

^{1,*}Абрамкина Д.В., ¹Петров Г.А.
¹ Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет
Россия, 129337, Москва, Ярославское ш., д. 26
*E-mail: dabramkina@ya.ru

ОСОБЕННОСТИ ВЕНТИЛЯЦИИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ЗАЛОВ

Аннотация. Выбор схемы организации воздухообмена является важнейшей задачей, от решения которой зависит не только качество внутреннего воздуха и тепловой комфорт в помещении, но и эффективность работы вентиляции. В статье приведен сравнительный анализ применения систем вытесняющей и перемешивающей вентиляции для помещений большого объема. Методологической основой исследования являются существующие теоретические положения и стандартные методики численного моделирования приточных струй. Представлены результаты многовариантных расчетов воздухораспределения для перемешивающей вентиляции зрительного зала кинотеатра. При применении горизонтальных настилающихся струй в рабочей зоне помещения не обеспечивается нормативная скорость. В случае вертикальной подачи вентиляционного воздуха с помощью потолочных диффузоров для верхних рядов зрительного зала не соблюдается условие относительной площади приточной струи на входе в рабочую зону. Данный фактор говорит о возможном формировании замкнутых циркуляционных контуров с повышенными концентрациями загрязняющих веществ. По результатам расчета было выявлено, что скорости движения веерных струй на входе в рабочую зону помещения ниже максимально допустимой подвижности воздуха. Требуемая температура обеспечивается при применении всех рассмотренных воздухораспределительных устройств.

Ключевые слова: воздухораспределение, вытесняющая вентиляция, перемешивающая вентиляция, приточные струи, относительная площадь струи

Введение. Схема организации воздухообмена в помещении влияет не только на качество внутреннего воздуха и тепловой комфорт [1], но и на потребление энергии в течение всего периода эксплуатации здания.

Вытесняющая вентиляция. В современных кинотеатрах [2], концертных залах [3], театрах [4], лекториях [5], ледовых аренах [6] с местами для зрителей, расположенными на повышающихся к периферии ступенях, все чаще применяются системы вытесняющей вентиляции (Рис.1). Такая схема организации воздухообмена так же используется при реконструкции зданий [7]. Оценка качества работы системы вытесняющей вентиляции, а именно создание комфортной тепловой среды, обеспечение низких концентраций загрязняющих веществ в рабочей зоне помещения и анализ энергопотребления производится с помощью компьютерного моделирования или натурных исследований, что представляет собой весьма трудоемкий процесс [8].

При применении вытесняющей вентиляции воздушный объем помещения можно условно разделить на три характерные области:

1. нижняя зона помещения, в которой формируется восходящий конвективный поток воздуха от источников теплоты;

2. зона сдвига – область, в которой температура струи становится примерно равной температуре внутреннего воздуха в помещении, при этом конвективный поток распадается и начинает движение в горизонтальном направлении;

3. верхняя зона помещения. Представляет собой участок циркуляции, в котором происходит перемешивание воздушных масс под воздействием вытяжных устройств.

В исследовании [9] представлены результаты моделирования зрительного зала, которые показывают, что на качество работы вентиляции значительно влияет размещение осветительных приборов, тепловые поступления от которых меняют структуру воздушных потоков в помещении. Эффективность вытесняющей вентиляции зрительного зала зависит от месторасположения зоны сдвига. Под воздействием тепловых источников в верхней части помещения зона сдвига смещается к полу,

вследствие чего происходит формирование застойных областей с повышенными температурами и концентрациями загрязняющих веществ [10, 11].

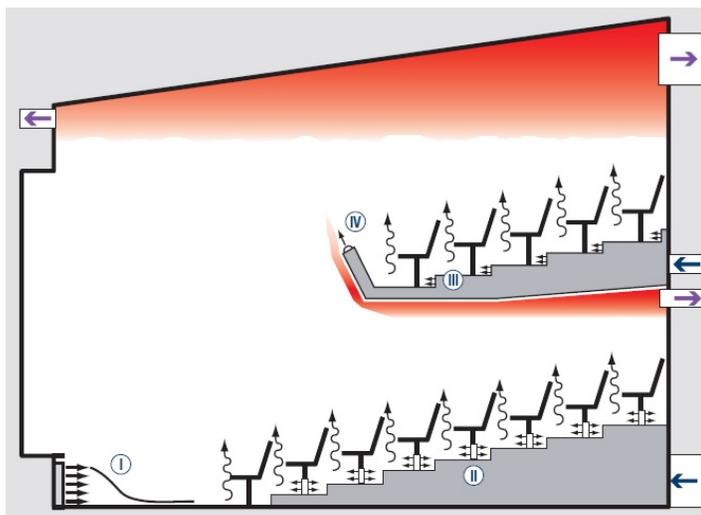


Рис. 1. Пример схемы вытесняющей вентиляции в зрительном зале. I – приточные вентиляционные решетки, расположенные в сцене; II – воздухораспределители, установленные под сиденьями в зрительном зале; III – воздухораспределители, установленные в ступенях балкона; IV – воздухораспределители, установленные в парапете балкона

При проведении натурных исследований [12, 13] было выявлено, что возникновение сквозняка у пола является серьезной проблемой при эксплуатации систем вытесняющей вентиляции. Для исключения переохлаждения рабочей зоны помещения, обслуживающий персонал был вынужден увеличить температуру приточного воздуха, что привело к перерасходу энергии. Часть приточных устройств при этом была закрыта, что так же повлияло на качество внутреннего воздуха в помещении.

Анализ научных работ [14-16] показывает, что обеспечение теплового комфорта системами вытесняющей вентиляции без применения дополнительного охлаждения возможно при нагрузке меньше 40 Вт/м^2 . Совместное годовое энергопотребление системами потолочного водяного охлаждения и вытесняющей вентиляции сопоставимо с полностью воздушной системой при организации перемешивающей вентиляции, однако капитальные затраты в первом случае оказываются выше [17]. Натурные исследования, проведенные в лекционных аудиториях, так же выявили значительное потребление энергии системами вытесняющей вентиляции по сравнению с потолочным воздухораспределением [18].

Перемешивающая вентиляция. Подача чистого приточного воздуха осуществляется сверху с помощью высокоскоростных турбулентных потоков, создающих интенсивную циркуляцию внутреннего воздуха в помещении (Рис. 2) [19, 20]. Вытяжка может обустраиваться в верхней или нижней зоне, например через вентиляционные решетки, расположенные в сцене [21]. При близком размещении устройств для подачи и удаления вентиляционного воздуха, в помещении может возникать эффект «короткой циркуляции», что приводит к повышению концентрации вредных веществ в рабочей зоне помещения [22, 23].

Сравнительный анализ качества работы систем перемешивающей и вытесняющей вентиляции показывает [24], что температура, относительная влажность воздуха и концентрация углекислого газа в рабочей зоне находятся в примерно одинаковом диапазоне. При наличии нагретых поверхностей уровень CO_2 в помещении с вытесняющей вентиляцией оказывается выше [25].

Проведение клинических исследований так же не выявило значительных различий при функционировании систем. Однако проведенный социологический опрос позволил обнаружить наличие симптомов усталости глаз при использовании вытесняющей вентиляции. Концентрации формальдегида и жизнеспособных бактерий при работе вытесняющей вентиляции оказались ниже, однако общее количество бактерий и спор плесени выше [26]. При корректном подборе воздухораспределителей уровни звукового давления для обеих систем не превышают нормируемых значений [27].

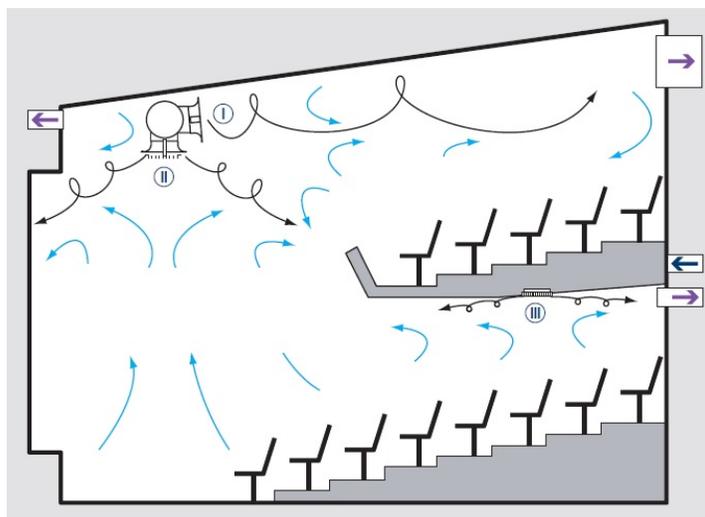


Рис. 2. Пример схемы перемешивающей вентиляции в зрительном зале. I – турбулизирующий регулируемый воздухораспределитель с горизонтальной подачей; II – турбулизирующий регулируемый воздухораспределитель с вертикальной подачей; III – веерный воздухораспределитель

Методы и материалы исследования. Выбор схемы организации воздухообмена в помещениях большого объема требует проведения многовариантных расчетов с подбором различных типов воздухораспределительных устройств [28]. Методика расчета приведена в работах [29-32].

В качестве объекта исследования выбран зрительный зал кинотеатра на 120 человек, расположенный в торговом центре (Рис. 3). Потолок помещения выполнен без уклона, высота для первого ряда составляет 5 м, для последнего – 2,8 м. Площадь рабочей зоны – 324 м². Рассмотрена вертикальная подача приточного воздуха с помощью полных веерных струй (Рис. 3, I) и горизонтальная подача с помощью настилающихся компактных и неполных веерных струй (Рис. 3, II) для различных типов воздухораспределительных устройств. Критериями, подлежащим оценке при расчете воздухораспределения, являются параметры приточной струи на входе в рабочую зону помещения: температура и скорость движения воздушного потока.

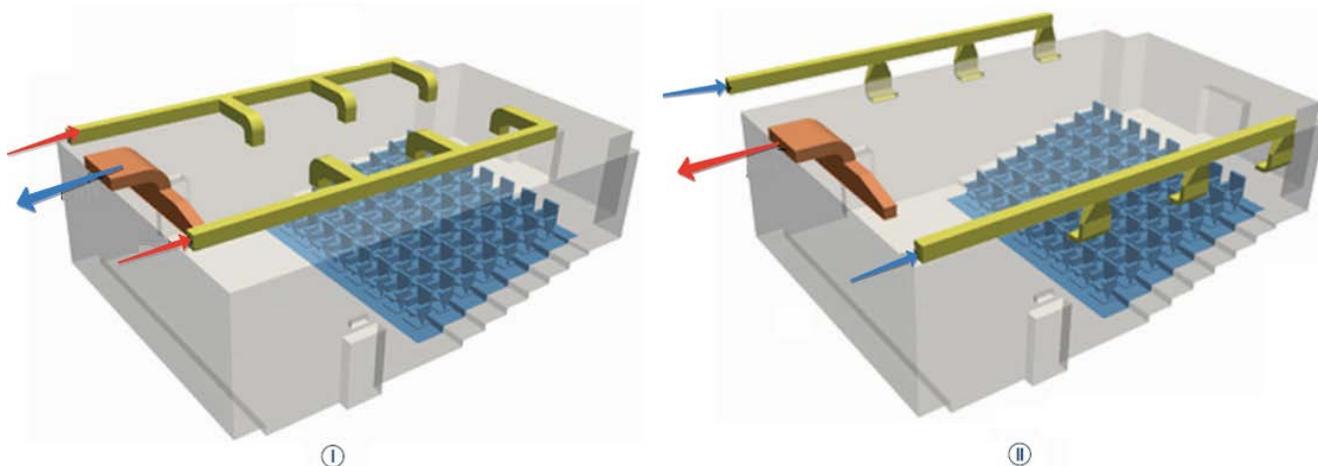


Рис. 3. Принципиальная схема зрительного зала кинотеатра

Равномерное распределение параметров воздуха в рабочей зоне помещения и отсутствие плохо вентилируемых застойных зон достигается при следующих геометрических соотношениях ячейки, обслуживаемой одним воздухораспределительным устройством:

Для полной веерной струи:

$$0,5 < l / x_n < 1,5;$$

$$a_1 \leq 3h_n$$

Для горизонтальных компактных и неполных веерных струй:

$$b_1 \leq 0,5m\sqrt{a_1 h_p}$$

$$b_1 + h_n - h_{p.з.} \leq 0,5m\sqrt{a_1 b_1}$$

Оценка эффективности использования вентиляционного воздуха проводится так же с учетом рекомендуемого диапазона изменения относительной площади приточной струи A_g :

Для веерных струй:

$$\bar{A}_g = 1 - 0,15 \left(2 - \frac{h_n - h_{p.з.}}{\sqrt{A_p}} \right)^2$$

Для горизонтальных компактных и неполных веерных струй:

$$\bar{A}_g = \frac{0,53}{m} \cdot \frac{(b_1 + h_n - h_{p.з.})^2}{a_1 b_1} \text{ при } S < a_1$$

$$\bar{A}_g = 0,22 \frac{b_1 + h_n - h_{p.з.}}{b_1} \text{ при } S \geq a_1$$

где $S = \frac{2,4}{m} (b_1 + h_n - h_{p.з.})$

(a_1 – ширина ячейки; b_1 – длина ячейки; h_n – высота помещения, м; $h_{p.з.}$ – высота рабочей зоны, м (1,5 метра в сидячем положении); m – скоростной коэффициент (принимается в зависимости от типа воздухораспределителя

Результаты и их анализ. По результатам расчета было выявлено, что скорости движения веерных струй на входе в рабочую зону помещения при различных типах воздухораспределительных устройств ниже максимально допустимой подвижности воздуха по СП 60.13330.2016 (Рис. 4). В случае применения двухпоточного прямоугольного диффузора 2 АПН, начиная с 9 ряда зрительного зала, происходит превышение оптимальной скорости движения воздуха.

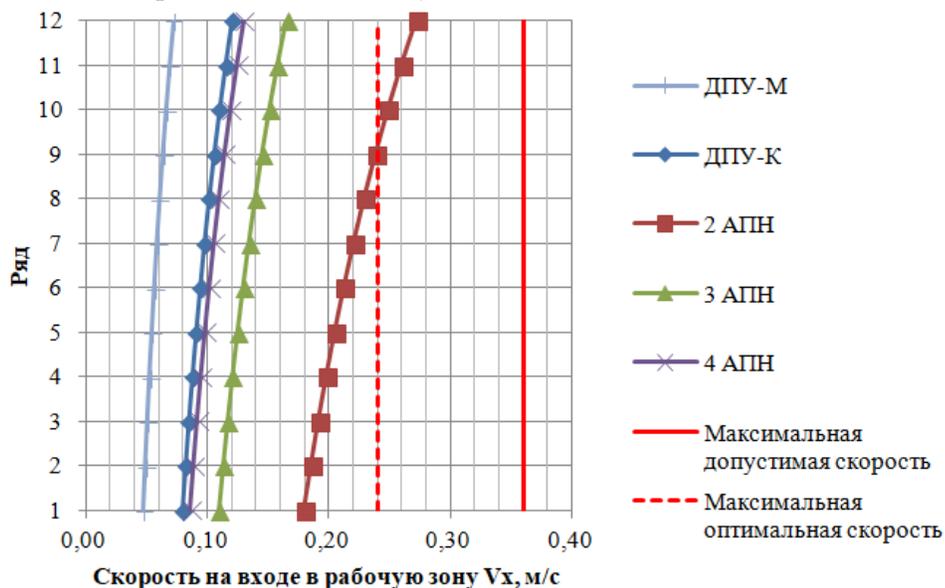


Рис. 4. Скорости движения воздушного потока на входе в рабочую зону при применении полных веерных струй

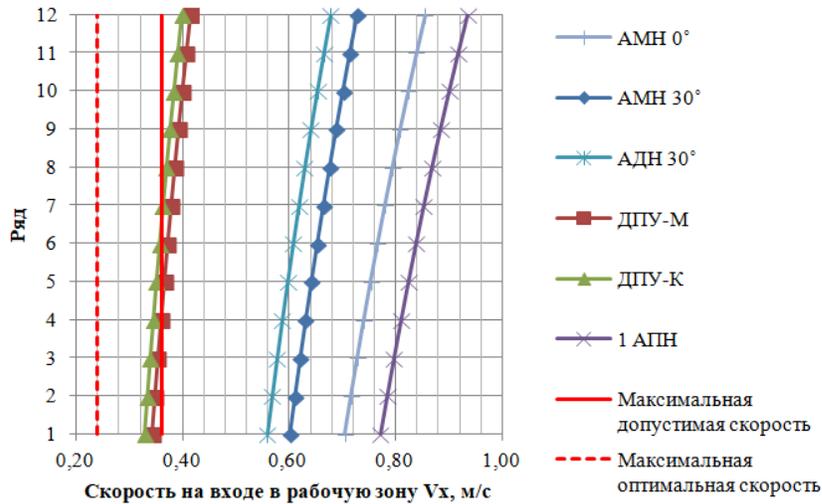


Рис. 5. Скорости движения воздушного потока на входе в рабочую зону при применении компактных и неполных веерных настилающихся струй

При подаче приточного воздуха с помощью настилающихся струй через однопоточный диффузор 1 АПН, а также вентиляционные решетки АДН с углом поворота жалюзи 30° и АМН с углом поворота жалюзи 0° и 30°, наблюдается повышенная скорость движения воздуха для всех рядов зрительного зала (Рис. 5). В случае применения горизонтальных веерных настилающихся струй (круглые диффузоры ДПУ-М и ДПУ-К) превышение скоростей происходит начиная с 4 и 6 ряда соответственно. Относительная площадь приточной струи для всей рабочей зоны будет находиться в диапазоне рекомендуемых значений только в случае использования диффузора ДПУ-К и решетки АДН с углом поворота жалюзи 30° (Рис. 6).

Требуемая температура в струе обеспечивается при применении всех рассмотренных воздухораспределительных устройств.

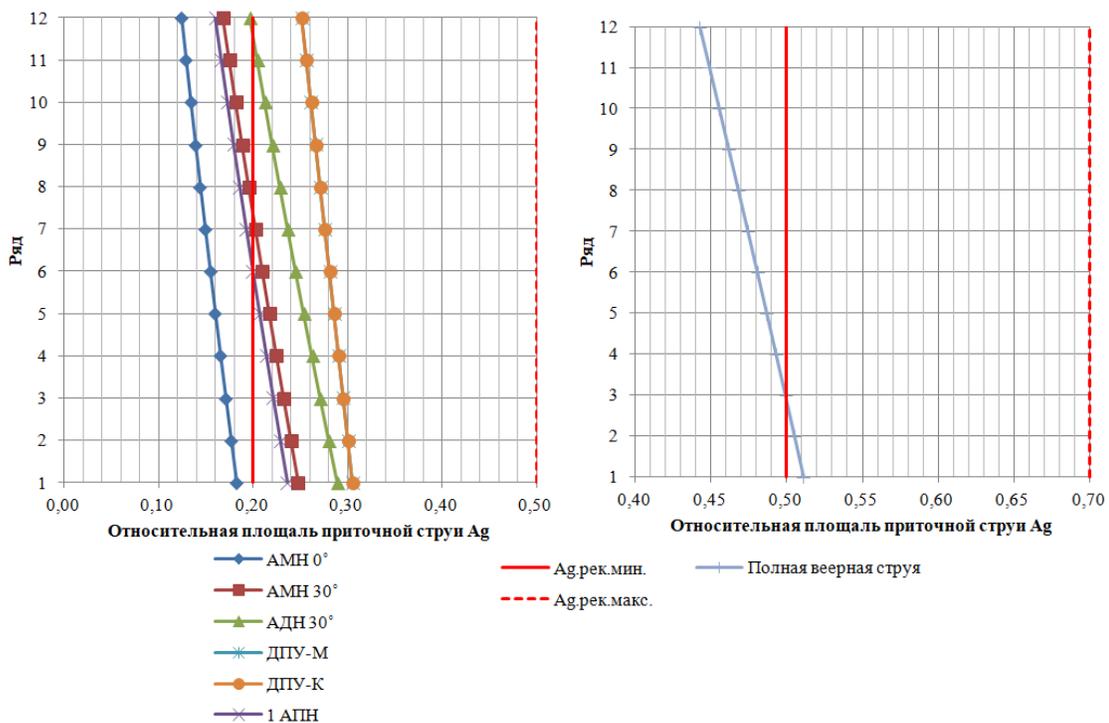


Рис. 6. Относительная площадь приточных струй. График слева – компактные и неполные веерные настилающиеся струи; график справа – полные веерные струи

Несмотря на то, что при осуществлении вертикальной подачи приточного воздуха, соблюдаются нормируемые параметры на входе в рабочую зону помещения, относительная площадь струи выходит за рамки рекомендуемых значений для всех рядов выше третьего (Рис. 6).

Выводы. Одной из основных проблем, возникающих при эксплуатации залов, является формирование зон повышенных скоростей и температур внутреннего воздуха, что особенно заметно на зрительских местах, расположенных на верхних рядах. При проведении инженерных расчетов проектировщики зачастую пренебрегают определением относительной площади приточной струи, A_g , что приводит к некорректному подбору воздухораспределителей. Данный критерий позволяет оценить степень равномерности распределения параметров в рабочей зоне помещения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Худошин И.И., Ткаченко Н.В. Влияние схемы организации воздухообмена на эффективность вентиляции в зрительных залах // Новые идеи нового века: Материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2020. Том 3. С. 488–492.
2. Елизарова А.Д. Особенности организации воздухообмена в помещениях современных кинозалов // VII Всероссийский фестиваль науки. 2017. Том 1. С. 344–347.
3. Lee S., Tanabe S., Kimura K. Field study on the thermal comfort and ventilation effectiveness in a concert hall with displacement ventilation system // Journal of Architecture and Planning. 2002. Vol. 67 (559). Pp. 37–44.
4. Нагорная А.Н., Морозова Н.С. Проблемы организации воздухораспределения при вытесняющей вентиляции с переменным расходом воздуха на примере зрительного зала театра // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: строительство и архитектура. 2013. Том. 12. № 2. С. 65–68.
5. Lastovets N., Sirén K., Risto K. et. al. Dynamic performance of displacement ventilation in a lecture hall // International Journal of Ventilation. 2020. DOI: 10.1080/14733315.2020.1777015.
6. Li L., Liu X., Zhang T., Lin W. Utilization of displacement ventilation and on-site measurement of thermal environment in an ice arena // Building and Environment. 2020. Vol. 186. 07391. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107391.
7. Mateus M. N., Carrilho Da Graca G. Thermal and airflow simulation of the Gulbenkian great hall // 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26–28. 2013. Pp. 1835–1842.
8. Mateus M. N., Carrilho Da Graca G. Simulated and measured performance of displacement ventilation systems in large rooms // Building and Environment. 2017. Vol. 114. Pp. 470–482.
9. Денисихина Д. М. Особенности численного моделирования воздушных потоков в объемах концертных и театральных залов // Интернет-журнал «Науковеденье». 2014. Выпуск 3. С. 1–13.
10. Lastovets N., Kosonen R., Jokisalo J., Kilpeläinen S. et. al. Dynamic design model of displacement ventilation // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 111 (10). 04049. DOI: 10.1051/e3sconf/201911104049.
11. Lastovets N., Kosonen R., Mustakallio P. et. al. Modelling of room air temperature profile with displacement ventilation // International Journal of Ventilation. 2019. Vol. 19 (3). Pp. 1–15. DOI: 10.1080/14733315.2019.1579486.
12. Naidenov K., Pitchurov G., Langkilde G., Melikov A. K. Performance of displacement ventilation in practice // Proceedings of Roomvent. Roomvent - 8th International Conference on Air Distribution in Rooms. 2002. 2389439622.
13. Shanab X., Zhouab J., W.-C.Chang V., Yang E. Comparing mixing and displacement ventilation in tutorial rooms: Students' thermal comfort, sick building syndromes, and short-term performance // Building and Environment. 2016. Vol. 102. Pp. 128–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.025>
14. Itania M., Ghalia K., Ghaddara N. Performance evaluation of displacement ventilation system combined with a novel evaporative cooled ceiling for a typical office in the city of Beirut // Energy Procedia. 2015. Vol. 75. Pp. 1728–1733. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.440
15. Itania M., Ghalia K., Ghaddara N. Displacement ventilation system combined with a novel evaporative cooled ceiling for a typical office in the city of Beirut: performance evaluation // Renewable Energy and Power Quality Journal. 2015. Vol. 13. DOI: 10.24084/repqj13.418.

16. Keblawi A., Ghaddar N., Ghali K., Jensen L. Chilled ceiling displacement ventilation design charts correlations to employ in optimized system operation for feasible load ranges // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. 1155–1164. doi:[10.1016/j.enbuild.2009.05.009](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.009)
17. Cho S., Im P., Haberl, J. Literature review of displacement ventilation // College Station, TX: Energy Systems Laboratory, Texas A&M University System. 2005. URL: <http://hdl.handle.net/1969.1/2845>
18. Zhou J., Chau, H. -W., Kang, Y., Hes, D., Noguchi, M., Aye L. Comparing mixing ventilation and displacement ventilation in university classrooms // *Proceedings of Zero Energy Mass Custom Home*. 2018. Pp. 263–274.
19. Шилькрот Е.О., Посохин В.Н. Воздухораспределение в помещениях: классификация систем // *АВОК*. 2009. № 3. С. 46–61.
20. Hasim B.A. Ventilation and air distribution systems in buildings // *Frontiers in mechanical engineering*. 2015. Vol. 1. Pp. 1–4.
21. Толстова Ю.И. Проектирование воздухораспределения в киноконцертных залах // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2012. № 6 (126). С. 68–69.
22. Ren S., Tian S., Meng X. Comparison of displacement ventilation, mixing ventilation and underfloor air distribution system // *International conference on architectural, civil and hydraulics engineering (ICACHE 2015)*. Pp. 79–82. DOI: 10.2991/icach-15.2015.16.
23. Наумов А.Л., Капко Д. В. CO₂: Критерий эффективности систем вентиляции // *АВОК*. 2015. № 1. С. 12–21.
24. Smedje G., Mattsson M., Wålander R. Comparing mixing and displacement ventilation in classrooms: pupils' perception and health // *Indoor air*. 2011. Vol. 21. Iss. 6. Pp. 454–461. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2011.00725.x
25. Keli A., Melikov A.K., Bivolarova M.P., Mustakallio P. Impact of room airflow interaction on metabolic CO₂ exposure // *E3S Web of Conferences CLIMA 2019*. 2019. Vol. 111. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/2019111020
26. Norbäck D., Wieslander G., Zhang X., Zhao Z. Respiratory symptoms, perceived air quality and physiological signs in elementary school pupils in relation to displacement and mixing ventilation system: an intervention study // *Indoor air*. 2011. Vol. 21. Iss. 5. Pp. 427–437. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2011.00717.x
27. Pantelic J., Rysanek A., Miller C. et. al. Comparing the indoor environmental quality of a displacement ventilation and passive chilled beam application to conventional air-conditioning in the Tropics // *Building and Environment*, 2018. Vol. 130. Pp. 128–142. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.026
28. Шумилов Р.Н., Толстова Ю.И. Воздухораспределение в киноконцертных залах // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2010. № 6 (102). С. 69–71.
29. Тертичник Е.И. Вентиляция. Учебник Изд. 2, исправл. и дополн. Москва: Изд-во АСВ, 2015. 608 с.
30. Шумилов Р.Н., Толстова Ю.И., Бояршинова А.Н. Проектирование систем вентиляции и отопления. Распределение приточного воздуха. // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2017. № 1 (181). С. 96–101.
31. Peter V. N. Analysis and design of room air distribution systems // *HVAC&R RESEARCH*. 2007. Vol.13 (6). Pp. 987–997.
32. Nielsen, P. V. Lecture Notes on Mixing Ventilation: Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University. 1995. Gul serie Vol. U9513 No. 29.

Информация об авторах

Абрамкина Дарья Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция». E-mail: dabramkina@ya.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Центральный федеральный округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26.

Петров Глеб Александрович, студент. E-mail: gpetrov962@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Центральный федеральный округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26.

^{1,*}**Abramkina D.V., ¹Petrov G.A.**

¹ National research Moscow state university of civil engineering
Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26

*E-mail: dabramkina@ya.ru

FEATURES OF VENTILATION SYSTEMS IN AUDITORIUM

Abstract. The choice of air distribution scheme is the most important task which determines indoor air quality, comfort thermal mode of the room and effectiveness of ventilation systems. The article presents comparative analysis of displacement and mixing ventilation systems for large premises. The methodology of the study is based on existing theoretical provisions and standard calculation approach of supply air jets. Multivariate calculations of mixing air distribution in cinema hall are presented. Horizontal jets along room surfaces can not provide required air velocity. In the case of vertical air distribution relative jet area beyond the recommended values. This factor had thus determined the possible formation of circulation contours with high concentrations of harmful emissions. The results of the calculation shows that the speed of the fan jet at the entrance of occupied zone lower than maximum permissible air mobility. The required temperature is achieved by using all air-distributing units considered.

Keywords: air distribution, displacement ventilation, mixing ventilation, supply air jets, relative jet area

REFERENCES

1. Khudoshin I.I., Tkachenko N.V.. Influence of the air exchange organization scheme on ventilation efficiency in auditoriums [*Vlijanie shemy organizacii vozduhoobmena na jeffektivnost' ventiljacii v zritel'nyh zalah*]. New Ideas of New Century – 2020: The Twentieth International Scientific Conference Proceedings. 2020. Tom 3. Pp. 488-492. (rus)
2. Elizarova A.D. Features of the organization of air exchange in the premises of modern cinemas [*Osobennosti organizacii vozduhoobmena v pomeshhenijah sovremennyh kinozalov*]. VII All-Russian Science Festival. 2017. Tom 1. Pp. 344–347. (rus)
3. Lee S., Tanabe S., Kimura K. Field study on the thermal comfort and ventilation effectiveness in a concert hall with displacement ventilation system // *Journal of Architecture and Planning*. 2002. Vol. 67 (559). Pp. 37–44.
4. Nagornaya A.N., Morozova N.S. Problems of air distribution at displacement ventilation and variable air volume on the basis of the theatre hall [*Problemy organizacii vozduhoraspredelenija pri vytesnjajushhej ventiljacii s peremennym rashodom vozduha na primere zritel'nogo zala teatra*]. Bulletin of the South Ural state university. Series “Construction engineering and architecture”. 2013. Tom. 12. No 2. Pp. 65–68. (rus)
5. Lastovets N., Sirén K., Risto K. et. al. Dynamic performance of displacement ventilation in a lecture hall // *International Journal of Ventilation*. 2020. DOI: 10.1080/14733315.2020.1777015.
6. Li L., Liu X., Zhang T., Lin W. Utilization of displacement ventilation and on-site measurement of thermal environment in an ice arena // *Building and Environment*. 2020. Vol. 186. 07391. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107391.
7. Mateus M. N., Carrilho Da Graca G. Thermal and airflow simulation of the Gulbenkian great hall // 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28. 2013. Pp. 1835–1842.
8. Mateus M. N., Carrilho Da Graca G. Simulated and measured performance of displacement ventilation systems in large rooms // *Building and Environment*. 2017. Vol. 114. Pp. 470–482.
9. Denisikhina D.M. Features of the numerical simulation of air movement inside concert and theater halls [*Osobennosti chislennogo modelirovanija vozdushnyh potokov v ob'emah koncertnyh i teatral'nyh zalov*]. Internet journal science. 2014. No 3(22). Pp. 1–13. (rus)
10. Lastovets N., Kosonen R., Jokisalo J., Kilpeläinen S. et. al. Dynamic design model of displacement ventilation // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 111 (10). 04049. DOI: 10.1051/e3sconf/201911104049.

11. Lastovets N., Kosonen R., Mustakallio P. et. al. Modelling of room air temperature profile with displacement ventilation // *International Journal of Ventilation*. 2019. Vol. 19 (3). Pp. 1–15. DOI: 10.1080/14733315.2019.1579486.
12. Naidenov K., Pitchurov G., Langkilde G., Melikov A. K. Performance of displacement ventilation in practice // *Proceedings of Roomvent. Roomvent - 8th International Conference on Air Distribution in Rooms*. 2002. 2389439622.
13. Shanab X., Zhouab J., W.-C.Chang V., Yang E. Comparing mixing and displacement ventilation in tutorial rooms: Students' thermal comfort, sick building syndromes, and short-term performance // *Building and Environment*. 2016. Vol. 102. Pp. 128–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.025>
14. Itania M., Ghalia K., Ghaddara N. Performance evaluation of displacement ventilation system combined with a novel evaporative cooled ceiling for a typical office in the city of Beirut // *Energy Procedia*. 2015. Vol. 75. Pp. 1728–1733. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.440
15. Itania M., Ghalia K., Ghaddara N. Displacement ventilation system combined with a novel evaporative cooled ceiling for a typical office in the city of Beirut: performance evaluation // *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2015. Vol. 13. DOI: 10.24084/repqj13.418.
16. Keblawi A., Ghaddar N., Ghali K., Jensen L. Chilled ceiling displacement ventilation design charts correlations to employ in optimized system operation for feasible load ranges // *Energy and Buildings*. 2009. Vol. 41. 1155–1164. doi:[10.1016/j.enbuild.2009.05.009](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.009)
17. Cho S., Im P., Haberl, J. Literature review of displacement ventilation // College Station, TX: Energy Systems Laboratory, Texas A&M University System. 2005. URL: <http://hdl.handle.net/1969.1/2845>
18. Zhou J., Chau, H. -W., Kang, Y., Hes, D., Noguchi, M., Aye L. Comparing mixing ventilation and displacement ventilation in university classrooms // *Proceedings of Zero Energy Mass Custom Home*. 2018. Pp. 263–274.
19. Shilkrot E.O., Posokhin V.N. Indoor air distribution: system classification [*Vozduhoraspredelenie v pomeshhenijah: klassifikacija system*]. AVOK. 2009. № 3. Pp. 46–61. (rus)
20. Hasim B.A. Ventilation and air distribution systems in buildings // *Frontiers in mechanical engineering*. 2015. Vol. 1. Pp. 1–4.
21. Tolstova Yu.I. Air distribution design in cinema and concert halls [*Proektirovanie vozduhoraspredelenija v kinokoncertnyh zalah*]. C.O.K. (Plumbing, Heating and Air Conditioning). 2012. № 6 (126). Pp. 68–69. (rus)
22. Ren S., Tian S., Meng X. Comparison of displacement ventilation, mixing ventilation and underfloor air distribution system // *International conference on architectural, civil and hydraulics engineering (ICACHE 2015)*. Pp. 79–82. DOI: 10.2991/icache-15.2015.16.
23. Naumov A.L., Kapko D. V. CO₂: A criterion for the efficiency of ventilation systems [*SO₂: Kriterij jeffektivnosti sistem ventiljacii*]. AVOK. 2015. № 1. Pp. 12–21. (rus)
24. Smedje G., Mattsson M., Wälinder R. Comparing mixing and displacement ventilation in classrooms: pupils' perception and health // *Indoor air*. 2011. Vol. 21. Iss. 6. Pp. 454–461. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2011.00725.x
25. Keli A., Melikov A.K., Bivolarova M.P., Mustakallio P. Impact of room airflow interaction on metabolic CO₂ exposure // *E3S Web of Conferences CLIMA 2019*. 2019. Vol. 111. 02005. DOI: 10.1051/e3sconf/2019111020
26. Norbäck D., Wieslander G., Zhang X., Zhao Z. Respiratory symptoms, perceived air quality and physiological signs in elementary school pupils in relation to displacement and mixing ventilation system: an intervention study // *Indoor air*. 2011. Vol. 21. Iss. 5. Pp. 427–437. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2011.00717.x
27. Pantelic J., Rysanek A., Miller C. et. al. Comparing the indoor environmental quality of a displacement ventilation and passive chilled beam application to conventional air-conditioning in the Tropics // *Building and Environment*, 2018. Vol. 130. Pp. 128–142. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.11.026
28. Shumilov R.N., Tolstova Yu.I. Air distribution in cinema and concert halls [*Vozduhoraspredelenie v kinokoncertnyh zalah*]. C.O.K. (Plumbing, Heating and Air Conditioning). 2010. № 6 (102). Pp. 69–71. (rus)
29. Tertichnik E.I. Ventilation [*Ventiljacija*]. Moscow: ASV. 2015. 608 p. (rus)
30. Shumilov R.N., Tolstova Yu.I., Boyarshinova A.N. Ventilation and heating system design. Supply air distribution [*Proektirovanie sistem ventiljacii i otoplenija. Raspredelenie pritochnogo vozduha*]. C.O.K. (Plumbing, Heating and Air Conditioning). 2017. № 1 (181). S. 96–101. (rus)

31. Peter V. N. Analysis and design of room air distribution systems // HVAC&R RESEARCH. 2007. Vol.13 (6). Pp. 987–997.

32. Nielsen, P. V. Lecture Notes on Mixing Ventilation: Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University. 1995. Gul serie Vol. U9513 No. 29.

Information about the authors

Abramkina, Daria V. Assistant professor, PhD. E-mail: dabramkina@ya.ru. National research Moscow state university of civil engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26.

Petrov, Gleb P. student. E-mail: gpetrov962@gmail.com. National research Moscow state university of civil engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoye Shosse, 26.