйного экрана над промышленной ванной / В. А. Бройда, Е. К. Бабич // Известия КГАСУ. – 2017. – №2. – С. 160 – 167.
15. Бромлей М.Ф. Местные отсосы для участков пересыпки горелой (оборотной) земли с ленты на ленту / ВЦСПС. Всесоюз. науч.-исслед. инт охраны труда (Москва). — М.: Машгиз, 1954. — 7 с.
16. Варсегова, Е. В. Об условиях предельного улавливания потока вредных выделений местным отсосом / Е. В. Варсегова, В. Н. Посохин. - (Санитарная техника). - Текст: непосредственный // Известия вузов. Строительство. - 2015. - № 11/12. - С. 18-22.
17. Виварелли И.Л. Бортовые отсосы от промышленных ванн [Пособие при проектировании]. — М.: Б. и., 1939. —138 с.
18. Вихревая вентиляция. Закрученные рециркуляционные, отрывные пылевоздушные течения: монография / А. Б. Гольцов, К. И. Логачев, О. В. Тирон. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2025. — 348 с.
19. Гальчинский Я.А. Исследование вентиляционных укрытий с шиберующими воздушными завесами (для малотоннажных химических производств): Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Харьк. инж.-строит. ин-т. - Харьков: 1965. - 12 с.

20. Гольцов А.Б., Логачев К.И., Аверкова О.А., Елистратова Ю.В., Семиренко А.С. Численное моделирование воздушного потока в аспирационной воронке с выравнивающим устройством // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – №7. – С. 64–75.

21. ГОСТ 12.1.005–88 Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Взамен ГОСТ 12.1.005–76; введ. 1989–01–01. – М.: Государственный стандарт Союза ССР, 1989. – 95 с.

22. ГОСТ 12.3.018–79 Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. – М.: Государственный стандарт союза ССР, 1981.

23. ГОСТ 14922–77 Аэросил. Технические условия. – М.: ИПК Издательство Стандартов, 1978.

24. ГОСТ 30494–2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Взамен ГОСТ 30494–96; введ. 2013–01–01. – М.: Стандартинформ, 2013 – 11 с.

25. ГОСТ Р 52249–2009. Правила производства и контроля качества лекарственных средств. - Взамен ГОСТ Р 52249–2004. – Введ. 20.05.2009. – М.: Стандартинформ, 2010. – 139 с.

26. ГОСТ Р 56638–2015. Чистые помещения. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Общие требования – Введен впервые; введ. 2016 – 12 – 01. – М.: АО НИЦКД, 2016 – 22 с.

27. ГОСТ Р ЕН 12238–2012. Вентиляция зданий. Воздухораспределительные устройства. Аэродинамические испытания и оценка применения для перемещающей вентиляции. - Введен впервые. – Введ. 23.11.2012. – М.: Стандартинформ, 2013. – 45 с.

28. ГОСТ Р ИСО 14644–1 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 2: Текущий контроль для подтверждения постоянного соответствия чистоты воздуха по концентрации частиц. – М.: АСИНКОМ, 2020.

29. ГОСТ Р ИСО 14644–1 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 3: Методы испытаний. – М.: АСИНКОМ, 2020.

30. ГОСТ Р ИСО 14644–1 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 4: Проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию. – М.: АСИНКОМ, 2010.

31. ГОСТ Р ИСО 14644–1 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1: Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. – М.: АСИНКОМ, 2017.

32. ГОСТ Р ИСО 14644–9 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 9: Классификация чистоты помещений по концентрации частиц. – М.: Стандартиформ, 2014.

33. Грануляция часть 1 и 2 // PPT онлайн URL: <https://ppt-online.org/76570> (дата обращения: 10.01.2025).

34. Гримитлин А.М., Дацюк Т. А., Крупкин Г. Л., Стронгин А. С., Шилькрот Е. О. Отопление и вентиляция производственных помещений. - 2007 г. — 424 с.

35. Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях. – СПб: Издательство «АВОК Северо-Запад», 2004. – 320 с.

36. Гримитлин М.И., Позин Г.М., Гримитлин А.М. О рециркуляции воздуха, удаляемого системами местной вытяжной вентиляции // Материалы IV съезда АВОК. М., 1995. – С. 159–164.

37. Гримитлин М.И., Тимофеева О.Н., Эльтерман В.М. Вентиляция и отопление цехов машиностроительных заводов. – М.: Машиностроение. 1978. – 272 с.

38. Гринев, К.М. Пневматический транспорт в цементной промышленности / К.М. Гринев, М.Н. Крашенинников, А.П. Кротков. – М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1951. – 139 с.

39. Гроссман, В. А. Технология изготовления лекарственных форм. - Москва: Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа», 2018. – 336 с.

40. Денисихина, Д. М. Методология построения математических моделей для задач вентиляции и кондиционирования воздуха / Д. М. Денисихина // VI Международная конференция «Воздух 2010». – Санкт-Петербург, 2010. – С. 54–56.

41. Джин Хевэй Численное моделирование системы вентиляции сварочных цехов больших объемов / Джин Хевэй, Н.С. Пономарев, Сон Ян Пин, Т.С. Рогожина // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – №1. – С. 84 – 95.
42. Дзюба, В. Ф. Твердые лекарственные формы: учеб. пособие / В. Ф. Дзюба. Воронеж: ВГУ, 2011. – 125 с.
43. Елинский, И. И. Вентиляция и отопление гальванических цехов машиностроительных предприятий. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1989. – 152 с.
44. Зайцев, О. Н. Увеличение скорости захвата загрязняющих веществ местным отсосом за счет использования внешней закрученной струи / О. Н. Зайцев, К. И. Логачев, А. Б. Гольцов // Экология. – 2022. – №6. – С. 40 – 45.
45. Зиборов М.М. Условия эффективной работы воздушных душей [в горячих цехах] и их расчет / Свердловский науч.-иссл. ин-т охраны труда. — Свердловск: Тип.треста «Полиграфкнига»,1938. — 12с.
46. Зиганшин А.М., Логачев К.И., Кареева Ю.Р., Габдрафиков Р.Р. Валидация и исследование плоской задачи о течении в системе «конвективный источник – соосный отсос-раструб» // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 4 (784). С. 117-127.
47. Иванова, С. В. Применение критериев доказательности диссертационных исследований в области наук об образовании: учеб. Пособие / С. В. Иванова, Н. Д. Подуфалов, В. В. Сериков, В. С. Басюк, Е. Н. Геворкян, В. А. Болотов. – М.: Российская академия образования, 2023. – 22 с.
48. **Ильин Е.А.**, Дашков А.С. Исследование эффективности действующей системы вентиляции фармацевтического производства на соответствие классу чистоты // Символ науки: международный научный журнал. – 2022. – №3–2. – С. 6–11.
49. **Ильин, Е. А.** Численное моделирование воздушного режима «чистого помещения» фармацевтического производства / **Е. А. Ильин**, В. М. Уляшева // Строительство и техногенная безопасность. Специальный выпуск. Материалы VI международной научно-практической конференции «Методология безопасности

среды жизнедеятельности 2023». – Симферополь: ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского», 2023. – С. 300 – 306.

50. **Ильин, Е. А.** Взаимодействие активированной струи и фармацевтического гранулятора // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – №12. – С. 47 – 57.

51. **Ильин, Е. А.** Воздействие активированной приточной струи на процесс изготовления твердых лекарственных форм (ТЛФ) // Инновации и инвестиции. – 2025. – №2 – С. 439 – 443.

52. **Ильин, Е. А.** Исследование скорости активированной струи у поверхности фармацевтического гранулятора // Сборник докладов Всероссийской конференции по теплогазоснабжению и вентиляции, посвященной 70-летию со дня образования БГТУ им. В. Г. Шухова [Электронный ресурс] / под ред. А.С. Семиненко – Белгород: БГТУ, 2024. С. 11 – 16.

53. **Ильин, Е. А.** Особенности проектирования систем кондиционирования и вентиляции чистых помещений в асептическом фармацевтическом производстве // Инновационные методы проектирования строительных конструкций зданий и сооружений. Курск.: ЮЗГУ, 2020. С. 123 – 129;

54. **Ильин, Е. А.** Совершенствование воздушного режима при производстве фармацевтической продукции на примере производства твердых лекарственных форм / Е. А. Ильин // Современные проблемы развития европейского севера: материалы всероссийской научно-практической конференции. Под редакцией Р. В. Агиней. – Ухта. – 2023. – С. 185 – 188.

55. **Ильина Т.Н., Крюков И.В., Колесников М.С.** Аспирационные системы в покрасочных цехах машиностроительных предприятий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 9. С. 15–20. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-15-2.

56. **Ищенко, В. И.** Промышленная технология лекарственных средств. – 2-е изд. – Витебск: УО «Витебский государственный медицинский университет», 2012. – 567 с

57. **Калинушкин, М. П.** Пневматический транспорт в строительстве / М. П. Калинушкин, З. Э. Орловский, И. С. Сегаль. – М.: Стройиздат, 1961. – 160 с.

58. Карел, Б. Производство твердых лекарственных форм / Б. Карел, П. Зденек. Курс лекций. – Москва: Company G.M.Project, 2005. – 92 с.
59. Каталог продукции «Арктос». URL: <http://www.arktos.ru/catalogue.phtml> (дата обращения 09.10.2024).
60. Каталог фармацевтического оборудования // Minipress URL: <https://minipress.ru/katalog/promyshlennoe-oborudovanie/oborudovanie-dlya-granulirovaniya-poroshkov/granulyator-dlya-suhogo-i-vlazhnogo-granulirovaniya-poroshkov-yr-90/?ysclid=m821zzekgz624279608> (дата обращения: 10.01.2025).
61. Качаев, А. Е. Математическая модель вихревого движения двухфазного потока в дезинтегральной мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – №4. – С. 79 – 90.
62. Килин, П. И. Расчет и устройство вытяжных зонтов / П. И. Килин, Т. Н. Рогова. – Екатеринбург: УрГУПС, 2005. – 82 с.
63. Клюкин Ю. Е. К вопросу о расчете бортовых отсосов от промышленных ванн — Новосибирск: тип. № 1 Полиграфиздата, 1950. — 16 с.
64. Клячко, Л.С. Пневматический транспорт сыпучих материалов / Л.С. Клячко, Э.Х. Одельский, Б.М. Хрусталева. – Минск: Наука и техника, 1983. – 216 с.
65. Колмогоров, А. Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости / А. Н. Колмогоров // Изв. АН СССР. Сер. физ. Т. 6. – 1942. – С. 299 – 303.
66. Колосницын, А. Н. Использование программы STAR-CCM+ при проектировании систем вентиляции: учеб. пособие / А. Н. Колосницын, Д. М. Денисина. СПб.: СПбГАСУ, 2016. – 100 с.
67. Колубков А.Н., Авакян Ю.С. Способы снижения потребления энергии системами климатизации общественного питания //Энергосбережение. 2019.-№7. С. 42-44.
68. Коростелев Ю. А. Исследование аэродинамики боковых местных отсосов от газовых и конвективных источников: диссертация ... кандидата технических наук: 05.23.03. - Новосибирск, 1975. - 150 с.

69. Кочарьянц К.В. Совершенствование методов расчета воздухораспределения в помещениях стесненными струями : диссертация ... кандидата технических наук : 05.23.03 / Кочарьянц Кристина Владимировна; [Место защиты: С.-Петерб. гос. архитектур.-строит. ун-т]. — Санкт-Петербург, 2018. — 168 с.
70. Краснов, Ю. С. Системы вентиляции и кондиционирования. Рекомендации по проектированию, испытаниям и наладке / Ю. С. Краснов, А. П. Борисглевский, А. В. Антипов. — М.: Термокул, 2004. — с. 373.
71. Краснюк, И. И. Фармацевтическая технология. Технология лекарственных форм / И. И. Краснюк, Г. В. Михайлова, Е. Т. Чижова. — 1-е изд. — М.: Academia, 2004. — 450 с.
72. Кузнецов, И. С. Моделирование полей концентраций вредных веществ и обоснование воздухообмена в производственных помещениях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Кузнецов Илья Сергеевич. — Воронеж, 2007. — 125 с.
73. Литвинова, Н.А. Исследование аэродинамических параметров и эффективности очистки приточных устройств с фильтрами на основе сорбентов из сыпучих и вяжущих строительных материалов / Литвинова Н.А., Азаров В.Н. // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2024. — № 8 (788). — С. 71-85.
74. Макаричев, Ю. А. Методы планирования эксперимента и обработки данных / Ю. А. Макаричев, Ю. Н. Иванников. — Самара: Самарский государственный технический университет, 2016. — 131 с.
75. Миллер, Ю. В. Методика определения минимального воздухообмена: традиционные и новые подходы // АВОК. — 2019. — №2. — С. 10 – 15.
76. Моделирование потока, насыщенного частицами с использование метода Лагранжа // Саровский инженерный центр URL: <https://saec-events.wixsite.com/saec-main> (дата обращения: 10.01.2025).
77. Моделирование ускорения дисперсной фазы с использованием метода Эйлера // Саровский инженерный центр URL: <https://saec-events.wixsite.com/saec-main> (дата обращения: 10.01.2025).
78. Молчанов Б.С. Проектирование промышленной вентиляции. — Л.: Изд-во литер.по стр-ву. 1970. — 240 с.

79. Надоленко, В. Устройство фальшполов и антивибрационных фундаментов в чистых помещениях / В. Надоленко // Научно-технический журнал «Нано-индустрия». – 2011. – №3, – С. 12 – 15.
80. Национальные проекты «Здравоохранение» и «Демография» // Министерство здравоохранения РФ URL: <https://minzdrav.gov.ru/poleznye-resursy/natsproektzdravooohranenie> (дата обращения: 21.01.2024).
81. Никишин, И. А. Опыт проектирования: чистые помещения для производства жидких лекарственных форм / И. А. Никишин, М. Т. Галиаскаров // АВОК. – 2023. – №1. – С. 68.
82. Новосельцев Б. П., Лобанов Д. В., Звенигородский И. И., Сафонов С. А. Совершенствование конструкции местного отсоса в системах вытяжной вентиляции гальванического цеха// Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2022. № 4 (23). – С. 52–60.
83. Отопление и вентиляция. Учебник для вузов. В 2-х ч. Ч. 2. Вентиляция. Под ред. В. Н. Богословского // В. Н. Богословский, В. И. Новожилов, Б. Д. Симанков, В. П. Титов. – М., Стройиздат, 1976. – 439с.
84. Оценка вирусной безопасности биотехнологических препаратов, получаемых из клеточных линий человеческого или животного происхождения Q5A(R1) // PharmAdvisor URL: <https://pharmadvisor.ru/document/tr3580/> (дата обращения: 10.01.2025).
85. Павлинова И.Б. Вентиляционные воздушно-струйные укрытия (соосная система «струя-отсос»): Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук. (482) / Объедин. учен. совет при ЦНИИЭП жилища. – М.: [б. и.], 1968. – 11 с.
86. Патент № 1112193. МПК F 24 F 3/00. Пылезащитная камера для рабочего стола / Л. Н. Гринберг, Р. Б. Знаменский, С. И. Крефцун, Г. Я. Крупкин, Л. В. Павлухин, Г. М. Позин, В. А. Трофимов. Заявитель и патентообладатель: Ленинградский научно-исследовательский институт гигиены труда и профзаболеваний и Всесоюзный научно-исследовательский институт охраны труда ВЦСПС. № 2045223. Заявл.18.01.83; опубл. 07.09.84.

87. Патент № 1459711. МПК E21F5/00. Аспирационное укрытие / А. П. Колесник, И. Н. Логачев, Г. Н. Никелина. Заявитель и патентообладатель: Научно-исследовательский институт по вентиляции и очистке воздуха на горнорудных предприятиях. № 1459711/22-3. Заявл.13.07.1970; опубл.13.09.1972.

88. Патент на изобретение 2477185 «Способ локализации конвективных потоков и вредных выделений от тепловыделяющего оборудования и безвихревой воздухораспределитель», Гримитлин А.М., Знаменский Р.Б., Крупкин Г.Я., Лукина М.А.// Бюл. 7. 2013.

89. Патент на изобретение 24793388 «Фильтр рукавно-картриджный для очистки воздуха от механических примесей», Воскресенский В.Е., Гримитлин А.М., Захаров А.Д. Оpubл.2013.04.20.

90. Патент на полезную модель 207611. МПК F 24 F 7/08. Коаксиальное воздухораспределительное устройство с торцевой раздачей потока для вентиляционных / О. Н. Зайцев, Ю. А. Сиванченко. Заявитель и патентообладатель: Сиванченко Юрий Анатольевич. № 2021105119. Заявл.25.02.21; опубл. 03.11.21.

91. Патент на полезную модель 217464. МПК E21F 5/00. Узел перегрузки с рециркуляцией аспирируемого воздуха / В. М. Киреев, А. Б. Гольцов, Ю. Г. Овсянников, А. С. Семиненко, К. И. Логачев, О. А. Аверкова, В. Е. Киреев, И. Д. Гольцов. Заявитель и патентообладатель: федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». №2022130751. Заявл.25.11.22; опубл. 03.04.23.

92. Позин Г.М. Местная вытяжная вентиляция — самый эффективный способ организации воздухообмена в помещении // СОК №10 2006 URL:| <https://www.c-o-k.ru/articles/mestnaya-vytyazhnaya-ventilyaciya-samyu-effektivnyy-sposob-organizacii-vozdushoobmena-v-pomeschenii>.

93. Полосин И. И., Кузнецов С. Н., Портянников А. В. Исследование эффективности местных отсосов новых конструкций от промышленных гальванических ванн // Труды конференции МГСУ. М.: 2007. – С. 153 – 157.

94. Полушкин В.И., Анисимов С.М., Васильев В.Ф., Дерюгин В.В. Вентиляция. – М.: Изд. центр «Академия», 2008. – 416 с.
95. Посохин В.Н. Расчет местных отсосов от тепло-и газовыделяющего оборудования. – М.: Машиностроение, 1984. – 160 с.
96. Посохин, В. Н. О численном определении характеристик приточного насадка / В. Н. Посохин, А. М. Зиганшин, Е. В. Варсегова // Известия КГАСУ. – 2017. – №1. – С. 173 – 179.
97. Приказ Минпромторга России «Об утверждении Правил надлежащей производственной практики» от 25.06.2021 № 14.06.2013 // Минпромторг. – 2013 г. – № 916. – с изм. и допол. в ред. от 18.12.2015.
98. Производство твердых лекарственных форм // Надлежащая производственная практика URL: <https://gmpua.com/Process/Tablet/Production/Production%20SDF.pdf> (дата обращения: 10.01.2025).
99. Р НП «АВОК» 7.3–2007 Вентиляция горячих цехов предприятий общественного питания. – Введен впервые. – Введ. 06.06.2007. – М.: База нормативной документации, 2007. – 40 с.
100. Расчет местной активированной вентиляции // Лекциопедия URL: <https://lektsiopedia.org/lek-68678.html> (дата обращения: 10.01.2025).
101. Рекомендации по выбору и расчету систем воздухораспределения. Сер. АЗ–669. М.: ГПИ Сантехпроект, 1979.–68 с.
102. Рециркуляционный многофункциональный агрегат для производственных помещений / Воскресенский В.Е., Гримитлин А.М., Захаров А.Д. //Инженерные системы. – 2016. - №1. – С.16-25.
103. Рымкевич А.А. Системный анализ общеобменной вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1990. – 300с.
104. СанПин 1.2.3685–21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – Взамен СанПин 2.2.4.548–96; введ. 2021 – 03 – 01. – М.: Постановление Главного государственного санитарного врача РФ, 2021. – 990 с.

105. СанПиН 2.1.13.1375–03 Гигиенические требования к размещению, устройству, оборудованию и эксплуатации больниц, родильных домов и других лечебных стационаров. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2003. – 31 с.

106. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2017617789 Российская Федерация. Программа «ClearView» для моделирования движения частиц пыли, осаждаемых в чистом помещении: № 2017614172: регистрация 04.05.2017: опубл. 12.07.2017 / Рощин В. М., Рябышенко А. С., Гущарин Д. А., Головлев А. А., Севрюкова Е. А. – 1 л.

107. Семиненко, А. С. Поведение частиц порошкообразного материала при пневмотранспортной загрузке / А. С. Семиненко, В. М. Уляшева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – №12. – С. 63 – 66.

108. Сиваченко, Ю. А. Влияние геометрических характеристик коаксиального отсоса на характеристики удаляемого потока / Ю. А. Сиваченко, А. Н. Кабанов, О. Н. Зайцев // Строительство и техногенная безопасность. Специальный выпуск. Материалы V международной научно-практической конференции «Методология безопасности среды жизнедеятельности 2022». – Симферополь: ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», 2022. – С. 234 – 238.

109. Смирнов, Е. М. Конспект лекций дисциплины «Течения вязкой жидкости и модели турбулентности: методы расчета турбулентных течений» / Е.М.Смирнов, А. В. Шарбарух. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010. – 127 с.

110. Сотников А.Г., Боровицкий А.А. Теоретически-экспериментальное обоснование метода оптимизации воздухообменов в системах промышленной вентиляции. Magazine of Civil Engineering, №2, 2012. – С.32-38.

111. Сотников, А.Г. Систематизация и обобщение характеристик местных вытяжных устройств - основа инженерной методики проектирования эффективных систем промышленной вентиляции / А. Г. Сотников, А. А. Боровицкий // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №6. – С. 54 – 59.

112. СП 131.13330.2020 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23–01–99*. – Введ. 25.06.2021. – М.: Минстрой России, 2021. – 113 с.
113. СП 50.13330.2024 Тепловая защита зданий. – Взамен СНиП 23–02–2003; введ. 2013 – 07 – 01. – М.: Минрегион России, 2012. – 95 с.
114. СП 60.13330.2020 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Взамен СП 60.13330.2012; введ. 2016 – 12 – 16. - М.: Стандартинформ, 2016. – 26 с.
115. Спиваковский, А. О. Конвейерные установки. Часть IV ОНТИ НКТП / А.О. Спиваковский. – Киев: Государственное научно-техническое издательство Украины, 1935. 508 с.
116. Столер В. Д. Эффективные устройства местной вентиляции на промышленных объектах [Электронный ресурс] / Столер В Д., Савельев Ю. Л., Иванов Ю. А., Шегал В. Л. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 252 с.
117. Страхович, А. И. Основы теории и расчета пневматических транс-портных установок. / А. И. Страхович. – Л.: ОНТИ НКТП, Главная редакция литературы по машиностроению и металлообработке, 1934.
118. Стронгин, А. С. Теоретическое обоснование применения активированных вытяжных зонтов при обеспыливании технологического транспорта складских помещений / Стронгин А. С. // Строительство и реконструкция. – 2021. – №5. – С. 106 – 114. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-106-114.
119. Сухая и влажная грануляция. Применяемое оборудование // Фармацевтические технологии и упаковка. – 2013. – №5. – С. 48 – 50.
120. Сыромясов, А. О. К вопросу о моделировании термодинамического взаимодействия частиц, взвешенных в двумерной среде / А. О. Сыромясов, Ю. В. Понкратова, Т. В. Меньшакова // Средневолжское математическое общество. – 2021. – №4. – С. 444 – 460.
121. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции. – М.: Стройиздат, –1979. – 296 с.

122. Теория турбулентных струй /Абрамович Г.Н., Гиршович Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнов И.П. Изд. 2-е перераб. и доп./ Под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.:Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 716 с.

123. Тьюториалы по многофазным течениям // Саровский инженерный центр URL: <https://saec-events.wixsite.com/saec-main> (дата обращения: 10.01.2025).

124. Уайт, У. Проектирование чистых помещений / У. Уайт – М.: Клинрум, 2004. – 343 с.

125. Уайт, У. Технология чистых помещений. Основы проектирования, испытаний и эксплуатации / У. Уайт. – М.: Клинрум, 2002. – 304 с.

126. Указ Президента Российской Федерации «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года» от 21.06.2020 № 474 // Официальный интернет-портал правовой информации. – 2020.

127. Федоровский, П. Е. Основные принципы вентиляции чугунолитейных заводов с рассеянным режимом литья / Федоровский П. Е.— М.: ВЦИК, 1933. — 4 с.

128. Федотов, А. Е. Основы GMP / А. Е. Федотов. – М.: АСИНКОМ, 2012.— 576 с.

129. Федотов, А. Е. Чистые помещения. Второе издание, переработанное и дополненное / А. Е. Федотов. – М.: АСИНКОМ, 2003. – 576 с.

130. Фиалковская Т.А. Вентиляция при окраске изделий. М. «Машиностроение», 1978- 180с.

131. Фрик, П. Г. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. / П. Г.Фрик. – Пермь, Перм. гос. техн. ун-т., 1998. – 108 с.

132. Черняков, Е. В. Влияние скорости приточного воздуха на перенос и удаление аэрозольных загрязнений из рабочей зоны / Черняков Е. В. // Технология чистоты. – 2013. – №4. – С. 23-27.

133. Черняков, Е.В. Повышение энергоэффективности систем подготовки и распределения воздуха чистых помещений: дис.канд.т.наук:05.23.03:защищена

22.12.2014:утв.22.12.2014/ Черняков Евгений Вадимович. - Ставрополь, 2014. - 146 с. - Библиогр.: с.14-35.

134. Шепелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. – 144с.

135. Шихт, Г. Г. Технология чистых помещений: взгляд в будущее / Ганс Г. Шихт // Технология чистоты. – 2006. – №4. – С. 6-12.

136. Штокман Е.А. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности. М. АСВ, 2001. – 564с.

137. Эйлерова Многофазность: Течение в Трубе с Использованием Модели AMUSIG с Несколькими Скоростями // Саровский инженерный центр URL:https://www.saec.ru/wpcontent/uploads/2018/06/6f2d8b2_3639e16d5df44b7b9654427fbdf719d7.pdf (дата обращения: 10.01.2025).

138. Эльтерман В.М. Вентиляция химических производств. – М.: Стройиздат, 1967. – 175с.

139. A Comparison of Granulation Technologies // GEA URL: <https://www.gea.com/en/customer-cases/comparing-granulation-techniques.jsp> (дата обращения: 21.01.2024).

140. Baseline pharmaceutical engineering guide (Volume 3 – Sterile Product Manufacturing Facilities)) / I. S. of. — [Tampa]: International Society for Pharmaceutical Engineering, 2011. – p.226.

141. Baseline pharmaceutical engineering guide (Volume 5 - Commissioning and Qualification)) / I. S. of. — [Tampa]: International Society for Pharmaceutical Engineering, 2019. – p.192.

142. Dept., G. B. Guide to good pharmaceutical manufacturing practice / G. B. Dept. — London : H.M. Stationery Off., 1971.

143. Fitzpatrick, M. Cleanroom Airflows Part II: The Messy Details. Cleanrooms / M. Fitzpatrick, K. Goldstein. URL: <http://cr.pennet.com/>.

144. Goodfellow H., Tahti E. Industrial ventilation. Design Guidebook. – London. Academic Press. 2001. – 1520 p.

145. **Ilin, E. A.** Clean-Room Class D Air Distributor Performance Evaluation: Case Study of RTC Polisan / E. A. Ilin, A. M. Grititlin // Proceedings of ECSF 2021 Engineering, Construction, and Infrastructure Solutions for Innovative Medicine Facilities. – 2021. – P. 111–122. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-99877-6_13.
146. ISPE Good Practice Guide: Heating, Ventilation, and Air Conditioning (Second Edition) // ISPE Connecting Pharmaceutical Knowledge URL: <https://guidance-docs.ispe.org/doi/book/10.1002/9781946964793> (дата обращения: 10.01.2025).
147. Launder, B. E. 1974. The Numerical Computation of Turbulent Flows. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3: p. 269-289.
148. Logachev K.I., Popov E.N., Kozlov T.A., Ziganshin A.M., Gao R., Averkova O.A., Tiron O.V. Numerical and experimental studies of airflows at exhaust hoods with inlet extensions // Building and Environment. 2024. T. 261. C. 111753. №7, 2013, 12 с.
149. P. Pandey, R. Bharadwaj, X. Chen Modeling of drug product manufacturing processes in the pharmaceutical industry // Predictive Modeling of Pharmaceutical Unit Operations. - 2017. - p. 1-13.
150. Pozin G., Ulyasheva V. 2013. Convergence of Numerical Modeling of Heat-Air-Exchange Processes in a Ventilated Room. World Applied Sciences Journal № 23: C. 117–121;
151. Saidi, M.H. The effect of source motion on contaminant distribution in the cleanroom / M.H. Saidi, B. Sajadi, G.R. Molaeimanesh // Energy and Buildings 43. – 2011. – P. 966-970.
152. Ström L. Transmission in efficiency of aerosol sampling // Sines. – Atmos. Environ. – 1972. Vol. 6, №2. – P.133–142.
153. Torotwa, I. A Study of the Mixing Performance of Different Impeller Designs in Stirred Vessels Using Computational Fluid Dynamics [Electronic resource] / I. Torotwa, C. Ji // Designs. – 2018. – Vol. 2, № 1. – P. 10. – Available from: <https://doi.org/10.3390/designs2010010>. URL:<http://alfar.ru>smart/4/1008/> (Дата обращения: 17.02.2025г.).

154. Wei-xue, Cao The inverse optimization of exhaust hood by using intelligent algorithms and CFD simulation [Electronic resource] / Cao Wei-xue, You Xue-yi // Powder Technology. – 2017. – Vol. 3, № 15. – P. 282–289.

155. Yuwei, Dai Periodic approaching flows and pollutant dispersion of a single-sided generic building with natural ventilation / Dai Yuwei, Luo Shuang, Zhu Haotian, Li Zhicheng, Feng Lingyao, Wang Zhuo // Physics of Fluids. – 2024. – №1. – C. 1–16.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет воздухообмена в экспериментальном модуле чистого помещения

Расчёт воздухообмена произведен по двум методикам [26, 114]. Определяется верхний предел воздухообмена по тепло-влагоизбыткам и нижний предел расхода воздуха (кратности воздухообмена) для соблюдения чистоты и времени восстановления воздушного потока в пространстве. В таблице А.1 представлены расчётные параметры внутреннего воздуха.

Таблица А.1 – Расчётные параметры внутреннего воздуха

Номер помещения	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Относительная влажность%	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный период года				
Экспериментальное помещение	Іб (140-174)	21,0-23,0	10-55	0,1-0,2
	При ламинарном поле однонаправленного потока			0,07-0,2
Теплый период года				
Экспериментальное помещение	Іб (140-174)	22,0-24,0	10-55	0,1-0,3
	При ламинарном поле однонаправленного потока			0,07-0,2

Расход приточного воздуха для расчетного помещения определяется для холодного и теплого периода года.

В холодный период года температура приточного воздуха [26, 114]:

$$t_{\pi} = 21 - 4 = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

В тёплый период года температура приточного воздуха [26, 114]:

$$t_{\pi} = 24 - 5,2 = 18,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Температура удаляемого воздуха рассчитывается по формуле, °С:

$$t_y = t_b + \text{grad}t(H_{\text{пом}} - h_{\text{оз}}) \quad (\text{А.1})$$

где $H_{\text{пом}}$, $h_{\text{оз}}$ – высота помещения «в свету» и обслуживаемой зоны ($h_{\text{оз}} = 1,5$ – люди преимущественно сидят), м;

$\text{grad}t = f(q_{\text{изб}}^{\text{я}})$ – градиент температур принимают для помещений в зависимости от удельных явных избытков теплоты по таблице А.2.

Таблица А.2 – Градиент температур

Удельные явные избытки теплоты, Вт/м ³	Градиент температур, °С/м
Более 23	0,8 ÷ 1,5
12÷23	0,3 ÷ 1,2
Менее 12	0,1 ÷ 0,5

Температура удаляемого воздуха в холодный период года:

$$t_y = 21 + 1,5 \cdot (3 - 1) = 24,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Температура удаляемого воздуха в теплый период года:

$$t_y = 24 + 1,5 \cdot (3 - 1) = 27,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Требуемый расход вытяжки из верхней зоны помещения по избыткам явной теплоты $L_{\text{я.тепл.}}$, м³/ч, определяют по формуле:

$$L_{\text{я.тепл.}} = \frac{3,6 \cdot Q_{\text{я.тепл.}}}{c_v \cdot (t_y - t_{\text{пр}})}, \quad (\text{А.2})$$

где $Q_{\text{я.тепл.}}$ – избыточные явные тепловые потоки в помещении с учетом оборудования и оператора, Вт;

t_y – температура удаляемого воздуха вне обслуживаемой (рабочей) зоне n -го помещения, °С;

$t_{\text{пр}}$ – температура приточного воздуха, °С;

c_v – удельная массовая теплоемкость воздуха, равная 1,2 кДж/(м³·°С);

Δt_p – рабочая разность температур воздуха $\Delta t_p = t_v - t_n$. Для производственных помещений: для категории работ Ib температура не должна превышать $\Delta t_p < 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Требуемый расход воздуха по избыткам явной теплоты $L_{\text{я.тепл.}}$, м³/ч, в холодный период года:

$$L_{\text{я.тепл.}} = \frac{3,6 \cdot 750}{1,2 \cdot (24,0 - 17,0)} = 300$$

Требуемый расход воздуха по избыткам явной теплоты $L_{\text{я.тепл.}}$, м³/ч, в теплый период года:

$$L_{\text{я.тепл.}} = \frac{3,6 \cdot (750 - 50)}{1,2 \cdot (27,0 - 18,8)} = 256$$

Определён верхний предел требуемого воздухообмена 300 м³/ч.

Для определения расхода воздуха (кратности воздухообмена) для соблюдения чистоты и времени восстановления воздушного потока в пространстве используется упрощенная формула [26]:

$$L_{\text{п}} = \frac{E \cdot 60}{C}, \quad (\text{А.3})$$

где C – средняя концентрация частиц в воздухе в 1 м³ (для класса чистоты d нижний предел составляет $C = 1410000$ частиц на 1 м³);

E – суммарная эмиссия частиц в чистом помещении (для класса чистоты d, $3,52 \times 10^6$ частиц с размерами $\geq 0,5$ мкм в мин);

60 – число минут в часе;

$L_{\text{п}}$ – расход приточного воздуха, м³/ч.

Значение рассчитаем по формуле А.3:

$$L_{\text{п}} = \frac{3,52 \cdot 10^6 \cdot 60}{1410000} = 150 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Полученные значения расхода воздуха модуля чистого помещения находится в диапазоне:

$$150 < L_{\text{п}} < 300, \text{ м}^3/\text{ч}$$

Подача воздуха будет осуществляться через один воздухораспределитель, установленный сверху.

Для обеспечения ламинарного однонаправленного потока будут использованы воздухоподающие блоки с фильтрами высокой эффективности ВБС-М (класс очистки HEPA 13).



Рисунок А.1 – Схема подачи ламинарных однонаправленных воздушных потоков

По каталогу «Арктос» производится подбор воздухораспределителя ВВС-М с сотовой панелью.

С торцевым подводом

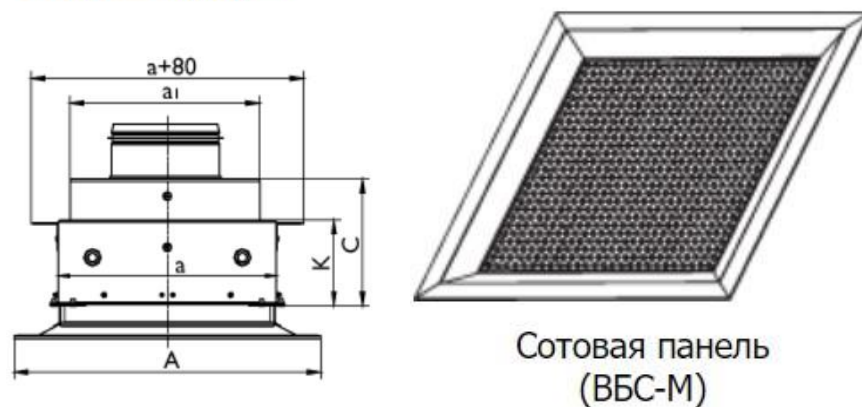


Рисунок А.2 – Воздухораздающий блок ВВС-М

Параметры ВВС-М представлены в таблице А.3.

Таблица А.3 – Параметры ВВС-М

Размер, А х В, мм	$F_o, м^2$	Номинальный расход воздуха $L_o, м^3/ч$	Тип воздухораздающего блока		
			ВВС-М		
			$\Delta P_{п}, Па$	Дальнобойность, м при V_x	
				, м/с	
				0,2	0,5
С фильтром Н13 толщиной 150 мм					
595x595	0,192	340	135	5,5	2,3

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Детализировка лабораторной установки



Рисунок Б.1 – Вентиляционная установка



Рисунок Б.2 – Приточная установка



Рисунок Б.3 – Камера статического давления

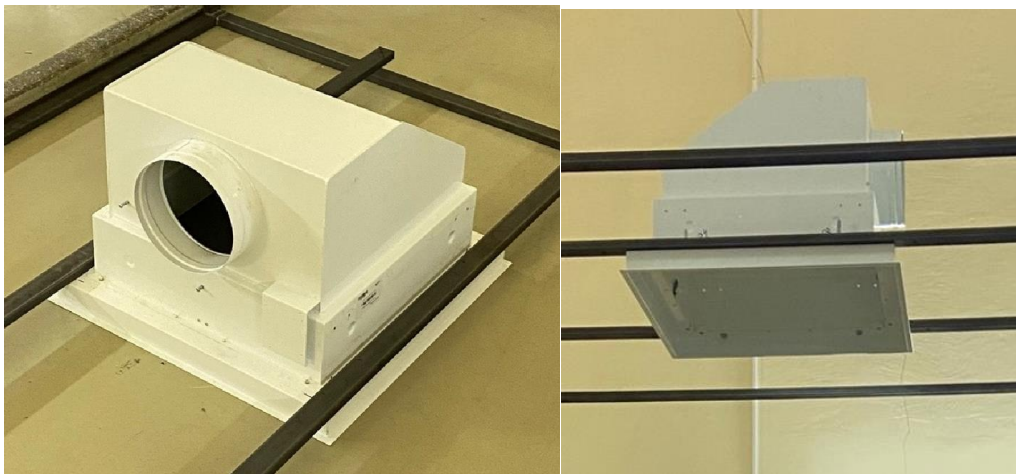
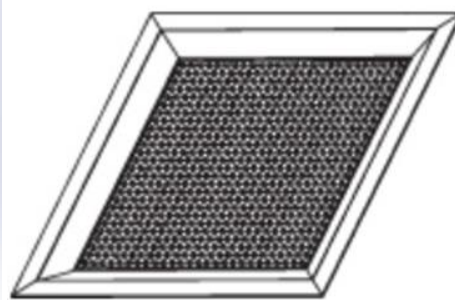
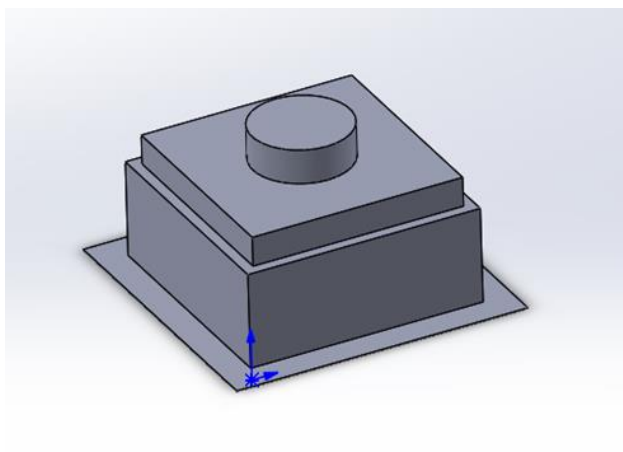


Рисунок Б.4 – Воздухораздающий блок



Сотовая панель
(ВБС-М)

Рисунок Б.5 – Воздухораздающий блок с воздухораспределителем ВБС-М



Рисунок Б.6 – Вентиляционная воронка, имитирующая поверхность гранулятора

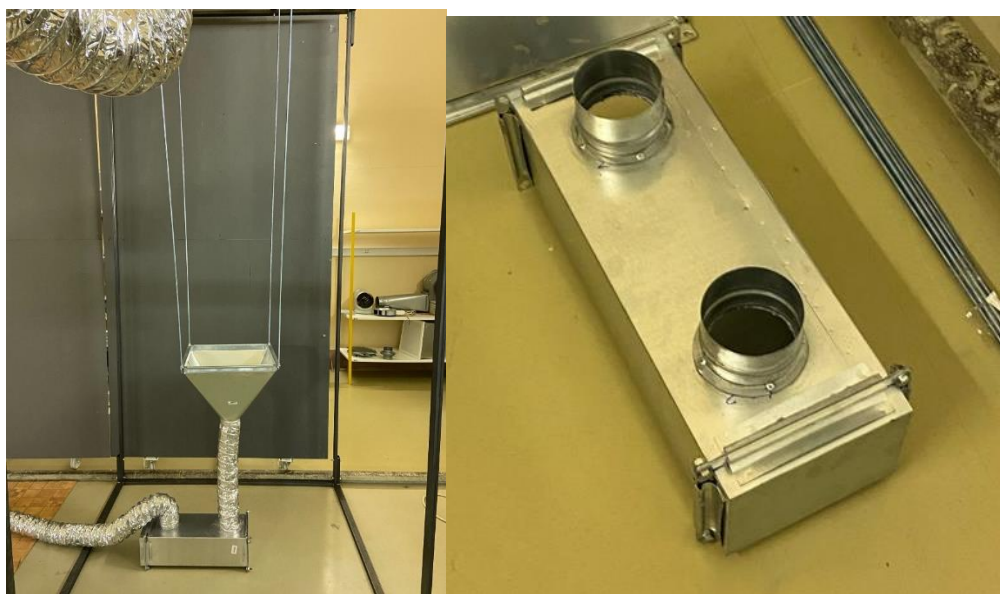


Рисунок Б.7 – Вентиляционный короб для сбора порошка



Рисунок Б.8 – Канальный вентилятор

Подробные характеристики оборудования приведены в таблице Б.1.

Таблица Б.1 – Характеристики оборудования экспериментальной установки

Наименование оборудования	Наименование характеристик	Значения
Приточная установка	производительность, м ³ /ч	3500
	температура приточного воздуха, °С	20
Канальный вентилятор Ostberg SK125 C	максимальное рабочее давление, Па	335
	максимальное количество перемещаемого воздуха, м ³ /ч	430
	рабочее напряжение вентилятора, В	230
	мощность, кВт	0,072
	число оборотов рабочего колеса, об/мин	2480
Воздухораздающий блок 1 ВБД 595х595 М	-	-
Воздухораспределитель БВС-М	Сечение, мм	525х525
НЕРА-фильтр (ФВА-II-457-457-78- E11/K4/OC0/Y2)	Класс очистки	H14
Комплектующие элементы лабораторной установки		
Воздуховод е/ш20 (200 * 150 l = 500)	количество, шт.	1
Гибкий воздуховод неизолированный 100	количество, шт.	1
Переход А*В/D Тип4 е/ш20 / фл (420 * 420 / 100 l = 400)	количество, шт.	1
Фланец круглый (черн.) на изделии (100)	количество, шт.	1
Заглушка прямоугольная е/ш20 (200 * 150)	количество, шт.	1
Врезка круглая (100 l = 100)	количество, шт.	2
Шпилька М8 L=2000мм	количество, шт.	10

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Значения скоростей, измеренных датчиками «Sensor»**

Таблица Г.1 – Расположения датчиков измерения скорости «Sensor»

Положение 1



Положение 2



Положение 3



Положение 4



Продолжение таблицы Г.1 – Расположения датчиков измерения скорости «Sensor»

Положение 5



Положение 6



Положение 7



Таблица Г.2 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 1

При расходе 300 м ³ /ч		Положение № 1			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик 7	Датчик 6	Датчик 5	Датчик 4	Датчик 3	Датчик 2	Датчик 1
1	10:47:16	0,48	0,444	0,429	0,363	0,312	0,198	0,154
2	10:47:18	0,481	0,444	0,429	0,365	0,314	0,2	0,156
3	10:47:20	0,481	0,445	0,43	0,365	0,314	0,202	0,159
4	10:47:22	0,481	0,445	0,43	0,366	0,315	0,203	0,16
5	10:47:24	0,482	0,446	0,431	0,366	0,316	0,203	0,161
6	10:47:26	0,482	0,446	0,431	0,366	0,317	0,205	0,162
7	10:47:28	0,482	0,447	0,432	0,367	0,317	0,204	0,161
8	10:47:30	0,482	0,446	0,432	0,367	0,316	0,203	0,16
9	10:47:32	0,483	0,447	0,432	0,367	0,316	0,203	0,159
10	10:47:34	0,483	0,447	0,432	0,367	0,316	0,202	0,159
11	10:47:36	0,484	0,448	0,433	0,369	0,317	0,203	0,161
12	10:47:38	0,484	0,449	0,435	0,37	0,32	0,206	0,16
13	10:47:40	0,484	0,45	0,434	0,37	0,32	0,207	0,158
14	10:47:42	0,484	0,45	0,435	0,37	0,32	0,207	0,158
15	10:47:44	0,484	0,451	0,435	0,369	0,32	0,207	0,16
16	10:47:46	0,484	0,45	0,433	0,368	0,318	0,207	0,161
17	10:47:48	0,484	0,45	0,432	0,366	0,315	0,207	0,163
18	10:47:50	0,485	0,45	0,432	0,365	0,314	0,207	0,164
19	10:47:52	0,484	0,449	0,431	0,365	0,313	0,207	0,165
20	10:47:54	0,484	0,449	0,431	0,366	0,314	0,208	0,168
21	10:47:56	0,483	0,447	0,429	0,364	0,314	0,21	0,17

Продолжение таблицы Г.2 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 1

При расходе 300 м³/ч		Положение № 1			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик 7	Датчик 6	Датчик 5	Датчик 4	Датчик 3	Датчик 2	Датчик 1
22	10:47:58	0,483	0,447	0,43	0,364	0,313	0,209	0,17
23	10:48:00	0,483	0,447	0,429	0,364	0,314	0,211	0,172
24	10:48:02	0,484	0,447	0,43	0,364	0,315	0,212	0,172
25	10:48:04	0,484	0,447	0,43	0,364	0,315	0,214	0,171
26	10:48:06	0,483	0,447	0,43	0,365	0,317	0,216	0,173
27	10:48:08	0,484	0,447	0,43	0,365	0,319	0,218	0,171
28	10:48:10	0,485	0,448	0,43	0,365	0,32	0,218	0,168
29	10:48:12	0,485	0,449	0,431	0,367	0,321	0,218	0,167
30	10:48:14	0,486	0,448	0,431	0,366	0,321	0,216	0,169
Σ _{сред. ариф.}		0,483	0,448	0,431	0,366	0,316	0,208	0,164

Таблица Г.3 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 1

При расходе 150 м ³ /ч		Положение № 1			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик 7	Датчик 6	Датчик 5	Датчик 4	Датчик 3	Датчик 2	Датчик 1
1	11:05:06	0,15	0,1	0,072	0,041	0,04	0,03	0,026
2	11:05:08	0,151	0,101	0,073	0,042	0,04	0,031	0,026
3	11:05:10	0,151	0,103	0,074	0,043	0,041	0,031	0,026
4	11:05:12	0,152	0,104	0,075	0,044	0,042	0,032	0,027
5	11:05:14	0,152	0,105	0,076	0,045	0,043	0,032	0,027
6	11:05:16	0,153	0,107	0,078	0,046	0,043	0,032	0,028
7	11:05:18	0,153	0,107	0,08	0,047	0,044	0,033	0,029
8	11:05:20	0,154	0,108	0,08	0,048	0,045	0,033	0,029
9	11:05:22	0,154	0,108	0,08	0,049	0,046	0,034	0,029
10	11:05:24	0,155	0,108	0,081	0,049	0,046	0,034	0,03
11	11:05:26	0,155	0,109	0,082	0,05	0,047	0,034	0,03
12	11:05:28	0,157	0,109	0,083	0,051	0,047	0,034	0,03
13	11:05:30	0,158	0,111	0,084	0,051	0,048	0,034	0,03
14	11:05:32	0,159	0,112	0,085	0,051	0,048	0,033	0,031
15	11:05:34	0,16	0,113	0,086	0,052	0,049	0,033	0,031
16	11:05:36	0,161	0,115	0,088	0,052	0,049	0,033	0,031
17	11:05:38	0,162	0,116	0,088	0,052	0,049	0,033	0,031
18	11:05:40	0,163	0,118	0,089	0,052	0,049	0,034	0,031
19	11:05:42	0,164	0,119	0,09	0,053	0,048	0,034	0,032
20	11:05:44	0,165	0,12	0,091	0,054	0,048	0,034	0,033
21	11:05:46	0,167	0,121	0,092	0,055	0,049	0,035	0,033

Продолжение таблицы Г.3 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 1

При расходе 150 м³/ч		Положение № 1			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик 7	Датчик 6	Датчик 5	Датчик 4	Датчик 3	Датчик 2	Датчик 1
22	11:05:48	0,169	0,122	0,093	0,055	0,049	0,035	0,034
23	11:05:50	0,171	0,124	0,094	0,056	0,048	0,035	0,034
24	11:05:52	0,173	0,126	0,096	0,057	0,048	0,035	0,035
25	11:05:54	0,174	0,127	0,097	0,058	0,048	0,036	0,035
26	11:05:56	0,175	0,129	0,098	0,059	0,048	0,036	0,035
27	11:05:58	0,176	0,131	0,1	0,06	0,048	0,036	0,036
28	11:06:00	0,177	0,132	0,101	0,06	0,047	0,036	0,036
29	11:06:02	0,178	0,133	0,101	0,061	0,048	0,036	0,037
30	11:06:04	0,178	0,134	0,102	0,062	0,048	0,036	0,037
31	11:06:06	0,179	0,135	0,103	0,062	0,049	0,037	0,038
32	11:06:08	0,18	0,135	0,104	0,063	0,048	0,037	0,038
33	11:06:10	0,18	0,136	0,105	0,063	0,049	0,037	0,039
34	11:06:12	0,181	0,137	0,106	0,064	0,049	0,037	0,04
35	11:06:14	0,182	0,137	0,108	0,065	0,049	0,037	0,04
36	11:06:16	0,183	0,138	0,109	0,066	0,049	0,037	0,041
37	11:06:18	0,183	0,139	0,11	0,067	0,049	0,036	0,041
38	11:06:20	0,184	0,141	0,112	0,067	0,048	0,036	0,041
39	11:06:22	0,185	0,142	0,113	0,068	0,048	0,036	0,042
40	11:06:24	0,186	0,143	0,114	0,069	0,049	0,036	0,043
41	11:06:26	0,186	0,145	0,116	0,07	0,049	0,036	0,043
42	11:06:28	0,187	0,146	0,117	0,071	0,049	0,035	0,043
43	11:06:30	0,188	0,146	0,117	0,072	0,049	0,035	0,043

Продолжение таблицы Г.3 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 1

При расходе 150 м³/ч		Положение № 1			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик 7	Датчик 6	Датчик 5	Датчик 4	Датчик 3	Датчик 2	Датчик 1
44	11:06:32	0,188	0,147	0,118	0,073	0,049	0,035	0,044
45	11:06:34	0,188	0,148	0,119	0,073	0,05	0,035	0,045
46	11:06:36	0,188	0,148	0,12	0,074	0,051	0,035	0,046
47	11:06:38	0,189	0,148	0,119	0,074	0,051	0,035	0,046
48	11:06:40	0,189	0,148	0,119	0,074	0,051	0,035	0,047
49	11:06:42	0,189	0,148	0,119	0,074	0,05	0,035	0,047
50	11:06:44	0,189	0,148	0,12	0,074	0,05	0,035	0,046
51	11:06:46	0,19	0,149	0,12	0,074	0,049	0,035	0,047
52	11:06:48	0,19	0,149	0,121	0,075	0,05	0,035	0,047
53	11:06:50	0,19	0,15	0,123	0,076	0,05	0,035	0,046
54	11:06:52	0,19	0,15	0,123	0,077	0,051	0,034	0,046
55	11:06:54	0,19	0,15	0,123	0,078	0,052	0,034	0,046
56	11:06:56	0,19	0,15	0,124	0,079	0,053	0,034	0,046
57	11:06:58	0,19	0,151	0,124	0,079	0,053	0,034	0,047
58	11:07:00	0,19	0,151	0,125	0,079	0,054	0,034	0,047
59	11:07:02	0,19	0,151	0,125	0,08	0,054	0,035	0,047
60	11:07:04	0,189	0,151	0,125	0,081	0,055	0,036	0,047
61	11:07:06	0,19	0,151	0,125	0,081	0,055	0,036	0,047
62	11:07:08	0,19	0,151	0,125	0,08	0,055	0,036	0,046
63	11:07:10	0,19	0,151	0,125	0,08	0,055	0,035	0,046
64	11:07:12	0,189	0,151	0,125	0,08	0,055	0,035	0,047
65	11:07:14	0,189	0,151	0,126	0,081	0,055	0,035	0,047

Продолжение таблицы Г.3 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 1

При расходе 150 м ³ /ч		Положение № 1			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик 7	Датчик 6	Датчик 5	Датчик 4	Датчик 3	Датчик 2	Датчик 1
66	11:07:16	0,189	0,151	0,126	0,081	0,055	0,036	0,047
67	11:07:18	0,19	0,151	0,126	0,082	0,056	0,037	0,047
68	11:07:20	0,19	0,152	0,127	0,082	0,056	0,037	0,047
69	11:07:22	0,19	0,152	0,127	0,082	0,057	0,037	0,047
70	11:07:24	0,19	0,152	0,127	0,083	0,056	0,036	0,047
71	11:07:26	0,19	0,152	0,127	0,083	0,056	0,036	0,046
72	11:07:28	0,19	0,153	0,127	0,084	0,056	0,035	0,047
73	11:07:30	0,19	0,153	0,128	0,084	0,056	0,035	0,048
74	11:07:32	0,19	0,153	0,129	0,086	0,056	0,035	0,048
75	11:07:34	0,19	0,154	0,13	0,086	0,057	0,035	0,049
76	11:07:36	0,191	0,154	0,13	0,087	0,058	0,035	0,049
77	11:07:38	0,191	0,155	0,131	0,088	0,058	0,036	0,049
78	11:07:40	0,191	0,155	0,132	0,089	0,058	0,035	0,049
79	11:07:42	0,191	0,155	0,132	0,09	0,058	0,036	0,049
80	11:07:44	0,191	0,155	0,133	0,09	0,059	0,035	0,049
81	11:07:46	0,191	0,156	0,133	0,091	0,059	0,036	0,05
82	11:07:48	0,191	0,156	0,133	0,091	0,059	0,036	0,05
83	11:07:50	0,192	0,156	0,133	0,091	0,059	0,036	0,05
84	11:07:52	0,192	0,156	0,133	0,091	0,059	0,036	0,051
85	11:07:54	0,192	0,156	0,133	0,09	0,059	0,036	0,051
86	11:07:56	0,192	0,156	0,133	0,09	0,058	0,037	0,052
87	11:07:58	0,192	0,156	0,132	0,09	0,057	0,037	0,052

Окончание таблицы Г.3 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 1

При расходе 150 м ³ /ч		Положение № 1			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик 7	Датчик 6	Датчик 5	Датчик 4	Датчик 3	Датчик 2	Датчик 1
88	11:08:00	0,192	0,155	0,132	0,089	0,057	0,037	0,052
89	11:08:02	0,192	0,155	0,131	0,088	0,057	0,037	0,052
90	11:08:04	0,192	0,155	0,131	0,087	0,057	0,037	0,052
$\Sigma_{\text{сред. ариф.}}$		0,180	0,138	0,111	0,070	0,051	0,035	0,041

Таблица Г.4 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 2

При расходе 300 м³/ч		Положение № 2			Измерения проводились в течение 1 минуты			
№	Время	Датчик 14	Датчик 13	Датчик 12	Датчик 11	Датчик 10	Датчик 9	Датчик 8
1	10:53:59	0,507	0,48	0,48	0,435	0,454	0,427	0,448
2	10:54:01	0,507	0,487	0,487	0,44	0,461	0,429	0,451
3	10:54:03	0,508	0,491	0,492	0,447	0,47	0,438	0,457
4	10:54:05	0,509	0,491	0,492	0,449	0,471	0,44	0,458
5	10:54:07	0,509	0,49	0,491	0,45	0,475	0,445	0,458
6	10:54:09	0,509	0,491	0,492	0,451	0,475	0,446	0,461
7	10:54:11	0,509	0,491	0,492	0,452	0,477	0,448	0,463
8	10:54:13	0,508	0,49	0,49	0,45	0,478	0,45	0,466
9	10:54:15	0,507	0,49	0,49	0,45	0,477	0,45	0,466
10	10:54:17	0,507	0,489	0,489	0,448	0,476	0,448	0,466
11	10:54:19	0,508	0,488	0,488	0,449	0,476	0,449	0,466
12	10:54:21	0,508	0,489	0,488	0,449	0,476	0,449	0,466
13	10:54:23	0,508	0,489	0,488	0,449	0,476	0,449	0,467
14	10:54:25	0,508	0,49	0,488	0,449	0,476	0,449	0,466
15	10:54:27	0,508	0,489	0,487	0,448	0,475	0,448	0,466
16	10:54:29	0,508	0,488	0,486	0,447	0,474	0,447	0,465
17	10:54:31	0,508	0,489	0,487	0,447	0,474	0,447	0,465
18	10:54:33	0,507	0,488	0,486	0,447	0,474	0,448	0,466
19	10:54:35	0,507	0,488	0,486	0,446	0,474	0,447	0,466
20	10:54:37	0,507	0,488	0,486	0,446	0,474	0,447	0,464
21	10:54:39	0,507	0,488	0,486	0,446	0,474	0,447	0,465
22	10:54:41	0,507	0,487	0,486	0,447	0,474	0,447	0,465

Продолжение таблицы Г.4 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 2

При расходе 300 м³/ч		Положение № 2			Измерения проводились в течение 1 минуты			
№	Время	Датчик 14	Датчик 13	Датчик 12	Датчик 11	Датчик 10	Датчик 9	Датчик 8
23	10:54:43	0,507	0,487	0,486	0,446	0,474	0,447	0,465
24	10:54:45	0,507	0,488	0,486	0,446	0,473	0,446	0,464
25	10:54:47	0,507	0,488	0,487	0,446	0,474	0,447	0,465
26	10:54:49	0,507	0,488	0,487	0,447	0,474	0,447	0,464
27	10:54:51	0,507	0,488	0,486	0,447	0,474	0,447	0,465
28	10:54:53	0,507	0,488	0,486	0,447	0,474	0,447	0,465
29	10:54:55	0,507	0,488	0,486	0,447	0,474	0,447	0,465
30	10:54:57	0,507	0,488	0,486	0,446	0,473	0,446	0,464
31	10:54:59	0,506	0,488	0,486	0,446	0,473	0,445	0,463
32	10:55:01	0,506	0,487	0,486	0,446	0,472	0,445	0,463
33	10:55:03	0,506	0,487	0,485	0,445	0,471	0,444	0,462
34	10:55:05	0,505	0,486	0,484	0,444	0,471	0,443	0,461
35	10:55:07	0,505	0,486	0,484	0,444	0,47	0,443	0,46
36	10:55:09	0,505	0,485	0,483	0,444	0,47	0,443	0,46
37	10:55:11	0,505	0,485	0,483	0,444	0,47	0,443	0,46
38	10:55:13	0,505	0,485	0,483	0,444	0,47	0,442	0,46
39	10:55:15	0,505	0,485	0,483	0,443	0,469	0,442	0,459
40	10:55:17	0,505	0,485	0,483	0,443	0,469	0,442	0,459
41	10:55:19	0,505	0,485	0,483	0,443	0,469	0,441	0,458
42	10:55:21	0,505	0,485	0,483	0,443	0,469	0,442	0,458
43	10:55:23	0,505	0,485	0,482	0,443	0,469	0,442	0,459
44	10:55:25	0,505	0,485	0,482	0,443	0,469	0,441	0,458
45	10:55:27	0,505	0,484	0,482	0,442	0,468	0,441	0,458

Продолжение таблицы Г.4 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 2

При расходе 300 м ³ /ч		Положение № 2			Измерения проводились в течение 1 минуты			
№	Время	Датчик 14	Датчик 13	Датчик 12	Датчик 11	Датчик 10	Датчик 9	Датчик 8
46	10:55:29	0,505	0,484	0,482	0,442	0,468	0,441	0,458
47	10:55:31	0,505	0,484	0,481	0,441	0,468	0,44	0,457
48	10:55:33	0,505	0,484	0,481	0,441	0,468	0,441	0,457
49	10:55:35	0,505	0,484	0,481	0,441	0,467	0,44	0,457
50	10:55:37	0,505	0,484	0,481	0,441	0,467	0,44	0,457
51	10:55:39	0,505	0,484	0,481	0,441	0,467	0,44	0,456
52	10:55:41	0,505	0,484	0,481	0,441	0,467	0,44	0,456
53	10:55:43	0,505	0,484	0,481	0,441	0,467	0,439	0,456
54	10:55:45	0,505	0,484	0,481	0,441	0,467	0,439	0,455
55	10:55:47	0,505	0,484	0,481	0,441	0,467	0,439	0,455
56	10:55:49	0,505	0,484	0,481	0,441	0,467	0,439	0,455
57	10:55:51	0,506	0,484	0,482	0,441	0,467	0,439	0,455
58	10:55:53	0,506	0,484	0,482	0,442	0,467	0,439	0,455
59	10:55:55	0,506	0,484	0,482	0,442	0,467	0,439	0,455
60	10:55:57	0,506	0,485	0,482	0,442	0,467	0,439	0,455
61	10:55:59	0,506	0,485	0,482	0,442	0,467	0,439	0,455
62	10:56:01	0,506	0,485	0,482	0,442	0,467	0,439	0,455
63	10:56:03	0,506	0,485	0,482	0,442	0,467	0,439	0,455
64	10:56:05	0,506	0,485	0,482	0,442	0,467	0,439	0,455
65	10:56:07	0,506	0,485	0,482	0,442	0,467	0,439	0,455
66	10:56:09	0,506	0,485	0,482	0,442	0,467	0,439	0,455
67	10:56:11	0,506	0,485	0,482	0,442	0,467	0,44	0,455
68	10:56:13	0,506	0,485	0,482	0,442	0,468	0,44	0,456

Окончание таблицы Г.4 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 2

При расходе 300 м³/ч		Положение № 2			Измерения проводились в течение 1 минуты			
№	Время	Датчик 14	Датчик 13	Датчик 12	Датчик 11	Датчик 10	Датчик 9	Датчик 8
69	10:56:15	0,506	0,485	0,482	0,442	0,468	0,44	0,456
70	10:56:17	0,507	0,485	0,483	0,442	0,468	0,44	0,456
71	10:56:19	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
72	10:56:21	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
73	10:56:23	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
74	10:56:25	0,506	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
75	10:56:27	0,506	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
76	10:56:29	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
77	10:56:31	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
78	10:56:33	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
79	10:56:35	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
80	10:56:37	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
81	10:56:39	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
82	10:56:41	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
83	10:56:43	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
84	10:56:45	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
85	10:56:47	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
86	10:56:49	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
87	10:56:51	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
88	10:56:53	0,507	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
89	10:56:55	0,506	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
90	10:56:57	0,506	0,485	0,483	0,443	0,468	0,441	0,457
Σ _{сред. ариф.}		0,506	0,486	0,484	0,444	0,470	0,442	0,459

Таблица Г.5 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 2

При расходе 150 м ³ /ч		Положение № 2			Измерения проводились в течение 1 минуты			
№	Время	Датчик 14	Датчик 13	Датчик 12	Датчик 11	Датчик 10	Датчик 9	Датчик 8
1	11:13:43	0,206	0,171	0,154	0,125	0,123	0,099	0,098
2	11:13:45	0,207	0,171	0,155	0,127	0,125	0,101	0,099
3	11:13:47	0,208	0,172	0,155	0,128	0,127	0,103	0,099
4	11:13:49	0,208	0,174	0,156	0,129	0,128	0,104	0,101
5	11:13:51	0,209	0,175	0,158	0,13	0,129	0,105	0,102
6	11:13:53	0,209	0,176	0,159	0,131	0,13	0,107	0,103
7	11:13:55	0,209	0,177	0,161	0,133	0,132	0,109	0,104
8	11:13:57	0,209	0,177	0,161	0,134	0,133	0,11	0,106
9	11:13:59	0,21	0,179	0,162	0,135	0,135	0,112	0,108
10	11:14:01	0,21	0,179	0,163	0,135	0,136	0,114	0,11
11	11:14:03	0,211	0,181	0,165	0,137	0,137	0,115	0,111
12	11:14:05	0,211	0,182	0,166	0,139	0,139	0,116	0,113
13	11:14:07	0,211	0,184	0,168	0,14	0,14	0,117	0,114
14	11:14:09	0,212	0,185	0,169	0,141	0,141	0,118	0,114
15	11:14:11	0,211	0,186	0,171	0,142	0,142	0,119	0,114
16	11:14:13	0,212	0,186	0,172	0,144	0,143	0,12	0,115
17	11:14:15	0,212	0,187	0,173	0,145	0,144	0,121	0,116
18	11:14:17	0,212	0,187	0,174	0,146	0,145	0,121	0,117
19	11:14:19	0,211	0,187	0,175	0,147	0,147	0,122	0,119
20	11:14:21	0,211	0,188	0,175	0,148	0,148	0,124	0,12
21	11:14:23	0,211	0,188	0,176	0,149	0,15	0,125	0,121
22	11:14:25	0,211	0,188	0,176	0,151	0,151	0,127	0,123
23	11:14:27	0,213	0,19	0,178	0,151	0,152	0,128	0,124

Продолжение таблицы Г.5 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 2

При расходе 150 м ³ /ч		Положение № 2			Измерения проводились в течение 1 минуты			
№	Время	Датчик 14	Датчик 13	Датчик 12	Датчик 11	Датчик 10	Датчик 9	Датчик 8
24	11:14:29	0,214	0,191	0,179	0,152	0,153	0,129	0,125
25	11:14:31	0,216	0,193	0,18	0,153	0,154	0,13	0,126
26	11:14:33	0,217	0,195	0,182	0,154	0,155	0,131	0,126
27	11:14:35	0,218	0,196	0,183	0,156	0,157	0,132	0,127
28	11:14:37	0,218	0,197	0,184	0,157	0,158	0,133	0,128
29	11:14:39	0,219	0,198	0,185	0,158	0,158	0,134	0,129
30	11:14:41	0,219	0,199	0,186	0,158	0,159	0,134	0,13
31	11:14:43	0,219	0,201	0,188	0,16	0,16	0,136	0,13
32	11:14:45	0,219	0,202	0,19	0,161	0,161	0,137	0,131
33	11:14:47	0,219	0,202	0,191	0,163	0,162	0,139	0,133
34	11:14:49	0,218	0,202	0,192	0,164	0,163	0,139	0,133
35	11:14:51	0,218	0,202	0,192	0,165	0,164	0,141	0,134
36	11:14:53	0,217	0,202	0,192	0,166	0,165	0,142	0,135
37	11:14:55	0,217	0,202	0,192	0,165	0,165	0,142	0,136
38	11:14:57	0,217	0,201	0,192	0,166	0,166	0,142	0,136
39	11:14:59	0,217	0,201	0,192	0,166	0,166	0,143	0,136
40	11:15:01	0,216	0,201	0,192	0,166	0,167	0,143	0,136
41	11:15:03	0,216	0,2	0,191	0,165	0,166	0,143	0,136
42	11:15:05	0,215	0,2	0,191	0,164	0,166	0,142	0,135
43	11:15:07	0,215	0,2	0,19	0,164	0,164	0,141	0,134
44	11:15:09	0,215	0,2	0,191	0,164	0,164	0,141	0,133
45	11:15:11	0,215	0,202	0,192	0,164	0,165	0,141	0,133
46	11:15:13	0,215	0,203	0,192	0,165	0,165	0,141	0,133

Продолжение таблицы Г.5 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 2

При расходе 150 м³/ч		Положение № 2			Измерения проводились в течение 1 минуты			
№	Время	Датчик 14	Датчик 13	Датчик 12	Датчик 11	Датчик 10	Датчик 9	Датчик 8
47	11:15:15	0,215	0,203	0,193	0,165	0,166	0,142	0,133
48	11:15:17	0,215	0,203	0,193	0,165	0,166	0,143	0,134
49	11:15:19	0,215	0,203	0,193	0,165	0,166	0,143	0,135
50	11:15:21	0,215	0,202	0,193	0,165	0,165	0,142	0,134
51	11:15:23	0,215	0,202	0,192	0,165	0,165	0,141	0,133
52	11:15:25	0,215	0,202	0,192	0,165	0,165	0,141	0,133
53	11:15:27	0,215	0,203	0,193	0,165	0,166	0,141	0,133
54	11:15:29	0,215	0,203	0,193	0,165	0,166	0,142	0,133
55	11:15:31	0,215	0,204	0,194	0,166	0,166	0,141	0,133
56	11:15:33	0,215	0,204	0,194	0,166	0,167	0,143	0,133
57	11:15:35	0,215	0,204	0,194	0,166	0,167	0,143	0,134
58	11:15:37	0,215	0,204	0,194	0,166	0,167	0,143	0,134
59	11:15:39	0,215	0,204	0,195	0,167	0,168	0,143	0,134
60	11:15:41	0,215	0,204	0,195	0,167	0,168	0,144	0,134
61	11:15:43	0,215	0,204	0,195	0,167	0,168	0,144	0,134
62	11:15:45	0,215	0,204	0,195	0,167	0,168	0,144	0,134
63	11:15:47	0,215	0,204	0,195	0,167	0,168	0,144	0,134
64	11:15:49	0,215	0,204	0,194	0,167	0,168	0,144	0,134
65	11:15:51	0,215	0,204	0,194	0,167	0,168	0,143	0,133
66	11:15:53	0,214	0,204	0,194	0,167	0,168	0,143	0,133
67	11:15:55	0,214	0,204	0,194	0,167	0,168	0,143	0,133
68	11:15:57	0,214	0,204	0,194	0,167	0,168	0,143	0,133
69	11:15:59	0,214	0,204	0,194	0,167	0,168	0,144	0,134

Окончание таблицы Г.5 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 2

При расходе 150 м³/ч		Положение № 2			Измерения проводились в течение 1 минуты			
№	Время	Датчик 14	Датчик 13	Датчик 12	Датчик 11	Датчик 10	Датчик 9	Датчик 8
70	11:16:01	0,214	0,204	0,195	0,167	0,168	0,144	0,134
71	11:16:03	0,214	0,204	0,194	0,167	0,169	0,144	0,134
72	11:16:05	0,214	0,204	0,194	0,167	0,169	0,144	0,135
73	11:16:07	0,214	0,204	0,194	0,167	0,169	0,145	0,134
74	11:16:09	0,214	0,204	0,195	0,168	0,17	0,145	0,135
75	11:16:11	0,214	0,204	0,195	0,168	0,17	0,146	0,136
76	11:16:13	0,215	0,204	0,195	0,169	0,171	0,147	0,136
77	11:16:15	0,215	0,205	0,195	0,168	0,171	0,147	0,137
78	11:16:17	0,215	0,205	0,195	0,169	0,172	0,148	0,138
79	11:16:19	0,215	0,205	0,196	0,169	0,172	0,148	0,138
80	11:16:21	0,215	0,205	0,196	0,169	0,172	0,148	0,138
81	11:16:23	0,215	0,205	0,196	0,17	0,172	0,148	0,138
82	11:16:25	0,214	0,205	0,196	0,17	0,172	0,149	0,138
83	11:16:27	0,214	0,205	0,195	0,17	0,172	0,148	0,137
84	11:16:29	0,215	0,205	0,195	0,169	0,172	0,148	0,136
85	11:16:31	0,215	0,205	0,195	0,169	0,171	0,147	0,136
86	11:16:33	0,215	0,205	0,196	0,169	0,171	0,146	0,135
87	11:16:35	0,215	0,205	0,196	0,169	0,171	0,145	0,134
88	11:16:37	0,215	0,205	0,196	0,169	0,171	0,145	0,133
89	11:16:39	0,215	0,205	0,196	0,169	0,17	0,145	0,133
90	11:16:41	0,215	0,205	0,195	0,169	0,17	0,145	0,133
Σ _{сред. ариф.}		0,214	0,197	0,186	0,159	0,159	0,135	0,128

Таблица Г.6 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 3

При расходе 300 м ³ /ч	Положение № 3	Измерения проводились в течение 1 минуты
№	Время	Датчик 15
1	12:31:28	0,456
2	12:31:30	0,457
3	12:31:32	0,46
4	12:31:34	0,47
5	12:31:36	0,488
6	12:31:38	0,52
7	12:31:40	0,562
8	12:31:42	0,602
9	12:31:44	0,641
10	12:31:46	0,664
11	12:31:48	0,659
12	12:31:50	0,645
13	12:31:52	0,629
14	12:31:54	0,613
15	12:31:56	0,622
$\Sigma_{\text{сред. ариф.}}$		0,57

Таблица Г.7 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 3

При расходе 150 м ³ /ч	Положение № 3	Измерения проводились в течение 1 минуты
№	Время	Датчик 15
1	12:34:13	0,227
2	12:34:15	0,231
3	12:34:17	0,23
4	12:34:19	0,225
5	12:34:21	0,226
6	12:34:23	0,227
7	12:34:25	0,231
8	12:34:27	0,232
9	12:34:29	0,243
10	12:34:31	0,249
11	12:34:33	0,248
12	12:34:35	0,248
13	12:34:37	0,255
14	12:34:39	0,255
15	12:34:41	0,266
Σ _{сред. ариф.}		0,240

Таблица Г.8 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 4

При расходе 300 м ³ /ч		Положение № 4			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
1	11:49:21	0,343	0,137	0,089	0,085	0,151	0,338	0,369
2	11:49:23	0,355	0,137	0,091	0,092	0,149	0,34	0,369
3	11:49:25	0,357	0,135	0,092	0,096	0,146	0,338	0,366
4	11:49:27	0,343	0,135	0,09	0,102	0,147	0,339	0,371
5	11:49:29	0,344	0,134	0,083	0,102	0,151	0,339	0,367
6	11:49:31	0,343	0,137	0,086	0,103	0,151	0,341	0,365
7	11:49:33	0,339	0,135	0,087	0,105	0,15	0,342	0,364
8	11:49:35	0,34	0,136	0,087	0,107	0,15	0,342	0,362
9	11:49:37	0,337	0,136	0,089	0,109	0,148	0,341	0,364
10	11:49:39	0,339	0,135	0,091	0,104	0,15	0,342	0,365
11	11:49:41	0,341	0,135	0,091	0,1	0,147	0,344	0,365
12	11:49:43	0,34	0,134	0,091	0,094	0,146	0,346	0,365
13	11:49:45	0,341	0,134	0,089	0,096	0,147	0,346	0,362
14	11:49:47	0,34	0,136	0,089	0,096	0,147	0,346	0,364
15	11:49:49	0,338	0,135	0,088	0,097	0,147	0,346	0,367
16	11:49:51	0,34	0,135	0,087	0,094	0,147	0,346	0,366
17	11:49:53	0,34	0,136	0,087	0,092	0,147	0,345	0,366
18	11:49:55	0,337	0,136	0,088	0,091	0,144	0,343	0,364
19	11:49:57	0,34	0,136	0,09	0,092	0,143	0,343	0,363
20	11:49:59	0,341	0,136	0,092	0,095	0,144	0,344	0,361
21	11:50:01	0,341	0,135	0,092	0,096	0,145	0,342	0,36
22	11:50:03	0,342	0,135	0,095	0,098	0,147	0,342	0,359
23	11:50:05	0,342	0,136	0,098	0,1	0,148	0,342	0,356

Продолжение таблицы Г.8 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 4

При расходе 300 м³/ч		Положение № 4			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
24	11:50:07	0,336	0,138	0,1	0,101	0,15	0,34	0,354
25	11:50:09	0,336	0,139	0,1	0,103	0,149	0,335	0,351
26	11:50:11	0,331	0,14	0,1	0,105	0,148	0,334	0,347
27	11:50:13	0,33	0,141	0,103	0,107	0,148	0,332	0,343
28	11:50:15	0,329	0,142	0,105	0,107	0,147	0,33	0,342
29	11:50:17	0,327	0,144	0,105	0,106	0,147	0,326	0,339
30	11:50:19	0,324	0,145	0,109	0,107	0,146	0,325	0,34
31	11:50:21	0,32	0,146	0,112	0,108	0,145	0,325	0,341
32	11:50:23	0,315	0,147	0,115	0,112	0,148	0,325	0,34
33	11:50:25	0,312	0,15	0,118	0,115	0,149	0,324	0,342
34	11:50:27	0,309	0,152	0,122	0,117	0,15	0,323	0,342
35	11:50:29	0,307	0,153	0,124	0,118	0,15	0,324	0,342
36	11:50:31	0,307	0,153	0,126	0,12	0,15	0,324	0,343
37	11:50:33	0,307	0,153	0,126	0,12	0,15	0,324	0,342
38	11:50:35	0,308	0,152	0,127	0,121	0,15	0,324	0,344
39	11:50:37	0,31	0,151	0,127	0,121	0,149	0,324	0,344
40	11:50:39	0,31	0,15	0,126	0,119	0,149	0,324	0,344
41	11:50:41	0,309	0,151	0,124	0,118	0,148	0,325	0,344
42	11:50:43	0,309	0,149	0,123	0,117	0,148	0,325	0,344
43	11:50:45	0,31	0,149	0,122	0,116	0,148	0,325	0,345
44	11:50:47	0,31	0,149	0,121	0,116	0,147	0,326	0,345
45	11:50:49	0,31	0,149	0,12	0,115	0,147	0,326	0,346
46	11:50:51	0,311	0,148	0,119	0,114	0,147	0,327	0,346

Продолжение таблицы Г.8 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 4

При расходе 300 м³/ч		Положение № 4			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
47	11:50:53	0,31	0,148	0,118	0,113	0,147	0,327	0,346
48	11:50:55	0,309	0,148	0,118	0,113	0,148	0,326	0,347
49	11:50:57	0,31	0,148	0,117	0,113	0,148	0,327	0,347
50	11:50:59	0,311	0,148	0,116	0,112	0,147	0,327	0,347
51	11:51:01	0,311	0,148	0,115	0,112	0,147	0,327	0,348
52	11:51:03	0,311	0,147	0,115	0,111	0,146	0,327	0,35
53	11:51:05	0,31	0,147	0,115	0,111	0,146	0,328	0,351
54	11:51:07	0,31	0,147	0,115	0,111	0,146	0,327	0,351
55	11:51:09	0,31	0,147	0,114	0,11	0,146	0,328	0,351
56	11:51:11	0,309	0,147	0,114	0,11	0,146	0,328	0,352
57	11:51:13	0,31	0,147	0,113	0,11	0,146	0,328	0,353
58	11:51:15	0,309	0,147	0,113	0,109	0,146	0,328	0,355
59	11:51:17	0,309	0,147	0,113	0,109	0,145	0,329	0,356
60	11:51:19	0,31	0,147	0,113	0,109	0,146	0,329	0,355
61	11:51:21	0,31	0,147	0,113	0,109	0,146	0,33	0,356
62	11:51:23	0,31	0,148	0,113	0,109	0,146	0,33	0,356
63	11:51:25	0,31	0,148	0,113	0,109	0,145	0,33	0,356
64	11:51:27	0,31	0,148	0,113	0,109	0,145	0,33	0,356
65	11:51:29	0,31	0,147	0,113	0,109	0,145	0,331	0,355
66	11:51:31	0,31	0,148	0,113	0,108	0,145	0,331	0,355
67	11:51:33	0,309	0,148	0,112	0,106	0,145	0,331	0,356
68	11:51:35	0,309	0,149	0,112	0,106	0,145	0,332	0,356
69	11:51:37	0,309	0,149	0,112	0,107	0,146	0,332	0,356

Окончание таблицы Г.8 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 4

При расходе 300 м ³ /ч		Положение № 4			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
70	11:51:39	0,309	0,15	0,112	0,107	0,145	0,332	0,356
71	11:51:41	0,31	0,15	0,112	0,107	0,145	0,333	0,355
72	11:51:43	0,31	0,151	0,113	0,107	0,145	0,333	0,355
73	11:51:45	0,311	0,151	0,113	0,107	0,145	0,333	0,355
74	11:51:47	0,312	0,151	0,113	0,107	0,145	0,333	0,355
75	11:51:49	0,312	0,151	0,113	0,107	0,146	0,334	0,356
76	11:51:51	0,313	0,151	0,113	0,107	0,146	0,333	0,356
77	11:51:53	0,313	0,151	0,113	0,107	0,145	0,333	0,356
78	11:51:55	0,313	0,152	0,114	0,107	0,144	0,333	0,356
79	11:51:57	0,313	0,151	0,114	0,107	0,144	0,334	0,357
80	11:51:59	0,313	0,151	0,114	0,107	0,144	0,334	0,356
81	11:52:01	0,314	0,151	0,114	0,107	0,144	0,334	0,357
82	11:52:03	0,314	0,152	0,114	0,107	0,144	0,334	0,357
83	11:52:05	0,314	0,153	0,114	0,107	0,144	0,334	0,358
84	11:52:07	0,314	0,153	0,115	0,107	0,144	0,334	0,358
85	11:52:09	0,314	0,153	0,115	0,107	0,145	0,334	0,358
86	11:52:11	0,314	0,153	0,115	0,107	0,145	0,334	0,358
87	11:52:13	0,314	0,153	0,114	0,107	0,145	0,334	0,359
88	11:52:15	0,313	0,153	0,114	0,106	0,144	0,334	0,359
89	11:52:17	0,313	0,153	0,115	0,106	0,144	0,335	0,359
90	11:52:19	0,313	0,153	0,115	0,106	0,144	0,335	0,359
Σ _{сред. ариф.}		0,320	0,145	0,108	0,107	0,147	0,333	0,354

Таблица Г.9 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 4

При расходе 150 м ³ /ч		Положение № 4			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
1	11:27:34	0,211	0,201	0,191	0,165	0,166	0,142	0,13
2	11:27:36	0,209	0,199	0,189	0,163	0,164	0,14	0,129
3	11:27:38	0,207	0,196	0,188	0,161	0,162	0,139	0,128
4	11:27:40	0,205	0,194	0,185	0,159	0,161	0,138	0,128
5	11:27:42	0,203	0,192	0,183	0,157	0,158	0,137	0,127
6	11:27:44	0,201	0,19	0,182	0,156	0,157	0,135	0,126
7	11:27:46	0,199	0,188	0,18	0,154	0,155	0,134	0,124
8	11:27:48	0,197	0,186	0,178	0,152	0,153	0,132	0,123
9	11:27:50	0,196	0,184	0,176	0,151	0,152	0,131	0,121
10	11:27:52	0,194	0,182	0,174	0,149	0,151	0,131	0,12
11	11:27:54	0,191	0,179	0,172	0,147	0,149	0,129	0,119
12	11:27:56	0,189	0,177	0,17	0,145	0,148	0,129	0,118
13	11:27:58	0,187	0,175	0,168	0,144	0,146	0,127	0,117
14	11:28:00	0,185	0,172	0,166	0,142	0,145	0,126	0,116
15	11:28:02	0,183	0,171	0,164	0,14	0,143	0,125	0,114
16	11:28:04	0,181	0,168	0,162	0,138	0,14	0,123	0,113
17	11:28:06	0,179	0,166	0,16	0,136	0,139	0,121	0,111
18	11:28:08	0,177	0,164	0,158	0,135	0,137	0,119	0,109
19	11:28:10	0,175	0,162	0,156	0,133	0,136	0,118	0,108
20	11:28:12	0,173	0,16	0,154	0,131	0,134	0,117	0,107
21	11:28:14	0,171	0,157	0,152	0,129	0,132	0,115	0,105
22	11:28:16	0,168	0,155	0,149	0,127	0,13	0,114	0,104

Продолжение таблицы Г.9 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 4

При расходе 150 м³/ч		Положение № 4			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
23	11:28:18	0,166	0,153	0,148	0,125	0,128	0,113	0,102
24	11:28:20	0,163	0,15	0,145	0,123	0,127	0,111	0,101
25	11:28:22	0,161	0,148	0,143	0,121	0,125	0,11	0,1
26	11:28:24	0,159	0,146	0,141	0,12	0,123	0,108	0,099
27	11:28:26	0,156	0,144	0,14	0,118	0,121	0,106	0,098
28	11:28:28	0,154	0,143	0,138	0,117	0,119	0,105	0,097
29	11:28:30	0,152	0,141	0,136	0,115	0,117	0,104	0,096
30	11:28:32	0,15	0,139	0,133	0,113	0,116	0,103	0,095
31	11:28:34	0,148	0,137	0,131	0,111	0,114	0,102	0,095
32	11:28:36	0,147	0,135	0,129	0,11	0,112	0,101	0,094
33	11:28:38	0,146	0,133	0,127	0,108	0,11	0,101	0,094
34	11:28:40	0,144	0,131	0,125	0,106	0,108	0,1	0,094
35	11:28:42	0,143	0,129	0,123	0,104	0,106	0,099	0,092
36	11:28:44	0,141	0,127	0,122	0,102	0,105	0,098	0,091
37	11:28:46	0,139	0,125	0,119	0,1	0,103	0,097	0,091
38	11:28:48	0,137	0,123	0,118	0,098	0,101	0,096	0,09
39	11:28:50	0,135	0,121	0,116	0,097	0,1	0,095	0,089
40	11:28:52	0,134	0,119	0,114	0,095	0,097	0,094	0,089
41	11:28:54	0,132	0,117	0,113	0,094	0,096	0,092	0,088
42	11:28:56	0,131	0,115	0,111	0,092	0,095	0,092	0,088
43	11:28:58	0,13	0,112	0,109	0,09	0,093	0,092	0,088
44	11:29:00	0,128	0,11	0,107	0,089	0,091	0,091	0,088
45	11:29:02	0,127	0,109	0,105	0,087	0,09	0,091	0,088

Продолжение таблицы Г.9 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 4

При расходе 150 м³/ч		Положение № 4			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
46	11:29:04	0,126	0,107	0,103	0,086	0,09	0,09	0,088
47	11:29:06	0,124	0,105	0,102	0,084	0,088	0,089	0,088
48	11:29:08	0,123	0,102	0,1	0,083	0,087	0,089	0,087
49	11:29:10	0,121	0,1	0,097	0,081	0,085	0,088	0,087
50	11:29:12	0,12	0,098	0,095	0,079	0,083	0,087	0,087
51	11:29:14	0,118	0,096	0,093	0,077	0,081	0,086	0,087
52	11:29:16	0,116	0,093	0,091	0,075	0,08	0,085	0,087
53	11:29:18	0,115	0,091	0,089	0,074	0,078	0,084	0,086
54	11:29:20	0,113	0,089	0,087	0,072	0,076	0,083	0,086
55	11:29:22	0,111	0,088	0,085	0,07	0,074	0,082	0,086
56	11:29:24	0,109	0,086	0,083	0,068	0,073	0,081	0,085
57	11:29:26	0,107	0,084	0,081	0,067	0,071	0,08	0,084
58	11:29:28	0,106	0,082	0,079	0,064	0,069	0,079	0,084
59	11:29:30	0,105	0,08	0,077	0,063	0,068	0,078	0,082
60	11:29:32	0,104	0,078	0,075	0,061	0,066	0,077	0,081
61	11:29:34	0,102	0,075	0,073	0,059	0,064	0,075	0,08
62	11:29:36	0,101	0,073	0,07	0,057	0,062	0,074	0,079
63	11:29:38	0,1	0,071	0,069	0,055	0,06	0,073	0,078
64	11:29:40	0,099	0,069	0,067	0,054	0,059	0,073	0,078
65	11:29:42	0,097	0,067	0,065	0,052	0,057	0,072	0,077
66	11:29:44	0,096	0,065	0,063	0,05	0,056	0,071	0,077
67	11:29:46	0,095	0,063	0,061	0,048	0,054	0,07	0,076
68	11:29:48	0,093	0,06	0,059	0,046	0,052	0,069	0,075

Окончание таблицы Г.9 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 4

При расходе 150 м³/ч		Положение № 4			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
69	11:29:50	0,092	0,058	0,057	0,044	0,05	0,067	0,073
70	11:29:52	0,091	0,056	0,055	0,043	0,049	0,066	0,072
71	11:29:54	0,09	0,054	0,053	0,041	0,047	0,065	0,07
72	11:29:56	0,088	0,052	0,051	0,04	0,045	0,064	0,069
73	11:29:58	0,087	0,05	0,049	0,039	0,044	0,062	0,069
74	11:30:00	0,085	0,048	0,047	0,037	0,043	0,061	0,068
75	11:30:02	0,084	0,046	0,045	0,035	0,041	0,06	0,067
76	11:30:04	0,082	0,044	0,043	0,034	0,04	0,059	0,067
77	11:30:06	0,081	0,042	0,041	0,032	0,038	0,058	0,066
78	11:30:08	0,079	0,039	0,039	0,03	0,036	0,057	0,066
79	11:30:10	0,077	0,037	0,038	0,028	0,035	0,056	0,066
80	11:30:12	0,075	0,035	0,035	0,026	0,033	0,055	0,066
81	11:30:14	0,073	0,033	0,034	0,025	0,032	0,054	0,066
82	11:30:16	0,071	0,032	0,033	0,024	0,031	0,053	0,066
83	11:30:18	0,069	0,03	0,031	0,023	0,03	0,052	0,066
84	11:30:20	0,066	0,028	0,029	0,021	0,029	0,052	0,065
85	11:30:22	0,064	0,026	0,027	0,019	0,027	0,051	0,065
86	11:30:24	0,062	0,023	0,026	0,017	0,026	0,05	0,064
87	11:30:26	0,06	0,021	0,024	0,015	0,024	0,049	0,064
88	11:30:28	0,058	0,02	0,022	0,013	0,023	0,048	0,063
89	11:30:30	0,056	0,018	0,021	0,012	0,021	0,047	0,062
90	11:30:32	0,056	0,019	0,022	0,013	0,022	0,046	0,062
Σ _{сред.ариф.}		0,129	0,107	0,104	0,087	0,091	0,091	0,090

Таблица Г.10 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 5

При расходе 306 м ³ /ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
1	11:41:47	0,043	0,047	0,043	0,023	0,03	0,042	0,07
2	11:41:49	0,046	0,05	0,045	0,025	0,033	0,044	0,072
3	11:41:51	0,048	0,053	0,047	0,026	0,034	0,047	0,075
4	11:41:53	0,05	0,056	0,049	0,028	0,035	0,049	0,078
5	11:41:55	0,053	0,059	0,051	0,029	0,036	0,051	0,081
6	11:41:57	0,056	0,062	0,053	0,029	0,037	0,053	0,083
7	11:41:59	0,059	0,065	0,055	0,031	0,039	0,055	0,085
8	11:42:01	0,062	0,067	0,057	0,032	0,04	0,057	0,087
9	11:42:03	0,066	0,069	0,058	0,034	0,042	0,06	0,089
10	11:42:05	0,068	0,072	0,061	0,035	0,044	0,063	0,092
11	11:42:07	0,071	0,075	0,063	0,037	0,046	0,065	0,094
12	11:42:09	0,073	0,078	0,065	0,039	0,048	0,068	0,097
13	11:42:11	0,076	0,081	0,067	0,04	0,05	0,071	0,101
14	11:42:13	0,079	0,084	0,068	0,041	0,052	0,073	0,104
15	11:42:15	0,08	0,087	0,07	0,042	0,054	0,076	0,108
16	11:42:17	0,083	0,09	0,072	0,043	0,056	0,078	0,111
17	11:42:19	0,086	0,093	0,074	0,045	0,058	0,081	0,115
18	11:42:21	0,089	0,096	0,075	0,046	0,059	0,084	0,119
19	11:42:23	0,093	0,099	0,077	0,048	0,061	0,087	0,123
20	11:42:25	0,096	0,101	0,078	0,049	0,064	0,09	0,126
21	11:42:27	0,1	0,104	0,079	0,051	0,066	0,092	0,13

Продолжение таблицы Г.10 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 5

При расходе 300 м³/ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
22	11:42:29	0,103	0,107	0,08	0,052	0,068	0,094	0,133
23	11:42:31	0,107	0,11	0,082	0,054	0,07	0,096	0,136
24	11:42:33	0,11	0,113	0,083	0,055	0,071	0,099	0,14
25	11:42:35	0,113	0,116	0,085	0,056	0,073	0,101	0,143
26	11:42:37	0,116	0,119	0,086	0,057	0,074	0,104	0,147
27	11:42:39	0,119	0,121	0,088	0,058	0,076	0,106	0,15
28	11:42:41	0,122	0,124	0,089	0,059	0,077	0,108	0,153
29	11:42:43	0,126	0,127	0,089	0,059	0,079	0,111	0,157
30	11:42:45	0,129	0,129	0,089	0,06	0,081	0,114	0,16
31	11:42:47	0,132	0,131	0,09	0,06	0,083	0,116	0,162
32	11:42:49	0,136	0,134	0,092	0,061	0,085	0,118	0,166
33	11:42:51	0,139	0,137	0,093	0,063	0,087	0,121	0,169
34	11:42:53	0,142	0,139	0,095	0,065	0,089	0,124	0,172
35	11:42:55	0,146	0,141	0,096	0,066	0,091	0,127	0,175
36	11:42:57	0,148	0,143	0,097	0,068	0,092	0,129	0,179
37	11:42:59	0,152	0,146	0,099	0,069	0,094	0,132	0,182
38	11:43:01	0,155	0,148	0,1	0,07	0,096	0,135	0,185
39	11:43:03	0,158	0,15	0,102	0,072	0,098	0,138	0,189
40	11:43:05	0,16	0,153	0,104	0,073	0,1	0,14	0,193
41	11:43:07	0,163	0,156	0,105	0,074	0,102	0,142	0,196
42	11:43:09	0,165	0,158	0,107	0,076	0,104	0,145	0,2

Продолжение таблицы Г.10 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 5

При расходе 300 м³/ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
43	11:43:11	0,167	0,161	0,108	0,077	0,106	0,147	0,204
44	11:43:13	0,169	0,163	0,11	0,079	0,108	0,15	0,207
45	11:43:15	0,171	0,166	0,112	0,08	0,109	0,153	0,211
46	11:43:17	0,173	0,169	0,114	0,081	0,11	0,156	0,214
47	11:43:19	0,175	0,171	0,117	0,083	0,111	0,159	0,218
48	11:43:21	0,178	0,174	0,118	0,084	0,112	0,161	0,222
49	11:43:23	0,181	0,177	0,119	0,084	0,113	0,162	0,225
50	11:43:25	0,183	0,179	0,119	0,085	0,114	0,164	0,228
51	11:43:27	0,186	0,181	0,121	0,086	0,116	0,167	0,231
52	11:43:29	0,19	0,183	0,122	0,087	0,118	0,169	0,234
53	11:43:31	0,193	0,185	0,124	0,088	0,119	0,171	0,237
54	11:43:33	0,195	0,187	0,125	0,09	0,121	0,173	0,24
55	11:43:35	0,198	0,19	0,126	0,091	0,122	0,176	0,243
56	11:43:37	0,2	0,192	0,128	0,092	0,124	0,178	0,247
57	11:43:39	0,203	0,195	0,13	0,093	0,126	0,181	0,251
58	11:43:41	0,206	0,198	0,131	0,095	0,128	0,184	0,255
59	11:43:43	0,21	0,2	0,133	0,096	0,13	0,187	0,258
60	11:43:45	0,212	0,203	0,135	0,097	0,132	0,19	0,262
61	11:43:47	0,215	0,206	0,136	0,098	0,134	0,192	0,266
62	11:43:49	0,217	0,209	0,138	0,1	0,136	0,195	0,269
63	11:43:51	0,22	0,211	0,14	0,101	0,138	0,198	0,273

Продолжение таблицы Г.10 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 5

При расходе 300 м³/ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
64	11:43:53	0,223	0,214	0,141	0,103	0,14	0,201	0,277
65	11:43:55	0,225	0,217	0,143	0,104	0,142	0,204	0,281
66	11:43:57	0,228	0,22	0,144	0,105	0,143	0,207	0,285
67	11:43:59	0,231	0,222	0,145	0,107	0,145	0,21	0,289
68	11:44:01	0,234	0,225	0,147	0,108	0,147	0,212	0,293
69	11:44:03	0,237	0,228	0,148	0,109	0,149	0,215	0,297
70	11:44:05	0,24	0,231	0,149	0,11	0,15	0,218	0,299
71	11:44:07	0,241	0,234	0,151	0,112	0,152	0,22	0,303
72	11:44:09	0,244	0,237	0,153	0,113	0,154	0,222	0,306
73	11:44:11	0,246	0,24	0,155	0,115	0,156	0,225	0,309
74	11:44:13	0,248	0,243	0,157	0,116	0,158	0,228	0,312
75	11:44:15	0,25	0,245	0,159	0,118	0,16	0,23	0,316
76	11:44:17	0,253	0,248	0,161	0,12	0,162	0,233	0,319
77	11:44:19	0,255	0,25	0,162	0,121	0,164	0,236	0,323
78	11:44:21	0,258	0,254	0,163	0,122	0,165	0,238	0,326
79	11:44:23	0,262	0,256	0,164	0,123	0,167	0,24	0,33
80	11:44:25	0,265	0,259	0,166	0,124	0,169	0,242	0,333
81	11:44:27	0,269	0,262	0,168	0,125	0,171	0,245	0,336
82	11:44:29	0,272	0,266	0,17	0,126	0,172	0,247	0,339
83	11:44:31	0,275	0,269	0,172	0,127	0,174	0,249	0,342
84	11:44:33	0,278	0,271	0,173	0,128	0,175	0,25	0,344

Окончание таблицы Г.10 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 5

При расходе 300 м ³ /ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
85	11:44:35	0,28	0,272	0,174	0,129	0,176	0,251	0,345
86	11:44:37	0,281	0,273	0,174	0,129	0,176	0,251	0,345
87	11:44:39	0,282	0,274	0,174	0,129	0,177	0,252	0,346
88	11:44:41	0,282	0,274	0,173	0,128	0,177	0,252	0,347
89	11:44:43	0,283	0,274	0,173	0,128	0,177	0,252	0,347
90	11:44:45	0,284	0,274	0,172	0,127	0,177	0,252	0,346
$\Sigma_{\text{сред.ариф.}}$		0,170	0,167	0,113	0,080	0,108	0,153	0,213

Таблица Г.11 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 5

При расходе 150 м³/ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
1	11:37:32	0,052	0,012	0,03	0,013	0,025	0,052	0,074
2	11:37:34	0,042	0,008	0,023	0,008	0,034	0,051	0,073
3	11:37:36	0,037	0,007	0,02	0,006	0,027	0,046	0,06
4	11:37:38	0,039	0,006	0,019	0,005	0,022	0,038	0,058
5	11:37:40	0,041	0,009	0,02	0,006	0,021	0,032	0,062
6	11:37:42	0,04	0,014	0,024	0,005	0,021	0,034	0,062
7	11:37:44	0,04	0,017	0,026	0,004	0,025	0,037	0,065
8	11:37:46	0,043	0,016	0,028	0,004	0,027	0,042	0,067
9	11:37:48	0,041	0,02	0,029	0,007	0,025	0,039	0,068
10	11:37:50	0,037	0,02	0,029	0,008	0,025	0,038	0,068
11	11:37:52	0,036	0,019	0,029	0,008	0,024	0,04	0,068
12	11:37:54	0,035	0,017	0,028	0,007	0,024	0,039	0,068
13	11:37:56	0,035	0,016	0,028	0,007	0,025	0,04	0,068
14	11:37:58	0,034	0,015	0,027	0,006	0,025	0,04	0,066
15	11:38:00	0,035	0,014	0,026	0,006	0,024	0,038	0,063
16	11:38:02	0,035	0,014	0,025	0,006	0,024	0,038	0,062
17	11:38:04	0,034	0,013	0,023	0,005	0,023	0,04	0,062
18	11:38:06	0,033	0,013	0,022	0,005	0,022	0,039	0,064
19	11:38:08	0,034	0,015	0,021	0,005	0,022	0,038	0,064
20	11:38:10	0,034	0,014	0,02	0,005	0,024	0,038	0,066
21	11:38:12	0,035	0,014	0,02	0,007	0,026	0,039	0,067

Продолжение таблицы Г.11 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 5

При расходе 150 м³/ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
22	11:38:14	0,036	0,015	0,019	0,008	0,027	0,04	0,072
23	11:38:16	0,038	0,015	0,019	0,009	0,029	0,041	0,075
24	11:38:18	0,037	0,017	0,02	0,01	0,029	0,042	0,078
25	11:38:20	0,037	0,019	0,022	0,009	0,029	0,042	0,079
26	11:38:22	0,037	0,021	0,023	0,009	0,028	0,041	0,079
27	11:38:24	0,036	0,022	0,023	0,009	0,029	0,04	0,079
28	11:38:26	0,034	0,023	0,024	0,01	0,029	0,039	0,079
29	11:38:28	0,033	0,024	0,024	0,011	0,029	0,038	0,078
30	11:38:30	0,032	0,024	0,025	0,013	0,028	0,037	0,077
31	11:38:32	0,032	0,024	0,026	0,013	0,027	0,037	0,076
32	11:38:34	0,032	0,024	0,026	0,013	0,027	0,036	0,073
33	11:38:36	0,032	0,024	0,027	0,014	0,027	0,035	0,071
34	11:38:38	0,031	0,025	0,027	0,014	0,027	0,035	0,069
35	11:38:40	0,03	0,025	0,028	0,013	0,026	0,034	0,068
36	11:38:42	0,03	0,026	0,029	0,013	0,026	0,033	0,066
37	11:38:44	0,03	0,026	0,03	0,013	0,025	0,033	0,065
38	11:38:46	0,03	0,025	0,03	0,013	0,024	0,033	0,064
39	11:38:48	0,029	0,025	0,031	0,012	0,024	0,033	0,063
40	11:38:50	0,029	0,024	0,031	0,013	0,024	0,033	0,062
41	11:38:52	0,029	0,024	0,031	0,014	0,025	0,033	0,061
42	11:38:54	0,028	0,023	0,031	0,015	0,026	0,033	0,061

Продолжение таблицы Г.11 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 5

При расходе 150 м³/ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
43	11:38:56	0,028	0,023	0,031	0,016	0,026	0,033	0,06
44	11:38:58	0,028	0,023	0,032	0,017	0,027	0,033	0,059
45	11:39:00	0,027	0,022	0,032	0,017	0,027	0,032	0,059
46	11:39:02	0,027	0,022	0,033	0,017	0,026	0,032	0,058
47	11:39:04	0,026	0,023	0,033	0,018	0,026	0,033	0,058
48	11:39:06	0,026	0,023	0,032	0,018	0,026	0,032	0,058
49	11:39:08	0,025	0,024	0,032	0,018	0,025	0,031	0,058
50	11:39:10	0,025	0,024	0,032	0,018	0,025	0,031	0,057
51	11:39:12	0,025	0,025	0,032	0,017	0,025	0,03	0,057
52	11:39:14	0,025	0,026	0,033	0,018	0,025	0,03	0,057
53	11:39:16	0,025	0,026	0,033	0,017	0,025	0,03	0,057
54	11:39:18	0,025	0,027	0,033	0,017	0,024	0,029	0,057
55	11:39:20	0,025	0,027	0,032	0,017	0,024	0,029	0,056
56	11:39:22	0,025	0,028	0,032	0,017	0,024	0,028	0,055
57	11:39:24	0,025	0,028	0,032	0,016	0,023	0,028	0,054
58	11:39:26	0,027	0,028	0,032	0,016	0,023	0,027	0,054
59	11:39:28	0,028	0,028	0,033	0,016	0,022	0,027	0,053
60	11:39:30	0,029	0,028	0,032	0,016	0,022	0,027	0,053
61	11:39:32	0,03	0,027	0,032	0,016	0,022	0,027	0,052
62	11:39:34	0,031	0,027	0,031	0,015	0,022	0,026	0,052
63	11:39:36	0,032	0,027	0,031	0,015	0,023	0,026	0,051

Продолжение таблицы Г.11 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 5

При расходе 150 м³/ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
64	11:39:38	0,033	0,027	0,031	0,015	0,024	0,026	0,051
65	11:39:40	0,033	0,027	0,031	0,016	0,025	0,027	0,051
66	11:39:42	0,033	0,027	0,032	0,016	0,025	0,027	0,051
67	11:39:44	0,032	0,028	0,033	0,016	0,025	0,028	0,052
68	11:39:46	0,032	0,029	0,033	0,017	0,025	0,028	0,052
69	11:39:48	0,032	0,03	0,034	0,017	0,025	0,028	0,052
70	11:39:50	0,031	0,03	0,034	0,017	0,025	0,028	0,052
71	11:39:52	0,032	0,03	0,034	0,016	0,024	0,028	0,052
72	11:39:54	0,033	0,031	0,034	0,016	0,024	0,028	0,052
73	11:39:56	0,033	0,031	0,034	0,016	0,024	0,028	0,051
74	11:39:58	0,033	0,031	0,034	0,016	0,024	0,027	0,05
75	11:40:00	0,033	0,03	0,033	0,016	0,023	0,027	0,05
76	11:40:02	0,033	0,03	0,033	0,015	0,023	0,027	0,05
77	11:40:04	0,033	0,03	0,033	0,015	0,023	0,026	0,049
78	11:40:06	0,033	0,03	0,032	0,015	0,023	0,026	0,049
79	11:40:08	0,033	0,03	0,032	0,015	0,022	0,026	0,049
80	11:40:10	0,033	0,03	0,032	0,015	0,022	0,025	0,049
81	11:40:12	0,033	0,03	0,032	0,014	0,022	0,025	0,048
82	11:40:14	0,032	0,029	0,032	0,014	0,022	0,025	0,048
83	11:40:16	0,032	0,029	0,032	0,014	0,022	0,025	0,047
84	11:40:18	0,032	0,029	0,032	0,014	0,022	0,025	0,047

Окончание таблицы Г.11 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 5

При расходе 150 м ³ /ч		Положение № 5			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
85	11:40:20	0,031	0,029	0,032	0,014	0,022	0,025	0,047
86	11:40:22	0,032	0,028	0,031	0,014	0,022	0,025	0,047
87	11:40:24	0,032	0,028	0,031	0,013	0,022	0,025	0,047
88	11:40:26	0,032	0,028	0,031	0,013	0,022	0,025	0,047
89	11:40:28	0,032	0,027	0,03	0,013	0,021	0,025	0,047
90	11:40:30	0,032	0,027	0,03	0,013	0,021	0,025	0,048
$\Sigma_{\text{сред.ариф.}}$		0,032	0,023	0,029	0,013	0,025	0,033	0,060

Таблица Г.12 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 6

При расходе 300 м³/ч		Положение № 6			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
1	11:55:26	0,252	0,185	0,155	0,137	0,16	0,345	0,351
2	11:55:28	0,231	0,198	0,177	0,137	0,145	0,344	0,358
3	11:55:30	0,24	0,203	0,175	0,13	0,142	0,343	0,358
4	11:55:32	0,254	0,193	0,169	0,125	0,145	0,349	0,342
5	11:55:34	0,267	0,19	0,162	0,123	0,149	0,353	0,341
6	11:55:36	0,266	0,19	0,163	0,121	0,149	0,349	0,338
7	11:55:38	0,266	0,19	0,162	0,12	0,149	0,345	0,342
8	11:55:40	0,257	0,187	0,162	0,125	0,144	0,342	0,348
9	11:55:42	0,263	0,19	0,167	0,128	0,14	0,34	0,354
10	11:55:44	0,251	0,189	0,163	0,131	0,14	0,339	0,355
11	11:55:46	0,255	0,189	0,157	0,127	0,136	0,335	0,354
12	11:55:48	0,264	0,187	0,151	0,12	0,132	0,334	0,356
13	11:55:50	0,27	0,186	0,152	0,119	0,131	0,336	0,358
14	11:55:52	0,276	0,187	0,15	0,117	0,13	0,337	0,361
15	11:55:54	0,283	0,188	0,149	0,115	0,128	0,338	0,363
16	11:55:56	0,285	0,189	0,146	0,116	0,127	0,34	0,367
17	11:55:58	0,286	0,189	0,143	0,114	0,123	0,34	0,371
18	11:56:00	0,287	0,188	0,143	0,113	0,12	0,338	0,372
19	11:56:02	0,289	0,188	0,142	0,112	0,119	0,338	0,373
20	11:56:04	0,292	0,186	0,142	0,109	0,118	0,339	0,373
21	11:56:06	0,293	0,184	0,142	0,106	0,118	0,34	0,376

Продолжение таблицы Г.12 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 6

При расходе 300 м³/ч		Положение № 6			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
22	11:56:08	0,294	0,184	0,14	0,104	0,117	0,34	0,375
23	11:56:10	0,297	0,183	0,138	0,103	0,12	0,341	0,375
24	11:56:12	0,298	0,182	0,136	0,1	0,121	0,342	0,376
25	11:56:14	0,299	0,18	0,135	0,098	0,123	0,343	0,376
26	11:56:16	0,301	0,179	0,133	0,098	0,125	0,343	0,374
27	11:56:18	0,303	0,179	0,132	0,097	0,126	0,344	0,373
28	11:56:20	0,303	0,178	0,132	0,097	0,126	0,344	0,375
29	11:56:22	0,304	0,178	0,131	0,097	0,128	0,344	0,37
30	11:56:24	0,306	0,177	0,131	0,099	0,129	0,344	0,366
31	11:56:26	0,307	0,178	0,131	0,098	0,129	0,345	0,367
32	11:56:28	0,306	0,178	0,13	0,099	0,131	0,344	0,365
33	11:56:30	0,304	0,179	0,13	0,1	0,131	0,345	0,365
34	11:56:32	0,304	0,179	0,13	0,101	0,132	0,345	0,364
35	11:56:34	0,305	0,179	0,132	0,101	0,132	0,345	0,365
36	11:56:36	0,305	0,18	0,133	0,103	0,132	0,345	0,364
37	11:56:38	0,304	0,18	0,132	0,104	0,133	0,345	0,362
38	11:56:40	0,304	0,18	0,133	0,105	0,133	0,344	0,361
39	11:56:42	0,301	0,18	0,133	0,106	0,134	0,344	0,361
40	11:56:44	0,301	0,18	0,134	0,105	0,134	0,344	0,362
41	11:56:46	0,3	0,18	0,133	0,107	0,135	0,343	0,36
42	11:56:48	0,302	0,18	0,133	0,108	0,136	0,343	0,361

Продолжение таблицы Г.12 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 6

При расходе 300 м³/ч		Положение № 6			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
43	11:56:50	0,3	0,181	0,133	0,109	0,136	0,343	0,362
44	11:56:52	0,296	0,181	0,134	0,111	0,136	0,343	0,361
45	11:56:54	0,293	0,181	0,135	0,112	0,137	0,343	0,36
46	11:56:56	0,293	0,181	0,136	0,114	0,138	0,343	0,361
47	11:56:58	0,294	0,182	0,137	0,115	0,138	0,343	0,36
48	11:57:00	0,292	0,183	0,137	0,115	0,139	0,342	0,361
49	11:57:02	0,289	0,184	0,137	0,117	0,14	0,342	0,361
50	11:57:04	0,288	0,184	0,138	0,117	0,14	0,342	0,361
51	11:57:06	0,286	0,183	0,138	0,118	0,14	0,341	0,361
52	11:57:08	0,284	0,183	0,138	0,119	0,14	0,341	0,362
53	11:57:10	0,282	0,183	0,138	0,12	0,14	0,341	0,36
54	11:57:12	0,282	0,184	0,139	0,12	0,14	0,341	0,36
55	11:57:14	0,282	0,184	0,14	0,12	0,14	0,34	0,361
56	11:57:16	0,281	0,183	0,141	0,121	0,14	0,34	0,361
57	11:57:18	0,282	0,184	0,142	0,121	0,139	0,34	0,361
58	11:57:20	0,281	0,184	0,142	0,122	0,14	0,34	0,361
59	11:57:22	0,281	0,184	0,143	0,123	0,139	0,34	0,362
60	11:57:24	0,28	0,185	0,144	0,124	0,14	0,34	0,362
61	11:57:26	0,278	0,184	0,144	0,124	0,14	0,34	0,361
62	11:57:28	0,278	0,184	0,145	0,125	0,141	0,338	0,36
63	11:57:30	0,279	0,184	0,146	0,126	0,141	0,338	0,36

Продолжение таблицы Г.12 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 6

При расходе 300 м³/ч		Положение № 6			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
64	11:57:32	0,279	0,185	0,146	0,126	0,142	0,338	0,36
65	11:57:34	0,279	0,185	0,147	0,126	0,143	0,338	0,36
66	11:57:36	0,278	0,185	0,147	0,126	0,143	0,338	0,36
67	11:57:38	0,278	0,185	0,147	0,126	0,143	0,338	0,36
68	11:57:40	0,277	0,185	0,147	0,127	0,143	0,338	0,359
69	11:57:42	0,277	0,185	0,146	0,127	0,143	0,338	0,359
70	11:57:44	0,278	0,186	0,146	0,127	0,143	0,338	0,359
71	11:57:46	0,278	0,186	0,145	0,126	0,143	0,338	0,359
72	11:57:48	0,278	0,186	0,145	0,126	0,143	0,338	0,359
73	11:57:50	0,279	0,187	0,146	0,126	0,142	0,338	0,359
74	11:57:52	0,278	0,187	0,146	0,126	0,142	0,337	0,358
75	11:57:54	0,278	0,187	0,145	0,126	0,143	0,338	0,359
76	11:57:56	0,28	0,187	0,145	0,126	0,143	0,338	0,359
77	11:57:58	0,28	0,187	0,145	0,126	0,143	0,338	0,359
78	11:58:00	0,281	0,186	0,145	0,126	0,143	0,338	0,359
79	11:58:02	0,282	0,186	0,145	0,126	0,143	0,338	0,359
80	11:58:04	0,283	0,185	0,145	0,126	0,143	0,337	0,359
81	11:58:06	0,283	0,184	0,145	0,125	0,144	0,338	0,359
82	11:58:08	0,283	0,184	0,145	0,125	0,145	0,338	0,359
83	11:58:10	0,284	0,184	0,145	0,125	0,144	0,338	0,358
84	11:58:12	0,285	0,184	0,145	0,124	0,144	0,337	0,359

Окончание таблицы Г.12 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 6

При расходе 300 м³/ч 19 Гц работа вентилятора приточной установки		Положение № 6 Горизонтальное измерение, стойка датчиков смотрит в камеру			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
85	11:58:14	0,285	0,185	0,145	0,124	0,143	0,337	0,36
86	11:58:16	0,285	0,185	0,145	0,124	0,143	0,337	0,36
87	11:58:18	0,285	0,185	0,145	0,123	0,142	0,337	0,361
88	11:58:20	0,286	0,185	0,145	0,123	0,142	0,337	0,361
89	11:58:22	0,286	0,185	0,145	0,122	0,141	0,337	0,361
90	11:58:24	0,287	0,185	0,145	0,122	0,14	0,337	0,362
$\Sigma_{\text{сред.ариф.}}$		0,284	0,184	0,144	0,117	0,137	0,341	0,361

Таблица Г.13 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 6

При расходе 150 м ³ /ч		Положение № 6			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
1	12:06:06	0,07	0,036	0,029	0,008	0,017	0,041	0,009
2	12:06:08	0,074	0,044	0,026	0,006	0,024	0,048	0,015
3	12:06:10	0,074	0,043	0,027	0,005	0,03	0,052	0,015
4	12:06:12	0,073	0,046	0,03	0,009	0,034	0,051	0,016
5	12:06:14	0,068	0,047	0,033	0,013	0,035	0,05	0,016
6	12:06:16	0,062	0,043	0,033	0,011	0,036	0,049	0,014
7	12:06:18	0,055	0,041	0,031	0,01	0,035	0,046	0,013
8	12:06:20	0,05	0,042	0,03	0,009	0,031	0,042	0,012
9	12:06:22	0,046	0,043	0,028	0,008	0,028	0,04	0,012
10	12:06:24	0,042	0,043	0,029	0,011	0,027	0,039	0,013
11	12:06:26	0,039	0,04	0,031	0,014	0,028	0,037	0,014
12	12:06:28	0,036	0,038	0,032	0,016	0,027	0,035	0,014
13	12:06:30	0,033	0,035	0,031	0,015	0,026	0,033	0,013
14	12:06:32	0,031	0,033	0,03	0,015	0,025	0,031	0,012
15	12:06:34	0,03	0,031	0,029	0,015	0,024	0,03	0,013
16	12:06:36	0,03	0,031	0,03	0,014	0,024	0,029	0,013
17	12:06:38	0,028	0,032	0,03	0,015	0,026	0,029	0,013
18	12:06:40	0,027	0,034	0,032	0,017	0,026	0,029	0,013
19	12:06:42	0,026	0,034	0,034	0,018	0,025	0,027	0,013
20	12:06:44	0,025	0,033	0,035	0,017	0,025	0,026	0,013
21	12:06:46	0,023	0,031	0,034	0,017	0,025	0,026	0,013

Продолжение таблицы Г.13 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 6

При расходе 150 м³/ч		Положение № 6			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
22	12:06:48	0,023	0,03	0,034	0,018	0,024	0,025	0,013
23	12:06:50	0,022	0,029	0,034	0,018	0,024	0,025	0,014
24	12:06:52	0,021	0,029	0,035	0,018	0,024	0,024	0,013
25	12:06:54	0,021	0,03	0,035	0,017	0,025	0,023	0,013
26	12:06:56	0,022	0,029	0,035	0,018	0,025	0,022	0,013
27	12:06:58	0,021	0,028	0,034	0,017	0,024	0,021	0,012
28	12:07:00	0,021	0,027	0,033	0,017	0,024	0,02	0,012
29	12:07:02	0,022	0,027	0,032	0,016	0,023	0,02	0,011
30	12:07:04	0,022	0,026	0,031	0,015	0,023	0,02	0,011
31	12:07:06	0,023	0,027	0,03	0,015	0,023	0,02	0,011
32	12:07:08	0,024	0,027	0,03	0,015	0,024	0,019	0,011
33	12:07:10	0,025	0,027	0,031	0,015	0,024	0,019	0,01
34	12:07:12	0,025	0,027	0,031	0,015	0,024	0,019	0,01
35	12:07:14	0,026	0,028	0,031	0,016	0,023	0,019	0,01
36	12:07:16	0,026	0,029	0,03	0,015	0,023	0,02	0,01
37	12:07:18	0,027	0,03	0,031	0,015	0,022	0,02	0,01
38	12:07:20	0,028	0,03	0,031	0,014	0,022	0,021	0,009
39	12:07:22	0,028	0,03	0,031	0,014	0,022	0,021	0,009
40	12:07:24	0,03	0,031	0,031	0,014	0,021	0,022	0,009
41	12:07:26	0,03	0,03	0,031	0,013	0,021	0,022	0,009
42	12:07:28	0,03	0,03	0,031	0,013	0,02	0,021	0,009

Продолжение таблицы Г.13 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 6

При расходе 150 м³/ч		Положение № 6			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
43	12:07:30	0,031	0,031	0,032	0,013	0,02	0,021	0,009
44	12:07:32	0,032	0,03	0,034	0,013	0,02	0,021	0,009
45	12:07:34	0,033	0,031	0,034	0,013	0,02	0,021	0,008
46	12:07:36	0,034	0,031	0,034	0,012	0,02	0,021	0,008
47	12:07:38	0,035	0,031	0,034	0,012	0,02	0,02	0,008
48	12:07:40	0,036	0,031	0,034	0,012	0,02	0,02	0,008
49	12:07:42	0,037	0,031	0,034	0,012	0,02	0,02	0,008
50	12:07:44	0,038	0,031	0,033	0,011	0,02	0,02	0,008
51	12:07:46	0,038	0,031	0,033	0,011	0,02	0,022	0,009
52	12:07:48	0,038	0,031	0,033	0,011	0,019	0,023	0,011
53	12:07:50	0,039	0,031	0,033	0,011	0,019	0,023	0,012
54	12:07:52	0,04	0,031	0,033	0,011	0,019	0,024	0,013
55	12:07:54	0,04	0,031	0,032	0,01	0,019	0,025	0,015
56	12:07:56	0,041	0,031	0,032	0,011	0,019	0,025	0,016
57	12:07:58	0,041	0,03	0,032	0,011	0,019	0,026	0,018
58	12:08:00	0,041	0,03	0,031	0,01	0,019	0,026	0,019
59	12:08:02	0,041	0,029	0,031	0,01	0,018	0,026	0,02
60	12:08:04	0,042	0,029	0,031	0,01	0,018	0,026	0,021
61	12:08:06	0,042	0,029	0,03	0,01	0,018	0,027	0,021
62	12:08:08	0,043	0,029	0,03	0,01	0,018	0,027	0,022
63	12:08:10	0,042	0,028	0,03	0,01	0,018	0,028	0,023

Продолжение таблицы Г.13 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 6

При расходе 150 м³/ч		Положение № 6			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
64	12:08:12	0,042	0,028	0,03	0,01	0,018	0,029	0,024
65	12:08:14	0,042	0,028	0,03	0,009	0,018	0,029	0,024
66	12:08:16	0,042	0,028	0,03	0,009	0,019	0,03	0,025
67	12:08:18	0,041	0,028	0,029	0,009	0,019	0,031	0,025
68	12:08:20	0,041	0,028	0,029	0,009	0,019	0,031	0,026
69	12:08:22	0,041	0,028	0,029	0,009	0,019	0,032	0,026
70	12:08:24	0,041	0,028	0,028	0,009	0,019	0,033	0,027
71	12:08:26	0,041	0,028	0,029	0,009	0,019	0,034	0,027
72	12:08:28	0,041	0,029	0,029	0,009	0,019	0,034	0,028
73	12:08:30	0,041	0,029	0,029	0,009	0,019	0,035	0,029
74	12:08:32	0,042	0,029	0,029	0,009	0,02	0,035	0,029
75	12:08:34	0,042	0,03	0,029	0,008	0,02	0,036	0,03
76	12:08:36	0,042	0,03	0,028	0,008	0,02	0,036	0,031
77	12:08:38	0,042	0,03	0,028	0,008	0,019	0,037	0,031
78	12:08:40	0,043	0,03	0,028	0,008	0,02	0,037	0,031
79	12:08:42	0,043	0,03	0,028	0,008	0,02	0,038	0,031
80	12:08:44	0,043	0,03	0,028	0,008	0,02	0,038	0,032
81	12:08:46	0,043	0,031	0,028	0,008	0,02	0,038	0,032
82	12:08:48	0,043	0,03	0,028	0,008	0,02	0,038	0,033
83	12:08:50	0,043	0,03	0,029	0,008	0,02	0,039	0,033
84	12:08:52	0,043	0,03	0,029	0,008	0,021	0,039	0,033

Окончание таблицы Г.13 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 6

При расходе 150 м ³ /ч		Положение № 6			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
85	12:08:54	0,044	0,031	0,029	0,008	0,021	0,039	0,033
86	12:08:56	0,044	0,031	0,03	0,008	0,021	0,039	0,033
87	12:08:58	0,043	0,031	0,03	0,008	0,022	0,039	0,033
88	12:09:00	0,044	0,031	0,03	0,008	0,022	0,039	0,033
89	12:09:02	0,044	0,03	0,03	0,008	0,022	0,039	0,033
90	12:09:04	0,043	0,031	0,029	0,008	0,023	0,039	0,034
$\Sigma_{\text{сред.ариф.}}$		0,038	0,032	0,031	0,012	0,022	0,030	0,018

Таблица Г.14 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 7

При расходе 300 м ³ /ч		Положение № 7			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
1	12:00:15	0,267	0,173	0,138	0,114	0,133	0,312	0,336
2	12:00:17	0,264	0,171	0,137	0,113	0,132	0,309	0,332
3	12:00:19	0,261	0,169	0,136	0,113	0,131	0,305	0,327
4	12:00:21	0,257	0,168	0,135	0,112	0,13	0,302	0,323
5	12:00:23	0,254	0,167	0,134	0,112	0,129	0,298	0,318
6	12:00:25	0,251	0,166	0,133	0,111	0,128	0,294	0,314
7	12:00:27	0,247	0,165	0,133	0,11	0,126	0,29	0,311
8	12:00:29	0,244	0,164	0,132	0,11	0,124	0,286	0,307
9	12:00:31	0,241	0,163	0,131	0,109	0,122	0,282	0,303
10	12:00:33	0,238	0,162	0,131	0,108	0,12	0,279	0,3
11	12:00:35	0,235	0,16	0,13	0,107	0,119	0,275	0,296
12	12:00:37	0,233	0,159	0,129	0,106	0,117	0,271	0,292
13	12:00:39	0,229	0,157	0,128	0,105	0,115	0,267	0,289
14	12:00:41	0,225	0,156	0,127	0,103	0,114	0,263	0,286
15	12:00:43	0,222	0,154	0,125	0,103	0,112	0,259	0,282
16	12:00:45	0,219	0,152	0,124	0,101	0,11	0,256	0,279
17	12:00:47	0,217	0,149	0,123	0,1	0,109	0,252	0,275
18	12:00:49	0,214	0,147	0,121	0,098	0,107	0,249	0,272
19	12:00:51	0,211	0,145	0,119	0,097	0,105	0,246	0,268
20	12:00:53	0,209	0,143	0,117	0,095	0,104	0,242	0,265

Продолжение таблицы Г.14 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 7

При расходе 300 м ³ /ч		Положение № 7			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
21	12:00:55	0,206	0,141	0,116	0,094	0,103	0,239	0,262
22	12:00:57	0,204	0,14	0,114	0,092	0,101	0,236	0,259
23	12:00:59	0,203	0,138	0,113	0,091	0,1	0,233	0,255
24	12:01:01	0,201	0,137	0,112	0,09	0,099	0,229	0,251
25	12:01:03	0,198	0,136	0,111	0,088	0,097	0,227	0,248
26	12:01:05	0,195	0,134	0,11	0,086	0,095	0,224	0,244
27	12:01:07	0,193	0,132	0,109	0,085	0,094	0,221	0,24
28	12:01:09	0,192	0,13	0,107	0,083	0,092	0,218	0,237
29	12:01:11	0,19	0,129	0,106	0,081	0,091	0,215	0,235
30	12:01:13	0,187	0,127	0,104	0,079	0,089	0,212	0,231
31	12:01:15	0,184	0,125	0,103	0,078	0,087	0,209	0,228
32	12:01:17	0,183	0,123	0,102	0,076	0,086	0,206	0,224
33	12:01:19	0,182	0,121	0,101	0,074	0,085	0,203	0,221
34	12:01:21	0,179	0,119	0,1	0,073	0,084	0,2	0,217
35	12:01:23	0,177	0,118	0,099	0,072	0,082	0,197	0,213
36	12:01:25	0,176	0,117	0,098	0,07	0,081	0,194	0,21
37	12:01:27	0,174	0,115	0,097	0,068	0,08	0,191	0,206
38	12:01:29	0,172	0,113	0,095	0,067	0,079	0,188	0,203
39	12:01:31	0,169	0,111	0,094	0,065	0,078	0,184	0,199
40	12:01:33	0,167	0,11	0,092	0,064	0,076	0,181	0,195
41	12:01:35	0,164	0,108	0,09	0,062	0,075	0,177	0,191

Продолжение таблицы Г.14 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 7

При расходе 300 м³/ч		Положение № 7			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
42	12:01:37	0,163	0,106	0,089	0,06	0,074	0,173	0,188
43	12:01:39	0,16	0,104	0,087	0,058	0,072	0,17	0,183
44	12:01:41	0,158	0,101	0,085	0,056	0,071	0,166	0,179
45	12:01:43	0,156	0,1	0,084	0,055	0,069	0,162	0,176
46	12:01:45	0,153	0,098	0,082	0,053	0,067	0,16	0,173
47	12:01:47	0,15	0,096	0,08	0,051	0,065	0,156	0,169
48	12:01:49	0,148	0,094	0,078	0,049	0,063	0,152	0,166
49	12:01:51	0,145	0,092	0,077	0,048	0,061	0,149	0,162
50	12:01:53	0,142	0,089	0,075	0,046	0,059	0,145	0,158
51	12:01:55	0,14	0,087	0,073	0,045	0,058	0,141	0,154
52	12:01:57	0,138	0,085	0,072	0,043	0,056	0,137	0,151
53	12:01:59	0,135	0,083	0,071	0,041	0,054	0,134	0,147
54	12:02:01	0,131	0,081	0,07	0,04	0,053	0,13	0,143
55	12:02:03	0,128	0,079	0,069	0,039	0,052	0,126	0,14
56	12:02:05	0,126	0,076	0,068	0,038	0,05	0,122	0,135
57	12:02:07	0,123	0,074	0,066	0,037	0,049	0,119	0,131
58	12:02:09	0,121	0,072	0,064	0,035	0,047	0,115	0,128
59	12:02:11	0,118	0,069	0,063	0,034	0,045	0,111	0,123
60	12:02:13	0,114	0,068	0,062	0,033	0,044	0,107	0,119
61	12:02:15	0,111	0,066	0,061	0,031	0,042	0,104	0,115
62	12:02:17	0,107	0,065	0,06	0,03	0,04	0,1	0,111

Продолжение таблицы Г.14 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 7

При расходе 300 м³/ч		Положение № 7			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
63	12:02:19	0,104	0,063	0,059	0,029	0,039	0,097	0,107
64	12:02:21	0,1	0,062	0,058	0,028	0,037	0,094	0,104
65	12:02:23	0,096	0,061	0,056	0,027	0,036	0,09	0,1
66	12:02:25	0,093	0,059	0,055	0,026	0,034	0,086	0,096
67	12:02:27	0,09	0,057	0,053	0,025	0,033	0,083	0,093
68	12:02:29	0,086	0,056	0,052	0,024	0,032	0,08	0,089
69	12:02:31	0,084	0,053	0,05	0,023	0,031	0,077	0,085
70	12:02:33	0,081	0,051	0,048	0,022	0,031	0,073	0,082
71	12:02:35	0,078	0,049	0,046	0,021	0,031	0,07	0,077
72	12:02:37	0,075	0,047	0,045	0,021	0,03	0,067	0,074
73	12:02:39	0,073	0,045	0,044	0,02	0,03	0,064	0,07
74	12:02:41	0,069	0,043	0,042	0,02	0,03	0,061	0,067
75	12:02:43	0,066	0,041	0,042	0,019	0,029	0,058	0,063
76	12:02:45	0,064	0,039	0,041	0,018	0,027	0,054	0,06
77	12:02:47	0,061	0,037	0,04	0,017	0,027	0,05	0,055
78	12:02:49	0,059	0,035	0,038	0,016	0,026	0,047	0,052
79	12:02:51	0,056	0,032	0,036	0,016	0,025	0,043	0,048
80	12:02:53	0,054	0,03	0,034	0,015	0,024	0,04	0,044
81	12:02:55	0,051	0,028	0,032	0,014	0,023	0,036	0,04
82	12:02:57	0,048	0,026	0,031	0,012	0,022	0,033	0,036
83	12:02:59	0,045	0,024	0,029	0,011	0,021	0,03	0,033

Окончание таблицы Г.14 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 300 м³/ч в положении № 7

При расходе 300 м³/ч		Положение № 7			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
84	12:03:01	0,044	0,023	0,029	0,011	0,021	0,028	0,03
85	12:03:03	0,043	0,022	0,028	0,01	0,021	0,026	0,028
86	12:03:05	0,043	0,022	0,028	0,01	0,021	0,026	0,026
87	12:03:07	0,042	0,021	0,028	0,01	0,021	0,026	0,025
88	12:03:09	0,041	0,021	0,028	0,011	0,021	0,026	0,025
89	12:03:11	0,042	0,021	0,028	0,011	0,021	0,026	0,024
90	12:03:13	0,042	0,022	0,028	0,012	0,021	0,026	0,024
$\Sigma_{\text{сред.ариф.}}$		0,148	0,097	0,082	0,058	0,069	0,159	0,173

Таблица Г.15 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 7

При расходе 150 м³/ч		Положение № 7			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
1	12:06:06	0,07	0,036	0,029	0,008	0,017	0,041	0,009
2	12:06:08	0,074	0,044	0,026	0,006	0,024	0,048	0,015
3	12:06:10	0,074	0,043	0,027	0,005	0,03	0,052	0,015
4	12:06:12	0,073	0,046	0,03	0,009	0,034	0,051	0,016
5	12:06:14	0,068	0,047	0,033	0,013	0,035	0,05	0,016
6	12:06:16	0,062	0,043	0,033	0,011	0,036	0,049	0,014
7	12:06:18	0,055	0,041	0,031	0,01	0,035	0,046	0,013
8	12:06:20	0,05	0,042	0,03	0,009	0,031	0,042	0,012
9	12:06:22	0,046	0,043	0,028	0,008	0,028	0,04	0,012
10	12:06:24	0,042	0,043	0,029	0,011	0,027	0,039	0,013
11	12:06:26	0,039	0,04	0,031	0,014	0,028	0,037	0,014
12	12:06:28	0,036	0,038	0,032	0,016	0,027	0,035	0,014
13	12:06:30	0,033	0,035	0,031	0,015	0,026	0,033	0,013
14	12:06:32	0,031	0,033	0,03	0,015	0,025	0,031	0,012
15	12:06:34	0,03	0,031	0,029	0,015	0,024	0,03	0,013
16	12:06:36	0,03	0,031	0,03	0,014	0,024	0,029	0,013
17	12:06:38	0,028	0,032	0,03	0,015	0,026	0,029	0,013
18	12:06:40	0,027	0,034	0,032	0,017	0,026	0,029	0,013
19	12:06:42	0,026	0,034	0,034	0,018	0,025	0,027	0,013
20	12:06:44	0,025	0,033	0,035	0,017	0,025	0,026	0,013
21	12:06:46	0,023	0,031	0,034	0,017	0,025	0,026	0,013

Продолжение таблицы Г.15 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 7

При расходе 150 м³/ч		Положение № 7			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
22	12:06:48	0,023	0,03	0,034	0,018	0,024	0,025	0,013
23	12:06:50	0,022	0,029	0,034	0,018	0,024	0,025	0,014
24	12:06:52	0,021	0,029	0,035	0,018	0,024	0,024	0,013
25	12:06:54	0,021	0,03	0,035	0,017	0,025	0,023	0,013
26	12:06:56	0,022	0,029	0,035	0,018	0,025	0,022	0,013
27	12:06:58	0,021	0,028	0,034	0,017	0,024	0,021	0,012
28	12:07:00	0,021	0,027	0,033	0,017	0,024	0,02	0,012
29	12:07:02	0,022	0,027	0,032	0,016	0,023	0,02	0,011
30	12:07:04	0,022	0,026	0,031	0,015	0,023	0,02	0,011
31	12:07:06	0,023	0,027	0,03	0,015	0,023	0,02	0,011
32	12:07:08	0,024	0,027	0,03	0,015	0,024	0,019	0,011
33	12:07:10	0,025	0,027	0,031	0,015	0,024	0,019	0,01
34	12:07:12	0,025	0,027	0,031	0,015	0,024	0,019	0,01
35	12:07:14	0,026	0,028	0,031	0,016	0,023	0,019	0,01
36	12:07:16	0,026	0,029	0,03	0,015	0,023	0,02	0,01
37	12:07:18	0,027	0,03	0,031	0,015	0,022	0,02	0,01
38	12:07:20	0,028	0,03	0,031	0,014	0,022	0,021	0,009
39	12:07:22	0,028	0,03	0,031	0,014	0,022	0,021	0,009
40	12:07:24	0,03	0,031	0,031	0,014	0,021	0,022	0,009
41	12:07:26	0,03	0,03	0,031	0,013	0,021	0,022	0,009
42	12:07:28	0,03	0,03	0,031	0,013	0,02	0,021	0,009
43	12:07:30	0,031	0,031	0,032	0,013	0,02	0,021	0,009
44	12:07:32	0,032	0,03	0,034	0,013	0,02	0,021	0,009
45	12:07:34	0,033	0,031	0,034	0,013	0,02	0,021	0,008

Продолжение таблицы Г.15 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 7

При расходе 150 м³/ч		Положение № 7			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
46	12:07:36	0,034	0,031	0,034	0,012	0,02	0,021	0,008
47	12:07:38	0,035	0,031	0,034	0,012	0,02	0,02	0,008
48	12:07:40	0,036	0,031	0,034	0,012	0,02	0,02	0,008
49	12:07:42	0,037	0,031	0,034	0,012	0,02	0,02	0,008
50	12:07:44	0,038	0,031	0,033	0,011	0,02	0,02	0,008
51	12:07:46	0,038	0,031	0,033	0,011	0,02	0,022	0,009
52	12:07:48	0,038	0,031	0,033	0,011	0,019	0,023	0,011
53	12:07:50	0,039	0,031	0,033	0,011	0,019	0,023	0,012
54	12:07:52	0,04	0,031	0,033	0,011	0,019	0,024	0,013
55	12:07:54	0,04	0,031	0,032	0,01	0,019	0,025	0,015
56	12:07:56	0,041	0,031	0,032	0,011	0,019	0,025	0,016
57	12:07:58	0,041	0,03	0,032	0,011	0,019	0,026	0,018
58	12:08:00	0,041	0,03	0,031	0,01	0,019	0,026	0,019
59	12:08:02	0,041	0,029	0,031	0,01	0,018	0,026	0,02
60	12:08:04	0,042	0,029	0,031	0,01	0,018	0,026	0,021
61	12:08:06	0,042	0,029	0,03	0,01	0,018	0,027	0,021
62	12:08:08	0,043	0,029	0,03	0,01	0,018	0,027	0,022
63	12:08:10	0,042	0,028	0,03	0,01	0,018	0,028	0,023
64	12:08:12	0,042	0,028	0,03	0,01	0,018	0,029	0,024
65	12:08:14	0,042	0,028	0,03	0,009	0,018	0,029	0,024
66	12:08:16	0,042	0,028	0,03	0,009	0,019	0,03	0,025
67	12:08:18	0,041	0,028	0,029	0,009	0,019	0,031	0,025
68	12:08:20	0,041	0,028	0,029	0,009	0,019	0,031	0,026
69	12:08:22	0,041	0,028	0,029	0,009	0,019	0,032	0,026

Окончание таблицы Г.15 – Значения измеренных скоростей датчиком «Sensor» при расходе 150 м³/ч в положении № 7

При расходе 150 м³/ч		Положение № 7			Измерения проводились в течение 3 минут			
№	Время	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик	Датчик
70	12:08:24	0,041	0,028	0,028	0,009	0,019	0,033	0,027
71	12:08:26	0,041	0,028	0,029	0,009	0,019	0,034	0,027
72	12:08:28	0,041	0,029	0,029	0,009	0,019	0,034	0,028
73	12:08:30	0,041	0,029	0,029	0,009	0,019	0,035	0,029
74	12:08:32	0,042	0,029	0,029	0,009	0,02	0,035	0,029
75	12:08:34	0,042	0,03	0,029	0,008	0,02	0,036	0,03
76	12:08:36	0,042	0,03	0,028	0,008	0,02	0,036	0,031
77	12:08:38	0,042	0,03	0,028	0,008	0,019	0,037	0,031
78	12:08:40	0,043	0,03	0,028	0,008	0,02	0,037	0,031
79	12:08:42	0,043	0,03	0,028	0,008	0,02	0,038	0,031
80	12:08:44	0,043	0,03	0,028	0,008	0,02	0,038	0,032
81	12:08:46	0,043	0,031	0,028	0,008	0,02	0,038	0,032
82	12:08:48	0,043	0,03	0,028	0,008	0,02	0,038	0,033
83	12:08:50	0,043	0,03	0,029	0,008	0,02	0,039	0,033
84	12:08:52	0,043	0,03	0,029	0,008	0,021	0,039	0,033
85	12:08:54	0,044	0,031	0,029	0,008	0,021	0,039	0,033
86	12:08:56	0,044	0,031	0,03	0,008	0,021	0,039	0,033
87	12:08:58	0,043	0,031	0,03	0,008	0,022	0,039	0,033
88	12:09:00	0,044	0,031	0,03	0,008	0,022	0,039	0,033
89	12:09:02	0,044	0,03	0,03	0,008	0,022	0,039	0,033
90	12:09:04	0,043	0,031	0,029	0,008	0,023	0,039	0,034
$\Sigma_{\text{сред.ариф.}}$		0,038	0,032	0,031	0,012	0,022	0,030	0,018

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Значения концентраций, измеренных счётчиком аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ»

Таблица Г.1 – Значения измеренных концентраций счётчик аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» с изокинетическим пробоотборником

Без притока									
Без пыли									
100 мм над гранулятором					650 мм над гранулятором				
	1 точка 1		1 точка 2			1 точка 1		1 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт
0,3	6142	9930	6439	10327	0,3	6154	9983	7111	11631
0,5	1520	3788	1604	3888	0,5	1563	3829	1933	4520
1	1295	2268	1324	2284	1	1268	2266	1582	2587
2,5	819	973	825	960	2,5	880	998	875	1005
5	141	154	126	135	5	104	118	117	130
10	13	13	9	9	10	14	14	13	13
	2 точка 1		2 точка 2			2 точка 1		2 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт
0,3	5779	9249	6555	10568	0,3	5820	8858	6559	10109
0,5	1381	3470	1655	4013	0,5	1311	3038	1501	3550
1	1215	2089	1311	2358	1	1074	1727	1244	2049
2,5	746	874	888	1047	2,5	605	653	689	805
5	114	128	144	159	5	42	48	107	116
10	14	14	15	15	10	6	6	9	9
	3 точка 1		3 точка 2			3 точка 1		3 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт
0,3	5905	9279	6283	10003	0,3	3986	9264	6531	10404
0,5	1379	3374	1540	3720	0,5	1315	3278	1576	3873
1	1141	1995	1248	2180	1	1088	1963	1320	2297
2,5	716	854	792	932	2,5	752	875	840	977
5	119	138	125	140	5	110	123	124	137
10	19	19	15	15	10	13	13	13	13
	4 точка 1		4 точка 2			4 точка 1		4 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт
0,3	6034	9837	6653	10601	0,3	5971	9470	7072	11949
0,5	1555	3803	1619	3948	0,5	1482	3499	1910	4877
1	1267	2248	1338	2329	1	1188	2017	1652	2967
2,5	825	981	847	991	2,5	721	829	1115	1315
5	137	156	126	144	5	96	108	179	200
10	19	19	18	18	10	12	12	21	21
	5 точка 1		5 точка 2			5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт
0,3	6046	9528	6453	10484	0,3	6244	10103	6770	10978
0,5	1420	3482	1599	4031	0,5	1582	3859	1657	4208
1	1177	2062	1338	2432	1	1290	2277	1459	2551
2,5	761	885	927	1094	2,5	867	987	949	1092

Продолжение таблицы Г.1 – Значения измеренных концентраций счётчик
аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» с изокинетическим пробоотборником

5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
5	109	124	147	167	5	105	120
10	15	15	20	20	10	15	15
Измерение через 2 секунды после засыпания порошка в каждой точке							
100 мм над гранулятором				650 мм над гранулятором			
1 точка 1		1 точка 2		1 точка 1		1 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6126	9665	6635	10447	0,3	6611	10353
0,5	1433	3539	1635	3812	0,5	1678	3742
1	1216	2106	1285	2177	1	1215	2064
2,5	771	890	798	892	2,5	767	849
5	109	119	83	94	5	76	82
10	10	10	11	11	10	6	6
2 точка 1		2 точка 2		2 точка 1		2 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6383	10054	6678	11158	0,3	6407	10223
0,5	1490	3671	1729	4280	0,5	1573	3816
1	1260	2181	1366	2551	1	1190	2243
2,5	781	921	1012	1185	2,5	904	1053
5	107	140	150	173	5	127	149
10	33	33	23	23	10	22	22
3 точка 1		3 точка 2		3 точка 1		3 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6105	9549	6756	10674	0,3	6529	10087
0,5	1436	3444	1665	3918	0,5	1545	3558
1	1157	2008	1341	2253	1	1240	2013
2,5	744	851	811	912	2,5	674	773
5	93	107	89	101	5	73	99
10	14	14	12	12	10	26	26
4 точка 1		4 точка 2		4 точка 1		4 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6125	9738	6738	10766	0,3	6649	10214
0,5	1590	3613	1728	4028	0,5	1509	3565
1	1191	2023	1346	2300	1	1223	2056
2,5	724	832	855	954	2,5	739	833
5	95	180	92	99	5	85	94
10	13	13	7	7	10	9	9
5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6155	9750	5998	9463	0,3	6602	10403
0,5	1531	3595	1445	3465	0,5	1569	3801
1	1183	2064	1195	2020	1	1293	2232
2,5	767	881	735	825	2,5	812	939

Продолжение таблицы Г.1 – Значения измеренных концентраций счётчик
аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» с изокINETическим пробоотборником

5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
5	106	114	68	90	5	121	127
10	8	8	22	22	10	6	6
Измерение через 10 секунд после засыпания порошка в каждой точке							
100 мм над гранулятором				650 мм над гранулятором			
1 точка 1		1 точка 2		1 точка 1		1 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6931	11809	6760	10485	0,3	6090	9478
0,5	1731	4878	1519	3725	0,5	1476	3488
1	1394	3147	1257	2206	1	1132	2012
2,5	995	1753	822	949	2,5	735	880
5	275	758	92	127	5	107	145
10	483	483	35	35	10	38	38
2 точка 1		2 точка 2		2 точка 1		2 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6092	9509	6772	10431	0,3	6013	9806
0,5	1453	3417	1573	3659	0,5	1491	3793
1	1165	1964	1195	2086	1	1170	2302
2,5	706	799	794	891	2,5	752	1132
5	81	93	92	97	5	160	380
10	12	12	5	5	10	220	220
3 точка 1		3 точка 2		3 точка 1		3 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6135	9708	9529	10118	0,3	5851	9153
0,5	1504	3573	1582	3589	0,5	1399	3302
1	1163	2069	1237	2007	1	1133	1903
2,5	780	906	690	770	2,5	710	770
5	97	126	73	80	5	55	60
10	29	29	7	7	10	5	5
4 точка 1		4 точка 2		4 точка 1		4 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6000	9476	6480	10021	0,3	5959	9332
0,5	1468	3476	1597	3541	0,5	1487	3373
1	1131	2008	1183	1944	1	1115	1886
2,5	679	877	682	761	2,5	695	771
5	89	198	75	79	5	71	76
10	109	109	4	4	10	5	5
5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	6047	9243	6564	10257	0,3	5849	9041
0,5	1430	3296	1571	3693	0,5	1427	3192
1	1073	1766	1247	2122	1	1095	1765
2,5	615	693	761	875	2,5	596	670

Продолжение таблицы Г.1 – Значения измеренных концентраций счётчик
аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» с изокинетическим пробоотборником

5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
5	70	78	98	114	5	69	74
10	8	8	16	16	10	5	5
С расходом 300 м3/ч							
Без пыли							
100 мм над гранулятором				650 мм над гранулятором			
1 точка 1		1 точка 2		1 точка 1		1 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	1439	1611	1416	1567	0,3	1524	1873
0,5	112	172	102	151	0,5	173	349
1	33	60	31	49	1	91	176
2,5	22	27	14	18	2,5	71	85
5	3	5	3	4	5	6	14
10	2	2	1	1	10	8	8
2 точка 1		2 точка 2		2 точка 1		2 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	1267	1412	926	1025	0,3	994	1157
0,5	90	145	70	99	0,5	83	163
1	32	55	19	29	1	42	80
2,5	16	23	7	10	2,5	33	38
5	6	7	3	3	5	5	5
10	1	1	0	0	10	0	0
3 точка 1		3 точка 2		3 точка 1		3 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	943	1053	1141	1250	0,3	1343	1609
0,5	79	110	82	109	0,5	136	266
1	19	31	23	27	1	61	130
2,5	9	12	3	4	2,5	60	69
5	2	3	1	1	5	9	9
10	1	1	0	0	10	0	0
4 точка 1		4 точка 2		4 точка 1		4 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	780	867	957	1043	0,3	701	809
0,5	56	87	58	86	0,5	59	108
1	15	31	18	28	1	25	49
2,5	14	16	10	10	2,5	15	24
5	1	2	0	0	5	9	9
10	1	1	0	0	10	0	0
5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	962	1071	536	596	0,3	1620	1904
0,5	69	109	41	59	0,5	162	284
1	28	40	15	18	1	79	122

Продолжение таблицы Г.1 – Значения измеренных концентраций счётчик аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» с изокинетическим пробоотборником

5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
2,5	10	12	2	3	2,5	32	43
5	2	2	0	1	5	5	11
10	0	0	1	1	10	6	6
Измерение через 2 секунды после засыпания порошка в каждой точке							
100 мм над гранулятором				650 мм над гранулятором			
1 точка 1		1 точка 2		1 точка 1		1 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	1464	1933	1576	1906	0,3	2745	4714
0,5	178	469	158	330	0,5	716	1969
1	122	291	71	172	1	604	1253
2,5	104	169	59	101	2,5	436	649
5	38	65	24	42	5	115	213
10	27	27	18	18	10	98	98
2 точка 1		2 точка 2		2 точка 1		2 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	980	1215	1176	1435	0,3	1105	1786
0,5	112	235	138	259	0,5	254	681
1	68	123	65	121	1	218	427
2,5	41	55	40	56	2,5	170	209
5	3	14	7	16	5	26	39
10	11	11	9	9	10	13	13
3 точка 1		3 точка 2		3 точка 1		3 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	1986	2793	2018	2832	0,3	1829	3147
0,5	334	807	361	814	0,5	476	1318
1	245	473	246	453	1	397	842
2,5	163	228	165	207	2,5	290	445
5	36	65	31	42	5	94	155
10	29	29	11	11	10	61	61
4 точка 1		4 точка 2		4 точка 1		4 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	2180	3521	1814	2880	0,3	829	1566
0,5	502	1341	356	1066	0,5	254	737
1	417	839	348	710	1	230	483
2,5	268	422	218	362	2,5	195	253
5	80	154	69	144	5	28	58
10	74	74	75	75	10	30	30
5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	430	701	1161	1715	0,3	2095	3734
0,5	96	271	213	554	0,5	615	1639
1	69	175	180	341	1	567	1024

Продолжение таблицы Г.1 – Значения измеренных концентраций счётчик аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» с изокинетическим пробоотборником

5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
2,5	76	106	131	161	2,5	367	457
5	17	30	24	30	5	64	90
10	13	13	6	6	10	26	26
Измерение через 10 секунд после засыпания порошка в каждой точке							
100 мм над гранулятором				650 мм над гранулятором			
1 точка 1		1 точка 2		1 точка 1		1 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	3166	4992	2810	4032	0,3	1469	2538
0,5	715	1826	551	1222	0,5	408	1069
1	586	1111	361	671	1	366	661
2,5	426	525	264	310	2,5	252	295
5	72	99	41	46	5	34	43
10	27	27	5	5	10	9	9
2 точка 1		2 точка 2		2 точка 1		2 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	1633	2449	1756	2570	0,3	2563	4713
0,5	342	816	388	814	0,5	795	2150
1	244	474	252	426	1	713	1355
2,5	170	230	143	174	2,5	524	642
5	44	60	28	31	5	85	118
10	16	16	3	3	10	33	33
3 точка 1		3 точка 2		3 точка 1		3 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	1014	1440	1825	2653	0,3	495	787
0,5	200	426	361	828	0,5	128	292
1	116	226	240	467	1	87	164
2,5	100	110	194	227	2,5	70	77
5	10	10	28	33	5	7	7
10	0	0	5	5	10	0	0
4 точка 1		4 точка 2		4 точка 1		4 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	1436	2344	1584	2727	0,3	1686	3146
0,5	323	908	429	1143	0,5	559	1560
1	319	585	359	714	1	454	901
2,5	206	266	247	355	2,5	383	447
5	30	60	70	108	5	58	64
10	30	30	38	38	10	6	6
5 точка 1		5 точка 2		5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт
0,3	1076	1752	1777	2911	0,3	772	1346
0,5	256	676	461	1134	0,5	224	574
1	234	420	354	673	1	183	350

Окончание таблицы Г.1 – Значения измеренных концентраций счётчик аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» с изокINETическим пробоотборником

5 точка 1		5 точка 2				5 точка 1		5 точка 2	
Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт	Размер	Дифф	Инт	Дифф	Инт
2,5	158	186	272	319	2,5	140	167	86	99
5	23	28	38	47	5	22	27	12	13
10	5	5	9	9	10	5	5	1	1

Примечание – результаты измерений счетчиком аэрозольных частиц «Handheld 3016-IAQ» выводятся в дифференциальной и интегральной формах.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акты внедрения



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ
ФАРМАЦЕВТИЧЕСКАЯ
ФИРМА «ПОЛИСАН»

ООО «НТФФ «ПОЛИСАН»
ОГРН 1027802736576
ИНН: 7805023934
КПП: 781601001

192102, Санкт-Петербург
ул. Салова, 72, корп. 2, лит. А
тел.: 812 448 2222
e-mail: info@polysan.ru
www.polysan.ru

26.02.2025 № 5/4

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

научно-технических разработок кандидатской диссертации

Ильина Егора Александровича

Обществом с ограниченной ответственностью «НТФФ «ПОЛИСАН»

Настоящий акт подтверждает, что результаты кандидатской диссертации Ильина Е. А. «Совершенствование воздушного режима чистых помещений фармацевтических производств» внедрены в производственный процесс изготовления твёрдых лекарственных форм ООО «НТФФ «ПОЛИСАН».

Эффект разработки состоит в уменьшении риска перекрёстной контаминации и снижает потери на стадиях загрузки сыпучих компонентов в технологическое оборудование.

Генеральный директор

Д. А. Борисов





195009, г. Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., д. 2, литер. Ж, пом. 1Н
Тел./факс: (812) 309-97-81, e-mail: mostek@mostek.spb.ru
www.mostek.spb.ru



Утверждаю
Генеральный директор ООО «МостЭК»
С.В.Куприянов
«25» февраля 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

научно-технических разработок кандидатской диссертации

Ильина Егора Александровича

обществом с ограниченной ответственностью «МостЭК»

Мы, нижеподписавшиеся, технический директор А.В.Доронин, руководитель отдела ОВ и ВК А.Г.Глазов, инженер-проектировщик И.В.Иванов, составили настоящий акт о том, что результаты кандидатской диссертации Ильина Е.А. «Совершенствование воздушного режима чистых помещений фармацевтических производств»:

1. «Расчет скорости движения воздуха с учетом коэффициента стеснения K_c при натекании воздушного потока на гранулятор» внедрены в процесс проектирования промышленных зданий;
2. Рекомендации по проектированию и монтажу систем вентиляции и кондиционирования «чистых помещений» фармацевтических производств внедрены в строительно-монтажный процесс.

Технический директор

А.В.Доронин

Руководитель отдела ОВ и ВК

А.Г.Глазов

Инженер-проектировщик

И.В.Иванов



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)

ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор ФГБОУ ВО СПбГАСУ

С.Г. Головина

27 сентября 2025г.

АКТ

о практическом использовании результатов
 диссертационной работы Ильина Егора Александровича в учебном процессе СПбГАСУ

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой Теплогазоснабжения и вентиляции (ТГВ), канд. техн. наук, доцент Куц Е.В., д-р. техн. наук профессор Уляшева В.М. и канд. техн. наук, доцент Яковлев В.А., составили настоящий акт о том, что научные результаты кандидатской диссертационной работы Ильина Егора Александровича на тему: Совершенствование воздушного режима чистых помещений фармацевтических производств:

- расчет скорости движения воздуха с учетом коэффициента стеснения K_c при натекании воздушного потока на гранулятор;
- рекомендации по проектированию и монтажу систем вентиляции и кондиционирования «чистых помещений» фармацевтических производств;
- данные экспериментальных исследований и численного моделирования систем вентиляции и кондиционирования воздуха «чистых помещений» фармацевтических производств,

используются в учебном процессе на кафедре «Теплогазоснабжения и вентиляции» в лекционных курсах, практических занятиях и курсовом проектировании дисциплин:

1. «Вентиляция» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 08.03.01 Строительство, профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция» (уровень бакалавриат) и 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Энергообеспечение предприятий» (уровень бакалавриат);
2. «Специальные разделы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 08.04.01 Строительство, профиль «Теплогазоснабжение и вентиляция» (уровень магистратура);
3. «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Энергообеспечение предприятий» (уровень магистратуры).

Зав. кафедрой, канд. техн. наук и доцент
 Профессор каф. ТГВ, д.т.н., профессор
 Доцент каф. ТГВ, к.т.н., доцент
 20.01.2025

Е.В. Куц
 В.М. Уляшева
 В.А. Яковлев

ООО «ЭМС»

ОГРН 1237800144845 ИНН 7806616302 КПП 780601001
195027, город Санкт-Петербург, Магнитогорская ул, д. 11 литера Б, помещ. 1-н ком. 27
email: ems-2023@yandex.ru, тел. +7 (994) 424-49-65

25.02.2025 г.

Справка

**об использовании результатов кандидатской диссертации Ильина Е.А. на тему
«Совершенствование воздушного режима чистых помещений фармацевтических
производств»**

Определенные в процессе диссертационного исследования Ильина Е.А. оптимальные параметры для численного моделирования, экспериментальных исследований систем вентиляции и кондиционирования воздуха «чистых помещений» фармацевтических производств и разработанный расчет скорости движения воздуха с учетом коэффициента стеснения K_c при натекании воздушного потока на гранулятор используется специалистами нашей компании при инженерных расчетах и численном моделировании воздушораспределения в помещениях промышленного назначения.

Генеральный директор
ООО «ЭМС»



Р.В. Корнев