

УДК: 621.43.062

OECD: 2.11 IF

Влияние режима работы турбокомпрессора высокофорсированного двигателя на аэродинамический шум

Глазков А.О.

¹ Аспирант, ФГУП «НАМИ», г. Москва, РФ

Аннотация

В последнее время двигателестроение стремится к снижению рабочего объема двигателя внутреннего сгорания из-за более жестких экологических норм. Данное явление называется «даунсайзингом». Для того чтобы поддерживать мощностные показатели двигателей с малым рабочим объемом на уровне с двигателями большого объема применяется турбонаддув. Было замечено достаточно много споров по поводу аэродинамического шума двигателя, форсированных по наддуву. Целью данной работы является определение влияния наличия турбокомпрессора и режима его работы на пульсации давления отработавших газов, и как следствие, на аэродинамический шум двигателя. В работе рассмотрен V-образный 8 цилиндровый двигатель, с непосредственным впрыском бензина, который в дальнейшем был дефорсирован по наддуву.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, турбокомпрессор, пульсации давления, отработавшие газы, аэродинамический шум.

The effect of the turbocharger operation mode of a high-powered engine on its aerodynamic noise

Glazkov A.O.

¹ Postgraduate student, FSUE 'NAMI', Moscow, Russia

Abstract

Recently, the engine industry has been striving to reduce the working volume of the internal combustion engine due to stricter environmental regulations. This phenomenon is called 'downsizing'. In order to maintain the power performance of engines with a small displacement at the level of large-volume engines, turbocharging is used. There has been quite a lot of controversy about the aerodynamic noise of the engine, forced by supercharging. The purpose of this work is to determine the effect of the presence of a turbocharger and its operating mode on the pulsation of exhaust gas pressure, and as a consequence, on the aerodynamic noise of the engine. The paper considers a V8-cylinder engine, with direct injection of gasoline, which was subsequently deforced by supercharging.

Keywords: internal combustion engine, turbocharger, pressure pulsations, exhaust gases, aerodynamic noise.

Введение

Аэродинамический шум возникает в результате колебания давления и скорости в газовых потоках и объемах [1]. Шум данного происхождения связан с системой воздухообмена поршневого двигателя и непосредственно связан с тактами всасывания и выпуска [2]. Шум в системе выпуска является наиболее интенсивным в автомобиле с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Интенсивность шума отработавших газов (ОГ) прямопропорциональна квадрату амплитуды пульсаций давления ОГ на выходе из выпускного клапана.

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} \quad (1)$$

где I – интенсивность, p – амплитуда звукового давления, ρ – плотность среды, c – скорость звука в среде.

Существует ряд способов по снижению аэродинамического шума ДВС. Применяются два вида глушителей шума: активные и реактивные. В последних применяются резонансные или отражательные эффекты. Турбокомпрессор (ТКР) может выступать в качестве глушителя, имеющего отражательный эффект.

При увеличении нагрузки и оборотов двигателя увеличивается кинетическая энергия ОГ. При прохождении потока ОГ через лопатки турбины происходит преобразование энергии газов в механическую работу колеса турбины. Лопатки ТКР создают противодавление в выпускной системе, а с акустической точки зрения – скачок акустического импеданса, который отражает часть акустической энергии. Шум выпуска ДВС становится более ослабленным.

1. Экспериментальное исследование аэродинамического шума двигателя

В натурном эксперименте было испытано два двигателя. V-образный 8 цилиндровый наддувный (далее – V8 наддув), который имеет два ТКР на каждый полублок двигателя и V-образный 8 цилиндровый атмосферный (далее V8 атмосферный), который не имеет ТКР. Оба двигателя имели систему выпуска, в которой отсутствовали глушители шума. Система выпуска состояла из выпускного коллектора и двух каталитических нейтрализаторов. Наддувный двигатель в конструкции ТКР имеет перепускной клапан, который при малых расходах ОГ открыт и напрямую соединяет выпускной коллектор с системой выпуска (ТКР не работает) [3]. Для наддувного двигателя экспериментальным путем были получены значения давления перед турбиной на разных режимах работы ДВС. Для измерения давления ОГ перед турбиной использовался высокотемпературный датчик давления, который был установлен в выпускной коллектор двигателя. Схема испытаний аналогична описанной в работе [4]. На рис.1. представлены значения давления ОГ перед крыльчаткой турбины от оборотов двигателя.

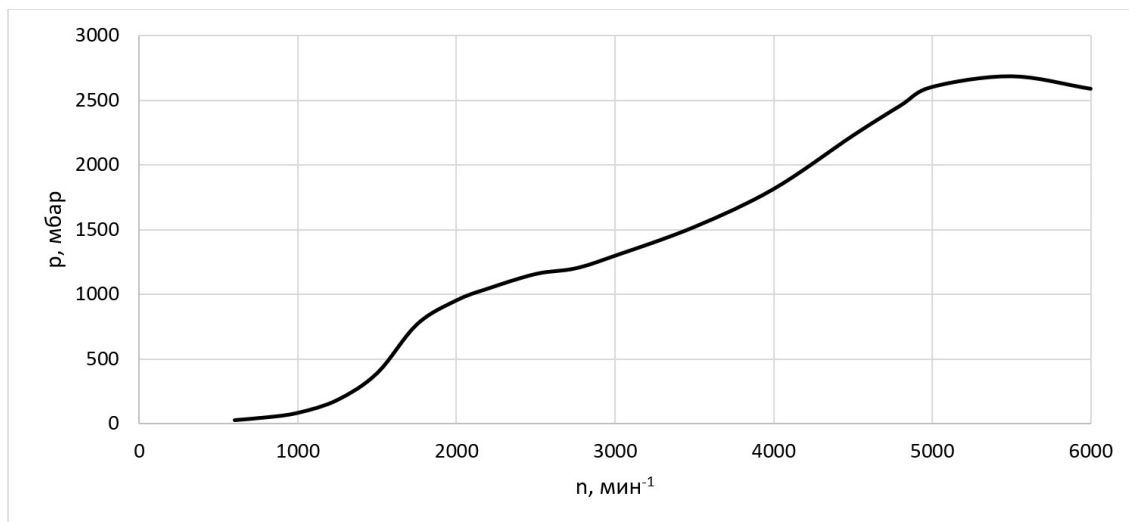


Рис. 1. Зависимость давления ОГ перед крыльчаткой турбины от оборотов двигателя

Далее был проведен замер шума на срезе трубы выпуска на трёх режимах для двух вариантов двигателей. Испытания двигателей осуществлялись в моторном боксе на динамометрическом стенде для испытаний двигателей. Акустические измерения системы выпуска проводились за пределами моторного бокса в шумоизолированном помещении. Замеры уровней шума выпуска производились микрофоном, установленным на расстоянии 140 мм от среза выпускной трубы под углом 45° от оси выпускной трубы.

Режимы испытаний представлены в табл.1.

Таблица 1

Режимы работы двигателей V8 наддув и V8 атмосферный

Обороты, мин ⁻¹	Крутящий момент, Н·м
650	40
800	140
2000	280

Результаты измерений уровней звукового давления (УЗД) выпуска, скорректированного по шкале А, в виде 1/3-октавных спектров представлены на рисунках 2-4.

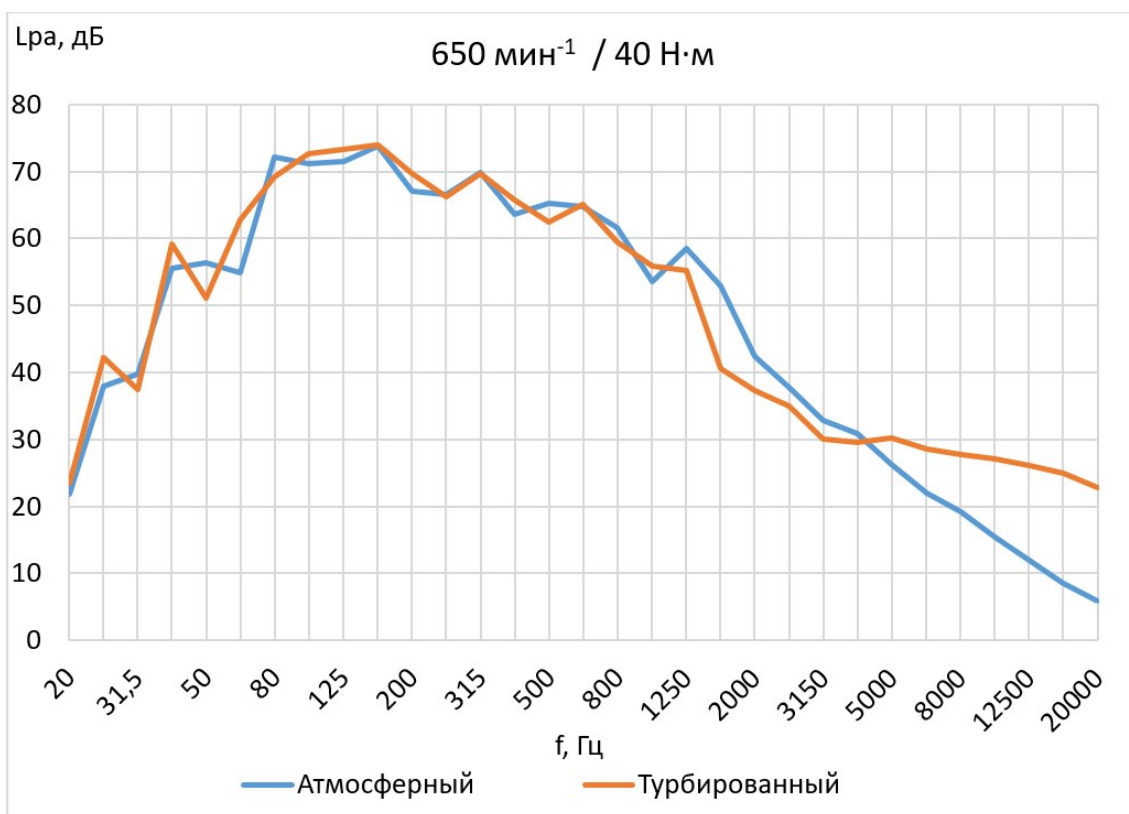


Рис. 2. Третьоктавный спектр на режиме 650 мин⁻¹ / 40 Н·м

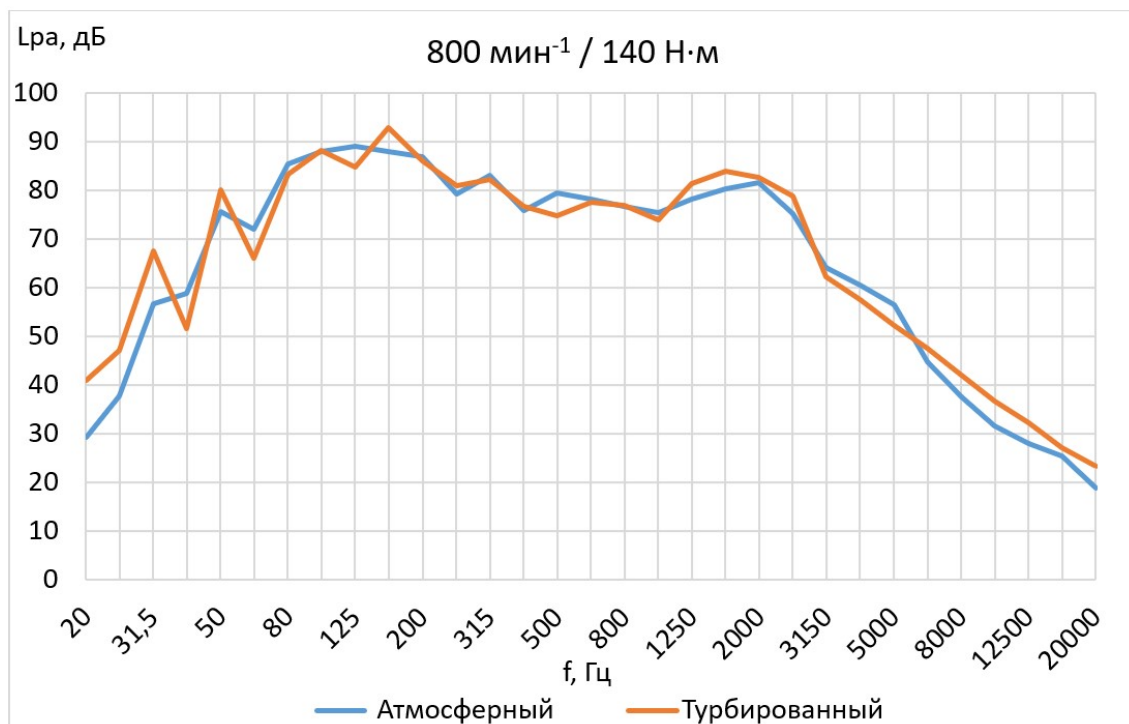


Рис. 3. Третьоктавный спектр на режиме 800 мин⁻¹ / 140 Н·м

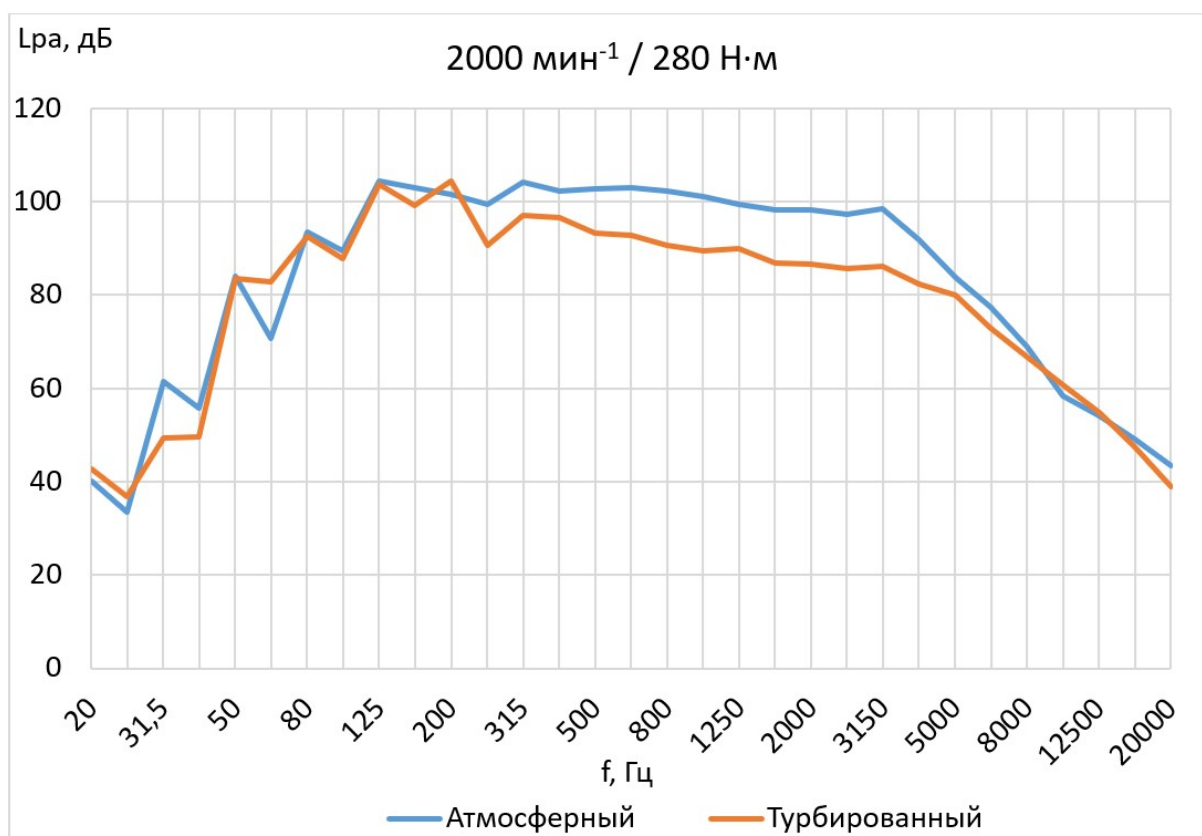


Рис. 4. Третьоктавный спектр на режиме $2000 \text{ мин}^{-1} / 280 \text{ Н}\cdot\text{м}$

На режимах 650 и 800 мин^{-1} спектры незначительно отличаются друг от друга. Это объясняется тем, что на малых нагрузках двигателя ТКР не отбирает энергию ОГ на совершение механической работы. Значительная часть ОГ на выходе из выпускного клапана минует колесо ТКР через перепускной клапан. ТКР не совершает полезной работы и турбированный двигатель работает, как атмосферный. Это проявляется, как по мощности, так и по аэродинамическому шуму двигателя.

На режиме $2000 \text{ мин}^{-1} / 280 \text{ Н}\cdot\text{м}$ на малых частотах уровни звукового давления незначительно отличаются друг от друга. На средних и высоких частотах УЗД атмосферного двигателя выше, чем у наддувного, в среднем на 8 дБ . На некоторых частотах разница составляет более 10 дБ .

На рис.5. представлены уровни звука (УЗ) выпуска, скорректированного по шкале А, атмосферного и наддувного двигателей для трёх режимов работы двигателя.

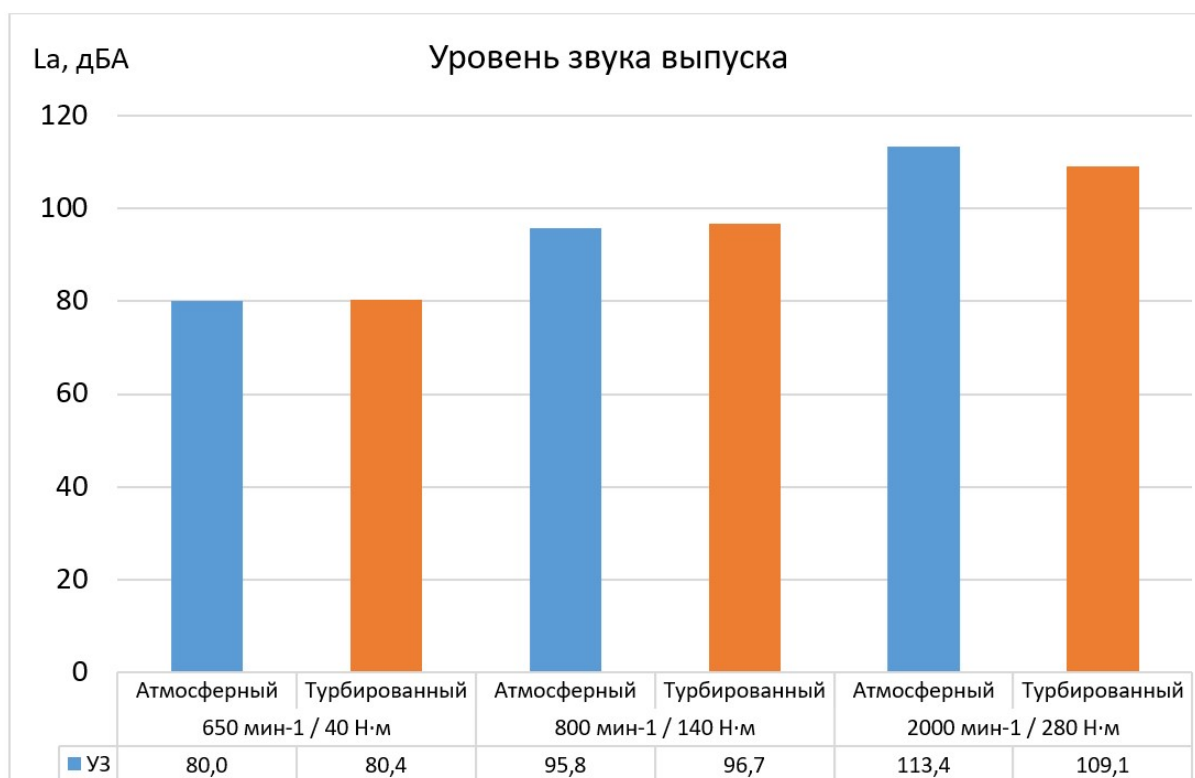


Рис. 5. Уровень звука выпуска по шкале А

Уровень звука (УЗ) выпуска по шкале А на режимах 650 и 800 мин⁻¹ примерно одинаков, разница составляет менее 1 дБА между двумя вариантами двигателя.

УЗ выпуска по шкале А атмосферного двигателя на режиме 2000 мин⁻¹ / 280 Н·м составил 113,4 дБА, наддувного – 109,1 дБА. Разница составляет 4,3 дБА.

Это можно объяснить тем, что на данном режиме перепускной клапан ТКР начинает закрываться. Поток ОГ направляется на колесо ТКР, раскручивая его. Создаётся значительное противодействие со стороны турбины, которое снижает амплитуду пульсаций давления ОГ, делая шум менее интенсивным.

Далее будет рассмотрено данное явление путем расчетного исследования.

2. Расчетное исследование пульсаций давления отработавших газов

Для моделирования рабочего процесса были созданы две математические модели двигателей в ПК AVL Boost [5]: V-8 наддувный и V-8 атмосферный. Так же, как и в эксперименте, глушители шума в модель не добавлялись – оценивались пульсации давления, которые не имели дополнительного противодействия. ТКР является единственным элементом в модели, который создавал противодействие в выпускной системе. Для оценки достоверности результатов, полученных в ходе расчетного исследования, использовалась работа [6], в которой подробно приведены основные зависимости параметров двигателя и ТКР, влияющие на амплитуду пульсаций давления ОГ.

На рис.6. представлено изменение пульсаций давления ОГ от угла поворота коленчатого вала (далее – ПКВ) на режиме 2000 мин⁻¹ / 280 Н·м. Исследование проводилось по одному из полублоков двигателя. Оранжевой пунктирной линией выделены пульсации давления ОГ перед ТКР. Оранжевой сплошной – после ТКР. Синей

сплошной линией выделены пульсации давления ОГ для атмосферного двигателя на выходе из выпускного коллектора.

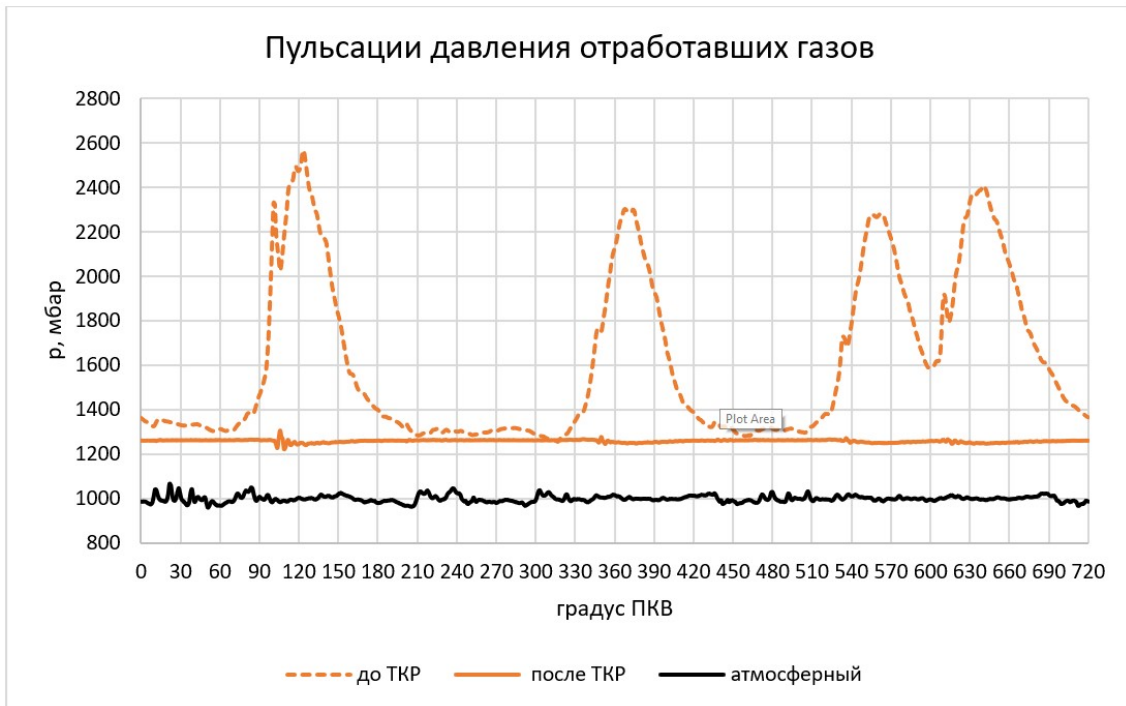


Рис. 6. Пульсации давления ОГ на режиме 2000 мин⁻¹ / 280 Н·м

Амплитуда пульсаций давления ОГ значительно снизилась после прохождения потока газов через лопатки турбины.

Стоит отметить, что значения давления после прохождения ТКР для турбированного автомобиля выше, чем у атмосферного. Однако, амплитуды пульсаций будут выше у атмосферного двигателя, чем у наддувного. Для каждого из режимов определялась разница УЗД между атмосферным и наддувным двигателем по формуле (2):

$$\Delta L_p = \frac{p_a}{p_n} \quad (2)$$

где p_a — максимальная амплитуда давления ОГ атмосферного двигателя, p_n — максимальная амплитуда давления ОГ наддувного двигателя.

Расчётным путем были определены амплитуды давлений ОГ за 2 оборота коленчатого вала. По формуле (2) определялась разница УЗД между атмосферным и наддувными двигателями, выраженная в дБ, во всем диапазоне частот по линейной шкале за один цикл двигателя. На рис.7. приведена разница между УЗД атмосферного и наддувного двигателя. При увеличении нагрузки и оборотов двигателя разница УЗД между атмосферным и наддувным двигателем увеличивается. При увеличении нагрузки ТКР создает большое сопротивление потоку (Рис.1), что ведет к сглаживанию пульсаций давления ОГ и уменьшению его аэродинамического шума выпуска.

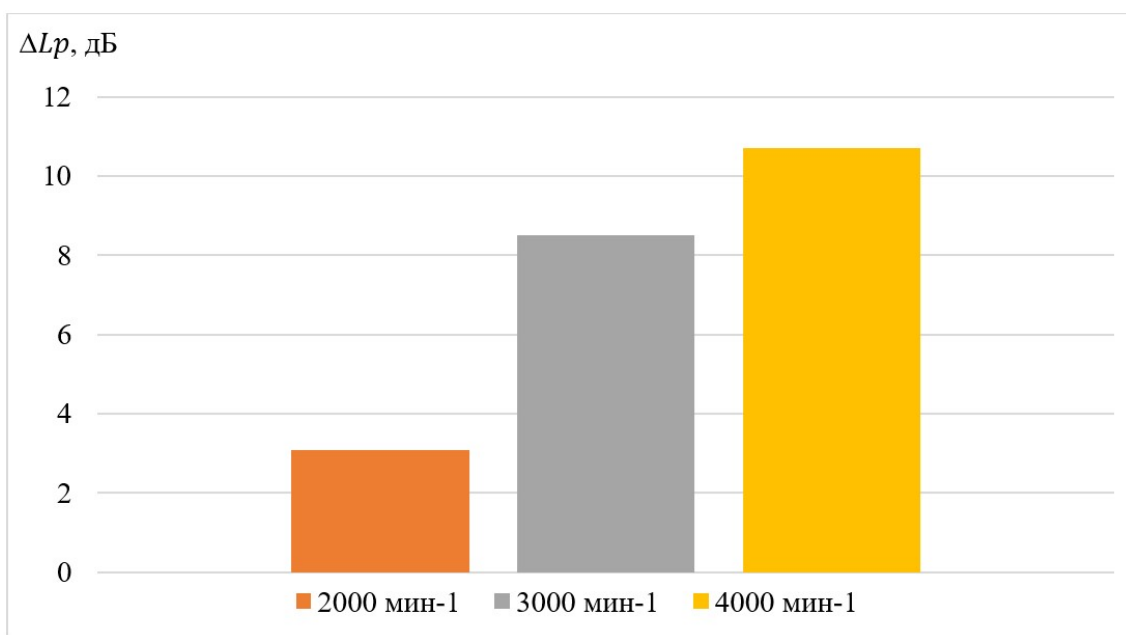


Рис. 7. Разница уровней звукового давления выпуска атмосферного и наддувного двигателя

Разница УЗД на режиме 2000 мин⁻¹ / 280 Н·м после обработки расчетных результатов составляет 3 дБ. Полученное значение хорошо коррелирует с результатом натурального эксперимента (Рис. 5), т.к. разница на этом же режиме равна 4,3 дБА.

Заключение

В натурном эксперименте измерить уровни шума выпуска без глушителей на режимах более 2000 мин⁻¹ / 280 Н·м для двух двигателей было затруднительно из-за слишком высоких УЗД.

Расчетное исследование показало, что при увеличении нагрузки и оборотов атмосферного двигателя стремительно увеличивается разница УЗД по отношению к наддувному.

Необходимо отметить, что в наддувном двигателе расход ОГ в несколько раз выше, чем в атмосферном. В системе выпуска в наддувном двигателе основной проблемой является газодинамический шум, который может появляться на расстоянии около 0,5 м от среза трубы. Проявляется он как высокочастотный широкополосный шум на некотором удалении от среза выпускной трубы.

В дальнейшем планируется исследование пульсаций давления ОГ на выходе двигателей. Цель исследований – задание входных граничных условий для проектирования системы выпуска.

Список литературы

1. Шатров, М.Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / М.Г. Шатров, А.Л. Яковенко, Т.Ю. Кричевская. – М.: МАДИ, 2014. – 68 с.
2. Сидоров А.А., Зайцев А.Б. Системы ДВС. Акустический расчет глушителя системы выпуска отработавших газов ДВС: учеб. Пособие. СПб.: Политехн.ун-т, 2012. – 57 с.

3. Сонкин В.И. Проблемы бензинового двигателя с высоким наддувом: турбо лаг. Часть 1. Труды НАМИ. 2019;(4):70-81.
4. Масиан, Ви и Лухан, Хосе и Бермудес, Висенте и Гвардиола, Карлос. (2004). Наблюдение за пульсацией давления выхлопных газов по измерению мгновенной скорости турбоагнетателя. Измерительная наука и техника. 15. 1185. 10.1088/0957-0233/15/6/020.
5. AVL BOOST, Руководство пользователя версии 2019, AVL LIST GmbH, Грац, Австрия.
6. Бэйчуань Хонг, Варун Венкатараман и Андреас Кронхьорт. (2021). Численный анализ параметров потока выхлопных газов двигателя для определения энтальпии и эксергии пульсирующего потока перед турбиной.. <https://doi.org/10.3390/en14196183>.

References

1. Shatrov, M.G. Noise of automobile internal combustion engines: textbook. manual / M.G. Shatrov, A.L. Yakovenko, T.Y. Krichevskaya. – M.: MADI, 2014.– 68 p.
2. Sidorov A.A., Zaitsev A.B. ICE systems. Acoustic calculation of the muffler of the exhaust system of the internal combustion engine: textbook. Stipend. St. Petersburg: Polytechnic University.un-t, 2012. – 57 p.
3. Sonkin V.I. High-pressure gasoline engine problems: turbo lag. Part 1. Trudy NAMI. 2019;(4):70-81.
4. Macián, V & Luján, Jose & Bermúdez, Vicente & Guardiola, Carlos. (2004). Exhaust pressure pulsation observation from turbocharger instantaneous speed measurement. Measurement Science and Technology. 15. 1185. 10.1088/0957-0233/15/6/020.
5. AVL BOOST, Users Guide version 2019, AVL LIST GmbH, Graz, Austria.
6. Beichuan Hong, Varun Venkataraman and Andreas Cronhjort. (2021). Numerical Analysis of Engine Exhaust Flow Parameters for Resolving Pre-Turbine Pulsating Flow Enthalpy and Exergy. <https://doi.org/10.3390/en14196183>.