

УДК 628.84

# Система вентиляции и кондиционирования Большого зала Московской консерватории им. П.И.Чайковского. Математическое моделирование\*

Канд. техн. наук **М.А. КОЛОСОВ**, ведущий специалист по спортивным технологиям ООО «НПФ «ХИМХОЛОДСЕРВИС», доцент МГТУ им. Н.Э.Баумана, [kolosov@himholod.ru](mailto:kolosov@himholod.ru)  
канд. техн. наук **К.С. ЕГОРОВ**, доцент МГТУ им. Н.Э.Баумана, [blackbird@mail.ru](mailto:blackbird@mail.ru)

*В заключительной части статьи рассмотрено математическое моделирование процессов вентиляции в партере, на балконах и амфитеатрах Большого зала Московской консерватории. Показано, что реализованная в зале схема вытеснительной вентиляции с воздухораспределительными решетками под креслами обеспечивает по всему партеру комфортные температуры в пределах  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ . На балконах условия вентиляции такие же, как в партере, и только в последних рядах второго амфитеатра наблюдается температурный дискомфорт.*

*Моделирование вентиляции группы кресел (3x3) помогло уточнить картину течения и температур воздуха, а также правильность подбора решеток.*

*В заключение перечислены общие результаты моделирования и решения, принятые на их основе.*

*Ключевые слова: математическое моделирование; вентиляция партера, амфитеатра, балконов; воздухораспределение.*

## THE VENTILATION AND AIR CONDITIONING SYSTEM IN THE HALL OF P.I. CHAIKOVSKIY MOSCOW CONSERVATOIRE. MATHEMATICAL MODELING

PhD M.A. KOLOSOV, key specialist on sports technologies, public corporation "NPF "KHIMKHOLODSERVIS", associate professor of Bauman MSTU, [kolosov@himholod.ru](mailto:kolosov@himholod.ru)

PhD K.S. EGOROV, associate professor of Bauman MSTU, [blackbird@mail.ru](mailto:blackbird@mail.ru)

*In the final part of the paper a mathematical modeling of the ventilation processes in the parterre, amphitheatres and balconies of the Hall is considered. Is shown that realized supplanting ventilation scheme of the Hall with distribution grids under stalls ensures comfort temperatures within the limits of  $25 \pm 1^\circ\text{C}$  all over the parterre. In the balcony ventilation conditions are the same as in the parterre; only in the back rows of the second amphitheatre a thermal discomfort is observed.*

*Ventilation modeling for the group of stalls (3x3) helped to define more exactly air flows and temperatures as well as the choice of the grids.*

*After all total modeling results and decisions based on them are discussed.*

*Key words: mathematical modeling; ventilation of parterre, amphitheatre, balconies; air distribution.*

## Моделирование пространства зала

Для партера, балконов и амфитеатров были выполнены расчеты полей температур и подвижности воздуха во всем объеме зала в двух стационарных режимах его эксплуатации: концертном и антрактом.

В концертном режиме в зал поступают тепловыделения от людей и исполнителей на сцене, от всех технологических устройств, рассеянные тепловые потоки снаружи через «второй свет» (ряд окон на боковых стенах зала на уровне первого амфитеатра) и, кроме того, происходит переизлучение тепла от потолка к области пребывания зрителей. Освещение в зале не работает. В полностью заполненном партере с учетом откидных кресел размещается 862 зрителя; приняты явные тепловыделения 72 Вт для каждого. Технологические нагрузки берутся согласно паспортам изделий, и, если это не осветительные приборы, все тепло учитывается локально (в месте размещения прибора); 85 % мощности осветительных приборов рассеивается локально в зоне размещения прибора, а все остальное — на освещаемой поверхности.

В режиме антракта включаются все люстры зала и бра, размещенные на стенах, и выключаются все технологические нагрузки.

В зоне партера осуществляется схема подачи свежего кондиционного воздуха к зоне кресел через камеру статического давления. Приточный кондиционный воздух в количестве  $60\,000\text{ м}^3/\text{ч}$  от специальных кондиционеров поступает в камеру под небольшим избыточным давлением. По всему пространству зала под каждым креслом, кроме откидных, размещаются напольные вихревые воздухораспределительные решетки (диффузоры), через которые свежий воздух поступает в зал. Акустические характеристики этих диффузоров определяют звуковое воздействие на зал. Такое воздухораспределение снизу от камеры статического давления через распределительные решетки можно назвать регулярной вытеснительной схемой вентиляции.

\* Окончание. Начало см. «Холодильная техника» № 8, 9, 10/2012.

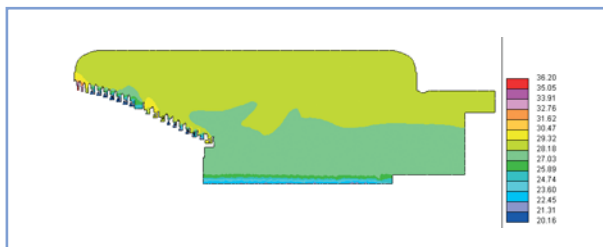


Рис. 7. Поле температур в среднем сечении зала по результатам моделирования при модернизированном варианте воздухооборота на сцене. (На шкале цветов температура дана в °С)\*

Схема обеспечивает высокую надежность термостатирования, стабильность и консервативность во всех режимах эксплуатации. Для всей поверхности партера характерна однородная температурная стратификация с горизонтальным расслоением в пределах 23,6...26 °С. На рис. 7 показано распределение температур в среднем сечении зала при принятой системе вентиляции. В области партера равномерно без вихрей и локальных выбросов температура воздуха повышается за счет явного тепла от людей.

Пространство партера сложно отделить от пространства сцены. Поле скоростей воздуха в зоне передних кресел партера формируется во многом условиями вентиляции на сцене. При подвижности воздуха, полученной во втором варианте его подачи (после модернизации схемы), и при подаче воздуха снизу в зоне пребывания людей в партере устанавливаются вполне комфортные температуры. Все это свидетельствует о надежности схемы вытеснительной вентиляции через воздухораспределительные решетки под креслами, об эффективности и надежности совместной работы статической камеры давления для подачи свежего воздуха в зал и вихревых воздухораспределителей для непосредственной подачи воздуха индивидуально к каждому зрительскому месту. Только на части мест партера, в углах зала под амфитеатром, где не было возможности организовать регулируемую подачу свежего воздуха под кресла, наблюдается локальное повышение температуры. На остальных местах, как показали расчеты, при температуре приточного воздуха 20 °С в зале и 17 °С на сцене по всему пространству партера, где присутствуют люди, устанавливается температура в пределах  $25 \pm 1$  °С.

Для амфитеатров и балконов по возможности была принята подобная схема вентиляции. Под обоими амфитеатрами были предусмотрены специальные камеры статического давления, откуда свежий воздух от кондиционеров подается к зрительским местам через лестничные воздухораспределительные решетки. Эти решетки, использовавшиеся из-за того, что в амфитеатре нет отдельных кресел, монтируются на вертикальной поверхности сплошных лавок в зоне ног и между рядами в проходах так, чтобы зрители не испытывали дискомфорта. Из-за ограниченности места число ре-

шеток в этой зоне было ограничено. Кроме того, в амфитеатрах есть несколько рядов лавок, где вообще не предусмотрена подача свежего воздуха от кондиционера, и вентиляция этих мест происходит за счет общего воздухообмена в зале.

Во многом поэтому, но в основном из-за невозможности оптимального размещения вытяжных устройств не удалось полностью оптимизировать систему вентиляции в области амфитеатров, добиться абсолютного комфорта на всех зрительских местах этой зоны. Распределение скоростей и температур в среднем сечении на амфитеатрах (см. рис. 7) показывает локальный всплеск скорости воздуха в области последних двух рядов первого амфитеатра. Температурный дискомфорт, как и следовало ожидать, наблюдается в пространстве лавок на последних рядах второго амфитеатра.

На балконах воздух подается к каждому зрительскому креслу через напольные воздухораспределительные решетки в фальшполу. Поэтому на балконе условия вентиляции зоны пребывания зрителей повторяют условия в партере.

#### Моделирование вентиляции для отдельной группы зрителей

Для подбора типа распределительной решетки под креслами зрителей и уточнения локальной картины течений и температур было выполнено моделирование пространства отдельной группы зрительских кресел (три кресла в трех рядах партера). Геометрическая модель этой группы представлена на рис. 8.

Граничные условия по температуре и давлению задавались те же, что и при моделировании пространства зала. Подача воздуха через диффузор моделировалась при разных углах установки лопаток диффузора и расходе воздуха. Поскольку моделирование работы диффузора не входило в круг поставленных задач, условно считалось, что воздух поступает под кресло через торцевую поверхность, чья площадь эквивалентна площади диффузора и которая в модели поднята над полом, так что эпюра скоростей эквивалентна характерной эпюре скоростей, приводимой фирмой TROX, производителем этих вихревых решеток. При этом непосредственно

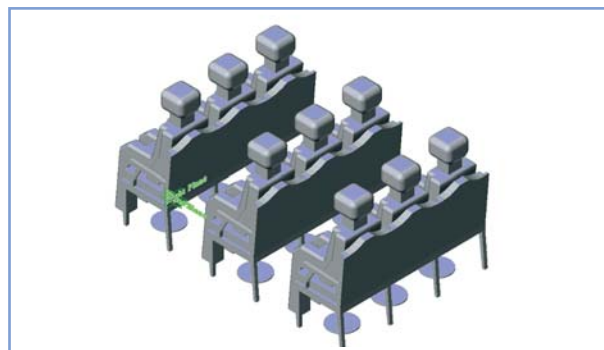


Рис. 8. Геометрическая модель зоны зрительских кресел 3×3

\* Нумерация рисунков сквозная по всей статье.

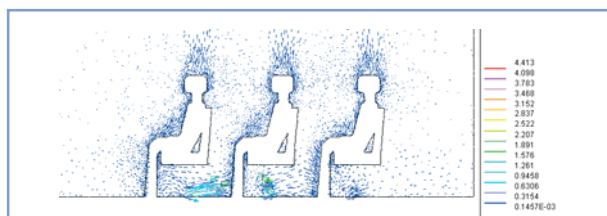


Рис. 9. Векторное поле скоростей около группы зрителей

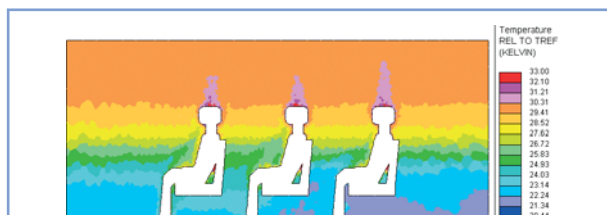


Рис. 10. Скалярное поле температур около группы зрителей

около распределительной решетки скорость воздуха лежит в пределах 1 м/с, быстро спадая до средних величин по мере удаления от нее. Распределение скоростей в пространстве группы зрительских кресел представлено на рис. 9.

Эти результаты хорошо коррелируют с результатами, полученными при моделировании всего зала. Скорость воздуха около сидящего человека не превосходит 0,3 м/с, что соответствует санитарным нормам.

Результаты распределения температур около группы зрителей представлены на рис. 10. В зоне пребывания людей наблюдается горизонтальная стратификация температуры. Благодаря работе вихревых воздухораспределителей область холодных температур локализована под креслами. Около ног (лодыжек) зрителей температура уже соответствует санитарной норме (23...24 °С). Здесь формируется область нижней границы зоны пребывания зрителей, откуда свежий воздух поступает непосредственно на охлаждение и восприятие выделяемых людьми тепла и вредных веществ. По высоте зоны пребывания людей температура монотонно, пропорционально тепловыделениям от людей повышается до 26...27 °С с локальными всплесками непосредственно около тел людей. Это хорошо согласуется с результатами, полученными на модели всего зала.

#### Заключение

✓ Таким образом, выполненное методом численного моделирования процессов газодинамики и теплообмена исследование условий вентиляции и кондиционирования пространства Большого зала Московской консерватории позволило еще на этапе проектирования системы вентиляции и кондиционирования внести ряд существенных и приемлемых изменений в ее конструкцию, которые улуч-

шили условия комфорта для исполнителей и зрителей. Можно сказать, что после реконструкции Большой зал консерватории впервые получил полноценную систему кондиционирования и вентиляции, которая позволяет круглогодично обеспечивать комфортные условия пребывания людей. При реконструкции Большого зала сохранились его исторический вид и уникальная акустика.

✓ Моделирование проводилось для двух режимов, двух сочетаний нагрузки (концерт и антракт), по результатам которого проектирование осуществлялось для наиболее напряженного режима. Поскольку в концертном режиме фиксировались в среднем более высокие уровни температур и скоростей воздуха, основной объем исследований выполнялся для этого режима. Общая напряженность параметров среды в режиме антракта ниже, а картина их распределения подобна концертному режиму.

✓ Проект системы кондиционирования и вентиляции партера, выполненный отделом СТО ГУП «Моспроект-4», по результатам моделирования показал удовлетворительную картину распределения температур и подвижности воздуха даже в самом напряженном режиме эксплуатации. Скорость воздуха в основном не превышала 0,3 м/с и градиент температуры по высоте зоны обитания составлял не более 3 °С. Особенно надежно работала система вентиляции в партере, гарантированно обеспечивая комфортные условия в зоне пребывания людей.

✓ В результате анализа системы подачи свежего воздуха на сцену установлено, что в первоначальном варианте (при использовании сопел) скорость воздуха в передней части сцены превышала 1,5 м/с. Поэтому была произведена замена сопел на воздухораспределительные решетки и оптимизированы их количество и размещение из условия, чтобы скорость воздуха на всем пространстве сцены не превышала 0,3 м/с.

✓ Для воздухораспределения были выбраны и проверены напольные и лестничные (при размещении на вертикальной поверхности) диффузорные решетки фирмы TROX с регулятором направления воздушного потока (крыльчаткой), что позволяет создать поток воздуха с преимущественно горизонтальным распределением скорости. Эти воздухоподающие устройства обеспечивают, с одной стороны, низкий уровень шума и с другой — достаточно комфортные температуру и условия вентиляции в зоне ног.

✓ В пространстве зала, в среднем, параметры воздуха для зрителей имеют комфортные значения: температура лежит в пределах 24...26 °С; градиент температур по высоте зоны обслуживания, зоны пребывания зрителей не превосходит 3,5 °С; местная скорость воздуха в этой зоне составляет 0,2...0,25 м/с.

✓ Моделирование показало автомодельность температурного поля в зале по отношению к темпера-

туре приточного воздуха, т.е. при изменении его температуры на несколько градусов средняя температура воздуха в зоне пребывания зрителей изменяется на ту же величину. Это свидетельствует о работоспособности предложенной схемы вентиляции и в условиях зимней эксплуатации.

✓ В вернем пространстве зала, как показало моделирование, формируется глобальный воздушный вихрь, который в отдельных областях зоны пребывания зрителей приводит к локальным всплескам скорости и температуры. Причиной этого является, по мнению авторов, принятая схема размещения вытяжных решеток на потолке. Дополнительное моделирование и анализ показали, что более приемлемым вариантом организации вытяжки является вытяжка с решетками, размещенными равномерно по всему потолочному пространству зала. Но размещение в существующем здании новых инженерных систем противоречит ограничениям, обусловленным историческим обликом зала.

Санитарные условия (условия комфорта) в зале для исполнителей и зрителей выполняются:

- ✓ по температуре – частично (на 87,4 %);
- ✓ по подвижности воздуха – полностью (на 100 %).

По результатам моделирования на всем пространстве зала в зоне пребывания зрителей, а также на всей площади сцены локальная скорость воздуха не превышает 0,25...0,3 м/с. Небольшое превышение температуры выше 26 °С наблюдается:

- ✓ в партере для 28 мест (~ 2 % от общего числа мест в партере);
- ✓ в первом амфитеатре для 94 мест (~ 20 % от числа мест);
- ✓ во втором амфитеатре для 105 мест (~ 27 % от числа мест);
- ✓ на балконах температурные условия выполняются везде.

Таким образом, из 1870 мест в зале примерно для 227 мест (~12,1 %) имеется превышение температуры в верхней зоне тела человека. По-настоящему некомфортные условия складываются приблизительно на 25 местах в зоне трех последних рядов второго амфитеатра.

Следует учесть, что моделирование выполнялось при максимальной напряженности тепловых нагрузок в зале и высоких принятых тепловыделениях от человека. Все это позволяет сделать вывод, что система кондиционирования и вентиляции Большого зала консерватории обеспечивает комфортные условия для зрителей и исполнителей, о чем свидетельствует и первый год эксплуатации этого зала после реконструкции.

Дополнительным фактором надежного поддержания условий комфорта в зале может служить способность стен аккумулировать тепло или холод даже при самых неблагоприятных сочетаниях внешних условий. Опыт эксплуатации подобных концертных залов показывает, что летом предварительное кондиционирование (охлаждение) зала и проветривание во время антракта могут помочь службе эксплуатации обеспечивать комфортные условия. Однако при моделировании учет теплоаккумулирующей способности стен зала не проводился в связи с зависимостью этого параметра от многочисленных неопределенных факторов, что делало бы расчет практически невозможным.

*В заключение авторы хотели бы выразить благодарность службе эксплуатации Московской консерватории им. П.И.Чайковского, санитарно-техническому отделу ГУП «Моспроект-4» и научно-производственной фирме «ХИМХОЛОДСЕРВИС»\* за активное сотрудничество при выполнении этой работы и за моральную и материальную поддержку, оказанную коллективу исполнителей этого исследования.*

\* Россия, 127422, Москва, ул.Костякова, д.12, оф. 96.  
Тел.: (495) 610-80-19, 610-45-11, 610-53-01, (499) 976-48-04  
<http://www.himholod.ru>, e-mail: [himholod@himholod.ru](mailto:himholod@himholod.ru), [sales@himholod.ru](mailto:sales@himholod.ru)