

УДК 697.381

© К. В. Кочарьяни, канд. техн. наук, директор по научной работе

© И. Н. Тисленко, руководитель группы компьютерного моделирования (ООО «Арктос», Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: nin-kasi@yandex.ru, tivanik@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-3-79-87

© K. V. Kochariantc, PhD in Sci. Tech., Scientific research director

© I. N. Tislenko, Head of the computer modeling group (LLC «Arktos», St. Petersburg, Russia)  
E-mail: nin-kasi@yandex.ru, tivanik@yandex.ru

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА УНИКАЛЬНОГО РОБОТИЗИРОВАННОГО АРХИВА ДОКУМЕНТОВ НА БУМАЖНЫХ НОСИТЕЛЯХ

### NUMERICAL SIMULATION OF THE THERMAL REGIME OF A UNIQUE ROBOTIC ARCHIVE OF PAPER DOCUMENTS

Приводятся результаты работы по поиску оптимального способа реализации воздушного отопления в помещении уникального роботизированного архива документов на бумажных носителях высотой 25 м. Существующие инженерные методы оказались неприменимы для расчета воздухораспределения в помещении такой высоты в условиях неизотермичности и сложной геометрии помещения, поэтому для решения поставленной задачи применялось численное моделирование в программном комплексе ANSYS CFX. В результате проведенных численных расчетов получено представление о распределении значений температуры во всем объеме помещения. На основании полученных данных выбран способ подачи теплого воздуха, определены параметры приточных устройств, позволяющие получить результат, отвечающий требованиям технического задания.

*Ключевые слова:* воздушное отопление, воздухораспределение, ANSYS CFX, архив.

The article presents the results of the work on the search for the optimal method of air heating in the premise of a unique robotic paper archive with a height of 25 m. The currently used engineering calculation methods turned out to be inapplicable for calculating the air distribution in the premise of such height characterized with non-isothermicity and complex geometry, therefore, numerical modeling in the ANSYS CFX software package was used to solve the problem. As a result of numerical calculations, there was obtained an idea of temperature value distribution in the entire volume of the premise. Based on the data obtained, a method of supplying warm air was selected, the parameters of the supply devices were determined, allowing obtaining a result that meets the requirements of the technical specification.

*Keywords:* air heating, air distribution, ANSYS CFX software package, paper archive.

#### Введение

Воздушное отопление складских, промышленных и общественных зданий — одно из эффективных решений в практике проектирования для обеспечения заданных параметров воздушной среды [1, 2, 3]. Как правило, при реализации воздушного отопления, совмещенного с системой вентиляции и/или

кондиционирования воздуха, используют схему подачи воздуха равномерно по площади помещения «сверху-вниз» [1, 4]: зимой подача теплого воздуха осуществляется дальнобойной компактной струей, а летом охлажденный или изотермический воздух подается конической или веерной струей [4, 5]. Расчет параметров приточной струи

для большинства рассматриваемых зданий осуществляется с помощью инженерной методики<sup>1</sup>.

Цель работы — выполнить моделирование воздушного отопления нового роботизированного архивного комплекса для хранения бумажных документов, высота которого составляет 25 м, для проектирующей компании, у специалистов которой в процессе работы возник ряд сложностей. Высота стеллажей сопоставима с высотой здания, следовательно, обслуживаемая зона, в которой необходимо поддерживать заданные параметры воздуха, превышает 20 м. Также особенностью данного помещения является полное отсутствие в нем людей, что позволяет не учитывать нормативные требования к скорости воздуха в обслуживаемой зоне.

Предварительный инженерный расчет показал, что при использовании традиционной для складских помещений схемы воздухораспределения с подачей воздуха между стеллажами из верхней зоны струя теплого воздуха достигает нижней точки обслуживаемой зоны в том случае, когда скорость на истечении из воздухораспределителя составляет около 40 м/с, что мало реализуемо на практике.

Вследствие вышесказанного перед авторами статьи была поставлена задача разработать рекомендации по созданию схемы воздухораспределения и выбору приточных устройств для поддержания заданных температур в обслуживаемой зоне помещения для холодного и теплого времени года (далее в статье будет рассматриваться только холодный период) для данного комплекса.

#### Методы исследования

В помещении роботизированного архива на распространение приточного воздуха влияют силы Архимеда, настиание, стесненность, температурный градиент, тепло-

обмен с наружными ограждениями и прочие факторы. Кроме того, особенностью данной задачи является требование к поддержанию заданных значений температуры практически во всем объеме помещения, заполненного стеллажами. Дополнительная сложность — требование сохранения единой схемы подачи приточного воздуха и одинакового расхода воздуха в холодный и теплый периоды года. Стандартные инженерные методы оказались неприменимы для расчета воздухораспределения в помещении такой высоты в условиях неизотермичности и сложной геометрии помещения. На стадии проектирования подобные задачи можно решить только при помощи численного моделирования [6–8], в основе которого лежат не полуэмпирические зависимости, как в инженерных методиках, а базовые физические принципы (в частности, уравнения Навье-Стокса). В связи с этим численное моделирование активно используется в последнее время для расчета воздухораспределения в помещениях различного назначения [9–11].

В рамках решения поставленной задачи авторами производилось численное моделирование с помощью программного комплекса для процессов гидрогазодинамики и теплообмена ANSYS CFX (бессрочная лицензия ООО «Арктос»).

Роботизированный архивный комплекс представляет собой здание, состоящее из трех секций, которые частично граничат друг с другом. На основе проектной документации здания архива была построена расчетная модель второй (средней) секции архива размерами 218 м (длина) × 98 м (ширина) × 25 м (высота). В модели учтены стеллажи, заполненные по высоте от 0,9 м до 21 м, и колонны (рис. 1).

Теплопотери второй секции в холодный период составляют 454 кВт и осуществляются через наружные стены (167 кВт), прилегающие к ним участки пола (два участка по 2 м

<sup>1</sup> СП 60.13330.2020. СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. М., 2020.

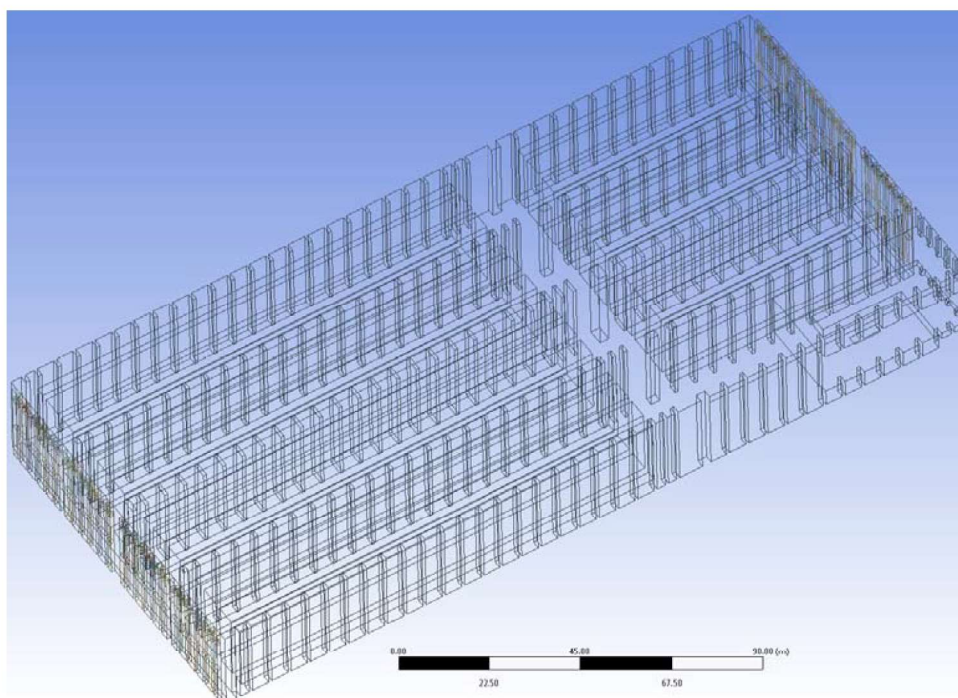


Рис. 1. Расчетная модель 2-й секции здания архива

шириной — 3024 Вт и 1512 Вт), и кровлю (282,5 кВт).

Для компенсации теплотерь в помещение подается воздух объемным расходом 195 000 м<sup>3</sup>/ч. Температура приточного воздуха в холодный период составляет 24 °С. Подача приточного воздуха возможна только из межферменного пространства под кровлей.

В обслуживаемой зоне (по всей высоте стеллажей от 0,9 м до 21 м) необходимо обеспечить поддержание температуры воздуха в диапазоне 17–19 °С.

В холодный период силы Архимеда, направленные вверх, противодействуют движению приточных струй. Для того чтобы приточные струи достигли пола и предотвратили охлаждение областей помещения вблизи наружных стен, необходимо подобрать тип приточных воздухораспределителей, их типоразмеры, места установки и объемные расходы приточного воздуха через каждый воздухораспределитель при заданных температуре и суммарном объемном расходе воздуха. При этом расходы воздуха через каж-

дый воздухораспределитель должны обеспечивать допустимые потери давления.

Учитывая отсутствие людей и вредоносных выделений внутри помещения, было принято решение выбрать схему воздухо-распределения вертикальными струями «сверху-вниз», подаваемыми только вдоль наружных ограждений. Таким образом, с помощью приточного воздуха создается преграда для теплотерь зимой.

При расчетах была использована «стандартная»  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности<sup>2</sup> [12], которая хорошо зарекомендовала себя при моделировании процессов тепло- и массообмена в вентиляции [13–15], количество ячеек расчетной сетки — 97 млн, количество узлов — 20 млн.

#### Результаты и обсуждения

На основании предварительных расчетов, для подачи приточного воздуха было решено использовать решетки однорядные АМН производства ООО «Арктос», расположенные в горизонтальной плоскости посередине

<sup>2</sup> ANSYS CFX-Pre User's Guide.

между колоннами на высоте 22 м. Расстояние между краем решетки и наружной стеной составляло 0,3 м. Традиционно для реализации воздушораспределения дальнобойными струями используются сопловые воздушораспределители. Стоит отметить, что дальнобойность большинства таких устройств такая же, как у решеток, или на 15–20 % больше, при этом пропускная способность сопел за счет малого типоразмерного ряда существенно ограничена (например, в данной задаче применение сопел привело бы к чрезмерному их количеству вследствие значительного объемного расхода подаваемого воздуха). При этом большой диапазон изменения габаритов решеток, а также возможность регулировки направления приточной струи с помощью жалюзи позволяют охватить широкий круг задач по воздушораспределению.

По результатам моделирования различных вариантов были определены оптимальные размеры решеток и расходы воздуха через них (рис. 2).

На габариты решеток и их число оказывали влияние следующие факторы:

- количество межколонных промежутков;

- размеры межколонных промежутков, которые формируют условия стеснения струи и теплообмена между приточным воздухом и стеной;

- высота помещения, которая определяет требуемую дальнобойность струи;

- сочетание размера решетки и количество подаваемого через нее воздуха, ограничивающиеся заданными потерями давления.

В оптимальном варианте суммарный объемный расход воздуха через 12 решеток АМН 600×400 составил 82 944 м<sup>3</sup>/ч (по 6912 м<sup>3</sup>/ч на каждую решетку), что соответствует скорости воздуха на истечении 8,0 м/с и потерям полного давления, равным 57 Па. Суммарный объемный расход воздуха через 44 решетки АМН 300×300 составил 112 056 м<sup>3</sup>/ч (по 2547 м<sup>3</sup>/ч на каждую решетку), что соответствует скорости воздуха на истечении 7,9 м/с и потерям полного давления, равным 58 Па.

Удаление воздуха производилось через горизонтальное отверстие площадью 18,75 м<sup>2</sup> на отметке низа 4,5 м.

Увеличенный типоразмер для 12 решеток (АМН 600×400) связан с тем, что межколонные промежутки на этом участке стены

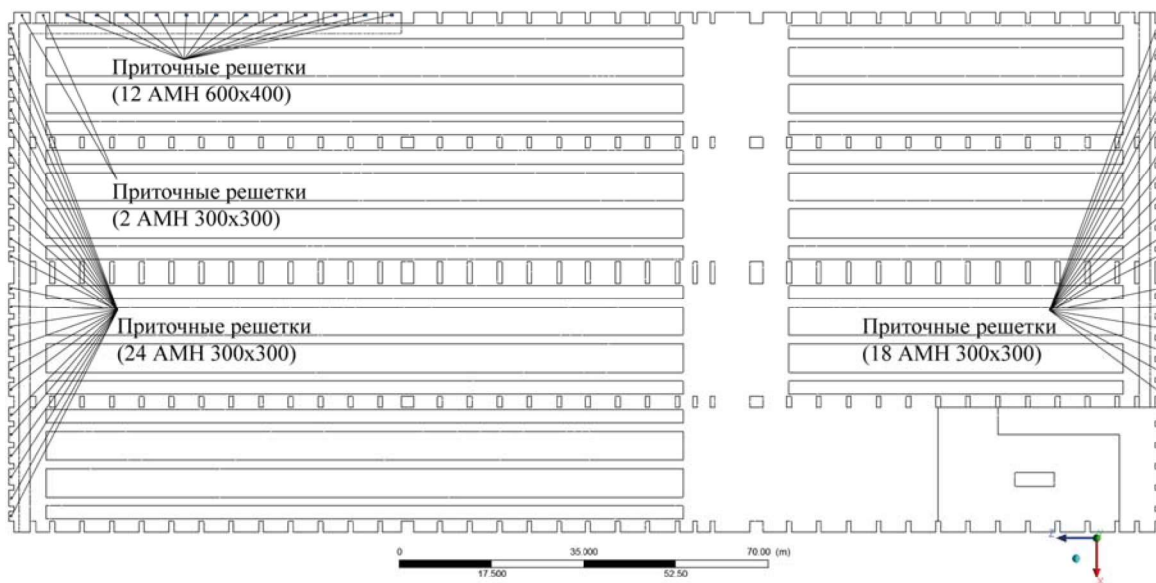


Рис. 2. Схема расположения приточных решеток

больше, чем на других участках стен. Результаты численного моделирования нескольких вариантов показали, что при установке в эти увеличенные межколонные промежутки решеток меньшего типоразмера, чем 600×400, приточная струя в холодный период не достигает пола, что приводит к чрезмерному охлаждению нижней части помещения в данной области.

На рис. 3–6 представлены результаты численного моделирования микроклимата 2-й секции здания архива для оптимального варианта схемы воздухораспределения.

Из анализа результатов расчета следует, что приточный воздух на истечении из решеток, настилаясь на наружную стену и достигая пола, препятствует теплообмену между ограждающими конструкциями и воздухом внутри помещения. При этом практически во всем объеме помещения устанавливается (исключая области подачи приточного воздуха) равномерное распределение температур.

Температура воздуха в объеме помещения в областях расположения стеллажей в холодный период преимущественно принимает значения в диапазоне 17–19 °С, что удовлетворяет требованиям технического задания, при этом отсутствует ярко выраженная стратификация. Области с температурой воздуха, превышающей указанный диапазон, расположены вблизи стен в местах подачи нагретого воздуха и не контактируют со стеллажами. Области с температурой воздуха ниже 17 °С в основном расположены в районе технических помещений, где отсутствуют стеллажи. В небольших локальных областях вблизи стеллажей наблюдается пониженная температура, но и в этом случае она не опускается ниже 16,5 °С, что с учетом допущений укладывается в требования технического задания.

На стадии предпроектной проработки при выборе схемы подачи воздуха только вдоль наружных стен были опасения, что воздух под кровлей будет охлаждаться

по всей площади помещения и, опускаясь вниз, создавать области в обслуживаемой зоне с температурами, ниже указанных в техническом задании. Однако результаты численного моделирования не оправдали этих опасений: область с пониженными значениями температуры не достигает верхних границ стеллажей.

На основании полученных результатов авторами были сформулированы рекомендации для проектной организации по схеме воздухораспределения, виду приточных устройств, их количеству и габаритам, местам их установки. Указанные рекомендации были применены при проектировании (как второй секции архива, так и по аналогии перенесены на остальные секции) и реализованы в ходе строительства.

Здание роботизированного бумажного архива запущено в эксплуатацию в 2022 г. В процессе эксплуатации как в холодный, так и в теплый периоды года обеспечено поддержание параметров микроклимата.

#### **Выводы**

На основании проведенного авторами исследования микроклимата можно сделать следующие выводы:

1. В роботизированном архивном комплексе и зданиях подобного типа при условии отсутствия людей для реализации воздушного отопления рекомендуется применять воздухораспределение вертикальными струями «сверху–вниз» вдоль наружных стен.

2. Указанный в п. 1 способ подачи воздуха препятствует потерям теплоты через стены аналогично работе воздушной завесы. При этом обслуживаемая зона находится вне влияния приточных и конвективных струй, что обеспечивает заданную в техническом задании температуру воздуха в обслуживаемой зоне помещения в холодный период в диапазоне 17–19±0,5 °С.

3. Для реализации указанной в п. 1 схемы воздухораспределения необходимо по-

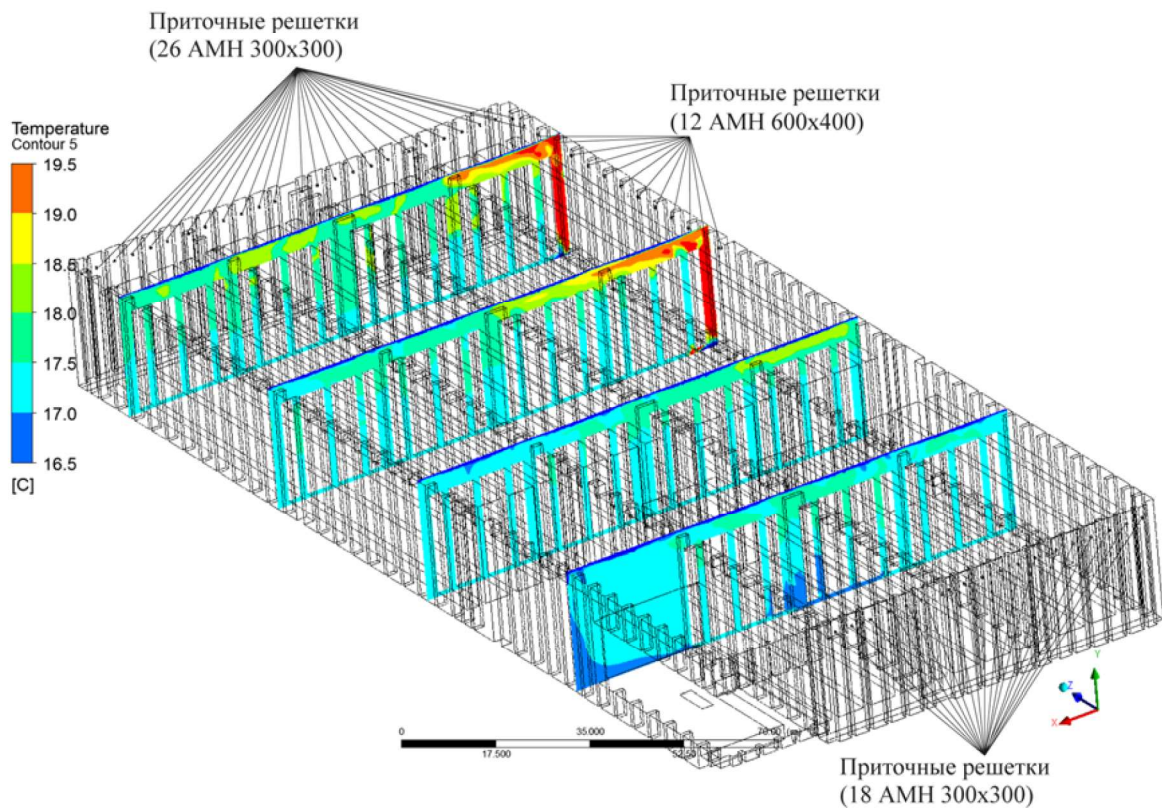


Рис. 3. Поля температур воздуха на вертикальных плоскостях, параллельных коротким стенам второй секции архива

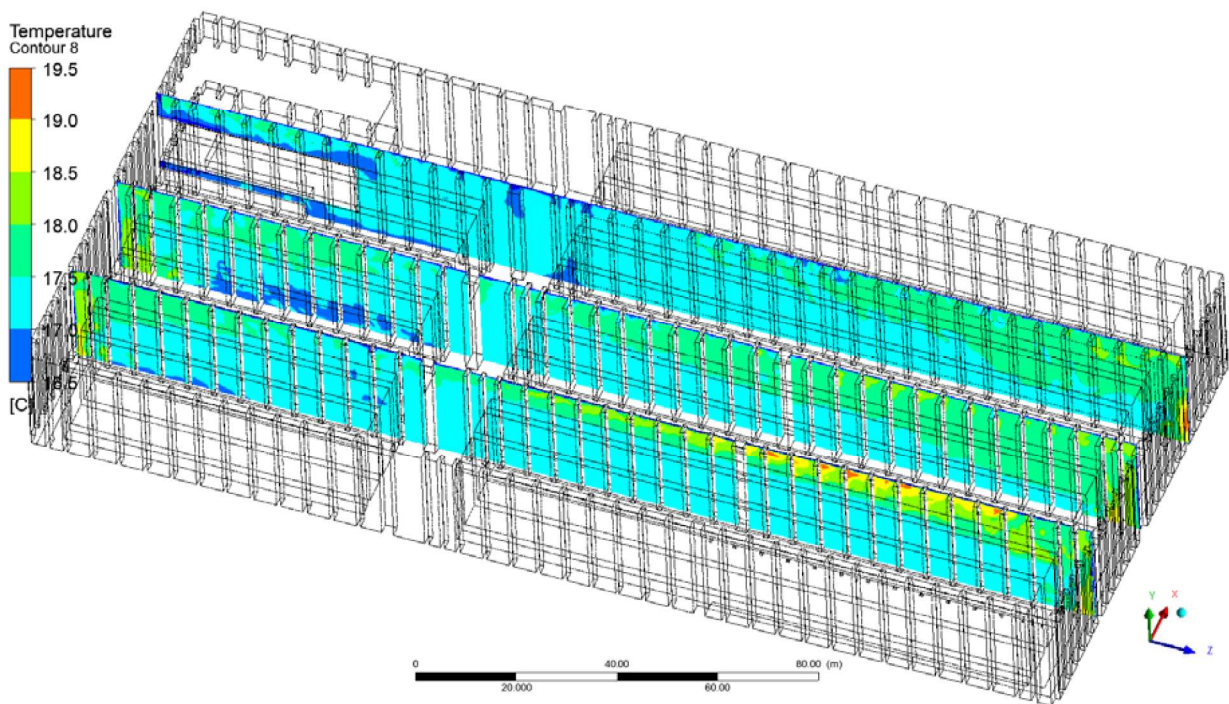


Рис. 4. Поля температур воздуха на вертикальных плоскостях, перпендикулярных коротким стенам второй секции архива

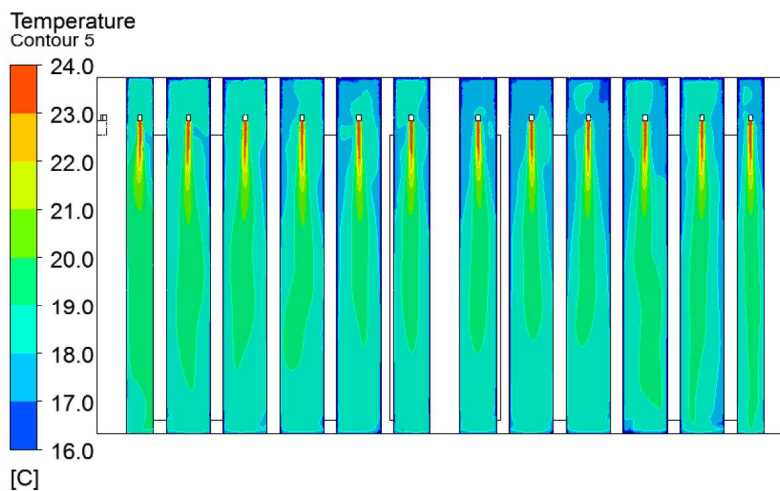


Рис. 5. Поля температур воздуха на части вертикальной плоскости, проходящей через приточные решетки

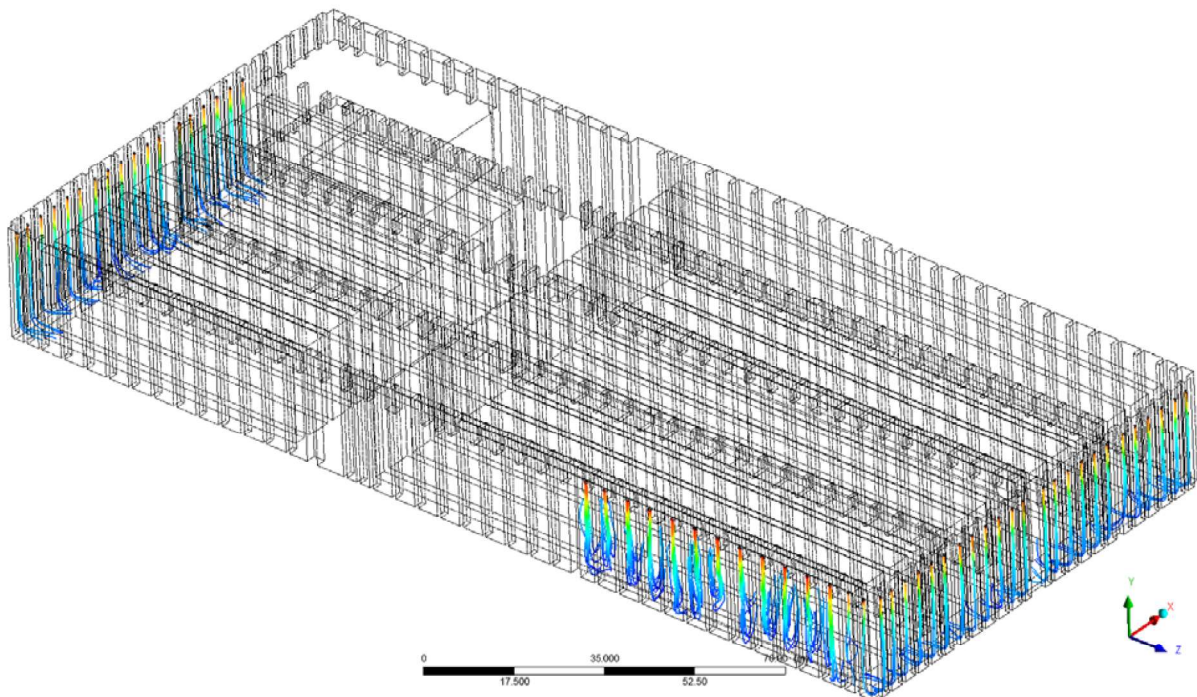


Рис. 6. Линии тока приточного воздуха

добрать габариты приточного устройства и объемный расход воздуха через него в зависимости от размера межколонного пространства, в котором происходит развитие приточной струи. Такой сложный подбор на стадии проектирования возможен только с помощью методов численного моделирования, так как существующие инженерные ме-

тодики не учитывают все нюансы развития струйного течения вдоль ограждающих конструкций в неизотермических условиях.

4. Полученные результаты были реализованы в ходе строительства архивного комплекса, показали свою эффективность и могут быть рекомендованы для аналогичных объектов.

### Библиографический список

1. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Крупкин Г. Я., Стронгин А. С., Шилькрот Е. О. Отопление и вентиляция производственных помещений. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2007. 400 с.
2. Агафонова И. А., Стронгин А. С., Шилькрот Е. О. Отопление и вентиляция современных складских комплексов // АВОК. 2004. № 6. С. 8–13.
3. Прот. Рябышев О., Проньков М. А., Дорохов В. Б. Система воздушного отопления, совмещенная с вентиляцией в храме Казанской иконы Божьей Матери в селе Борисоглеб Владимирской епархии // АВОК. 2017. № 2. С. 34–40.
4. Гримитлин М. И. Распределение воздуха в помещениях. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2004. 320 с.
5. Шепелев И. А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении. М.: Стройиздат, 1978. 144 с.
6. Гримитлин А. М., Дацюк Т. А., Денисихина Д. М. Математическое моделирование в проектировании систем вентиляции и кондиционирования. М.: АВОК Северо-Запад, 2013. 192 с.
7. Shokofe R.; Majid A.; Hasan M. Investigating impact of gas emission uncertainty on airflow distribution in an auxiliary ventilation system using CFD and Monte-Carlo simulation // *Build. Environ.* 2021. № 204. 108165.
8. Pierre-Emmanuel Bournet, Fernando Rojano. Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: Research, applications and challenges // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 201. Article 107277.
9. Денисихина Д. М. Расчет коэффициента воздухообмена методами математического моделирования параметров микроклимата // *Известия КГАСУ*. 2023. № 4 (66). С. 337–345.
10. Palmowska A., Lipska B. Research on improving thermal and humidity conditions in a ventilated ice rink arena using a validated CFD model // *International Journal of Refrigeration*. 2018. Vol. 86. Pp. 373–387.
11. Adjiski V., Mirakovski D., Despodov Z., Mijalkovski S. Method for determining the air change effectiveness of the auxiliary forcing ventilation system in underground mines using CFD software // *Mining Science*. 2018. Vol. 25. Pp. 175–192.
12. Колешко С. Б., Лапин Ю. В., Никулин Д. А., Стрелец М. Х., Чумаков Ю. С. Физические и математические основы численного моделирования гидроаэродинамики и теплообмена. СПб., 2005. 262 с.
13. Кочарьянц К. В. Численное моделирование воздухораспределения верными настилающимися струями. Выбор модели турбулентности // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 4 (57). С. 128–133.
14. Захарова Е. В. Кочарьянц К. В. Исследование быстрозатухающего высокотурбулентного потока,

формируемого воздухораспределителем для ступенчатого пола // *Научный журнал*. 2018. № 3. С. 6–11.

15. Васильев В. Ф., Уляшева В. М., Канев М. А., Рябов Г. А. О применении моделей турбулентности при численном моделировании процессов тепло-, воздухо- и массообмена // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2016. № 12 (180). С. 66–69.

### References

1. Gritmitlin A. M., Datsyuk T. A., Krupkin G. Ya., Strongin A. S., Shil'krot E. O. *Otoplenie i ventilyatsiya proizvodstvennykh pomeshcheniy* [Heating and ventilation of industrial premises]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2007, 400 p.
2. Agafonova I. A., Strongin A. S., Shil'krot E. O. *Otoplenie i ventilyatsiya sovremennykh skladskikh kompleksov* [Heating and ventilation of modern warehouse complexes]. AVOK, 2004, no. 6, pp. 8–13.
3. Prot. Ryabyshev. O, Pron'kov M. A., Dorokhov V. B. *Sistema vozdušnogo otopleniya, sovmeshchennaya s ventilyatsiey v khrame Kazanskoj ikony Bozh'ey Materi v sele Borisogleb Vladimiroj eparkhii* [Air heating system combined with ventilation in the Church of the Kazan Icon of the Mother of God in the village of Borisogleb, Vladimir diocese]. AVOK, 2017, no. 2, pp. 34–40.
4. Gritmitlin M. I. *Raspreделение vozdukhа v pomeshcheniyakh* [Air distribution in premises]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2004, 320 p.
5. Shepelev I. A. *Aerodinamika vozdušnykh potokov v pomeshchenii* [Aerodynamics of air flows in premises]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 144 p.
6. Gritmitlin A. M., Datsyuk T. A., Denisikhina D. M. *Matematicheskoe modelirovanie v proektirovanii sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya* [Mathematical modeling in design of ventilation and conditioning systems]. Moscow, AVOK Severo-Zapad Publ., 2013, 192 p.
7. Shokofe R.; Majid A.; Hasan M. Investigating impact of gas emission uncertainty on airflow distribution in an auxiliary ventilation system using CFD and Monte-Carlo simulation. *Build. Environ.*, 2021, no. 204, 108165.
8. Pierre-Emmanuel Bournet, Fernando Rojano. Advances of computational fluid dynamics (CFD) applications in agricultural building modeling. Research, applications and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, vol. 201, article 107277.
9. Denisikhina D. M. *Raschet koeffitsientа vozdukhoobmena metodami matematicheskogo modelirovaniya parametrov mikroklimate* [Calculation of air exchange coefficient by methods of mathematical modelling of microclimate parameters]. *Izvestiya KGASU – Bulletin of KGASU*, 2023, no. 4 (66), pp. 337–345.



10. Palmowska A., Lipska B. Research on improving thermal and humidity conditions in a ventilated ice rink arena using a validated CFD model. *International Journal of Refrigeration*, 2018, vol. 86, pp. 373–387.

11. Adjiski V., Mirakovski D., Despodov Z., Mijalkovski S. Method for determining the air change effectiveness of the auxiliary forcing ventilation system in underground mines using CFD software. *Mining Science*, 2018, vol. 25, pp. 175–192.

12. Koleshko S. B., et al. *Fizicheskie i matematicheskie osnovy chislennogo modelirovaniya gidroaerodinamiki i teploobmena* [Physical and mathematical bases of numerical modeling of hydroaerodynamics and heat exchange]. St. Petersburg, 2005, 262 p.

13. Kochariantc K. V. *Chislennoe modelirovanie vozdukhoraspredeleniya veernymi nastilayushchimisya struyami. Vybor modeli turbulentnosti* [Numerical modelling of air distribution by fan overlapping jets.

Selection of turbulence model]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 4 (57), pp. 128–133.

14. Zakharova E. V. Kochariantc K. V. *Issledovanie bystro zatukhayushchego vysokoturbulentnogo potoka, formiruемого vozdukhoraspredelitelem dlya stupenchatogo pola* [Investigation of a rapidly damped highly turbulent flow formed by an air distributor for a stepped floor]. *Nauchniy zhurnal – Scientific Journal*, 2018, no. 3, pp. 6–11.

15. Vasil'ev V. F., Ulyasheva V. M., Kanev M. A., Ryabev G. A. *O primenenii modeley turbulentnosti pri chislennom modelirovanii protsessov teplo-, vozdukho- i massoobmena* [On the application of turbulence models in numerical modeling of heat, air and mass transfer processes] *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie – Sanitary Engineering, Heating, Conditioning*, 2016, no. 12 (180), pp. 66–69.