

УДК: 534-13
OECD: 1.03

Численное моделирование шумообразования в оконном щелевом приточном клапане

Карионова Л.А.¹, Пастухова Л.Г.^{2*}, Давыдов В.Б.³, Шаламова А.Р.⁴

¹Аспирант кафедры гидравлики,

²К.т.н., зав. кафедрой гидравлики,

³К.ф.-м.н., доцент кафедры гидравлики,

⁴Магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции,

^{1,2,3,4}Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, РФ

Аннотация

Щелевые оконные клапаны инфильтрации, предназначенные для подачи приточного воздуха в помещение, часто становятся источниками шума. Предметом исследования стали факторы, влияющие на уровень аэродинамического шума, создаваемого в процессе движения воздуха в щели оконного клапана с резко меняющимся профилем. Исследование выполнено методом численного эксперимента в квази-3D-постановке на основе метода конечных элементов с применением программного комплекса Comsol Multiphysics. В результате решения гидродинамической и аэроакустической задач получены поля звукового давления в диапазоне частот 5 – 2500 Гц для различных вариантов разности давлений снаружи и внутри здания, формируемой гравитационными силами и ветром от 0 до 450 Па. Получены зависимости уровней звукового давления от разности давления в контрольных точках. В дальнейшей перспективе предполагается проверка данной численной модели на адекватность путем постановки физического эксперимента, а также использование данной модели для исследования возможности изменения конфигурации профиля щели оконного клапана с целью снижения генерируемого ею шума.

Ключевые слова: аэродинамическая и аэроакустическая задача, LES-модель турбулентности, уравнение Рейнольдса, уравнение Лайтхилла, щелевой оконный клапан инфильтрации

Numerical modeling of noise generation in a window slot supply valve

Karionova L.A.¹, Pastukhova L.G.^{2*}, Davydov V.B.³, Shalamova A.R.⁴

¹Postgraduate student in the Department of Hydraulics,

²Ph.D., Head of the Department of Hydraulics,

³Ph.D., Associate Professor of the Department of Hydraulics,

⁴Master's student of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation,

^{1,2,3,4}Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Abstract

Slotted window infiltration valves designed to supply fresh air to a room often become noise sources. The subject of the study were the factors affecting the level of aerodynamic noise generated during air movement in the slot of the window valve with a sharply changing profile. The study was carried out using the numerical experiment method in a 2D statement based on the finite element method using the Comsol Multiphysics

*E-mail: l.g.pastuhova@urfu.ru (Пастухова Л.Г.)

software. As a result of solving the hydrodynamic and aeroacoustic problems, sound pressure fields were obtained in the frequency range of 5 - 2500 Hz for various options for the pressure difference outside and inside the building, formed by gravitational forces and wind from 0 to 450 Pa. Dependences of sound pressure levels on the pressure difference at control points were obtained. In the future, it is planned to check this numerical model for adequacy by setting up a physical experiment, as well as to study the possibility of changing the configuration of the window valve slot profile in order to reduce the noise it generates.

Keywords: aerodynamic and aeroacoustic problem, LES-model of turbulence, Reynolds equation, Lighthill equation, slot window infiltration valve

Введение

В практике проектирования вентиляции объектов строительства специалисты сталкиваются с проблемой адекватного подбора оборудования, в частности, приточных оконных клапанов, которые бы не вызывали у жильцов акустический дискомфорт из-за генерируемого ими шума. Действительно, разность давлений, под действием которой формируется скорость потока воздуха, проходящего через клапан, носит непостоянный быстро меняющийся во времени характер, который зависит не только от температурного перепада внутреннего и наружного воздуха, но и от характера распределения аэродинамических коэффициентов на фасадах и кровле здания и пульсаций скорости ветра. Эти факторы в свою очередь приводят к резкому возникновению значительных перепадов давления на воздухозаборных и вытяжных отверстиях, что приводит к шумообразованию – свисту и гулу – в воздухозаборных устройствах, приточных клапанах инфильтрации. Чтобы избежать данного звукового эффекта, жильцы, как правило, закрывают плотно клапаны и окна, что дестабилизирует работу системы вентиляции с естественным побуждением, приводит к «опрокидыванию» вытяжных каналов, которые начинают работать на приток, перенося загрязнения и запах из чужих квартир. Известно, что нормирование шума в помещении осуществляется, при работающей вентиляции, и в случае вентиляции с естественным побуждением – при открытых окнах или клапанах инфильтрации. Ввиду изложенного, проблема разработки численной модели для исследования влияния различных факторов на шумообразование в щели оконного клапана является актуальной.

Исследование влияния перепада внешнего и внутреннего давления на формируемый в щели клапана звук, генерируемый в следствии отрыва пограничного слоя от стенки канала с резко меняющимся профилем, выполнялось численным методом в среде ComSol Multiphysics и сводилось к решению задачи Лайтхилла для турбулентного потока в квази-3D-постановке с использованием LES-модели турбулентности.

Вопросам аэроакустического анализа в пограничном слое турбулентного воздушного потока методом Лайтхилла (Lighthill M.J.) [1], [2] посвящены работы многих российских и зарубежных исследователей, среди которых работы Росситера (Rossiter J.E.) [3], Роквелла и Наудашера (Rockwell D., Naudascher E.) [4], Лафона, Цейлауда, Девоса и Ламберта (Lafon P., Caillaud S., Devos J.P., Lambert C.) [5], Копьева В.Ф. [6], Зайцева М.Ю. [7], Беляева И.В. [8], Сухинова А.И. [9], Воронкова С.С. [10], Кандрюнина В.С. [11] и др. являются наиболее близкими разрабатываемой теме.

В данной работе приводятся результаты, полученные при решении системы уравнений гидроаэродинамики и аэроакустики для численной модели щели приточного оконного клапана. Построенная модель является инструментом для дальнейших исследований данной прикладной задачи.

1 Методология

1.1 Математическая модель шумообразования в приточном клапане

Решение аэроакустической задачи о возникновении шума в воздушном потоке в приточном клапане сводится к решению сложной сопряженной (мультифизической) задачи о движении жидкости в канале с резкоменяющимся профилем стенки. Известно, что поток, проходящий мимо открытой полости, приводит к возникновению автоколебаний [1], [2]. Моделирования турбулентности выполнено методом LES (Large Eddy Simulation) [12] - [15].

Система уравнений аэрогидродинамики модели невесомой несжимаемой жидкости, движущейся в канале с резкоменяющимся профилем стенки, состоит из уравнений (1) – (4):

- уравнение неразрывности

$$\rho (\nabla \vec{V}) = 0, \quad (1)$$

- уравнение движения

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \vec{V} (\nabla \vec{V}) = \nabla [-pI + K] - \rho \nabla \tau_{LES} + F, \quad (2)$$

где $\vec{V}$ – вектор скорости; ρ – плотность; p – абсолютное давление; I – единичный тензор; K – тензор вязких напряжений; F – массовые силы; τ_{LES} – турбулентные касательные напряжения,

$$K = \mu \left[\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right], \quad (3)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости;

$$\tau_{LES} = \vec{V} \vec{V}'^T + \vec{V}' \vec{V}^T + \vec{V}' \vec{V}'^T, \quad (4)$$

где $\vec{V}'$ – пульсационная составляющая вектора скорости.

Эту систему дополняет уравнение аэроакустики – уравнение Лайтхилла (5), описывающее распространение звука в среде с потерями при наличии дипольных источников q_d , монопольных источников Q_m , затухания и дисперсии ρ_c и k_{eq}

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m, \quad (5)$$

где p_t – полное акустическое давление; q_d – дипольный аэродинамический источник звука; ρ_c – комплексная плотность, учитывающая потери в среде; $k_{eq}^2 p_t$ – эквивалентное волновое число; k_{eq} – эффективное волновое число, учитывающее дисперсию (зависимость скорости звука от частоты) и потери (вязкость, теплопроводность); ; $k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2$; c – скорость звука; ω – круговая частота; Q_m – монопольный источник.

1.2 Граничные и начальные условия

Геометрия граничных условий на начальных этапах исследования выбрана максимально приближенной к реальной геометрии (рисунок 1в). Упрощение коснулось входной части клапана (рисунок 1б, выделена зеленым) и выходной области (рисунок 1б, выделена голубым) в процессе попыток добиться сходимости решения.

Расчетный участок канала оконного клапана инфильтрации – домен с геометрическими параметрами: ширина домена $d = 5$ мм, высота доменного участка $H = 10$ мм, длина участка домена-источника $l_s = 90$ мм, длина всего домена $l = 210$ мм (рисунок 2). На входном сечении в домен задан равномерный профиль скорости, на выходе – давление. Нижняя и верхняя границы акустического домена (щели клапана) – твердые с нулевой скоростью (условие налипания), нижняя и верхняя границы домена потока – жидкость (условие скольжения).

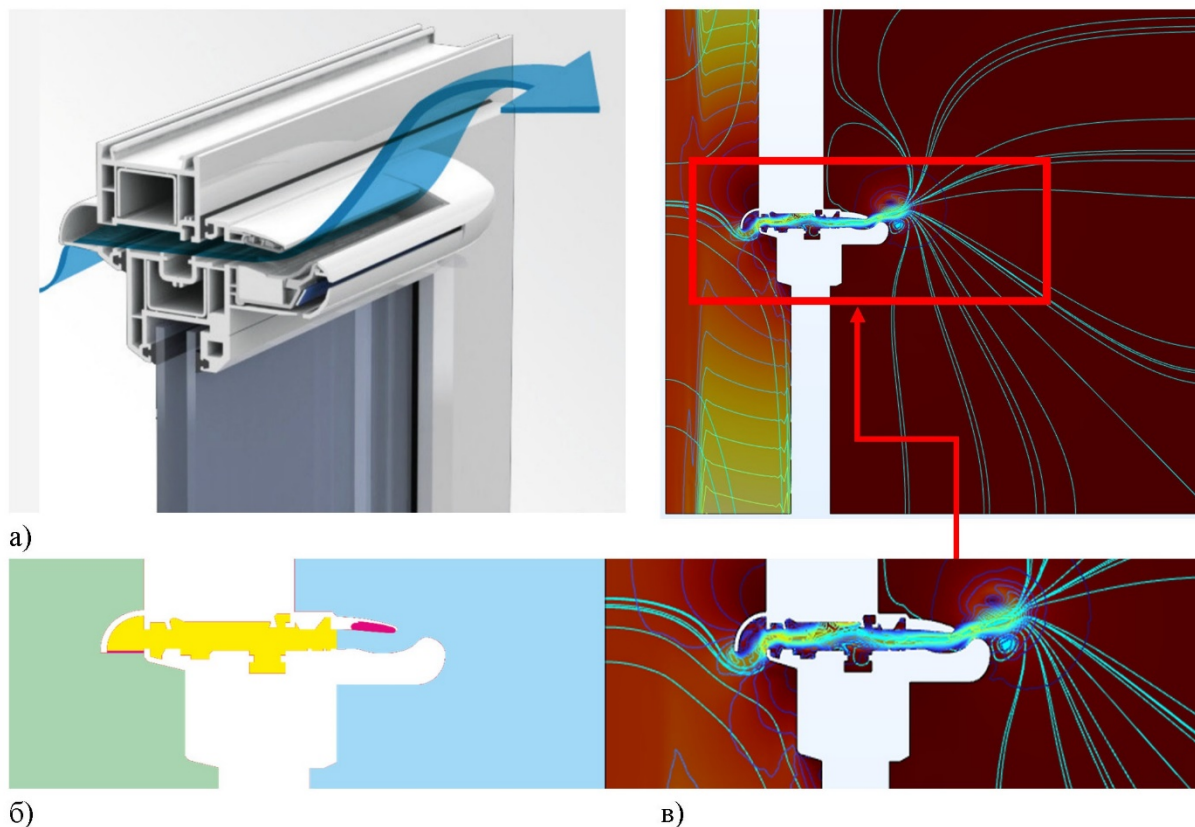


Рисунок 1 – Геометрия канала: а) схема устройства оконного клапана; б) исследуемая часть канала оконного клапана инфильтрации (выделен желтым); в) поле распределения скорости, м/с, и линии тока в поперечном сечении для геометрии, максимально приближенной к реальности

Задача решена в квази-3D-постановке. На боковых поверхностях заданы условия симметрии. Расчетная сетка получена путем построения треугольной сетки на серединной плоскости расчетного домена путем растягивания в поперечном направлении с получением конечных элементов в виде призм. Всего модель имеет 63698 пространственных элементов, 66440 граничных элементов, 2884 линейных элементов, 199212 степеней свободы.

Для удобства анализа выбраны три расчетные точки 1, 2, 3 с координатами (x, y, z) :

1 точка – (90; 5; 2,5) мм – на выходе из щели клапана;

2 точка – (150; 5; 2,5) мм – на расстоянии 60 мм от выхода;

3 точка – (210; 5; 2,5) мм – на расстоянии 120 мм от выхода.

Выбор вариантов начальных скоростей u_0 был выполнен, исходя из возможных значений гравитационных и ветровых давлений для зданий, построенных в географических районах с параметрами климата, соответствующими условиям г. Екатеринбурга по СП 131.13330.2020 [16]:

– скорости ветра $w = 4,0$ м/с,

– температуре воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью $0,92 \ t = -32 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура внутреннего воздуха в расчете принята $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

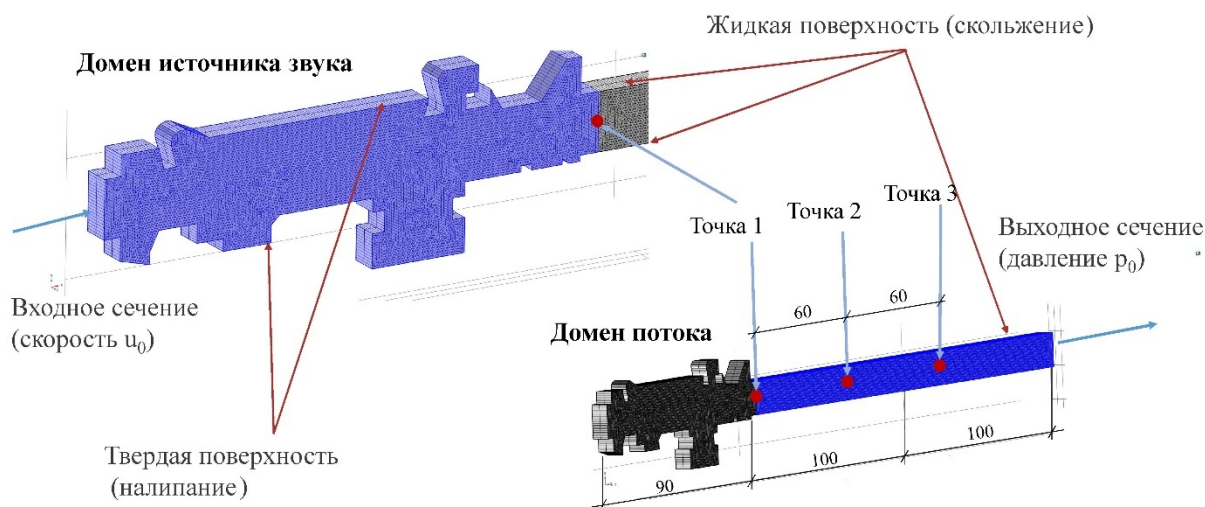


Рисунок 2 – Граничные условия

Разность давлений на наружной и внутренней поверхностях ограждающей конструкции определена по СП 50.13330.2024 [17]:

$$\Delta p = 0,55H(\gamma_n - \gamma_v) + 0,03\gamma_n w^2, \quad (6)$$

где H – высота здания, м; 0,55 – коэффициент, учитывающий положение среднего элемента наружного ограждения по высоте; $\gamma = \rho g$ – удельный вес наружного γ_n воздуха и внутреннего γ_v воздуха; w – скорость ветра, м/с, принимается по СП 20.13330.2016 [18].

Результаты расчетов сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 – Перепад давления снаружи и внутри помещения

Высота здания, м	Коэффициент изменения скорости ветра по высоте	Величина гравитационного перепада давлений, Па	Величина ветрового перепада давлений, Па	Величина общего перепада давлений Δp , Па
15	1,1	21,3	8,7	30,0
60	1,6	85,8	18,6	104,4
150	1,9	215,0	26,2	240,7
210	2,2	300,6	61,3	361,6

Таким образом, в качестве расчетных вариантов выбраны 7 вариантов скоростей на входе в доменную область $u_0 = [1; 2; 5; 10; 15; 20; 25]$ м/с, что соответствует разности давлений $\Delta p = \frac{\rho u_0^2}{2} = [0,7; 2,9; 18,3; 73,2; 164,8; 262,9; 457,7]$ Па.

1.3 Алгоритм решения

Алгоритм решения следующий.

Этап 1 (Study 1). Решить начальную модель LES, чтобы получить полностью развитый турбулентный поток, выбрав время (продолжительность), соответствующее минимум 10 проходкам, используя ту же сеточную модель, что и для второго исследования (Study 2). Сохранять решение в конечный момент времени.

Этап 2 (Study 2). Решить LES-модель, используя результаты 1-го этапа (Study 1) в качестве начального условия для 2-го этапа.

Модель хорошо разрешается в пространстве и времени при следующих условиях:

- а) решая от 0 до T_{end} , сохраняем решения на каждом шаге Δt ;
- б) размеры сетки для разрешения пограничного слоя и структуры вихря:
 - разрешение по частоте: $\Delta f = \frac{1}{T_{end}}$,
 - максимальная частота: $f_{max} = \frac{1}{2\Delta t}$.

Этап 3 (Study 3). Решить переходное отображение исходных условий из сетки CFD в сетку акустики.

Этап 4 (Study 4). Преобразование Фурье исходных значений параметров с использованием шага исследования Time to Frequency FFT.

Этапы 5 и 6 (Study 5, 6). Акустический анализ в частотной области.

2 Обсуждение результатов

В итоге реализации вышеописанного алгоритма получены спектры уровней звукового давления (УЗД) в расчетных точках для 7 вариантов скоростей u_0 (рисунок 3).

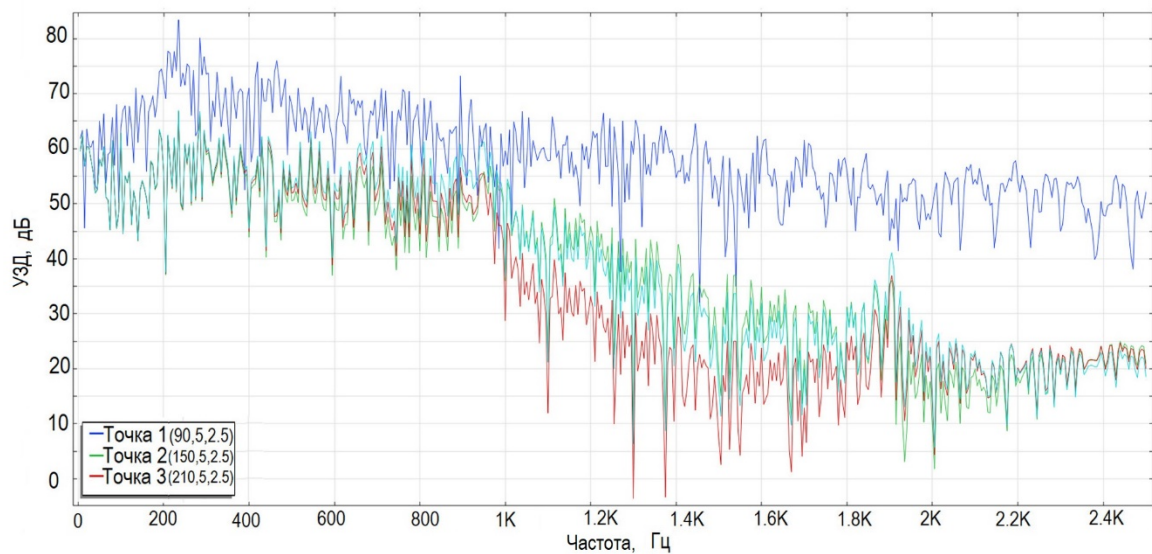


Рисунок 3 – Спектры УЗД, дБ, в расчетных точках на 6 этапе расчета (на примере варианта для скорости $u_0 = 10$ м/с).

Для удобства спектральные характеристики УЗД в расчетных точках на выходе из щели клапана представлены с осреднением в стандартных октавных полосах частот [20]. Полученные таким образом спектры в расчетных точках для всех вариантов скорости на входе, соответствующей перепаду давления снаружи и внутри помещения, представлены на Рисунке 4.

Для скоростей на входе в клапан 1 м/с и 2 м/с наблюдаются отрицательные УЗД, что говорит о звуковом давлении ниже порогового значения $p_0 = 20$ мкПа, то есть генерация звука практически отсутствует.

Для скорости $u_0 = 5$ м/с спектр УЗД имеет максимум в 56 дБ в полосе 125 Гц.

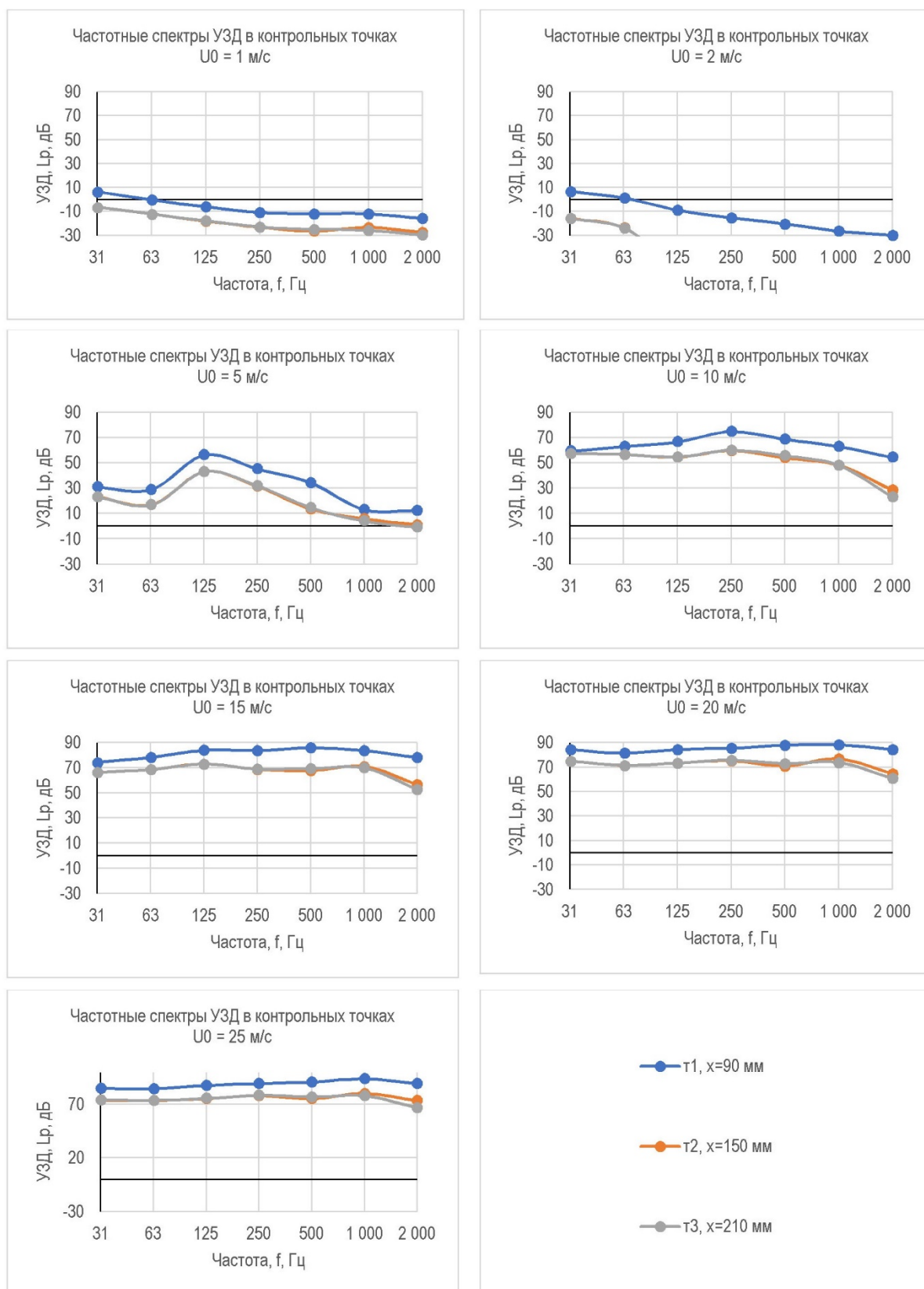


Рисунок 4 – Спектры УЗД, дБ, в расчетных точках 1, 2, 3 (Т1, Т2, Т3) для вариантов скоростей на входе в клапан $u_0 = 1$ м/с; $u_0 = 2$ м/с; $u_0 = 5$ м/с; $u_0 = 10$ м/с; $u_0 = 15$ м/с; $u_0 = 20$ м/с; $u_0 = 25$ м/с.

С увеличением скорости u_0 с 5 м/с до 25 м/с наблюдается смещение максимума УЗД в полосу 250 Гц и далее 500 Гц и 1000 Гц. Максимальные значения УЗД в спектре выходного сечения из клапана при этом возрастают с 56 дБ до 94 дБ.

Практический интерес представляют зависимости уровней звукового давления (УЗД) L_p от перепада давлений снаружи и внутри помещения Δp в каждой исследуемой полосе частот f в расчетных точках 1 – 3 (Рисунки 5 – 7, пунктирные линии). Дисперсионный анализ двухпараметрической регрессий обнаружил, что влияние второго параметра – частоты f – статистически не значимо. Таким образом в логарифмических координатах получаем линейную регрессию $L_p = \lg(\Delta p) + a$.

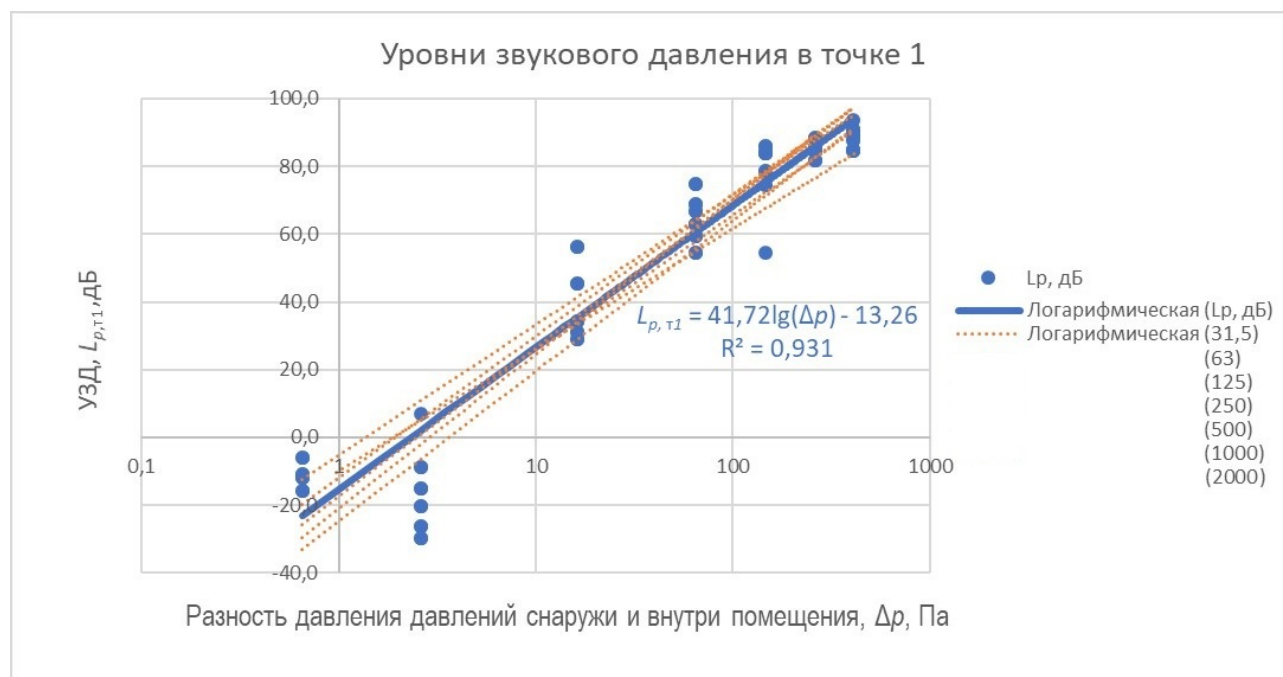


Рисунок 5 – Уровни звукового давления, $L_{p,1}$, дБ, в расчетной точке 1 (т1, на выходе из приточного клапана) в зависимости от разности абсолютных давлений снаружи и внутри помещения, Δp , Па

На выходе из щели клапана (в точке 1) эта зависимость имеет вид

$$L_{p,1} = 41,72 \lg(\Delta p) - 13,26, \quad (7)$$

где $L_{p,1}$ – уровни звукового давления на выходе из клапана в точке 1, дБ; Δp – разность абсолютных давлений снаружи и внутри помещения, м.

В точках 2 и 3, отстоящих от выходного сечения клапана на расстоянии соответственно 60 и 120 мм, зависимость УЗД от перепада давления имеет вид

$$L_{p,2} = 44,11 \lg(\Delta p) - 30,94, \quad (8)$$

$$L_{p,3} = 43,79 \lg(\Delta p) - 29,63, \quad (9)$$

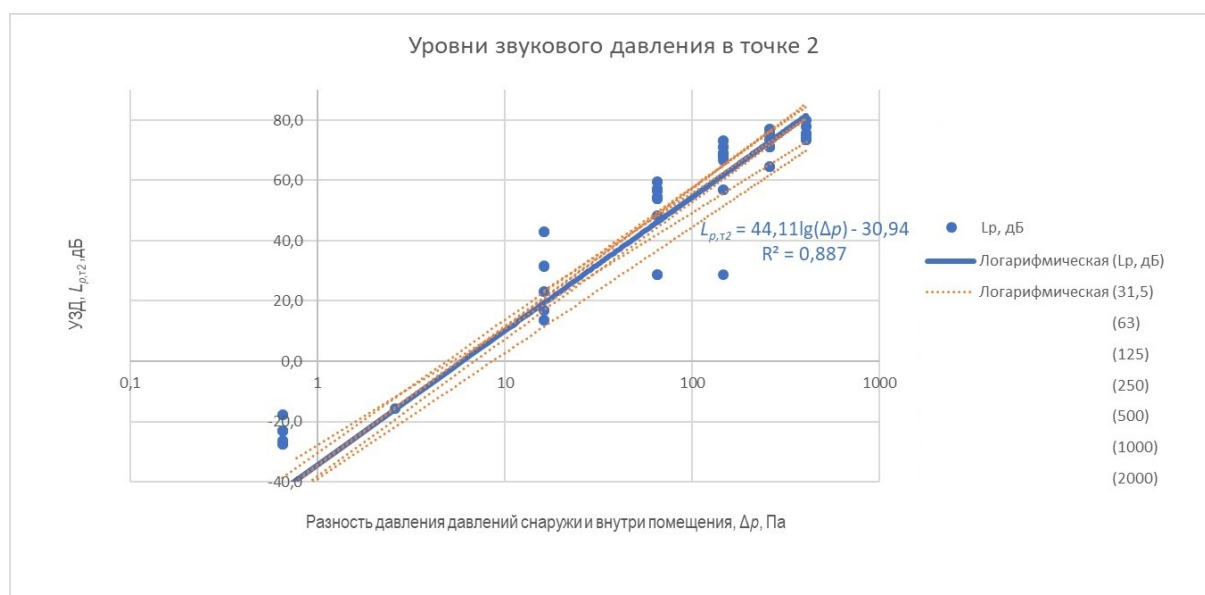


Рисунок 6 – Уровни звукового давления, $L_{p,2}$, дБ, в расчетной точке 2 (т2, на расстоянии 60 мм от приточного клапана) в зависимости от разности абсолютных давлений снаружи и внутри помещения, Δp , Па

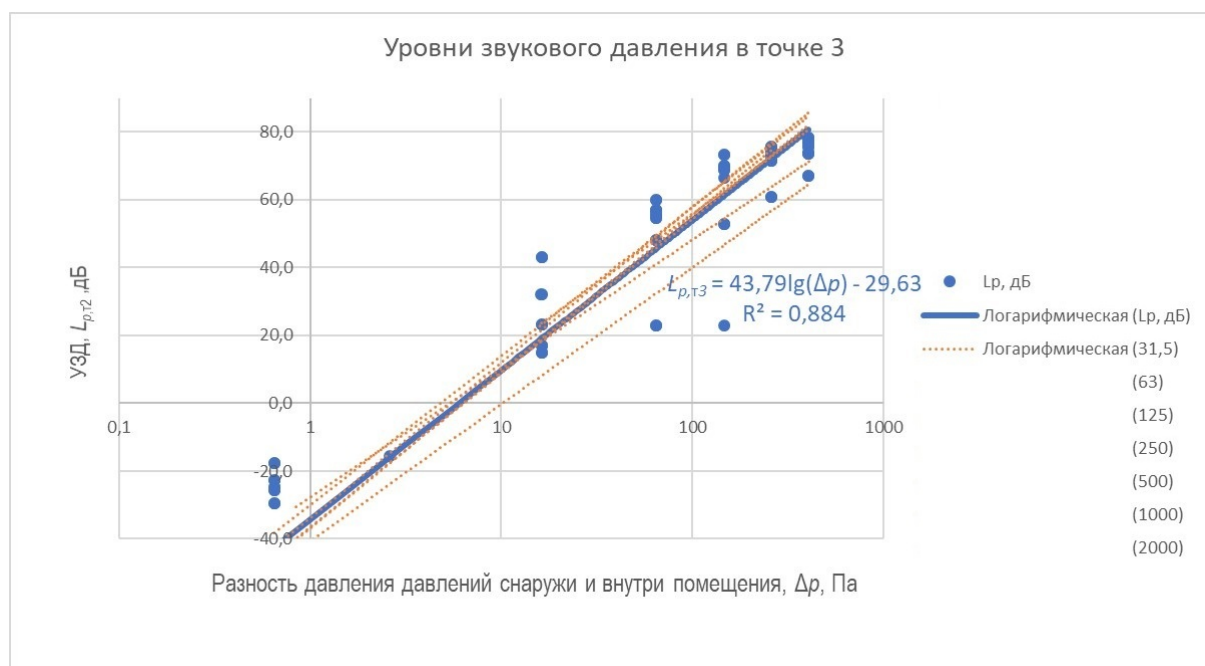


Рисунок 7 – Уровни звукового давления, $L_{p,3}$, дБ, в расчетной точке 3 (т3, на расстоянии 120 мм от приточного клапана) в зависимости от разности абсолютных давлений снаружи и внутри помещения, Δp , Па

Анализ качества моделей (7 – 9) выполнен на основе дисперсионного и статистического анализа полученных регрессий средствами MS Excel.

Значение критерия Стьюдента, например, для модели (7) равен $t(0,95; 44) = 2,018$, t -статистика для коэффициента при $\lg(\Delta p)$ равна 3,653, а для свободного коэффициента – 23,84. Поскольку по модулю коэффициенты t -статистики превышают критическое значение в обоих случаях, то оба коэффициента являются статистически значимыми. Также это подтверждается P -значением, которое для коэффициента при $\lg(\Delta p)$ равно

$0,7 \cdot 10^{-3}$, а для свободного коэффициента – $0,1 \cdot 10^{-24}$, что существенно меньше вероятности ошибки в 5% (0,05). Значение коэффициента корреляции между $lg(\Delta p)$ и $L_p R = 0,966 > 0,7$. Значит связь между ними сильная и прямая. При этом вариация переменной L_p на 93,35% объясняется вариацией $lg(\Delta p)$. Оставшиеся 6,65% изменчивости приходятся на другие факторы, не учтенные в модели (например, частотная полоса, особенности характеристик турбулентности и т.д.). Средняя ошибка аппроксимации составляет $3,26\% < 5\%$, что также подтверждает качество предложенной модели.

Аналогично выполнен анализ качества моделей (8) и (9), подтвердивший их статистическую значимость.

Согласно предложенной модели (7), генерация звука начинается при перепаде давления $\Delta p > 2,08$ Па или при скорости на входе в приточный клапан $u_0 > 1,79$ м/с. При перепаде давления $\Delta p = 10,8$ Па скорость на входе в клапан u_0 становится равной 4,09 м/с, а УЗД на выходе из клапана достигает 30 дБ.

Заключение

Построена численная модель возникновения звука вследствие турбулентных пульсаций в оконном щелевом приточном клапане на основе уравнений течения с использованием LES-модели турбулентности и уравнения Лайтхилла.

Проведен численный эксперимент в квази-3D-постановке для 7 вариантов разности давлений $\Delta p = [0,7; 2,9; 18,3; 73,2; 164,8; 262,9; 457,7]$ Па. Получены спектры уровней звука в диапазоне частот 0...2500 Гц. Получены зависимости уровня звукового давления на выходе из щели клапана от разности абсолютных давлений снаружи и внутри помещения, $L_p(\Delta p)$, позволяющая принимать адекватные проектные решения по применению щелевых оконных клапанов инфильтрации.

Установлено, что генерация звука начинается при перепаде давления $\Delta p > 2,08$ Па или при скорости на входе в приточный клапан $u_0 > 1,79$ м/с. При этом происходит резкое нарастание УЗД с ростом Δp . При перепаде давления $\Delta p = 8,26$ Па при перепаде давления $\Delta p = 10,8$ Па скорость на входе в клапан u_0 становится равной 4,09 м/с, а УЗД на выходе из клапана достигает 30 дБ.

В дальнейшей перспективе разработки темы исследования возможно выполнение следующих этапов:

- провести экспериментальную проверку полученных на численной модели зависимостей в натурных условиях;
- в разработанной численной модели аэродинамического потока с излучением пульсаций давления в звуковом спектре построить геометрию, соответствующую пониженному уровню шума;
- провести численные исследования с целью получения зависимости уровней звука от геометрических параметров канала.

Список использованных источников

1. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. General Theory. Pt 1. // Proc. Roy. Soc. Ser. A. - 1952. V. 211. - P. 564-587. DOI: 10.1098/rspa. 1952.0060
2. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically: II. Turbulence as a source of sound. Proc. R. Soc. Lond. A. - 1954. V. 222. - P. 1-32. DOI:10.1098/rspa.1954.0049
3. Rossiter J.E. Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds // Aeronautical Research Council Reports and Memoranda. -

Technical Report N 3438, Oct. 1964. - London: Her Majesty's Stationery Office. - 1966. - 32 p.

4. Rockwell D., Naudascher E. Review – self-sustained oscillations of flow past cavities // ASME Journal of Fluids Engineering. - 1978. Vol. 100, P. 152-165. DOI:10.1115/1.3448624

5. Lafon P., Caillaud S., Devos J.P., Lambert C. Aeroacoustical coupling in a ducted shallow cavity and fluid/structure effects on a steam line // Journal of Fluids and Structures. -2003. - Vol. 18(6). - P. 695-713.

6. Копьев В.Ф., Чернышев С.А., Фараносов Г.А. О роли различных механизмов в излучении звука турбулентной струей // Вычислительный эксперимент в аэроакустике и аэродинамике: Сборник тезисов девятой российской конференции, Светлогорск, Калининградской области, 26 сентября - 01 октября 2022 года. - М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2022. - С. 25-30. - DOI 10.20948/сеаа-2022.

7. Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф. Механизм излучения звука турбулентностью вблизи твердого тела // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. - 2008. - N 1. - С. 98-109.

8. Беляев И.В., Копьев В.Ф., Миронов М.А. Акустическое излучение турбулентного пограничного слоя, образующегося над плоской гладкой границей // Акустический журнал. - 2024. - Т. 70, N 6. - С. 865-877. - DOI 10.31857/S0320791924060067.

9. Сухинов А.И., Проценко С.В., Проценко Е.А. Фильтрация натуральных данных для численного моделирования трехмерных турбулентных течений с применением подхода LES // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». - 2022. - Т. 14, N 4. С. 40-51. DOI 10.14529/mmph220406

10. Воронков С.С. Об источниках аэродинамического шума в вязком теплопроводном газе // Noise Theory and Practice. - 2017. - Т. 3, N 3(9). - С. 31-38.

11. Кандрунин В.С., Фомина С.В. Численное предсказание шума, создаваемого аэродинамическим профилем при остановке, с использованием LES и акустической аналогии // Приоритеты мировой науки: новые подходы и актуальные исследования : сборник научных трудов по материалам XX Международной научно-практической конференции (Анапа, 30 августа 2021). - Анапа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-исследовательский центр экономических и социальных процессов» в Южном Федеральном округе, 2021. - С. 37-40.

12. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. Monthly Weather Review. - 1963. - Vol. 91, N 3, P. 99-164 DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:gcewtp>2.3.co;2

13. Deardorff J.A. Numerical Study of Three-Dimensional Turbulent Channel Flow at Large Reynolds Numbers. Journal of Fluid Mechanics. - 1970. - Vol. 41, P. 453-480. DOI:10.1017/S0022112070000691

14. Sagaut P. Large Eddy Simulation for Incompressible Flows. -Third Edition. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2006. - 558 p. - ISBN - 3-540-26344-6.

15. Chenxi Xu, Tao Fang, Dong Liu, Wei Yang. A New Scale-Adaptive Hybrid RANS-LES Model Considering the Rotational Effect for Separated Flow Predictions // Physics of Fluids. - 2025. - Vol. 37, N 065113. - doi: 10.1063/5.0272228

16. СП 131.13330.2020 Строительная климатология. // Кодекс: [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения 19.06.2025).

17. СП 50.13330.2024 Тепловая защита зданий // Кодекс: [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306326592> (дата обращения 19.06.2025).

18. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия // Кодекс: [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения 19.06.2025).

19. ГОСТ 23337–2014 Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. Издание официальное. М.: Стандартинформ, 2015. – 29 с.

20. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н.И. Иванов. - М.: Логос, 2010. – 424 с. - ISBN 978-5-98704-520-6.

References

1. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically. General Theory. Pt 1. // Proc. Roy. Soc. Ser. A. - 1952. V. 211. - P. 564-587. DOI: 10.1098/rspa.1952.0060

2. Lighthill M.J. On sound generated aerodynamically: II. Turbulence as a source of sound. Proc. R. Soc. Lond. A. - 1954. V. 222. - P. 1-32. DOI:10.1098/rspa.1954.0049

3. Rossiter J.E. Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds // Aeronautical Research Council Reports and Memoranda. - Technical Report N 3438, Oct. 1964. - London: Her Majesty's Stationery Office. - 1966. – 32 p.

4. Rockwell D., Naudascher E. Review – self-sustained oscillations of flow past cavities // ASME Journal of Fluids Engineering. - 1978. Vol. 100, P. 152-165. DOI:10.1115/1.3448624

5. Lafon P., Caillaud S., Devos J.P., Lambert C. Aeroacoustical coupling in a ducted shallow cavity and fluid/structure effects on a steam line // Journal of Fluids and Structures. -2003. - Vol. 18(6). - P. 695-713.

6. Kopyev V.F., Chernyshev S.A., Faranosov G.A. On the role of various mechanisms in the emission of sound by a turbulent jet // Computational experiment in aeroacoustics and aerodynamics: Book of abstracts of the 9th Russian conference, Svetlogorsk, Kaliningrad region, September 26 - October 01, 2022. - М.: Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, 2022. - P. 25-30. – DOI 10.20948/ceaa-2022.

7. Zaitsev M.Yu., Kopyev V.F. Mechanism of sound radiation by turbulence near a rigid body // Fluid Dynamics. - 2008. – Vol. 43. - P. 86-96.

8. Belyaev I.V., Kopyev V.F., Mironov M.A. Acoustic radiation of a turbulent boundary layer formed above a flat smooth boundary // Akusticheskij Zhurnal. - 2024. - Vol. 70, N 6. - P. 865-877. – DOI 10.31857/S0320791924060067.

9. Sukhinov A.I., Protsenko S.V., Protsenko E.A. Field data filtering for the digital simulation of three-dimensional turbulent flows using the LES approach // Bulletin of the South Ural State University Series 'Mathematics. Mechanics. Physics'. - 2022. - Vol. 14, N 4. P. 40-51. DOI 10.14529/mmph220406

10. Voronkov S.S. On the noise source of the boundary layer of a viscous heat-conducting gas // Noise Theory and Practice. - 2017. - Vol. 3, N 3(9). - P. 31-38.

11. Kandrunin V.S., Fomina S.V. Numerical prediction of noise generated by an aerodynamic profile during a stop, using LES and acoustic analogy // Priorities of world science: new approaches and current research: collection of scientific papers based on the materials of the XX International scientific and practical conference (Anapa, August 30, 2021). - Anapa: Limited Liability Company 'Research Center for Economic and Social Processes' in the Southern Federal District, 2021. - P. 37-40.

12. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. Monthly Weather Review. - 1963. - Vol. 91, N 3, P. 99-164 DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:gcewtp>2.3.co;2

13. Deardorff J.A. Numerical Study of Three-Dimensional Turbulent Channel Flow at Large Reynolds Numbers. Journal of Fluid Mechanics. - 1970. - Vol. 41, P. 453-480. DOI:10.1017/S0022112070000691

14. Sagaut P. Large Eddy Simulation for Incompressible Flows. -Third Edition. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2006. – 558 p. – ISBN - 3-540-26344-6.
15. Chenxi Xu, Tao Fang, Dong Liu, Wei Yang. A New Scale-Adaptive Hybrid RANS-LES Model Considering the Rotational Effect for Separated Flow Predictions // Physics of Fluids. - 2025. - Vol. 37, N 065113. - doi: 10.1063/5.0272228
16. SP 131.13330.2020 Civil Engineering climatology // Кодекс: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (date of reference 19.06.2025).
17. SP 50.13330.2024 Thermal protection of buildings // Кодексы: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1306326592> (дата обращения 19.06.2025).
18. SP 20.13330.2016 Loads and impacts // Кодексы: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (date of reference 19.06.2025)
19. GOST 23337–2014 Noise. Methods for measuring noise in residential areas and in residential and public buildings. Official publication. M.: Standartinform, 2015. – 29 p.
20. Ivanov N.I. Engineering acoustics. Theory and practice of noise control: textbook - M.: Logos, 2010. – 424 p. - ISBN 978-5-98704-520-6.