

УДК 534.833.5

Особенности расчета акустических характеристик системы выпуска двигателя внутреннего сгорания с учетом потока отработавших газов

Коньшина Алевтина Сергеевна^()*

alevtina.konshina@nami.ru

Юдин Станислав Иванович

stanislav.yudin@nami.ru

Надарейшвили Гиви Гурамович

givi.nadareishvili@nami.ru

ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

Аннотация. Проведено исследование влияния потока отработавших газов (ОГ) на акустические характеристики системы выпуска (СВОГ) двигателя внутреннего сгорания (ДВС), эксплуатируемой на реальных автомобилях. Интерес представляли различные способы задания граничных условий при разном наборе элементов, входящих в СВОГ. Особое внимание уделялось модулю линеаризованных уравнений Навье-Стокса, где при акустическом расчете производился учет вязких пристеночных свойств среды (Slip/Noslip). Результаты расчетов получены методом конечно-элементного моделирования в программном комплексе Comsol Multiphysics. Полученные данные подтвердили выводы, представленные в предыдущих работах авторов, а также помогли выявить новые вычислительные особенности частотной и амплитудной настройки системы выпуска с учетом газодинамического потока.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, система выпуска отработавших газов, шум выпуска, поток отработавших газов, метод конечно-элементного моделирования, резонатор Гельмгольца

Features of calculating the acoustic characteristics of an internal combustion engine exhaust system, taking into account the exhaust gas flow

Konshina Alevtina sergeevna^()*

alevtina.konshina@nami.ru

Yudin Stanislav Ivanovich²

stanislav.yudin@nami.ru

Nadareishvili Givi Guramovich

givi.nadareishvili@nami.ru

FSUE "NAMI", Moscow, Russia

Abstract. The study investigated the influence of the flow of exhaust gases on the acoustic characteristics of the exhaust system of an internal combustion engine operating on real vehicles. The study focused on various methods of setting boundary conditions for different sets of elements in the system. Special attention was given to the module of linearized Navier-Stokes equations, which took into account the viscous properties of the medium (slip/no slip). The calculation results were obtained by the finite-element modeling method in the software package Comsol Multiphysics. The obtained data confirmed the conclusions presented in the previous works of the authors, and also helped to identify new computa-

tional features of the frequency and amplitude tuning of the exhaust system, taking into account the gas dynamic flow.

Keywords: internal combustion engine, exhaust system, exhaust noise, exhaust flow, finite element modeling, Helmholtz resonator

Введение. В настоящее время при разработке систем выпуска широко применяются различные программные продукты, позволяющие определять акустические, газодинамические и другие параметры СВОГ [1–3]. Каждый применяемый в расчетах алгоритм имеет свои особенности и отличия. Представляются результаты работы, касающиеся расчетного определения акустических свойств системы выпуска с учетом потока ОГ методом конечных элементов в программном комплексе Comsol Multiphysics. Рассматривается режим холостого хода (XX), на котором ярко проявляется вклад в шум выпуска низкочастотных оборотных гармоник работы двигателя.

Методы и материалы. *Описание настроек программы для расчета акустических характеристик СВОГ при наличии газодинамического потока.* Программные особенности проведения акустических расчетов с учетом потока конструкций типа СВОГ в COMSOL Multiphysics предполагают исключение из расчетов входных и выходных элементов, обозначенных ранее как «горячая часть СВОГ» и «выходная акустическая нагрузка СВОГ» в связи с особенностями задания входных и выходных условий:

- для проведения акустических расчетов спектров TL, на входе и выходе расчетной модели необходимо задать условия согласованной нагрузки и дополнительно на входе — акустическое возбуждение;

- для проведения газодинамических расчетов на входе и выходе должны быть прямые участки достаточной длины для формирования ламинарного потока;

- для удовлетворения указанным требованиям согласованные нагрузки задаются в виде специальных отрезков волноводов достаточной длины PML (Perfectly Matched Layer), а акустическое возбуждение в виде отрезка волновода “Background Acoustic Field”;

- указанные отрезки волноводов должны иметь диаметр, равный диаметру всего волновода (трубопровода) СВОГ для формирования плоской акустической волны, причем в заданном направлении.

Анализ акустики при наличии потока проводится в три этапа: газодинамический расчет (Turbulent Flow, SST), перенос результатов с газодинамической на акустическую сетку (Background Fluid Flow Coupling) и расчет акустики (Linearised Navier-Stokes, Frequency Domain). В качестве граничных условий для газодинамического анализа задается усредненная скорость потока на входе, нулевое давление на выходе и распределение температуры вдоль СВОГ. При переносе результатов происходит подключение модуля Multiphysics. При акустическом расчете резонаторов Гельмгольца в соответствии с методикой COMSOL [4] задавались пристеночные условия отсутствия учета

вязкости и турбулентности (Slip) и адиабатического потока. При проведении описанных далее расчетных экспериментов по определению спектров TL всех элементов СВОГ, задавались условия как Slip с адиабатическим потоком, так и Noslip и изотермического потока.

Особое внимание уделялось разбиению сетки моделей: для газодинамики было выбрано более подробное разбиение как всей сетки, так и пристеночных слоев (6 слоев от 1 мм с увеличением ширины с коэффициентом 1,4 — рис. 1, а), чем для акустического расчета (4 слоя от 1 мм с увеличением ширины с коэффициентом 1,4 — рис. 1, б). Область горла резонатора разбивалась особо размельченной сеткой для достижения необходимой точности решений (рис. 2).

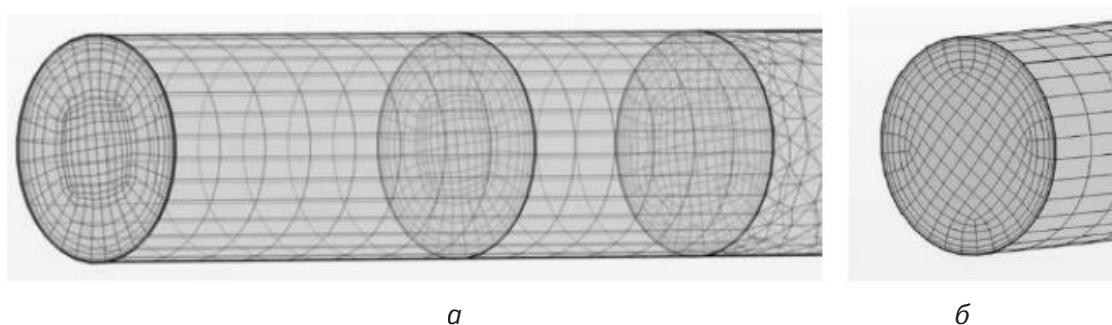


Рис. 1. Расчетная сетка:
а — газодинамическая; б — акустическая

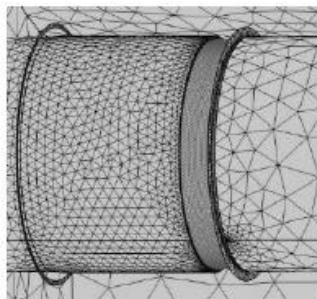


Рис. 2. Мелкая сетка в области горла резонатора Гельмгольца

Результаты. Были исследовано влияния регулировки параметров модуля линеаризованных уравнений Навье — Стокса на кривую потерь передач. Для точного установления влияния настроек расчетной программы на акустическую эффективность элементов резонатора, приводятся результаты расчетов для комплектаций: один резонатор Гельмгольца с двумя диссипативными камерами, как в системе СВОГ, так и отдельно. Число Маха в расчетах принято 0.009, что соответствует калибровкам работы двигателя на режиме ХХ.

Первоначально к анализу принята конфигурация резонатора, представленного на рис. 3. Рассматривалось три расчетные модификации: резонатор Гельмгольца с диссипативными камерами, резонатор без диссипативных ка-

мер, резонатор с полыми диссипативными камерами (без диссипативной набивки).

На рис. 4–6 приведены результаты расчетов акустической эффективности TL при наличии газодинамического потока в сравнении с вариантом без потока.



Рис. 3. Модель анализируемого резонатора с диссипативными камерами

На представленных и дальнейших рисунках обозначения соответствуют:

- $Ma = 0$: расчет без учета потока, с учетом распределения температуры;
- Slip: расчет с учетом потока $Ma = 0,009$, с учетом температуры, режим расчета Slip;
- Noslip: расчет с учетом потока $Ma = 0,009$, с учетом температуры, режим расчета Noslip;

Настройка собственной частоты резонатора под действием потока незначительно сдвигается в область низких частот, амплитуда резонанса существенно уменьшается, ширина резонансной кривой несколько увеличивается — по результатам расчета Slip. В режиме Noslip наличие резонатора Гельмгольца в спектре не регистрируется.

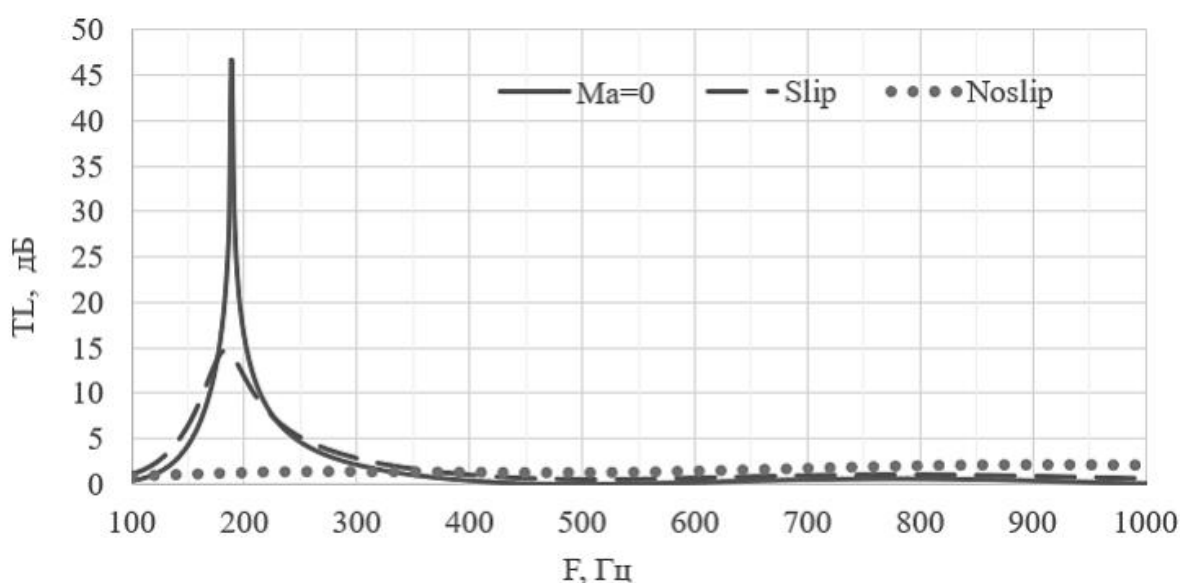


Рис. 4. Результаты расчетов резонатора без диссипативных камер

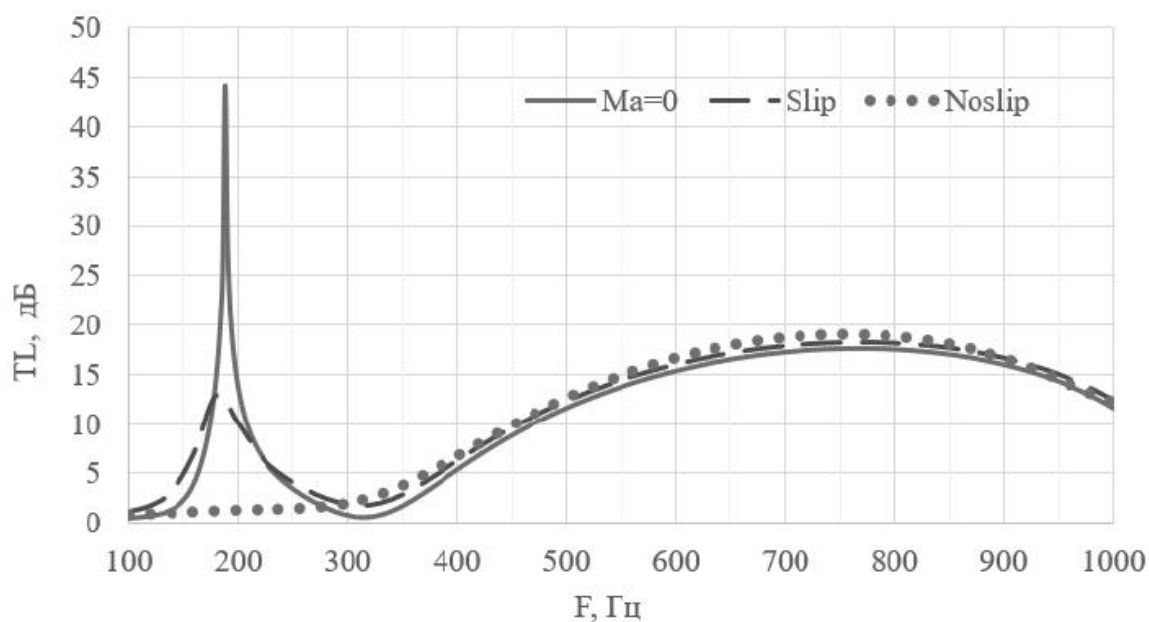


Рис. 5. Результаты расчетов резонатора с полыми диссипативными камерами

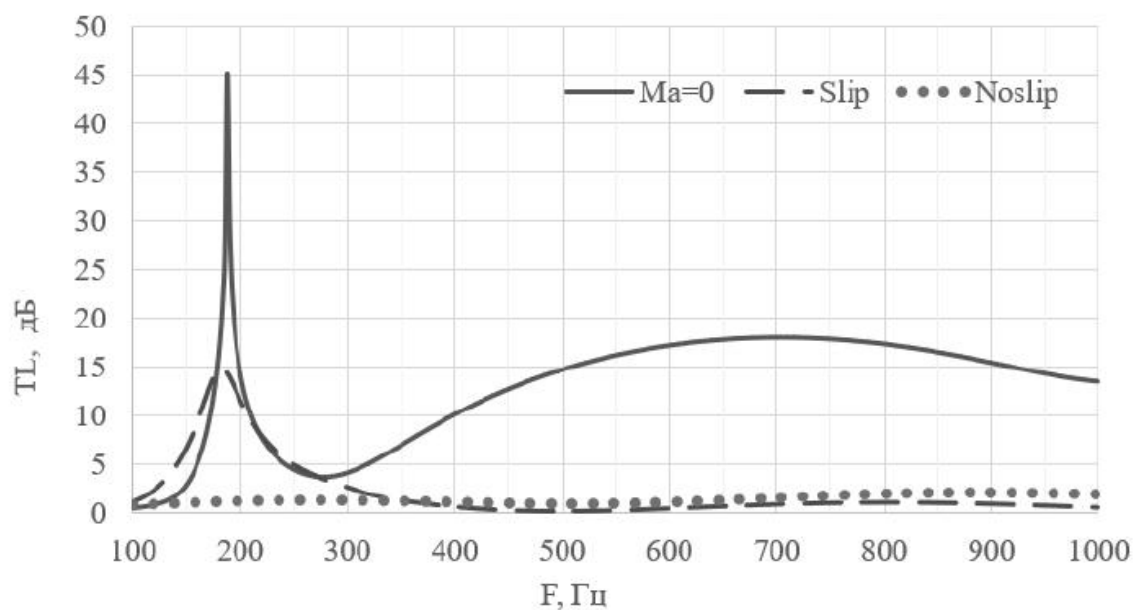


Рис. 6. Результаты расчетов резонатора с диссипативными камерами

Учет объема диссипативных камер (без поглотителя) отражается на кривой акустической эффективности примерно в равной степени на всех трех режимах расчета (рис. 5).

Учет диссипативного материала в камерах совершенно не отражается при расчетах с потоком как с режимом Slip, так и Noslip (рис. 6).

Помимо этого, рассматривалась расчетная модель, в которой резонатор Гельмгольца являлся частью СВОГ (рис. 7).

Результаты расчетов потерь передачи двух конфигураций СВОГ приведены на рис. 8, 9.



Рис. 7. Модель СВОГ с резонатором и диссипативными элементами

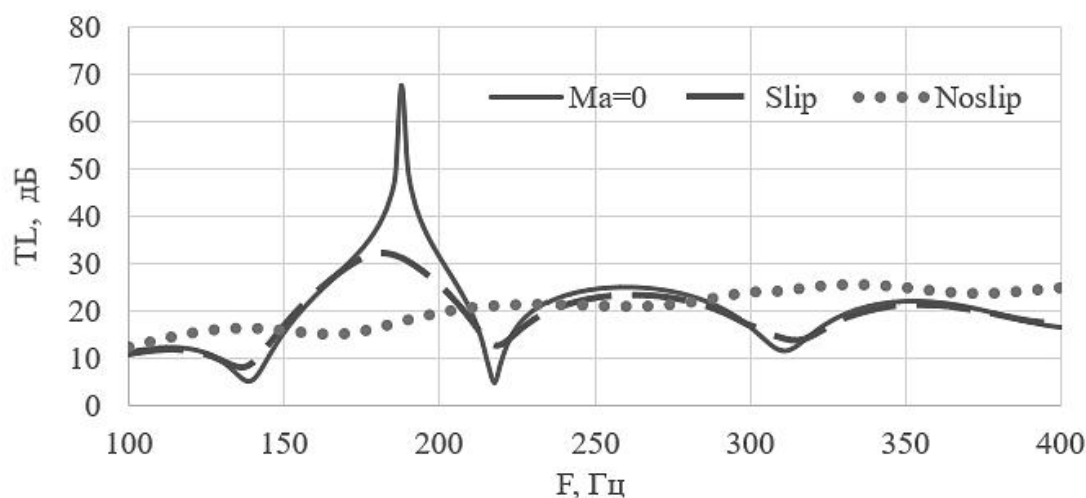


Рис. 8. Результаты расчетов TL СВОГ без диссипативных камер у резонатора и с диссипативной камерой у глушителя

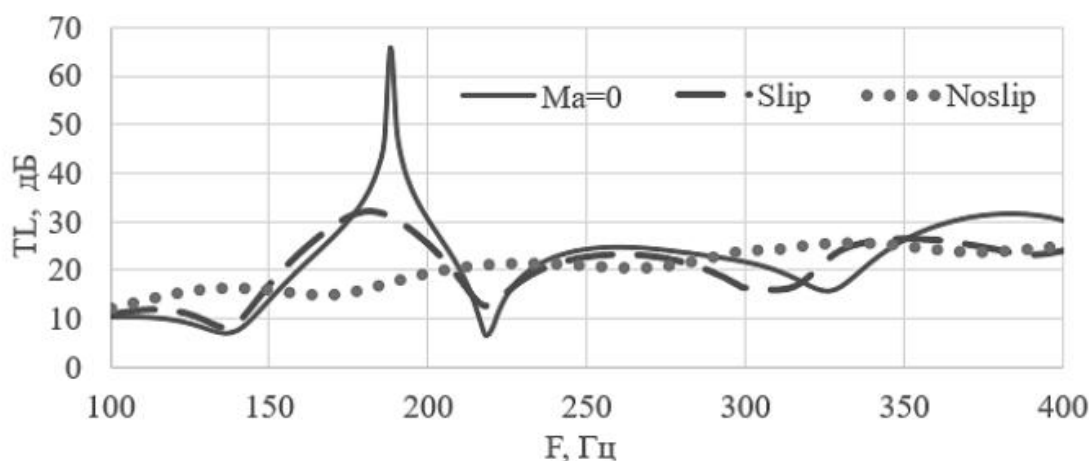


Рис. 9. Результаты расчетов TL СВОГ с диссипативными камерами у резонатора и с диссипативной камерой у глушителя

Наличие локальных максимумов и минимумов вне диапазона настройки резонаторов на различных частотах определяется соответствующей картиной стоячей волны в СВОГ. На рис. 10 для примера приведена картина распределения звукового давления на частоте 330 Гц.



Рис. 10. Распределение звукового давления вдоль СВОГ на частоте 330 Гц

Обсуждение. Полученные данные подтверждают выводы, которые были сделаны на основе рис. 4–6. Присутствие потока сдвигает частотную настройку резонатора в область низких частот. Настройка Noslip не учитывает собственную частоту резонатора, а также наличие диссипативных поглотителей. Только при условии Slip фиксируется настройка резонатора на кривой потерь передач. Учет влияния диссипативных материалов также отсутствует.

Заключение

1. COMSOL Multiphysics при настройке Slip в модуле линеаризованных уравнений Навье–Стокса позволяет считать собственную частоту резонатора Гельмгольца, которая изменяется при наличии газодинамического потока по ранее установленным зависимостям. Этот вывод был подтвержден расчетно и экспериментально в предыдущих работах [2, 3].

2. При расчетах акустики с потоком учет диссипативных элементов не учитывается в обоих режимах: Slip и Noslip.

3. Режим Slip в модуле линеаризованных уравнений Навье — Стокса позволяет оценить вклад резонаторов и других реактивных элементов типа расширительных камер в кривую потерь передач.

4. Режим Noslip в модуле линеаризованных уравнений Навье — Стокса не считает ни резонаторов, ни поглотителей.

Список источников

- [1] COMSOL 5.5 Acoustics Module User's Guide Pat number: CM020201. URL: <https://www.comsol.com/product-download/> (accessed 05.03.2026).
- [2] Коньшина А.С. и др. Расчетно-экспериментальные исследования настройки резонатора Гельмгольца при малых скоростях потока. *Noise Theory and Practice*, 2025, т. 11, № 3, с. 68–80.
- [3] Коньшина А.С. и др. Расчетные исследования настройки резонатора Гельмгольца при малых скоростях потока. *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*, 2025, № 2 (44). EDN: PMNJUS
- [4] Helmholtz Resonator with Flow: Interaction of Flow and Acoustics. URL: <https://www.comsol.com/model/download/737381/models.aco.helm> (accessed 05.03.2026).