

На правах рукописи

ЧЕРНЯКОВ Евгений Вадимович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПОДГОТОВКИ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ**

Специальность: **05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет» на кафедре теплогазоснабжения и экспертизы недвижимости

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Стоянов Николай Иванович

Официальные оппоненты: **Кузнецов Сергей Николаевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра теплогазоснабжения и нефтегазового дела, профессор;

Уляшева Вера Михайловна
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, профессор;

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (Университет ИТМО) Институт холода и биотехнологий**

Защита диссертации состоится «22» декабря 2014 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.06 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета.

Тел./Факс: (812) 316-58-72 E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru

Автореферат разослан _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент

Пухкал Виктор Алексеевич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. С начала XXI века наблюдается неуклонный рост потребности в чистых производственных помещениях, классифицируемых по ГОСТ Р ИСО 14644-1: Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды.

Обусловлен этот рост двумя основными тенденциями развития высокотехнологичных производств, обозначенными У. Уайтом, А. Е. Федотовым, Гансом Г. Шихтом и другими экспертами в области чистых помещений:

- ускоряющийся рост объемов продукции, производимой в условиях промышленной чистоты;
- устойчивая тенденция к минимизации размеров производимых устройств и элементов.

Таким образом, принимая во внимание обозначенные тенденции, а также учитывая тот факт, что многие изделия, производимые в чистых помещениях, являются результатом реализации последних достижений в соответствующих областях науки и техники, можно с полной уверенностью утверждать, что спрос на чистые помещения со временем будет только возрастать.

Основной причиной сдерживания массового распространения чистых помещений являются высокие финансовые затраты при их строительстве и эксплуатации.

Так, согласно анализу, проведенному экспертом в области чистых помещений Ллойдом Кроствейтом, капитальные затраты при строительстве чистых помещений для нужд полупроводниковой промышленности составляют в среднем 18000 – 40000 долларов США на каждый квадратный метр площади.

В то же время, эксплуатационные затраты, соответствующие чистому помещению по производству полупроводников, зачастую составляют более 1 000 000 долларов США в год.

Таким образом, суммарные эксплуатационные затраты чистого помещения за время его эксплуатации, превышают капитальные затраты в несколько раз.

В результате анализа распределения эксплуатационных затрат ряда действующих производств, использующих чистые помещения, было выявлено, что одним из основных потребителей энергии выступают системы вентиляции и кондиционирования воздуха (более 40% потребляемой энергии).

Это обусловлено тем, что поддержание высокого класса чистоты производственной зоны обеспечивается главным образом за счет увеличения объема воздуха, подаваемого в чистое помещение.

К настоящему времени проведена серия исследований и экспериментов, направленных на исследование энергоэффективности как системы вентиляции и кондиционирования в целом, так и каждого компонента системы в отдельности.

Наиболее экономичным решением данной проблемы является использование систем рециркуляции воздуха.

В настоящее время растет количество чистых помещений, в которых недопустимо использование рециркуляции воздуха. Примером могут служить по-

мещения, в которых ведется работа с веществами, представляющими опасность химического загрязнения и бактериологического заражения.

Таким образом, вопрос сокращения эксплуатационных затрат в подобных помещениях за счет совершенствования систем вентиляции и кондиционирования воздуха чистых помещений имеет первостепенное значение для развития ряда высокотехнологичных производств.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическими основами работы стали исследования российских и зарубежных ученых, посвященных проблеме энергосбережения в чистых помещениях: А. Е. Федотова, W. Whyte, Hans H. Schiht, W. K. Brown, S.C. Hu, M. Matsuki, R. Schrecengost, P. Naughton, T. Xu и др., а также трудов научно-исследовательских и проектных институтов.

Цель и задачи исследования.

Цель работы – повышение энергоэффективности систем подготовки и распределения воздуха чистых помещений за счет совершенствования схемы кондиционирования воздуха, а также оптимизации скорости потока воздуха на входе в чистое помещение.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

- анализ преимуществ и недостатков существующих систем подготовки и распределения воздуха чистых помещений, с точки зрения их конструктивных и энергетических особенностей;
- оценка применимости существующих систем подготовки и распределения воздуха к чистым помещениям, в которых ведется работа с веществами, представляющими опасность химического и биологического загрязнения;
- выявление основных факторов, влияющих на поддержание требуемого класса чистоты рабочей зоны;
- разработка схемы установки кондиционирования воздуха для нужд чистых помещений, в которых недопустимо применения рециркуляции воздуха;
- анализ существующих математических моделей, используемых в вычислительной гидродинамике (CFD - Computational Fluid Dynamics) с целью подбора наиболее рациональной модели для проведения численного моделирования воздухораспределения в чистом помещении;
- разработка численной модели чистого помещения средствами CFD, учитывающей влияние скорости приточного воздуха на входе в чистое помещение на перенос аэрозольных загрязнителей и время стабилизации воздушного потока, с учетом движения оператора;
- проведение физических лабораторных исследований с целью подтверждения адекватности выбора математической модели для прогнозирования воздухораспределения в пространстве чистого помещения;
- выявление зависимостей между скоростью приточного воздуха и переносом частиц аэрозольного загрязнителя в рабочей зоне чистого помещения, а также скоростью восстановления (стабилизации) воздушного потока, нарушение которого было вызвано движением персонала внутри этой зоны;
- выбор рациональной скорости воздушного потока;

- оценка энергетической и экономической эффективности предложенной установки кондиционирования, в сравнении с другими установками, применяемыми в чистых помещениях.

Объектом исследования являются чистые помещения, классифицируемые по ГОСТ Р ИСО 14644-1 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды.

Предметом исследования являются системы вентиляции и кондиционирования воздуха, используемые в чистых помещениях.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Разработана принципиальная схема энергоэкономичной прямоточной установки подготовки воздуха, включающая тепловой насос с возможностью регулирования теплопроизводительности (холодопроизводительности) теплообменников, для чистых помещений, в которых ведется работа с веществами, представляющими опасность химического и биологического загрязнения.

2. На базе численного моделирования процессов воздухораспределения в пространстве чистого помещения в формате 3D, выявлена зависимость между скоростью приточного воздуха и эффективностью удаления частиц аэрозольного загрязнителя, а также временем восстановления (стабилизации) воздушного потока.

3. Разработаны теоретически и экспериментально обоснованные рекомендации по выбору оптимальной скорости потока воздуха на входе в чистое помещение.

4. Подтверждена адекватность выбора математического подхода и модели турбулентности, используемых при численном моделировании.

5. Обоснована экономическая эффективность прямоточной установки подготовки воздуха с применением теплового насоса как альтернативного источника энергии.

Методологической основой диссертационного исследования послужили основные положения российских и международных стандартов в области классификации, проектирования, испытания и эксплуатации чистых помещений.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирования воздуха, газоснабжение и освещение: п. 1. «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии».

Практическая ценность и реализация результатов исследований.

Результаты диссертационного исследования имеют практическую ценность при разработке соответствующих государственных стандартов (серия стандартов ГОСТ Р ИСО 14644), в соответствии с письмом №161 от 23.10.2013 от Ассоциации инженеров по контролю загрязнений (АСИНКОМ).

Результаты, полученные с помощью численной модели, также имеют существенное значение для дальнейших исследований процессов воздухораспределения в пространстве чистого помещения, в соответствии с письмом от Института механики жидкости и тепломассообмена Венского технического уни-

верситета от 15.04.2012 и заключением Гонконгского университета науки технологии от 28.05.2013.

Результаты диссертационного исследования были использованы при разработке проекта строительства чистых помещений по объекту «Научно-лабораторный корпус по адресу: пр. Кулакова, 2 в 527 квартале г. Ставрополя» в разделе «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха», в соответствии с актом внедрения №87/1 от 16.04.14 от ОАО «Ставропольский Электронпроект (СТЭП).

Результаты исследования используются в учебном процессе по дисциплине «Современные энергоэффективные технологии для систем теплоснабжения, газоснабжения и теплоисточников» при подготовке магистров по направлению подготовки 270800.68 Строительство в институте строительства, транспорта и машиностроения ФГАОУ ВПО Северо-Кавказский федеральный университет.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на 13-й ежегодной международной конференции «Indoor Air Quality and Climate 2014», проводимой международным обществом по исследованию качества воздуха в помещении (International Society for Indoor Air Quality and Climate, ISIAQ), Гонконг, КНР, 7-12 июля 2014 года; III всероссийской молодежной конференции «Устойчивость, безопасность и энергоресурсосбережение в современных архитектурных, конструктивных, технологических решениях и инженерных системах зданий и сооружений», проводимой на базе Московского государственного строительного университета; V международной научной конференции «Научный потенциал XXI в.»; I ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону»; XL научно-технической конференции по итогам работы профессорско-преподавательского состава СевКавГТУ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе: 2 статьи в периодических научных и научно-технических изданиях, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций; 2 статьи в профильном журнале «Технология чистоты», издаваемом ассоциацией инженеров по контролю микрозагрязнений (АСИНКОМ); 1 публикация, включенная в базу цитирования Scopus; сделано 5 докладов на научно-технических конференциях различного уровня, по которым опубликованы материалы докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав с выводами по каждой из них, общих выводов. Диссертация содержит 165 страниц машинописного текста, 15 таблиц, 55 рисунков, 64 формулы, 5 приложений и список использованной литературы из 114 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, поставлены цели и задачи, обоснована научная и практическая значимость работы.

В первой главе приведена классификация чистых помещений по концентрации взвешенных в воздухе частиц (аэрозолей); проведен анализ преимуществ и недостатков существующих систем подготовки и распределения воздуха чистых помещений, с точки зрения их конструктивных и энергетических

особенностей; выполнена оценка применимости существующих систем подготовки и распределения воздуха к чистым помещениям, в которых ведется работа с веществами, представляющими опасность химического и биологического загрязнения.

Во второй главе разработана принципиальная схема энергоэкономичной прямоточной установки кондиционирования воздуха для чистых помещений, в которых ведется работа с веществами, представляющими опасность химического и биологического загрязнения; обозначены основные преимущества предложенной схемы в сравнении с существующими системами кондиционирования воздуха.

В третьей главе проведен анализ основных методов расчета турбулентных течений, и математических моделей турбулентности, реализованных в коммерческих и научных пакетах CFD, преследующий цель выбора рационального метода и модели турбулентности при моделировании воздушных потоков в чистом помещении.

В четвертой главе разработана численная модель воздухораспределения в пространстве чистого помещения, учитывающая влияние движения оператора; проведен анализ факторов, влияющих на эффективность удаления частиц аэрозольного загрязнителя из рабочей зоны чистого помещения; выявлены зависимости между скоростью приточного воздуха и эффективностью удаления частиц загрязнителя, а также временем стабилизации воздушного потока; даны рекомендации по выбору оптимальной скорости воздушного потока.

В пятой главе проведено экспериментальное исследование влияния скорости приточного воздуха на время стабилизации воздушного потока в полностью функционирующем чистом помещении; выполнена оценка погрешности измерений; по результатам сравнительного анализа результатов экспериментального исследования и результатов численного моделирования подтверждена адекватность выбора математического подхода и модели турбулентности, примененных при численном моделировании.

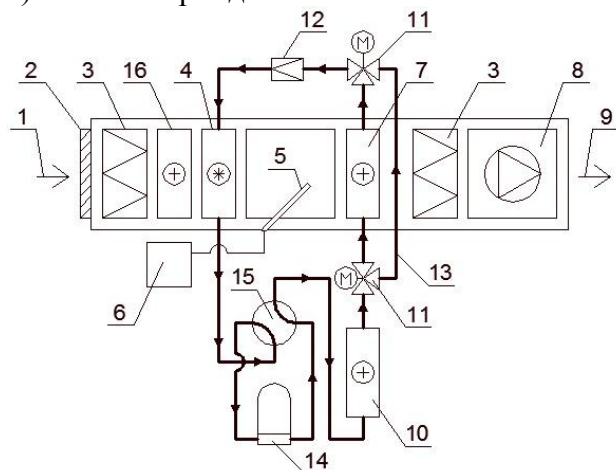
В шестой главе выполнена оценка энергетической и экономической эффективности предложенных мер по сокращению эксплуатационных затрат.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

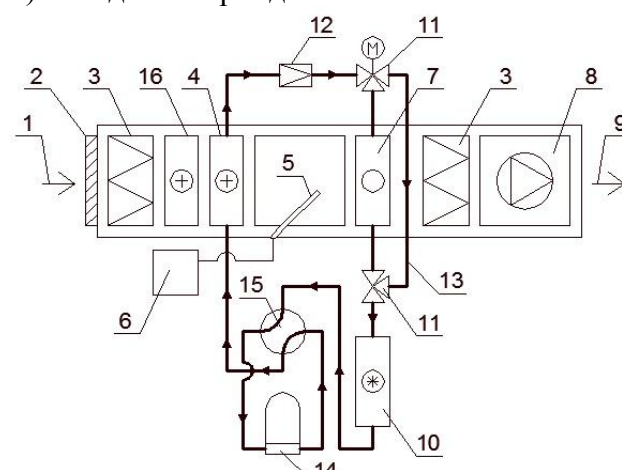
1. Разработана принципиальная схема энергоэкономичной прямоточной установки подготовки воздуха, включающая тепловой насос с возможностью регулирования теплопроизводительности (холодопроизводительности) теплообменников, для чистых помещений, в которых ведется работа с веществами, представляющими опасность химического и биологического загрязнения.

С целью сокращения затрат энергии при подготовке воздуха автором была разработана принципиальная схема прямоточной установки подготовки воздуха, представленная на рис. 1 (подана заявка на получение патента на изобретение № 2013118749 от 23.04.2013 г.).

а) теплый период



б) холодный период

**Рис. 1. Предложенная схема установки подготовки воздуха для чистых помещений**

1 – поток наружного воздуха; 2 – воздушный клапан; 3 – воздушный фильтр;
 4, 7, 10 – фреоновый теплообменник; 5 – трубка, подающая пар; 6 – парогенератор;
 8 – вентилятор; 9 – поток подготовленного воздуха; 11 – трехходовой клапан;
 12 – дросселирующее устройство; 13 – байпас; 14 – компрессор; 15 – четырехходовой клапан; 16 – электрический воздухонагреватель.

В предложенной схеме теплообменники 4, 7, 10 объединены в единый гидравлический контур с циркулирующим хладагентом в цикле парокомпрессионной холодильной машины (ПКХМ). В зависимости от направления движения хладагента в контуре, теплообменники 4, 7, 10 могут выступать как в роли испарителей, так и в роли конденсаторов ПКХМ.

В теплый период года теплообменник 4 функционирует в качестве охладителя наружного воздуха с непосредственным охлаждением хладагента (испаритель ПКХМ). В свою очередь, теплообменник 7 выступает в роли воздухонагревателя второго подогрева (конденсатор ПКХМ).

В ПКХМ количество тепловой энергии, отводимой от конденсатора, превышает количество тепловой энергии, подводимой к испарителю на величину, равную мощности компрессора. Однако, количество тепловой энергии, необходимой для дополнительного нагрева воздуха в воздухонагревателе второго подогрева, значительно меньше количества тепловой энергии «отбираемой» у воздуха в секции охлаждения.

В связи с этим, теплообменник 10 в теплый период выступает в роли дополнительного конденсатора, через который отводится часть тепловой энергии, тем самым обеспечивается стабильная работа всей установки. В роли дополнительного регулятора выступает байпас 13, позволяющий в случае необходимости уменьшать количество хладагента, проходящего через теплообменник 7.

В холодный период года четырехходовой клапан 15 меняет направление потока хладагента в контуре на противоположное. Теплообменник 4 выступает в роли конденсатора (воздухонагревателя), а теплообменник 10 - в роли испарителя. Теплообменник 7 исключен из цикла. Поток хладагента с помощью трехходовых клапанов 11 направляется по обводной линии 13.

В целях повышения надежности установки в ней присутствует электрический воздухонагреватель 16 - на тот случай, если теплопроизводительности

теплообменника 4 будет недостаточно для поддержания требуемой температуры приточного воздуха в холодный период года.

Преимущества предложенной установки в сравнении с проточной установкой кондиционирования воздуха:

- для нагрева воздуха в секции воздухонагревателя 7 в теплый период не используются дополнительные источники тепловой энергии, в роли которых обычно выступают водяные воздухонагреватели, получающие энергию от котельной или индивидуального теплового пункта (ИТП);

- отсутствует необходимость устройства дополнительного гидравлического контура с теплоносителем, циркулирующим между котельной/ИТП и установкой кондиционирования воздуха, как в холодный, так и в теплый период года.

Преимущества предложенной установки в сравнении с установкой кондиционирования воздуха, основанной на использовании теплоутилизатора с промежуточным теплоносителем:

- в предложенной установке теплообменники 4 и 7 способны полностью покрыть потребность установки в тепловой энергии для нагрева наружного воздуха в холодный период и дополнительного нагрева приточного воздуха в теплый период, в то время как теплоутилизатор с промежуточным теплоносителем способен покрыть лишь часть этой потребности;

- эффективность установки не зависит от параметров удаляемого воздуха;

- отсутствие капитальных затрат на сооружение гидравлического контура, а также эксплуатационных затрат на его обслуживание;

- отсутствие гидравлического контура с промежуточным теплоносителем повышает надежность всей системы.

В сравнении с существующими установками с тепловым насосом предложенная установка характеризуется более высоким холодильным коэффициентом. Это обусловлено тем, что в предложенной схеме хладагент проходит два этапа охлаждения:

- первый - в дополнительном теплообменнике 10, когда хладагент отдает тепловую энергию наружному воздуху или воде из водопровода;

- второй - в теплообменнике 7, когда хладагент отдает тепловую энергию воздуху с температурой точки росы или ниже.

Таким образом, в теплообменнике 7 происходит переохлаждение жидкого хладагента, что приводит к уменьшению необратимых потерь при дальнейшем дросселировании, уменьшению парообразования при дросселировании, увеличению удельной холодопроизводительности цикла и холодопроизводительности машины в целом, повышению энергетической эффективности цикла, то есть увеличению холодильного коэффициента.

Переохлаждения хладагента уже достаточно давно применяется для повышения холодильного коэффициента ПКХМ. Однако в существующих установках охлаждение хладагента, поступающего в теплообменник, в большинстве случаев осуществляется водой. Использование воды в качестве промежуточного теплоносителя обладает рядом недостатков в сравнении с авторской схемой, основанной на использовании охлажденного приточного воздуха, так как:

- возникает дополнительная потребность в холодной воде, которая должна быть должным образом подготовлена (очищена);
- появляются дополнительные расходы энергии на обеспечение циркуляции холодной воды;

- возрастают капитальные затраты, а также снижается надежность всей системы, что обусловлено сооружением дополнительного гидравлического контура.

Действительный холодильный коэффициент предложенной схемы $\varepsilon_{Д2}$, выше, чем для одноступенчатой холодильной машины с водяным теплообменником (переохладителем) $\varepsilon_{Д1}$:

$$\varepsilon_{Д1} = \frac{Q_0 + \Delta Q_{OT}}{N_e + \sum N_{НАС} + N_{В.Н.Т}} < \varepsilon_{Д2} = \frac{Q_0 + \Delta Q_{OT}}{N_e + \sum N_{НАС}} \quad (1)$$

где Q_0 - заданная холодопроизводительность, Вт; ΔQ_{OT} - увеличение холодопроизводительности, Вт; N_e - эффективная мощность компрессора, Вт; $\sum N_{НАС}$ - суммарная мощность насосов или вентиляторов, необходимая для движения воды или воздуха через конденсатор и испаритель, а также мощность масляных насосов, компрессоров, Вт; $N_{В.Н.Т}$ - мощность привода насоса гидравлического контура, Вт (в авторской схеме $N_{В.Н.Т} = 0$).

Охлаждение жидкого рабочего вещества перед дроссельным вентилем можно также осуществить за счет холодного пара, идущего из испарителя, т.е. за счет применения процесса регенерации.

Действительный холодильный коэффициент предложенной схемы $\varepsilon_{Д2}$ выше, чем одноступенчатой холодильной машины с регенеративным теплообменником $\varepsilon_{Д3}$, вследствие отсутствия необходимости увеличения мощности, затрачиваемой на привод компрессора в связи с повышением температуры всасывания ($\Delta N_e = 0$):

$$\varepsilon_{Д3} = \frac{Q_0 + \Delta Q_{OT}}{N_e + \sum N_{НАС} + \Delta N_e} < \varepsilon_{Д2} = \frac{Q_0 + \Delta Q_{OT}}{N_e + \sum N_{НАС}} \quad (2)$$

где ΔN_e - увеличение мощности, затраченной на привод компрессора из-за повышения температуры всасывания, Вт.

В процессе работы установки теплообменник 10 может быть использован как дополнительный источник тепловой энергии (в теплый период) или «холода» (в холодный период) для нагрева/охлаждения воды или другой жидкости для нужд чистого помещения или смежных с ним. Она также может быть использована в вентиляционных установках, обеспечивающих требуемые параметры микроклимата в административных помещениях, расположенных в здании.

2. На базе численного моделирования процессов воздухораспределения в пространстве чистого помещения в формате 3D, выявлена зависимость между скоростью приточного воздуха и эффективностью удаления частиц аэрозольного загрязнителя, а также временем восстановления (стабилизации) воздушного потока.

При постановке основной задачи, а также в ходе ее решения автор опирался на результаты численного моделирования и реальных экспериментов в обла-

сти воздухораспределения, которые уже были проведены другими исследователями. Так S-J Yang и W-S Fu провели исследования, направленные на изучение влияния движения оператора на удаление частиц загрязнителя в непосредственной близости от рабочего места оператора. Y-C Shih исследовал влияние движения оператора на распределение воздушных потоков внутри турбулентно вентилируемого помещения. М.Н. Saidi исследовал влияние местоположения источника загрязнений на распределение загрязнителя в чистом помещении.

В соответствии с поставленными задачами была разработана численная модель воздухораспределения в чистом помещении, учитывающая влияние движения оператора.

Выбор расчетных комплексов. Для дискретизации расчетных областей со сложной геометрической топологией был использован программный комплекс Ansys ICEM-CFD. Для более простой геометрии использовался Ansys GAMBIT. Расчет и обработка полученных результатов производились в программном комплексе Ansys FLUENT. Визуализация полученных результатов осуществлялась в программе Tecplot360.

Пространственная модель. В рамках данной работы была создана численная модель чистого помещения с размерами 3 x 6 x 2,8 м (рис. 2). Данные размеры соответствуют размерам чистых помещений в исследовательских центрах и учебных заведениях, в которых автор имел возможность работать над своими исследованиями: в лаборатории наноцентра Венского технического университета (ZMNS - TUW), в чистых помещениях Гонконгского университета науки и технологии (NFF - HKUST) и в Швейцарской высшей технической школе Цюриха (FIRST - ETH Zurich), а также экспериментальному чистому помещению компании Cleanroom Technology Austria GmbH.

В качестве схемы воздухораспределения для данной модели была выбрана широко распространенная схема с вертикальным однонаправленным потоком воздуха, при 100%-ном покрытии потолка фильтрами. Удаление воздуха осуществляется через перфорированные панели, образующие фальшпол чистого помещения.

Согласно поставленной задаче, оператор движется прямолинейно вдоль оси Z с постоянной скоростью равной 1 м/с.

Создание расчетной сетки. При решении поставленной задачи была использована неструктурированная сеточная технология.

Для сжимающихся/расширяющихся объемов, а также относительно простой геометрии, была выбрана гексаэдральная расчетная сетка с применением технологии Cooreg, которая является наиболее удобным решением при работе с изменяемыми поверхностями. Эта технология позволяет строить объемную неструктурированную сетку путем экструзии вдоль тела двумерной сетки с торцевой поверхности. Размер ребра гексаэдра составляет 50мм. Для достаточно сложного с геометрической точки зрения объема, которым является блок оператора, была выбрана тетраэдральная расчетная сетка (размер ребра тетраэдра составляет 10мм), на основе метода граничной коррекции (Octree/Quadtree).

В результате наложения сеток на модель, было получено 264559 тетраэдральных и 286276 гексаэдральных расчетных ячеек.

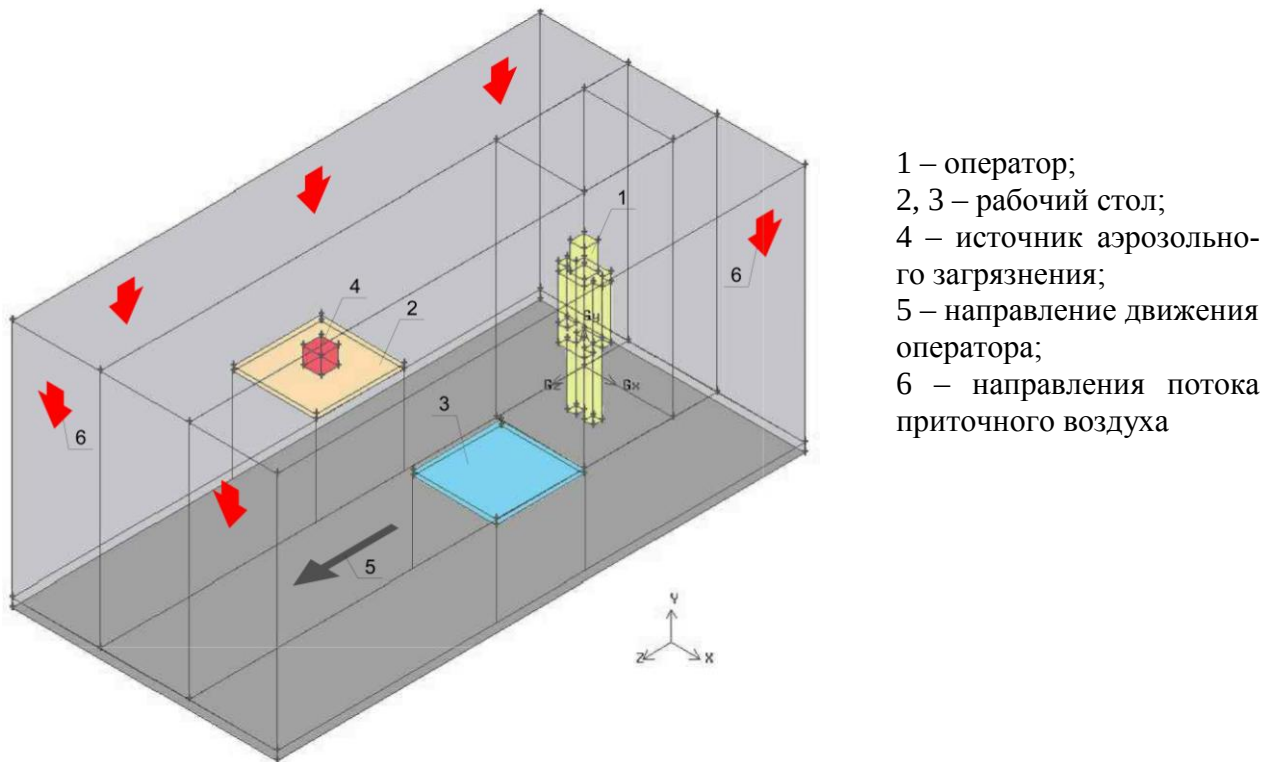


Рис. 2. Геометрическая модель чистого помещения (общий вид 3D)

Основные уравнения и параметры модели. Так как в чистых помещениях концентрация частиц (аэрозольного загрязнителя) в воздухе находится на очень низком уровне, то эти частицы не оказывают влияния на гидродинамику воздушного потока. В результате чего, проведя ряд преобразований в отношении определяющих уравнений, а именно уравнения неразрывности или сохранения массы и уравнения изменения количества движения, можно получить уравнение движения в форме Навье-Стокса. Для решения уравнений Навье-Стокса был использован метод осреднения по Рейнольдсу (RANS). Для замыкания уравнений RANS была использована модель турбулентности, основанная на решении двух транспортных дифференциальных уравнений для расчета кинетической энергии k и турбулентной диссипации ε (стандартная модель k - ε).

Уравнения для k и ε имеют следующий вид:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \rho \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, $\text{м}^2/\text{с}^2/\text{с}$; μ , μ_t – коэффициенты кинематической молекулярной и турбулентной вязкости, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$; τ_{ij} – компоненты тензора

рейнольдсовых напряжений, $\text{м}^2/\text{с}^2$; δ_{ij} – символ Кронекера ($i = j \rightarrow \delta_{ij} = 1$; $i \neq j \rightarrow \delta_{ij} = 0$); $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – значения числа Прандтля для k и ε , соответственно; $c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}, C_\mu$ – модельные константы ($c_{\varepsilon 1} = 1,44$; $c_{\varepsilon 2} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$).

В качестве основного алгоритма сегрегации был выбран – SIMPLE. Данный алгоритм использует связь скорости и корректировок давлений для обеспечения сохранения массы, а также, чтобы получить поля давлений.

В качестве граничных условий на границе вязкой жидкости и твердого тела были выбраны «no-slip boundary conditions».

В расчете также была использована пристеночная функция, что позволило повысить точность моделирования турбулентного пограничного слоя на сравнительно грубой сетке. В решении поставленной задачи была использована функция, описанная в работе В.Е. Launder и D. B. Spalding. Данная функция получила широкое распространение в решении различных прикладных задач, связанных с моделированием потоков жидкости и газа. В программном комплексе FLUENT данная функция именуется как «Standard Wall Function».

Расчет начального значения турбулентной кинетической энергии k для поверхности, через которую осуществляется подача воздуха в чистое помещение, был произведен в соответствии со следующей эмпирической формулой:

$$k = 0,002 \cdot V^2 \quad (7)$$

где V – скорость воздушного потока на входе в чистое помещение, м/с.

Подобное соотношение, согласно работе S.C. Hu, соответствует значению турбулентной интенсивности на уровне 4%, что является наиболее корректной величиной при моделировании воздушных потоков в чистом помещении, в соответствии с рядом проведенных численных и физических экспериментов.

Для определения значения скорости диссипации турбулентной энергии применялась формула, представленная в работе Ферцигера:

$$\varepsilon = k^{3/2} \cdot L \quad (8)$$

где L – масштаб турбулентности, равный 10 мм, что соответствует размеру ячейки высокоэффективного воздушного фильтра, через который осуществляется подача воздуха в чистое помещение.

Основные параметры расчета с учетом движения оператора следующие:

- шаг по времени (Time step size) – 0,1 с;
- количество шагов по времени (Number of time steps) – 300;
- количество итераций для одного шага (Max iterations/time step) – 5000;
- автосохранение результатов моделирования – каждые 5 временных шагов.

В дополнение к уже обозначенным параметрам модели, для моделирования процесса воздухораспределения в пространстве чистого помещения с учетом движения оператора была использована динамическая сетка, а также UDF (User-Defined Function). Для данной модели автором была составлена функция, позволяющая описать характер движения оператора вдоль одной из стен чистого помещения.

Согласно поставленной задаче, в пространство модели (рис. 2) было произведено 5 введений индикаторных частиц: по 5 частиц сферической формы на каждую из 5-ти плоскостей источника загрязнений в течение первых пяти се-

кунд моделирования. Таким образом, в сумме в пространство чистого помещения было введено 125 частиц.

Диаметр индикаторных частиц составляет 0,3 мкм. Данный размер соответствует одному из характерных диаметров частиц загрязнителя, которые, как правило, учитываются при определении класса чистоты помещения согласно ГОСТ Р ИСО 14644-1. Плотность индикаторных частиц составляет 1 г/см³.

Траектория движения дискретной фазы (аэрозольных частиц) описывается путем интеграции балансовых сил на частицу в Лагранжевой системе координат. Этот баланс сил приравнивает силы инерции частиц с силами, действующими на частицы.

Весь процесс моделирования происходил в три этапа:

- анализ скоростей и направления потоков воздуха при неподвижном операторе;

- исследование влияния скорости потока приточного воздуха на перенос аэрозольных загрязняющих веществ в пространстве чистого помещения за счет возмущений, возникающих вокруг движущегося оператора. Область скоростей воздушного потока - от 0,01 м/с до 1,0 м/с;

- исследование влияния скорости воздушного потока на входе в чистое помещение на время восстановления (стабилизации) этого потока после возмущения, вызванного движущимся оператором вдоль одной из осей помещения.

Результаты численного моделирования.

Анализ скоростей и направления потоков воздуха при неподвижном операторе. В результате предварительного расчета было установлено, что при отсутствии движения внутри чистого помещения воздух обтекает оператора без существенных возмущений. Таким образом, даже одна из самых низких скоростей воздушного потока (0,1 м/с) способна поддерживать стабильный однопоточный поток воздуха (рис. 3а).

Однако, вне зависимости от скорости приточного воздуха в чистом помещении образуются рециркуляционные зоны, в которых может накапливаться значительное количество частиц, например зона, расположенная непосредственно под рабочим столом (рис. 3б).

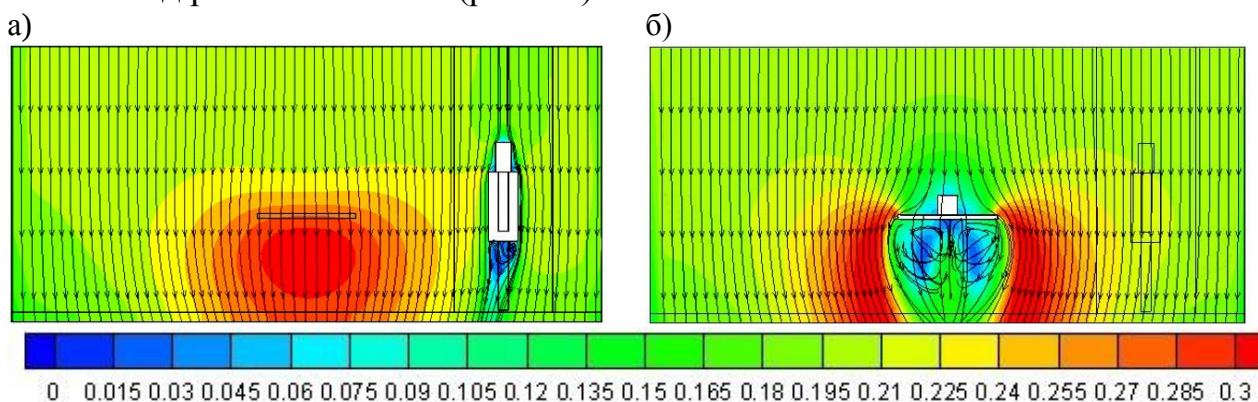


Рис. 3. Линии тока и поле модуля скорости при скорости воздушного потока на входе в чистое помещение – 0,2 м/с

а – в разрезе Y–Z, проходящем через неподвижный манекен; б – в разрезе Y–Z, проходящем через источник загрязнения

Исследование влияния скорости воздушного потока при подаче в чистое помещение на перенос аэрозольных загрязняющих веществ. В результате проведения численного моделирования были установлены зависимости между скоростью приточного воздуха и эффективностью удаления частиц из рабочей зоны чистого помещения с учетом движения оператора. В графической форме зависимость представлена на рис. 4.

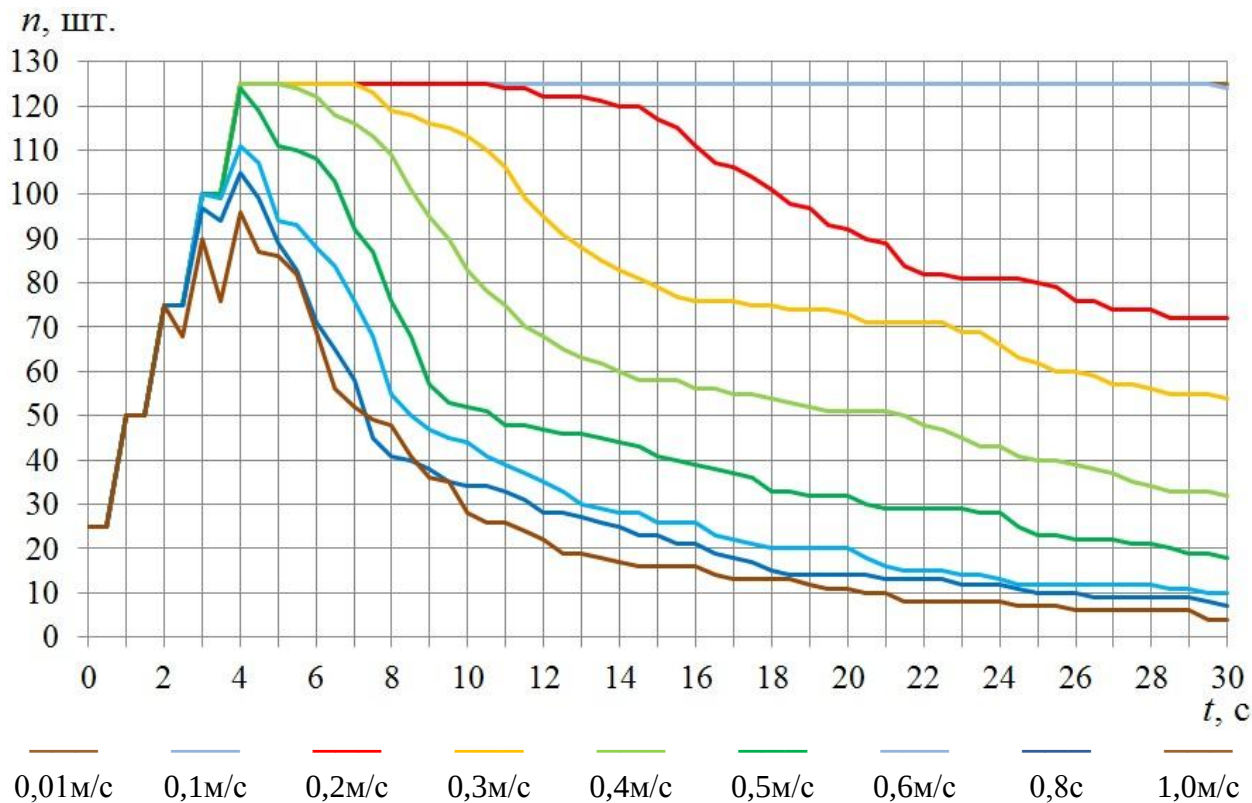


Рис. 4. Эффективность удаления частиц загрязнителя n за время t

При анализе рис. 4 было установлено, что скорость приточного воздуха напрямую влияет на скорость удаления частиц из чистой зоны. Однако, были выявлены некоторые особенности:

- скорости в диапазоне от 0,01 м/с до 0,1 м/с недостаточно для удаления частиц в течение всего времени проведения численного моделирования (30 с);
- в диапазоне скоростей 0,6 – 1,0 м/с эффективность удаления частиц остается практически неизменной, то есть, скорость приточного потока свыше 0,5 – 0,6 м/с является нерациональной;
- наибольшее влияние скорости приточного воздуха на эффективность удаления частиц загрязнителя наблюдается в диапазоне скоростей 0,2-0,5 м/с.

В результате анализа каждого введения индикаторных частиц в отдельности (рис. 5), были подтверждены зависимости, указанные ранее. При этом были выявлены некоторые особенности:

- в момент начала движения оператора, т.е. когда поддерживается стабильный однонаправленный поток воздуха в непосредственной близости от источника загрязнений, подтверждается прямая зависимость между эффективностью удаления частиц загрязнителя и скоростью этого потока;

- в момент времени, когда оператор пересекает зону генерации частиц загрязнителя, частицы «падают» в циркуляционные зоны, которые неизбежно окружают движущегося оператора. В результате, может сложиться ситуация, когда воздушный поток с меньшей скоростью эффективнее удаляет частицы загрязнителя из рабочей зоны, чем поток с большей скоростью воздуха. Таким образом, можно утверждать, что эффективность удаления частиц зависит также от положения источника загрязнения. В таком случае наибольшее влияние на эффективность удаления частиц оказывает не скорость приточного воздуха, а направление потока воздуха, в котором находится индикаторная частица;

- в момент времени, когда оператор достигает противоположной стены помещения, т.е. когда направление потока воздуха в непосредственной близости от источника частиц начинает стабилизироваться, наблюдается прямая зависимость между эффективностью удаления частиц загрязнителя и скоростью приточного воздуха.

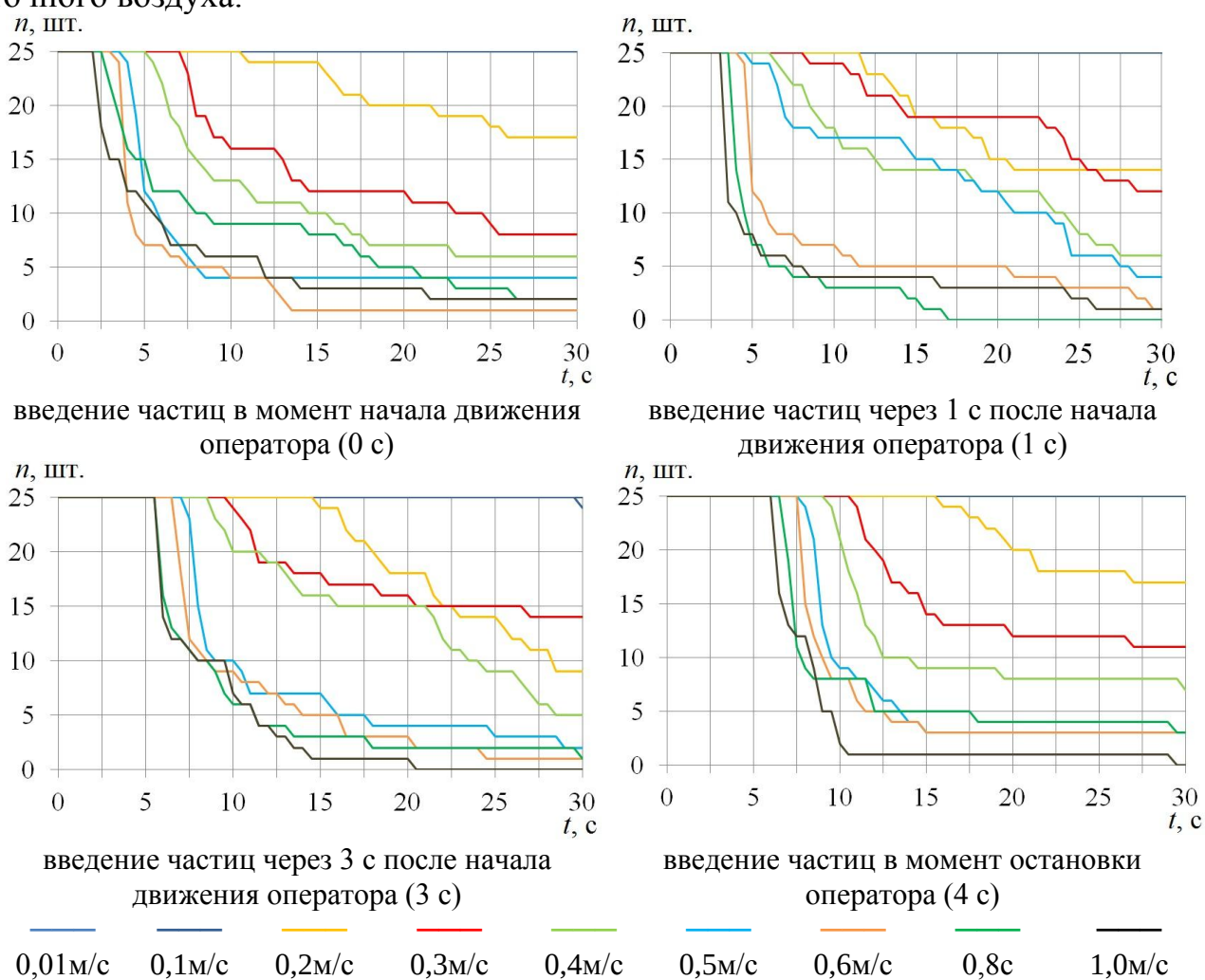


Рис. 5. Эффективность удаления частиц загрязнителя n за время t при каждом отдельном введении индикаторных частиц

Установлено, что эффективность удаления частиц напрямую зависит от скорости приточного воздуха, однако в случае, когда в помещении присутствует движущийся оператор, такая зависимость может быть нарушена. Таким образом, основная задача при выборе рациональной скорости приточного воздуха

сводится к выбору такой скорости, которая позволила бы максимально быстро восстановить однонаправленный воздушный поток, нарушенный оператором.

Исследование влияния скорости воздушного потока на входе в чистое помещение на время восстановления (стабилизации) потока. В качестве времени стабилизации воздушного потока был принят период времени с момента начала движения оператора до момента, в который направление движения воздушных струй вернется к первоначальному (однонаправленному) виду.

С целью определения времени стабилизации воздушного потока были выбраны две индикаторные плоскости, условно разделяющие чистое помещение на два равных объема: плоскость А, пересекающая пространство чистого помещения перпендикулярно оси Z (рис. 6); плоскость В, пересекающая пространство чистого помещения перпендикулярно оси X (рис. 7).

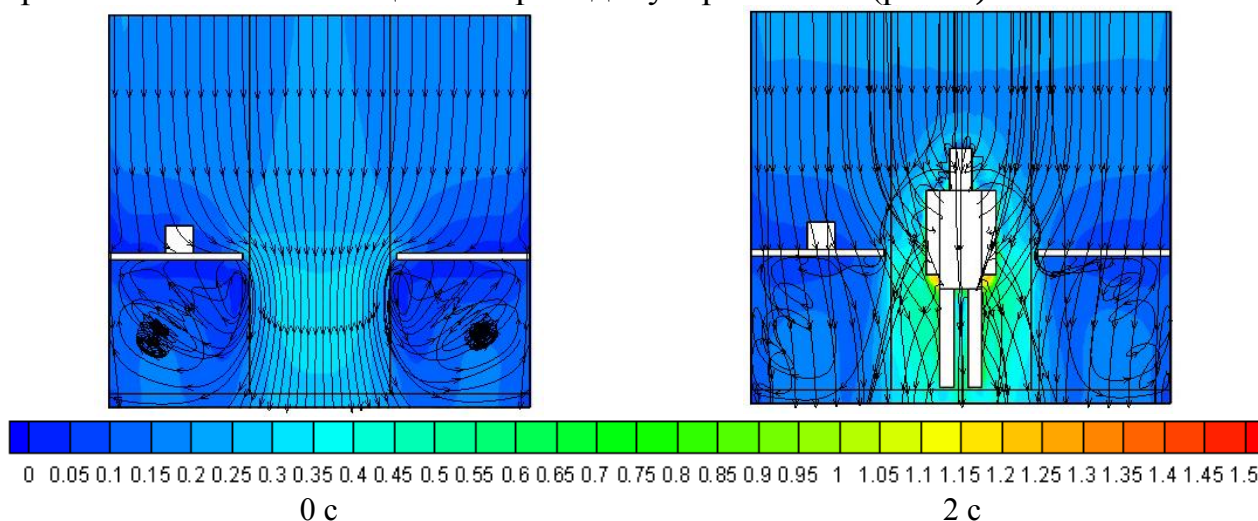


Рис. 6. Линии тока и поле модуля скорости в индикаторной плоскости А во время движения оператора в заданный момент времени (скорость потока воздуха 0,2 м/с)

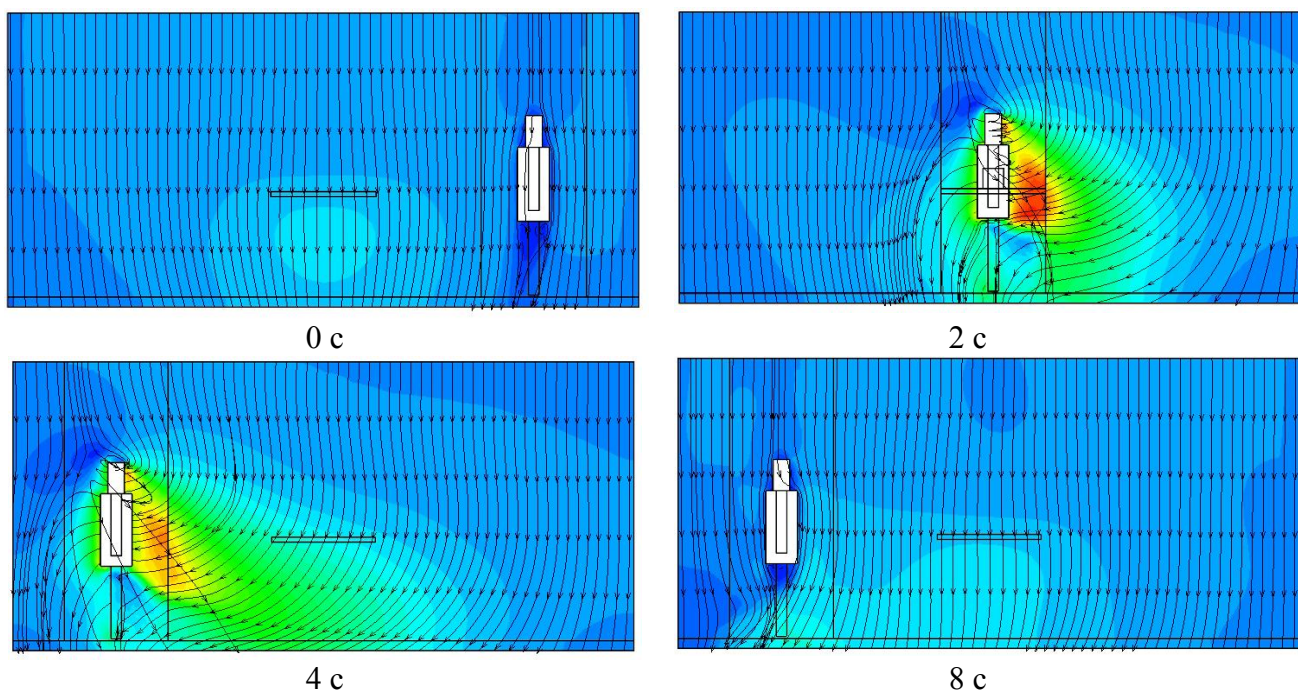


Рис. 7. Линии тока и поле модуля скорости в индикаторной плоскости В во время движения оператора в заданный момент времени (скорость потока воздуха 0,2 м/с)

Результаты, полученные при определении времени стабилизации воздушного потока, представлены на рис. 8.

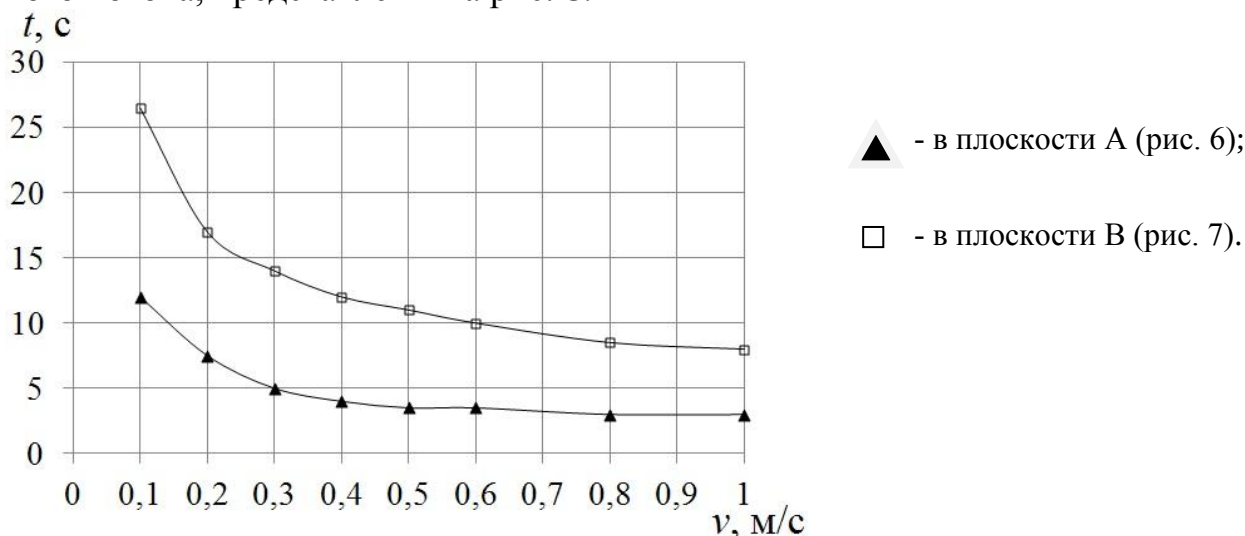


Рис. 8. Зависимость времени стабилизации воздушного потока t от скорости потока воздуха на входе в чистое помещение v

В результате проведенного численного моделирования были сделаны следующие выводы:

- движение оператора вызывает существенные нарушения воздушного потока в чистом помещении, следовательно, оно оказывает активное влияние на скорость удаления частиц загрязнителя из чистой зоны;

- скорость приточного воздуха оказывает прямое влияние на время стабилизации (восстановления) воздушного потока после его нарушения, вызванного движением оператора;

- в диапазоне скоростей воздушного потока от 0,5 до 1,0 м/с, разница во времени стабилизации воздушного потока незначительна;

- в процессе движения оператора в чистом помещении формируются различные завихрения, которые на практике могут служить «транспортными тоннелями» для загрязнителей, присутствующих в воздухе чистого помещения. Тем самым, чем дольше время стабилизации потока воздуха, тем выше вероятность распространения загрязнителя по значительной площади чистого помещения;

- эти завихрения (нарушения потока) могут быть условно разделены на два типа. Первый — небольшие (по площади) завихрения вокруг тела оператора. Второй — значительные (по площади) завихрения, образующиеся до и после оператора, во время его движения. При этом завихрения первого типа затухают достаточно быстро после остановки оператора. В то время как завихрения второго типа сохраняются значительно дольше (в 2-3 раза дольше);

- разница во времени стабилизации воздушного потока имеет тенденцию уменьшаться с возрастанием скорости приточного воздуха;

- вне зависимости от присутствия движущегося объекта (оператора), а также скорости приточного воздуха в чистом помещении могут образовываться рециркуляционные зоны, в которых может накапливаться значительное количество частиц. Избежать данного эффекта возможно только правильной плани-

ровкой помещения (отсутствие пустот под поверхностью стола или другой горизонтальной поверхности).

3. Разработаны теоретически и экспериментально обоснованные рекомендации по выбору оптимальной скорости потока воздуха на входе в чистое помещение.

В результате сравнительного анализа данных, представленных на рисунках 3-8, было установлено, что в диапазоне скоростей от 0,1 м/с до 1,0 м/с оптимальной с точки зрения эффективности удаления частиц, а также поддержания устойчивого однонаправленного потока воздуха, является скорость, равная 0,3 м/с. Данное значение скорости находится «внизу» диапазона скоростей, предлагаемых ГОСТ Р ИСО 14644-4 для помещений с высоким классом чистоты (выше ИСО 5). Таким образом, существует возможность экономии капитальных и эксплуатационных затрат не только для вновь проектируемых, но и для действующих чистых помещений.

Экономический эффект от обоснованного снижения скорости воздуха напрямую зависит от первоначального завышения скорости. Следовательно, для каждого отдельного случая этот эффект будет различен.

С целью ориентировочной оценки экономического эффекта был проведен расчет, согласно которому снижение скорости приточного воздуха на 0,1 м/с позволяет говорить об экономии более 3 млн. куб. метров подготовленного воздуха в год на каждый кв. метр чистого помещения. Принимая во внимание тот факт, что на подготовку воздуха затрачивается до 60% всей энергии, потребляемой чистым помещением, а также то, что на крупных производствах чистые помещения занимают площадь в несколько тыс. кв. метров, даже незначительное обоснованное снижение скорости приточного воздуха позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты.

4. Подтверждена адекватность выбора математического подхода и модели турбулентности, используемых при численном моделировании.

С целью подтверждения адекватности данных, полученных в результате численного моделирования, проведена серия экспериментов в пространстве функционирующего чистого помещения, схема и основные элементы которого представлены на рис. 9.

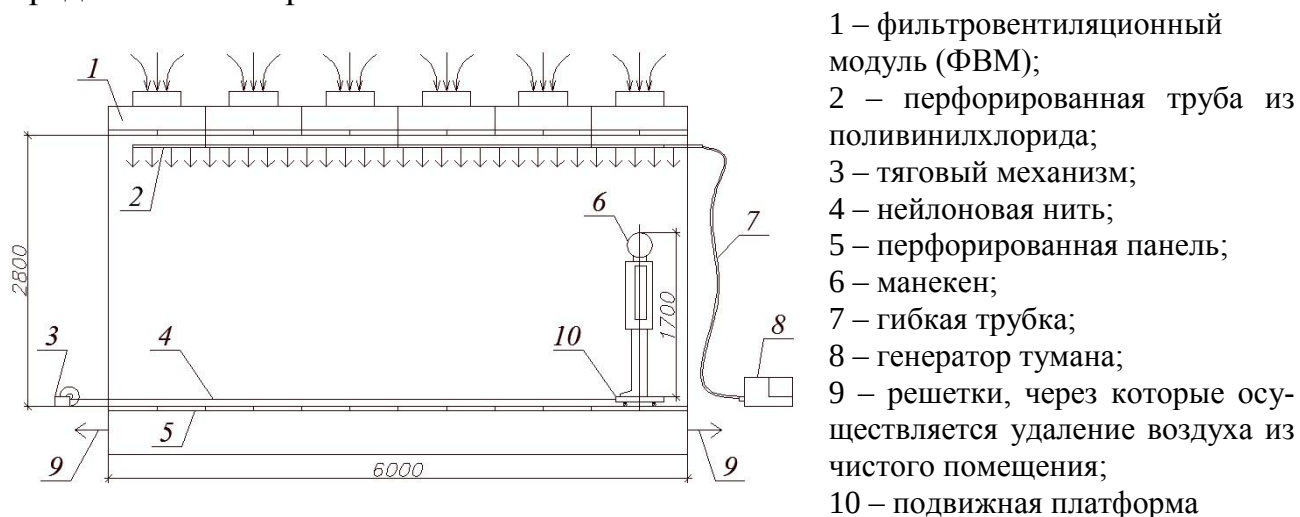


Рис. 9. Схема экспериментального чистого помещения

Физические размеры экспериментального помещения, характер движения оператора, схема воздухораспределения и ряд других параметров аналогичны размерам модели, исследованной при численном моделировании (рис. 2).

Как и в случае с численным моделированием была проведена серия экспериментов при скоростях потока приточного воздуха: 0,1 м/с; 0,2 м/с; 0,3 м/с; 0,4 м/с; 0,5 м/с; 0,6 м/с; 0,8 м/с; 1,0 м/с. Регулирование скорости потока приточного воздуха осуществлялось с помощью частотного преобразователя.

Для проверки скорости потока приточного воздуха использовался ручной крыльчатый анемометр. Замеры скорости проводились в нескольких точках чистого помещения на расстоянии 200 мм от поверхности высокоэффективного фильтра (потолка чистого помещения). Данное расстояние выбрано в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14644-3. Все измерения производились при установившемся режиме работы системы подачи воздуха в чистое помещение.

Постоянство температуры и давления воздуха обеспечивалось системами вентиляции и кондиционирования чистого помещения. Отслеживание значений температуры и давления производилось с помощью датчиков, установленных в помещении.

Как и в большинстве исследований воздушных потоков для визуализации потоков воздуха использовался аэрозоль. В роли источника аэрозоля выступал генератор тумана.

Была проведена серия из 10 экспериментов для каждой исследуемой скорости потока приточного воздуха. Было выявлено, что связь между скоростью воздушного потока и временем стабилизации имеет степенной характер:

$$t = 7,503v^{-0,535} \quad (9)$$

где v – скорость приточного воздуха, м/с; t – время стабилизации воздушного потока, с.

Ошибка аппроксимации рассматриваемой модели находится в пределах 5 - 7%, коэффициент детерминации - $R^2 = 0,96$.

С целью подтверждения адекватности выбора математических подходов и моделей турбулентности был проведен сравнительный анализ результатов, полученных при численном моделировании и экспериментальном исследовании (рис. 10).



Рис. 10. Зависимость времени стабилизации воздушного потока t от скорости приточного воздуха v

Было установлено, что отклонение результатов математического моделирования по отношению к результатам экспериментального исследования составляет в среднем не более 5%.

Фактические значения времени стабилизации воздушного потока идентичны для численного моделирования и экспериментального исследования. Таким образом, математический подход и модель турбулентности, выбранные для построения численной модели, с достаточной точностью отражают характер воздухораспределения в пространстве экспериментального чистого помещения.

5. Обоснована экономическая эффективность прямоточной установки подготовки воздуха с применением теплового насоса как альтернативного источника энергии.

На примере комплекса чистых помещений (рис. 11) была проведена оценка сокращения эксплуатационных затрат за счет использования разработанной установки подготовки воздуха (в роли внешнего источника энергии принята только электрическая энергия).

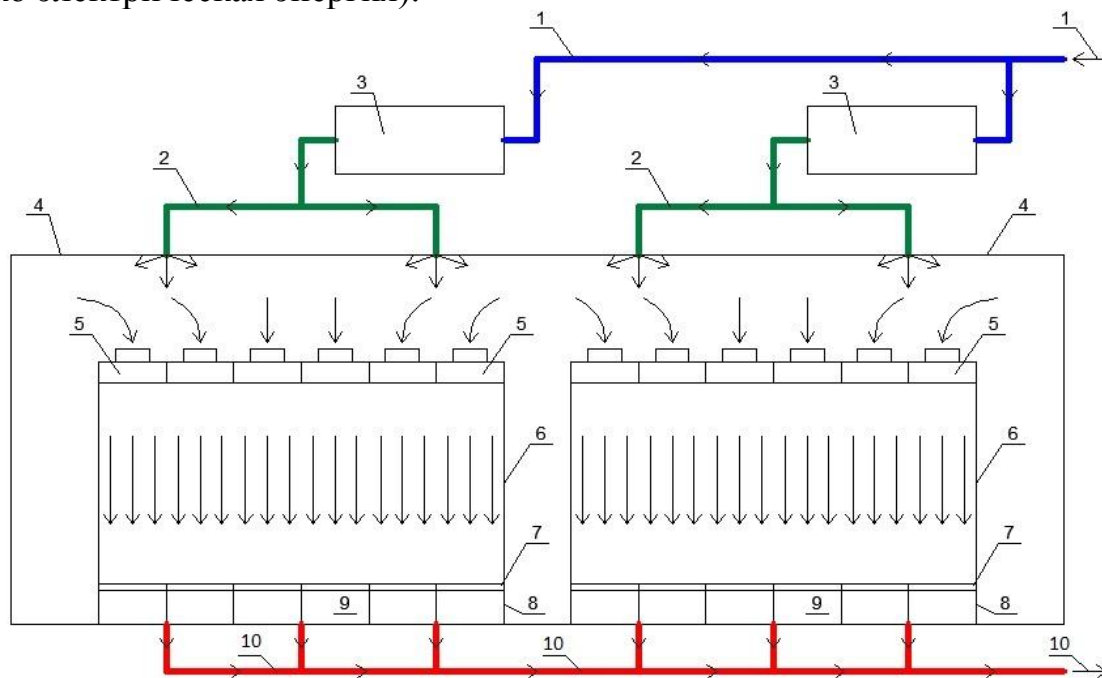


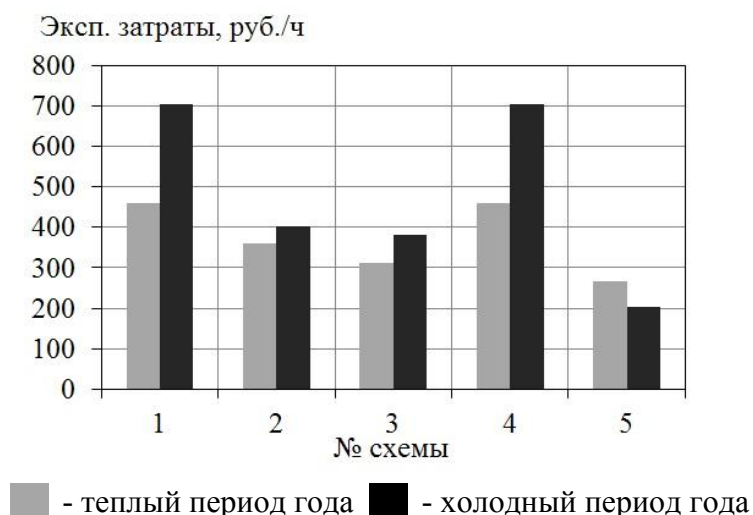
Рис. 11. Схема рассматриваемого комплекса

1 – поток наружного воздуха; 2 – поток воздуха, прошедшего подготовку в установке кондиционирования воздуха; 3 – установка кондиционирования воздуха; 4 – сервисное помещение комплекса; 5 – фильтровентиляционный модуль; 6 – чистое помещение; 7 – перфорированные панели; 8 – опоры фальшпола; 9 – герметичная камера; 10 – поток удаляемого воздуха.

В качестве рассматриваемого объекта в данном расчете выступал лабораторный комплекс (рис. 11), состоящий из двух идентичных чистых помещений 6, расположенных в сервисном помещении 4. Геометрические размеры и схема воздухораспределения чистых помещений 6 полностью идентичны численной модели, представленной на рис. 2. Скорость воздуха на входе в пространство чистых помещений составляет 0,35 м/с. Забор воздуха фильтровентиляционными модулями 5 осуществляется непосредственно из пространства сервисного помещения 4. В свою очередь, в сервисное помещение приточный воздух пода-

ется из двух идентичных установок кондиционирования воздуха 3 по системе воздуховодов 2. Удаление загрязненного воздуха из чистых помещений осуществляется через перфорированные панели фальшпола 7. Параметры наружного воздуха соответствуют климатическим данным для г. Ставрополя. Параметры внутреннего воздуха идентичны как для теплого, так и для холодного периода года (температура - $t_{вн} = +22^{\circ}\text{C}$; относительная влажность – $\phi=45\%$).

Результаты проведенной оценки представлены на рис. 12. Эксплуатационные затраты разработанной установки значительно ниже по сравнению с остальными рассмотренными видами установок.



- 1 – прямоточная установка кондиционирования воздуха;
- 2 – установка кондиционирования воздуха на основе теплоутилизатора с промежуточным теплоносителем;
- 3 – приточно-вытяжная установка кондиционирования воздуха с пластинчатым теплоутилизатором;
- 4 – приточно-вытяжная установка с охлаждением наружного воздуха с помощью теплового насоса;
- 5 – установка, основанная на предложенной схеме.

Рис. 12. Соотношение эксплуатационных затрат при использовании электрической энергии в воздушнонагревателях

Общие выводы

1. Проведен анализ преимуществ и недостатков существующих систем подготовки и распределения воздуха чистых помещений, с точки зрения их конструктивных и энергетических особенностей.

2. Произведена оценка применимости существующих систем подготовки и распределения воздуха к чистым помещениям, в которых ведется работа с веществами, представляющими опасность химического и биологического загрязнения.

3. Выявлены основные факторы, влияющие на поддержание требуемого класса чистоты рабочей зоны.

4. Разработана схема установки кондиционирования воздуха для нужд чистых помещений, в которых недопустимо применение рециркуляции воздуха.

5. Проведен анализ существующих математических моделей, используемых в вычислительной гидродинамике (CFD - Computational Fluid Dynamics), с целью подбора наиболее рациональной модели для проведения численного моделирования воздушнораспределения в чистом помещении.

6. Разработана численная модель чистого помещения средствами CFD, учитывающая влияние скорости приточного воздуха на входе в чистое помещение на перенос аэрозольных загрязнителей и время стабилизации воздушного потока, с учетом движения оператора.

7. Проведена серия физических лабораторных исследований с целью подтверждения адекватности выбора математической модели для прогнозирования воздухораспределения в пространстве чистого помещения.

8. Выявлена зависимость между скоростью приточного воздуха и переносом частиц аэрозольного загрязнителя в рабочей зоне чистого помещения, а также скоростью восстановления (стабилизации) воздушного потока, нарушение которого было вызвано движением персонала внутри этой зоны.

9. Даны рекомендации по выбору рациональной скорости воздушного потока;

10. Выполнена оценка энергетической и экономической эффективности предложенной прямоточной установки подготовки воздуха с применением теплового насоса как альтернативного источника энергии для чистых помещений.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. **Черняков, Е.В.** Исследование влияния скорости приточного воздуха на эффективность удаления частиц загрязнителя из пространства чистого помещения с учётом движения оператора [Текст] / Е.В. Черняков // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2014. – №3 (42). – С 69-73. (0,6 п.л.)

2. **Черняков, Е.В.** Исследование средствами вычислительной гидродинамики (CFD) влияния скорости приточного воздуха на время восстановления (стабилизации) однонаправленного воздушного потока вследствие нарушения, вызванного движением оператора в рабочей зоне чистого помещения [Текст] / Е.В. Черняков // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2013. – №6 (39). – С. 79-83 (0,6 п.л.).

Статьи в других изданиях:

3. **Cherniakov, E.** Numerical investigation of effects of a moving operator on airborne contamination removal in a cleanroom / E. Cherniakov, Sau C Fu, Gin n Sze To, Christopher Y H Chao // Proceedings of the 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. – 2014. – С. 424-431 (0,8 п.л./0,2 п.л.) (включена в базу цитирования Scopus).

4. **Черняков, Е.В.** Влияние скорости приточного воздуха на перенос и удаление аэрозольных загрязнений из рабочей зоны [Текст] / Е.В. Черняков // Технология чистоты. / М.: Изд-во АСИНКОМ. – 2013. - №4. – С. 23-28 (0,7 п.л.).

5. **Черняков, Е.В.** Сравнительный анализ систем вентиляции и кондиционирования воздуха в чистых помещениях и проблемы энергосбережения [Текст] / Е.В. Черняков // Технология чистоты. / М.: Изд-во АСИНКОМ. – 2012. - №3. – С. 25-28 (0,5 п.л.).

6. **Черняков, Е.В.** Математическое моделирование воздушных потоков в чистом помещении [Текст] / Е.В. Черняков // Научное издание «Актуальные проблемы строительства, транспорта, машиностроения и техносферной без-

опасности». Материалы 1-й ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета «Университетская наука – региону». / Ставрополь: Изд-во ТЭСЭРА. – 2013. – С. 162-166. (0,3 п.л.).

7. **Черняков, Е.В.** Повышение энергоэффективности систем ОВК чистых помещений на примере совершенствования установки кондиционирования воздуха (УКВ) [Текст] / Е.В. Черняков // Сборник тезисов III Всероссийской молодежной конференции «Устойчивость, безопасность и энергоресурсосбережение в современных архитектурных, конструктивных, технологических решениях и инженерных системах зданий и сооружений». / М.: Изд-во МИСИ-МГСУ. – 2012. – С. 313-319 (0,4 п.л.).

8. **Черняков, Е.В.** Летучие молекулярные загрязнения в чистых помещениях, их источники и негативное влияние на выход готовой продукции в микроэлектронике [Текст] / Е.В. Черняков // Материалы V международной научной конференции «Научный потенциал XXI в.». / Ставрополь: Изд-во СевКавГТУ. – 2011. – С. 151-154 (0,25 п.л.).

9. **Черняков, Е.В.** Проблемы очистки воздуха чистых помещений [Текст] / Е.В. Черняков // Материалы XL научно-технической конференции по итогам работы профессорско-преподавательского состава СевКавГТУ за 2010 год. Том первый. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. – 2011. – С. 266-267 (0,25 п.л.).

10. **Черняков, Е.В.** Анализ существующих схем воздухораспределения, применяемых в чистых помещениях. Перспективы развития чистых помещений [Текст] / В.В. Богачев, Е.В. Черняков // Материалы XL научно-технической конференции по итогам работы профессорско-преподавательского состава СевКавГТУ за 2010 год. Том первый. Естественные и точные науки. Технические и прикладные науки. – 2011. – С. 229-230 (0,25/0,125 п.л.).