

УДК 697.953

**Ефимова Елена Ивановна**

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет  
путей сообщения императора Александра I»  
Санкт-Петербург, Россия<sup>1</sup>

Профессор кафедры «Техносферная и экологическая безопасность»  
Доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор  
E-Mail: [Eei0509@yandex.ru](mailto:Eei0509@yandex.ru)

**Чухлей Валентина Дмитриевна**

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет  
путей сообщения императора Александра I»  
Санкт-Петербург, Россия

Студент 4 курса  
E-Mail: [bphantom666@gmail.com](mailto:bphantom666@gmail.com)

**Ершов Алексей Михайлович**

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет  
путей сообщения императора Александра I»  
Санкт-Петербург, Россия

Студент 4 курса  
E-Mail: [Ms.office@list.ru](mailto:Ms.office@list.ru)

**Тарбеев Никита Дмитриевич**

ФГБОУ ВПО «Петербургский государственный университет  
путей сообщения императора Александра I»  
Санкт-Петербург, Россия

Студент 4 курса  
E-Mail: [nik-turbo@mail.ru](mailto:nik-turbo@mail.ru)

**Применение системы автоматизированного  
проектирования SolidWorks для  
моделирования воздушных потоков в служебных  
помещениях метрополитена**

---

<sup>1</sup> 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I

**Аннотация:** Организация безопасной работы метрополитена во многом зависит от работоспособности обслуживающего его технические устройства персонала. Это связано в первую очередь с обеспечением нормируемых параметров микроклимата в служебных помещениях, имеющих различное производственное назначение. К воздуху рабочей зоны предъявляются требования, обусловленные санитарно-гигиеническими нормативами, так как его состояние влияет на здоровье и работоспособность персонала, а также на эксплуатационные характеристики технического оборудования.

Особенностью организации воздухообмена является значительная протяженность воздуховодов и значительные местные потери давления, связанные с большим количеством устройств системы обеспечения вентиляции. Это приводит к значительному увеличению потребления энергии тоннельной вентиляцией.

Особый интерес вызывает поиск путей минимизации потерь давления, обусловленных исследованием влияния распределения скоростей воздушного потока в воздуховодах, имеющих различные формы поперечного сечения.

Для решения задачи оптимизации конфигурации воздуховода использовалась система автоматизированного проектирования SolidWorks и её модуль - Flow Simulation.

Полученные в результате моделирования воздухообменных процессов данные, показывают, что наилучшим, с точки зрения минимизации потерь давления, является воздуховод криволинейного поперечного сечения, изготовление которого возможно обеспечить с помощью 3d прототипирования и изготовления на 3d принтерах.

**Ключевые слова:** Вентиляция служебных помещений метрополитена; нормируемые параметры микроклимата; трехмерные траектории движения воздуха; моделирование воздушных потоков; SolidWorks; Flow Simulation; 3D-прототипирование.

Идентификационный номер статьи в журнале 03TVN314

Метрополитен является неотъемлемой частью транспортной системы развитых городов. Организация безопасной работы метрополитена во многом зависит от работоспособности персонала, который обслуживает его технические устройства. Специфика размещения служебных и технических помещений метрополитена обусловлена значительным их заглублением под поверхность земли, что приводит, во-первых, к проблемам организации воздухообменных процессов в различных помещениях, а так же в тоннелях метрополитена, на подземных станциях и переходах между станциями метрополитена, во-вторых, к значительному потреблению энергии тоннельной вентиляцией. Решение обозначенных проблем может быть достигнуто путем оптимизации потерь давления, как по длине воздухопроводов, так и путем снижения местных сопротивлений на различных участках [1].

Воздуховоды классифицируются по нескольким признакам. По материалам, применяемым в конструкции, воздуховоды подразделяются на металлические, металлопластиковые и неметаллические. По технологическим и конструктивным особенностям - прямошовные, спирально-замковые, спирально-сварные. По форме поперечного сечения они делятся на воздуховоды прямоугольного сечения и круглого сечения. Прямоугольные, в основном, применяются для бытовых помещений, так как они имеют меньшие габариты и форму, которая удобно вписывается как в интерьер, так и по размерам помещений. Круглые используются в нежилых объектах, где необходимы длинные воздуховоды.

В основном, свежий воздух в метрополитен поступает (и выводится из него) через вентиляционные шахты и подходные выработки, которые затем используются как воздуховоды и через сам перегонный тоннель. Для вентиляции производственных и служебных помещений используют местные вентиляционные системы, оборудованные вентиляторами, работающими на приток и вытяжку. Воздух для этой цели забирается со станции или из перегонных тоннелей и предварительно очищается в противопыльных фильтрах. Выбрасывается воздух в перегонные тоннели (за станцией) по ходу движения поездов.

В этих случаях применяется, в основном, воздуховоды круглого очертания, преимущественно металлические, так как они обладают наибольшей огнестойкостью и возможностью работы при отрицательных температурах.

В каждой вентиляционной системе, как и в отдельных её участках, часть полного давления, является для неё безвозвратно потерянной, так как из-за молекулярной и турбулентной вязкости движущейся газовой среды, механическая работа сил сопротивления преобразуется необратимо в теплоту [2].

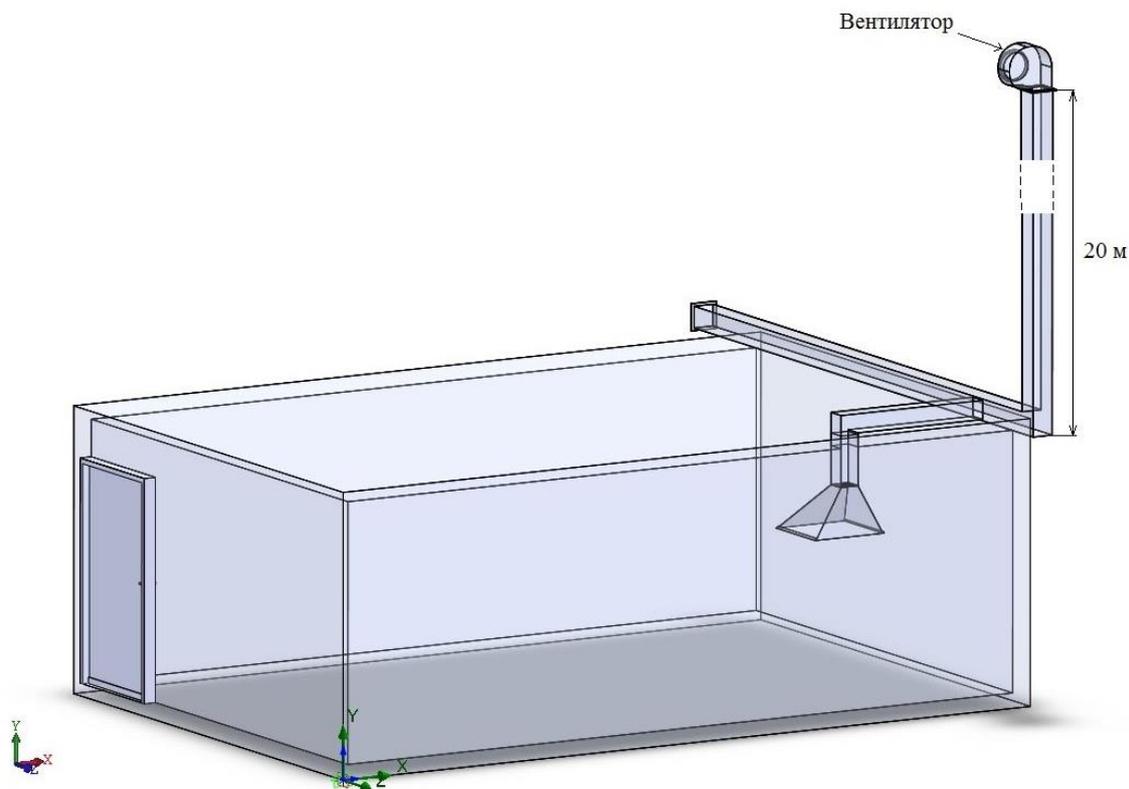
Различают два вида потерь полного давления в сети трубопровода: потери давления на трение и местные потери. Потери на трение вызываются вязкостью реальных газов, возникающей при их движении, и являются результатом обмена количеством движения между молекулами, а также и между отдельными частицами соседних слоев газа, движущихся с разной скоростью [3]. Местные потери возникают при местном нарушении нормального сечения, отрыве потока от стенок канала, вихреобразования и интенсивном турбулентном перемешивании потока в местах изменения конфигурации воздухопроводов или при встрече препятствий (расширение, сужение, изгиб, разветвление потока, протекание через отверстия и т.д.) [4].

Согласно ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» в воздухе рабочей зоны производственных помещений оптимальная температура (например, для категории работ Ib, к которым относятся работы, производимые сидя, стоя или связанные с ходьбой и сопровождающиеся некоторым физическим напряжением с расходом энергии в пределах 151-250 ккал/ч (175-290 Вт) ) должна находиться в пределах 21

- 23 °С, оптимальная влажность не должна превышать 40-60%, а скорость движения воздуха – 0,1 м/с.

Оптимальные показатели распространяются на всю рабочую зоны, а допустимые устанавливаются, учитывая различие для постоянных и не постоянных рабочих мест. [5]

Для создания оптимальных параметров микроклимата в рабочих и служебных помещениях необходимо обеспечить требуемый воздухообмен. Особый интерес вызывает поиск путей минимизации потерь давления, обусловленных исследованием влияния распределения скоростей воздушного потока в воздуховодах, имеющих различные формы поперечного сечения. Для этого была создана виртуальная модель служебного помещения станции метро, которая представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Виртуальная модель служебного помещения станции метро

Существуют различные методы моделирования явлений и процессов. Методы математического моделирования позволяют исследовать функции изучаемого объекта, получить информацию о его качественных свойствах без необходимости проведения эксперимента в реальности, что часто не представляется возможным.

Основной сложностью при использовании методов математического моделирования является оценка достоверности полученных результатов и их визуализации. Для решения данной проблемы используются системы компьютерной имитации многочисленных природных процессов и технических объектов [6]. Одной из таких систем является программный комплекс SolidWorks.

Система автоматизированного проектирования SolidWorks позволяет создавать 3d-модели любой степени сложности на этапе их разработки и их динамическую презентацию в виде анимации, проверять их конструкционную функциональность и производительность, проводить анализ технологичности конструкции изделия и процессов их изготовления, разрабатывать управляющие программы для станков с числовым программным управлением.

Встроенные модули дают возможность проведения инженерного анализа моделей на прочность, устойчивость, определения теплопередачи, оптических и светотехнических свойств модели и др.

Одним из таких модулей является Flow Simulation, который позволяет моделировать течения газов, управлять расчётной сеткой, выполнять комплексный тепловой расчёт, а также расчёт вращающихся объектов, создавать газодинамические и тепловые модели технических устройств и др. [1].

Полченков И. П. в своей работе при помощи модуля Flow Simulation провел анализ процесса течения жидкости в плавающем поршне амортизатора десятого семейства ВАЗ [7].

Гараев Р.Р., Мударисов С.Г. использовали Flow Simulation для исследования процесса работы устройства для смешивания жидких комплексных удобрений [8].

Майструк В.В., Гаврилов Р. И. Попиль А. С. и Басистый А. М. рассматривали в своем исследовании возможность использования программного пакета Flow Simulation для предварительной оценки гидравлического сопротивления прямоточного циклона [9].

Для создания модели течения воздуха в системе вентиляции служебных и производственных помещений необходимо задать начальные условия: давление, равное 101325 Па, температура, равная 293,2 К и расходно-напорные характеристики виртуального вентилятора, к которым относятся тип вентилятора, скорость вращения, диаметр и его аэродинамические характеристики. В нашем исследовании использован вентилятор со следующими параметрами:

- тип вентилятора - радиальный (центробежный);
- диаметр вентилятора - 0.212 м;
- скорость вращения - 303 рад/с.

Аэродинамические характеристики вентиляторов определяются на специальных стендах согласно ГОСТ 10921-90 «Вентиляторы радиальные и осевые» [10]. Аэродинамические характеристики виртуального вентилятора представлены на рис. 2.

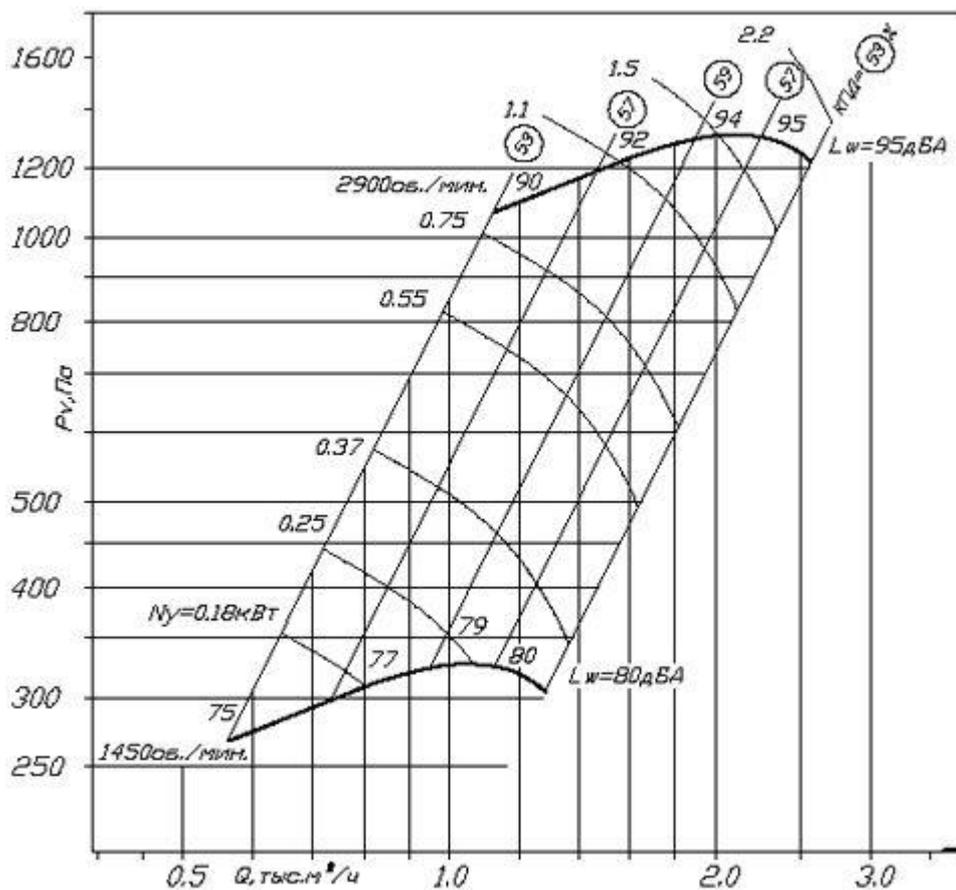


Рис. 2. Аэродинамические характеристики виртуального вентилятора

Результаты исследования приведены на рис. 3, где графически представлены трехмерные траектории движения воздушных масс в служебном помещении.

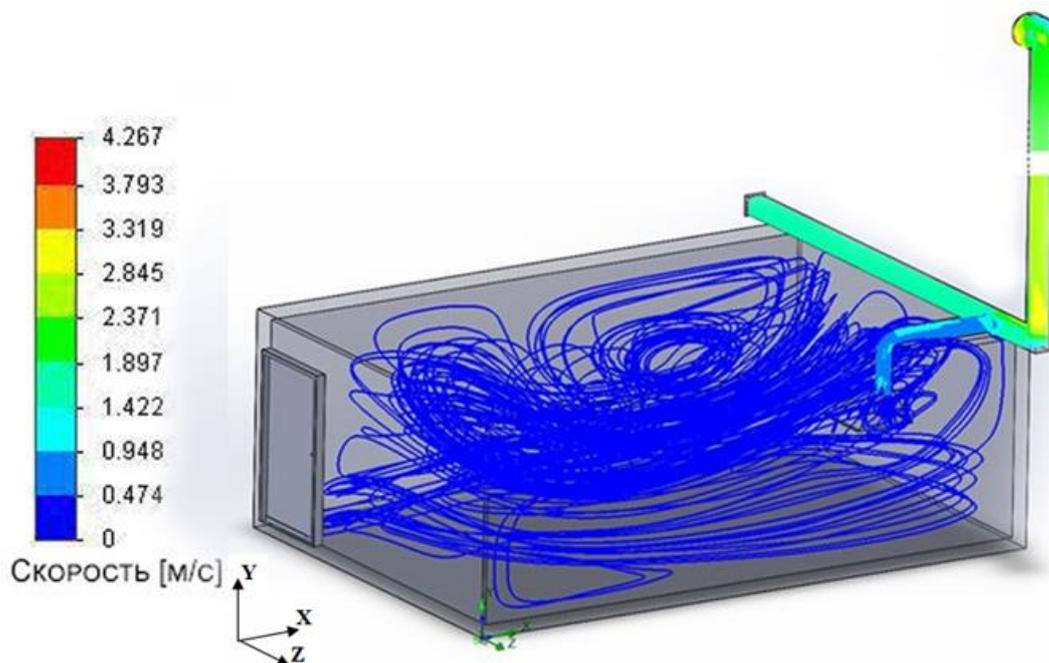
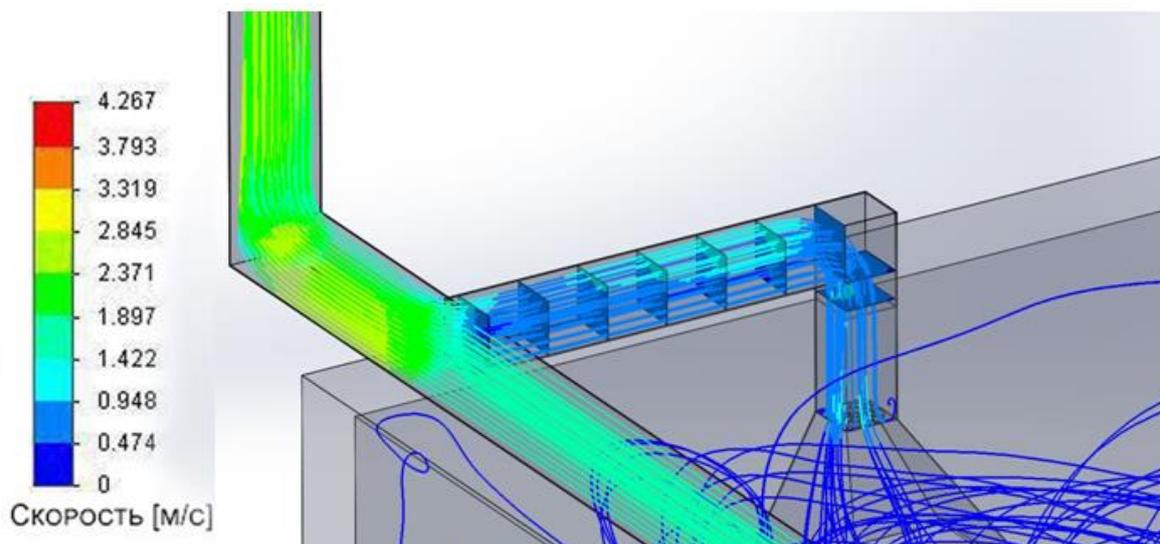


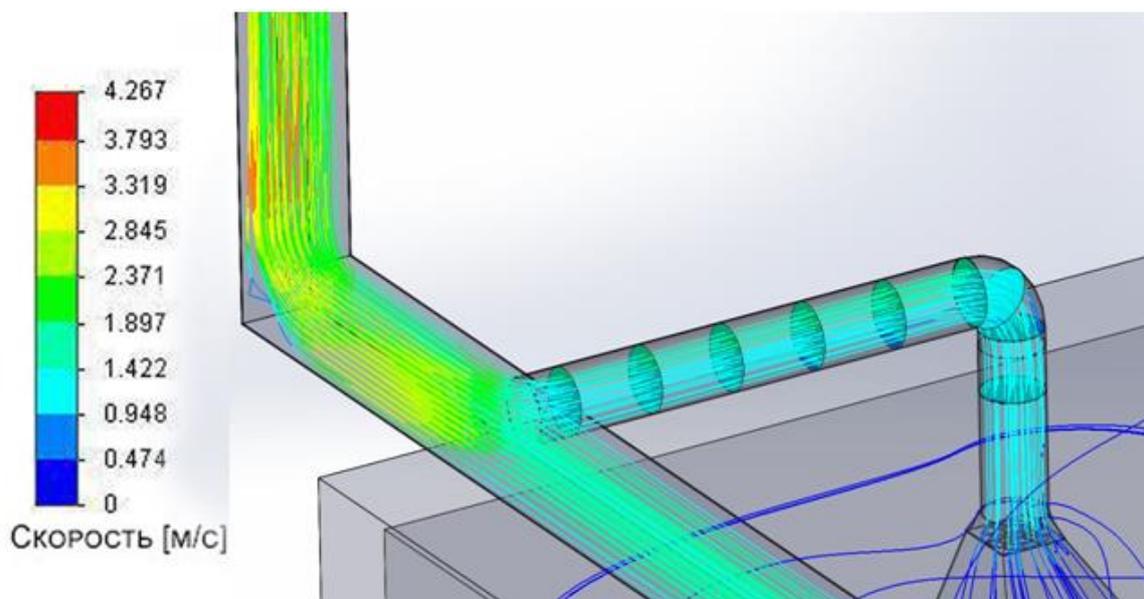
Рис. 3. Трехмерные траектории движения воздушных масс в служебном помещении

В процессе моделирования воздушных потоков в системе вентиляции было выбрано три варианта воздуховодов:

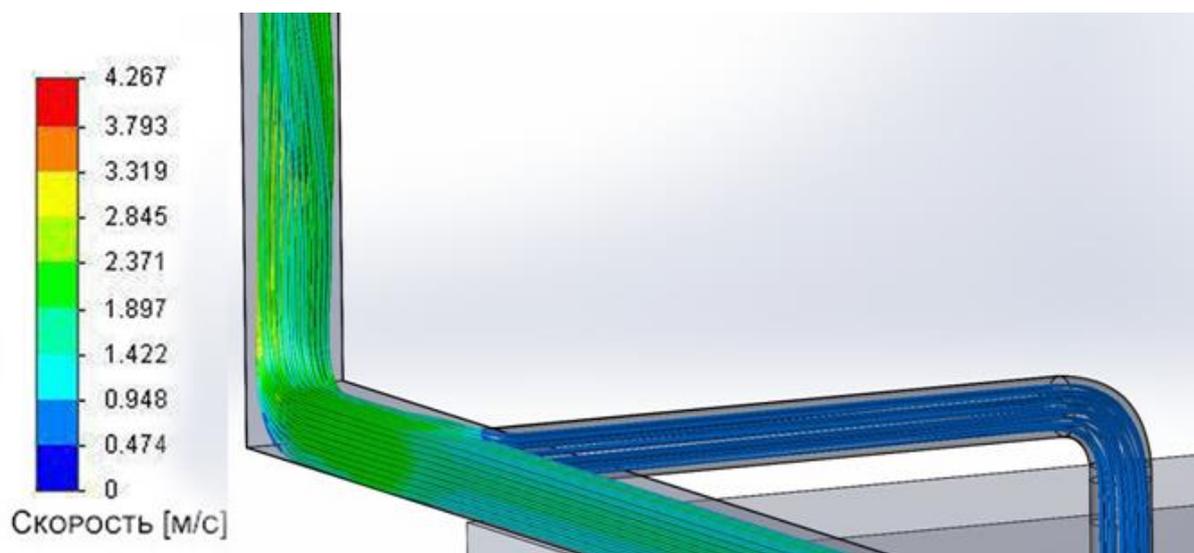
- 1) воздуховод с прямоугольным (квадратным) сечением (рис. 4);
- 2) воздуховод с круглым (стандартным) сечением (рис. 5);
- 3) воздуховод с круглым сечением с нестандартным участком (коленом), при условии равномерного распределения скоростей (рис. 6).



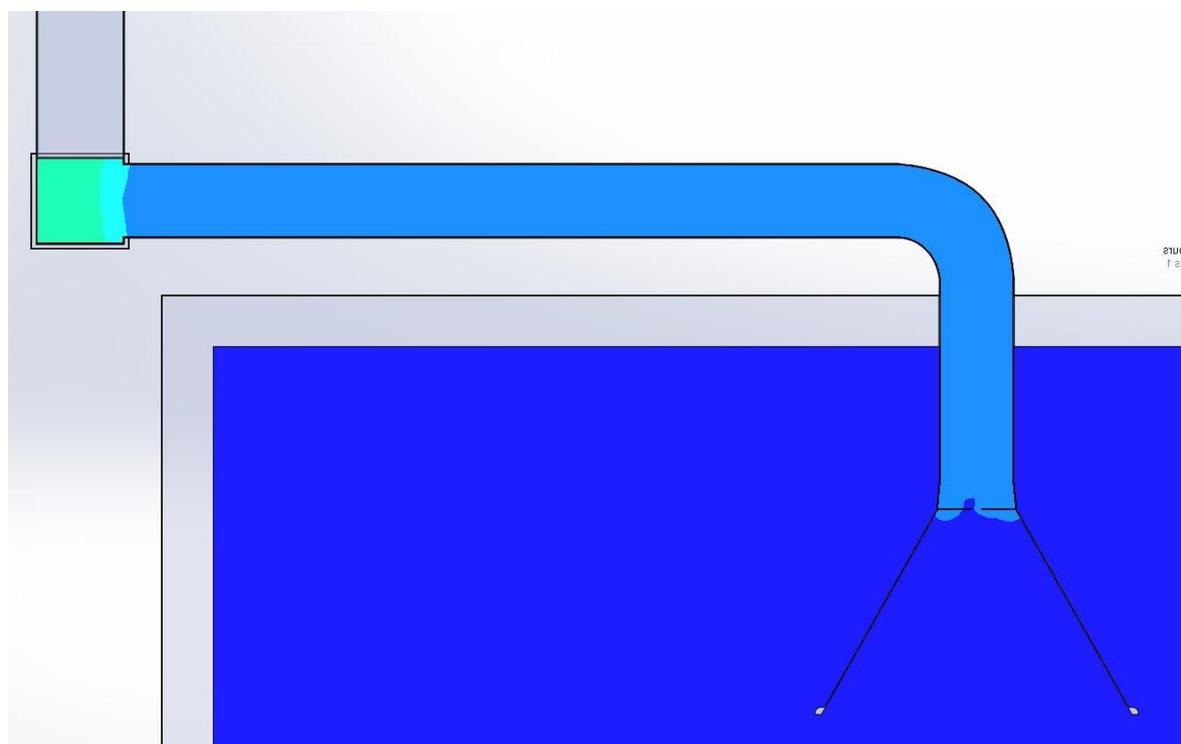
*Рис. 4. Трехмерные траектории скоростей воздуха в воздуховоде прямоугольного сечения*



*Рис. 5. Трехмерные траектории скоростей воздуха в воздуховоде прямоугольного сечения и участка воздуховода из помещения круглого сечения*



*Рис. 6. Трехмерные траектории скоростей воздуха в воздуховоде круглого сечения основных участков воздуховода с коленом нестандартного сечения*



*Рис. 7. Поле скоростей воздуха в воздуховоде криволинейного сечения основных участков воздуховода с коленом нестандартного сечения из условия минимизации потерь давления в сечении YX*

После проведения исследования и обработки результатов наибольшие потери давления наблюдаются у воздуховода с прямоугольным сечением. Из рисунка 4 видно, что распределение скоростей очень неравномерное, наибольшие потери возникают в углах, скачки давления не прекращаются вплоть до входа потока в обще-вентиляционный канал.

У воздуховода с круглым сечением «ситуация» значительно лучше: распределение скоростей весьма равномерное, но все же есть области с пониженной скоростью движения воздуха (рис. 5).

А в воздуховоде с «нестандартной» секцией, распределение скоростей равномерное, потерь в угловом сегменте не наблюдается (рис.6).

Возникает вопрос, если «нестандартный» воздуховод имеет параметры движения воздуха лучше, чем остальные, то как добиться технологичности его изготовления? Решение этой задачи лежит в области стремительно расширяющихся возможностей технологии 3d печати. Ведь действительно, если мы сможем изготавливать воздуховоды любой формы, удовлетворяющие различным требованиям, с учетом минимизации потерь сопротивления движению воздушных потоков, то это позволит достичь экономической эффективности вентиляционных систем.

*Работа выполнена при поддержке Петербургского государственного университета путей сообщения инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимова Е. И., Чухлей В. Д., Нагабедян В. С. Моделирование воздушных потоков в помещениях метрополитена на платформе SolidWorks//Интернет-журнал «Наукоедение», 2014 №1 (20) [Электронный ресурс] - М.: Наукоедение, 2014 - .- Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/24TVN114.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. - Яз. рус., англ.
2. Посохин В. Н. Расчет местных отсосов от тепло- и газовыделяющего оборудования. — М.: Машиностроение, 1984. — 160 с.
3. Стуров Д.С. Проектирование и расчет местной вентиляции машиностроительных производств. Учебное пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006
4. Стефанов Е. В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. - Санкт-Петербург: Издательство «АВОК Северо-Запад», 2005 — 402 с.
5. ГОСТ 12.1.005-88.ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
6. Умнов А. Е. Методы математического моделирования: Учебное пособие. – М.: МФТИ, 2012. 295 с.
7. Полченков И.П Особенности численного моделирования течения жидкости в узлах машинах// Материалы Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ) "Автомобиле- И Тракторостроение В России: приоритеты развития и подготовки кадров", посвященной 145-летию МГТУ "МАМИ". Книга 1, Москва, МГТУ «МАМИ», 2010 г., 575 с.
8. Гараев Р.Р., Мударисов С.Г. Исследование процесса работы устройства для смешивания жидких комплексных удобрений в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation// Материалы Международной научно-практической конференции в рамках XXIII Международной специализированной выставки "АгроКомплекс-2013". [Электронный ресурс]. - М. 2013 - Режим доступа: <http://www.bsau.ru/science/conferences/progr/agrokompleks-2013-part1.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. - Яз. рус., англ.
9. Майструк В.В., Гаврилов Р. И. Попиль А. С. и Басистый А. М. Оцінка енергозатрат при роботі прямотечійного циклону за допомогою програмного пакету Flow Simulation//Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2012 №8 (60) [Электронный ресурс]. - М. 2012 - Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/5765/5198>, свободный. – Загл. с экрана. - Яз. рус., укр.
10. ГОСТ 10921-90. Вентиляторы радиальные и осевые. Методы аэродинамических испытаний. Взамен ГОСТ 10921-74; Введ. с 01.01.92 до 01.01.97. М.: Издательство стандартов, 1991. -32 с.

**Рецензент:** Титова Тамила Семеновна, проректор по научной работе, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Петербургский государственный университет путей сообщения».

**Elena Efimova**

Petersburg State Transport University  
Russia, Sankt-Petersburg  
E-Mail: [Eei0509@yandex.ru](mailto:Eei0509@yandex.ru)

**Valentina Chukhley**

Petersburg State Transport University  
Russia, Sankt-Petersburg  
E-Mail: [6phantom666@gmail.com](mailto:6phantom666@gmail.com)

**Aleksej Ershov**

Petersburg State Transport University  
Russia, Sankt-Petersburg  
E-Mail: [Ms.office@list.ru](mailto:Ms.office@list.ru)

**Nikita Tarbeev**

Petersburg State Transport University  
Russia, Sankt-Petersburg  
E-Mail: [nik-turbo@mail.ru](mailto:nik-turbo@mail.ru)

## **The application the system of computer–aided design SolidWorks for modeling of air flow in ventilation systems of working spaces in the underground**

**Abstract:** The organization of an effective and safe activity of an underground depends on efficiency of an attendant, and unit staff. It is connected most of all to provision of normalized parameters of microclimate in working spaces of different production purposes. There are special requirements, imposed by hygiene regulations, to air in working spaces as it influences the health and efficiency of staff, as well as the performance of technical equipment.

The feature of the organization of air exchange is significant extension of the airway and substantial local pressure loss, caused by a large number of ventilation devices. This leads to a significant increase in energy consumption of tunnel ventilation.

There is a particular interest in the search of ways to minimize the pressure loss, caused by investigation of influence of distribution of air flow's velocity in ducts, with different cross sectional forms.

For the solving the problem with optimization of configuration of airways, the system of computer–aided design SolidWorks and its module – Flow Simulation was employed.

The findings, obtained after the modeling of air exchange processes, reveal that the best, in terms of minimization of pressure loss, is a curvilinear cross sectional duct, produced with the help of 3d prototyping and on 3d printers. Simulation of airflow in ventilation systems of working space of underground on platform SolidWorks.

**Keywords:** Ventilation of working spaces underground; normalized parameters of the microclimate; three-dimensional trajectories of air movement; air flows modeling; SolidWorks; Flow Simulation; 3D-prototyping.

Identification number of article 03TVN314

## REFERENCES

1. Efimova E. I., Chuhlej V. D., Nagabedjan V. S. Modelirovanie vozdushnyh potokov v pomeshhenijah metropolitena na platforme SolidWorks//Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2014 №1 (20) [Jelektronnyj resurs] - M.: Naukovedenie, 2014 -.- Rezhim dostupa: <http://naukovedenie.ru/PDF/24TVN114.pdf>, svobodnyj. – Zagl. s jekrana. - Jaz. rus., angl.
2. Posohin V. N. Raschet mestnyh otsosov ot teplo- i gazovydel'jajushhego oborudovanija. — M.: Mashinostroenie, 1984. — 160 s.
3. Sturov D.S. Proektirovanie i raschet mestnoj ventiljarii mashinostroitel'nyh proizvodstv. Uchebnoe posobie. – Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2006
4. Stefanov E. V. Ventiljacija i kondicionirovanie vozduha. - Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo «AVOK Severo-Zapad», 2005 — 402 s.
5. GOST 12.1.005-88.SSBT. Obshhie sanitarno-gigienicheskie trebovanija k vozduhu rabochej zony.
6. Umnov A. E. Metody matematicheskogo modelirovanija: Uchebnoe posobie. – M.: MFTI, 2012. 295 s.
7. Polchenkov I.P Osobennosti chislennogo modelirovanija techenija zhidkosti v uzlah mashinah// Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii Associacii avtomobil'nyh inzhenerov (AAI) "Avtomobile- I Traktorostroenie V Rossii: priority razvitiya i podgotovki kadrov", posvjashhennoj 145-letiju MGTU "MAMI". Kniga 1, Moskva, MGTU «MAMI», 2010 g., 575 s.
8. Garaev R.R., Mudarisov S.G. Issledovanie processa raboty ustrojstva dlja smeshivanija zhidkih kompleksnyh udobrenij v programmnom komplekse SolidWorks Flow Simulation// Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii v ramkah XXIII Mezhdunarodnoj specializirovannoj vystavki "AgroKompleks-2013". [Jelektronnyj resurs]. - M. 2013 - Rezhim dostupa: <http://www.bsau.ru/science/conferences/progr/agrokompleks-2013-part1.pdf>, svobodnyj. – Zagl. s jekrana. - Jaz. rus., angl.
9. Majstruk V.V., Gavrilov R. I. Popil' A. S. i Basistyj A. M. Ocinka energozatrat pri raboti prjamotehijnogo ciklonu za dopomogaju programmnoho paketu Flow Simulation//Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij, 2012 №8 (60) [Jelektronnyj resurs]. - M. 2012 - Rezhim dostupa: <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/5765/5198>, svobodnyj. – Zagl. s jekrana. - Jaz. rus., ukr.
10. GOST 10921-90. Ventiljatory radial'nye i osevyje. Metody ajerodinamicheskikh ispytanij. Vzamen GOST 10921-74; Vved. s 01.01.92 do 01.01.97. M.: Izdatel'stvo standartov, 1991. -32 s.