

ОДНОМЕРНАЯ СИМУЛЯЦИЯ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ С ТУРБОКОМПРЕССОРОМ С РЕСТРИКТОРОМ НА ВХОДЕ В КОМПРЕССОР

Татаров М.Г.

ФГБОУ ВПО Московский политехнический университет, Москва, Россия
angelo92@mail.ru

Во всем мире, а в России особенно, набирают популярность инженерно-спортивные соревнования «Формула Студент». «Формула Студент» – это международные соревнования, проводящиеся среди студентов технических вузов, с целью приобретения ими практических знаний в процессе разработки и постройки гоночного болида класса «Формула Студент». При создании автомобиля необходимо придерживаться строгого технического регламента. Так, одним из ограничений является максимальный объем двигателя – 710 см³, что само по себе подразумевает использование мотоциклетного мотора. Обязательным условием является наличие ограничительного патрубка (рестриктора) диаметром 20 мм во впускной системе. Это вызывает множество проблем при проектировании систем впуска двигателей и снижению выходных показателей мощности. Однако разрешено использовать различные системы наддува двигателей. Наиболее распространенным и эффективным решением проблемы повышения мощности является установка агрегата турбонаддува. Более того при рациональном проектировании всех элементов системы впуска в сочетании с агрегатом турбонаддува можно добиться показателей мощности и момента, превышающих показатели стандартного двигателя без ограничительного патрубка. В статье представлены данные, полученные в ходе одномерного математического моделирования работы двигателя KTM LC4 с агрегатом турбонаддува и рестриктором во впускном коллекторе. В процессе работы проводился анализ газодинамических процессов, происходящих в различных частях системы впуска двигателя, влияющих на его выходные показатели на основе численных исследований. В результате исследований получены зависимости выходных показателей двигателя (максимальной мощности и максимального крутящего момента) от параметров, форм и размеров различных компонентов системы впуска с агрегатом турбонаддува.

Ключевые слова: двигатель, рестриктор, турбокомпрессор, система впуска, внешняя скоростная характеристика.

Введение

В последние годы все большее количество команд «Формулы Студент» переходит на одноцилиндровые силовые агрегаты. Это объясняется их компактностью и тяговитостью. Однако они обладают рядом недостатков: повышенная вибрация, большая пульсация воздуха во впускном ресивере – но основной проблемой является недостаток мощности.

Как известно эффективным решением этой проблемы является установка на двигатель агрегата турбонаддува. Однако при этом по техническому регламенту соревнований предусмотрена установка рестриктора (ограничительного патрубка) во впускной системе двигателя, что создаст дополнительные ограничения потока воздуха на входе в компрессор. В связи с этим одним из наиболее важных параметров в расчете двигателя является определение конфигура-

ции впускного патрубка с рестриктором перед компрессором, а также объема ресивера находящегося за компрессором. В статье приводятся результаты математического моделирования работы двигателя KTM LC4 объемом 654 см³ с установленным на него турбокомпрессором Garrett GT1241 и рестриктором перед входом в компрессор. По регламенту схема расположения компонентов впускной системы выглядит так: рестриктор – компрессор – дроссельная заслонка – впускной ресивер [1].

Цель и задачи работы

Целью работы является рассмотрение возможности увеличения мощности устанавливаемого на гоночные болиды класса «Формула Студент» одноцилиндрового двигателя с рестриктором на входе за счет установки перед двигателем агрегата турбонаддува.

Исследование выполнялось посредством проведения расчетного моделирования работы одноцилиндрового двигателя с рестриктором и агрегатом турбонаддува на входе. В расчетах использовался патрубок с рестриктором в виде прямого диффузора.

Моделирование выполнялось в расчетно-проектном комплексе Ricardo WAVE. Комплекс позволяет проводить расчеты с различными системами впуска воздуха и выпуска газов двигателя, в том числе с рестриктором и агрегатом турбонаддува.

Помимо определения мощностных и моментных характеристик одноцилиндрового двигателя при проведении моделирования решались задачи определения геометрии патрубка между рестриктором и компрессором агрегата турбонаддува и объема устанавливаемого за компрессором агрегата турбонаддува ресивера. Патрубок должен иметь минимальные гидравлические потери и обеспечивать равномерное распределение скоростей на входе в компрессор агрегата турбонаддува, а ресивер должен иметь определенный объем для снижения отрицательного влияния резких колебаний величины расхода воздуха через одноцилиндровый двигатель на характеристики двигателя с турбонаддувом [2].

Объект исследования

В качестве объекта исследования выбран одноцилиндровый двигатель австрийской фирмы KTM LC4. Двигатель четырехтактный, объемом 654 см³, диаметр и ход поршня соот-

ветственно 102 мм и 80 мм, обладает системой смазки с сухим картером, имеет низкие габаритно-массовые показатели, отличается высокими показателями крутящего момента на низких оборотах по сравнению с рядными четырехцилиндровыми моторами схожего объема [3].

Перед построением расчетной модели двигателя без наддува с рестриктором была проведена апробация расчетной модели двигателя в стандартном варианте без рестриктора для сравнения ее с уже известными показателями завода-изготовителя. Была построена расчетная модель со стандартными элементами системы впуска и выпуска, а затем проведено математическое моделирование, которое показало следующие результаты: крутящий момент равный 66 Нм, мощность – 46 кВт, что практически совпадает с данными полученными в ходе измерения BCX со стандартного заводского варианта мотора (67 Нм и 47 кВт, соответственно).

На рис. 1 представлена используемая при проведенном моделировании расчетная модель. В нее входят двигатель, рестриктор, агрегат турбонаддува, патрубок между рестриктором и компрессором, впускной ресивер. Также условно изображены все патрубки и воздухопроводы системы впуска и выпуска отработанных газов двигателя.

На рис. 2 приведены определенные при моделировании моментная и мощностная характеристики двигателя с рестриктором без агрегата турбонаддува. Как видно установка

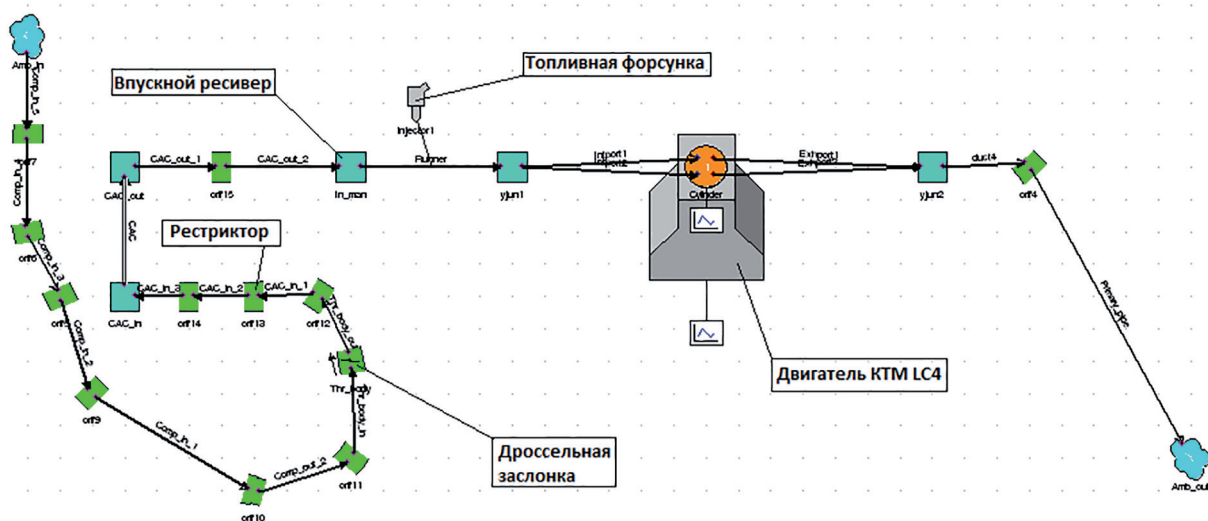


Рис. 1. Расчетная модель ДВС KTM LC4 без агрегата турбонаддува на рабочем поле программы Ricardo WAVE

рестриктора приводит к значительному снижению мощности и крутящего момента. Так, максимальный показатель крутящего момента после установки рестриктора упал на 11 Нм и составил 58 Нм (67 Нм у двигателя без рестриктора). Из графика мощности на рис. 3 видно, что после установки рестриктора она упала на 9 кВт и по сравнению со стандартной мощностью двигателя (47 кВт) составляет 38 кВт.

Двигатель KTM LC4 с агрегатом турбонаддува с рестриктором

С помощью программного комплекса Ricardo WAVE была построена схема ДВС (рис. 4) с агрегатом турбонаддува. Турбокомпрессор даст повышение и значительное выравнивание характеристики момента в широком диапазоне оборотов двигателя [4]. Ниже представлена схема ДВС с агрегатом турбонаддува в программном комплексе Ricardo WAVE.

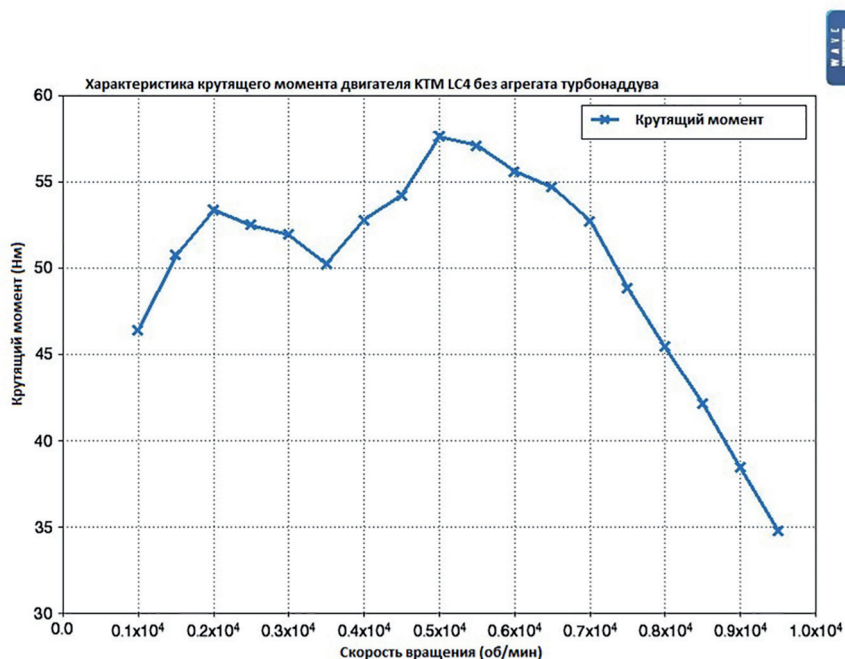


Рис. 2. Крутящий момент ДВС без ТК

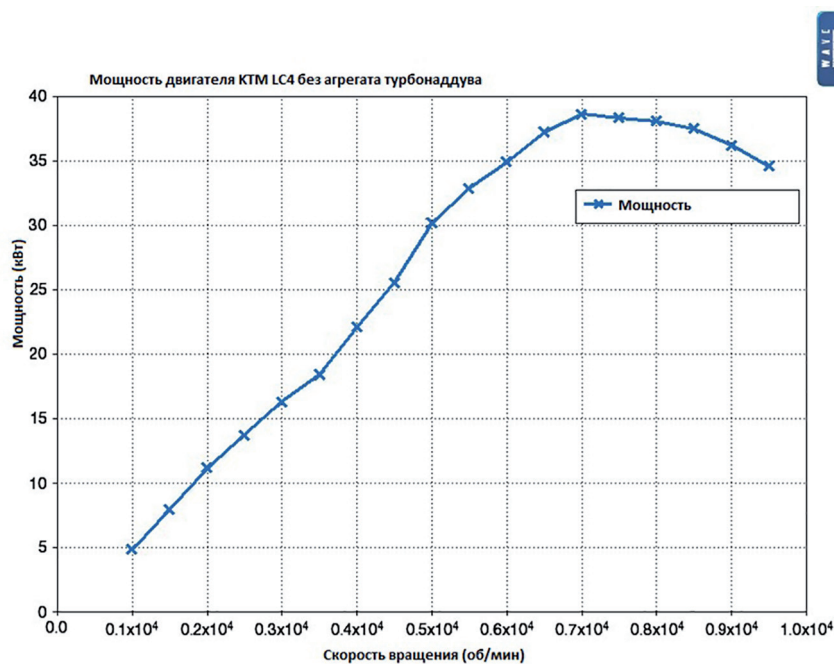


Рис. 3. Мощность ДВС без ТК

KTM LC4 Turbo FS (1000.00 rpm)

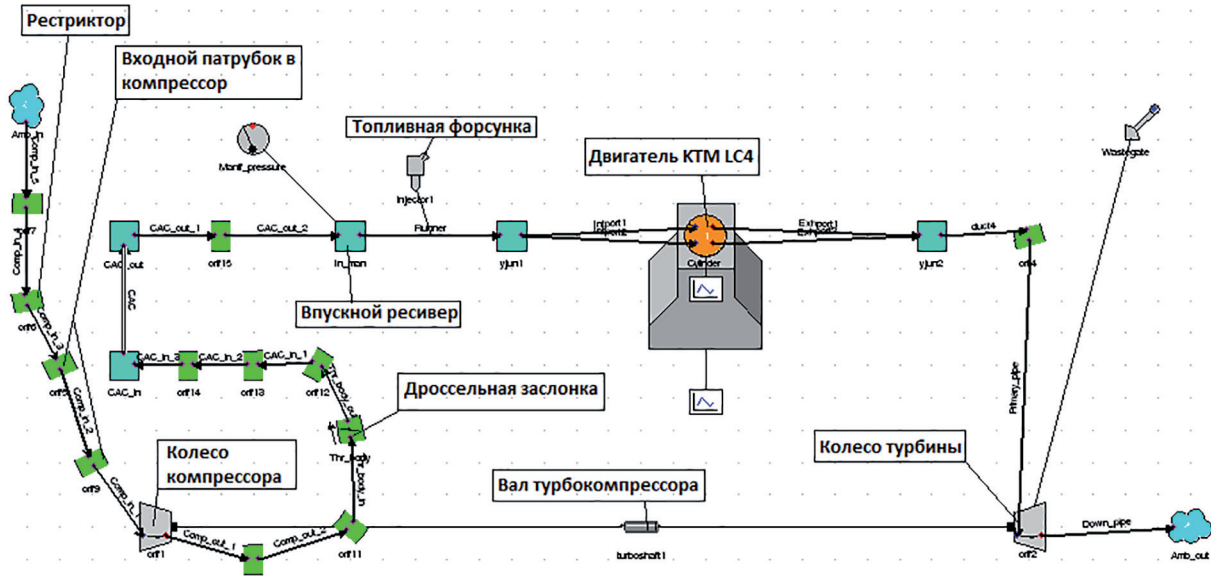


Рис. 4. Расчетная модель ДВС с ТК

На рис. 4 показана расчетная модель, на которой условно обозначены все основные компоненты системы двигателя внутреннего сгорания с агрегатом турбонаддува. В варианте с агрегатом турбонаддува рестриктор находится перед входом в компрессор, а дроссельная заслонка находится за колесом компрессора.

Рестриктор (рис. 5) имеет сопло и диффузор от 20 до 52 мм в диаметре и длиной 116 мм (угол раскрытия равен 7 град). Это обеспечивает при минимальных габаритах малые гидравлические потери (без наличия отрывных течений) [5]. Объем впускного ресивера определялся путем многочисленных симуляций. Так, после некоторого количества итерации был найден объем ресивера равный 2000 см³, благо-

даря которому была получена характеристика крутящего момента, приведенная на рис. 6.

Как видно из графика (рис. 6), характеристика момента значительно улучшилась как в количественном, так и в качественном отношении. Стоит отметить, что его показатели (84 Нм) превышают вариант без турбокомпрессора и рестриктора (67 Нм). Нивелирован провал в диапазоне от 2000 до 4000 об/мин. Эти обороты очень важны для гоночного использования мотора, которое подразумевает частую смену режимов работы двигателя, как, например, выход из поворота после резкого торможения, где требуются хорошие показатели крутящего момента. Первоначальный объем ресивера в ходе математического мо-

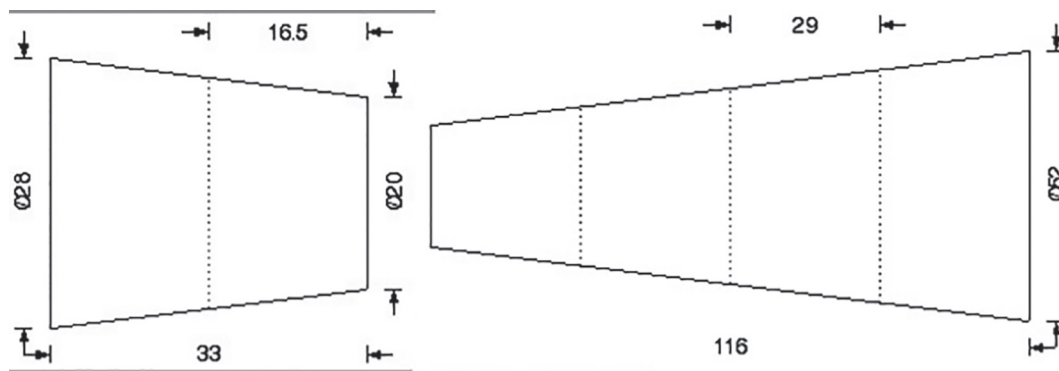


Рис. 5. Геометрия патрубка с рестриктором

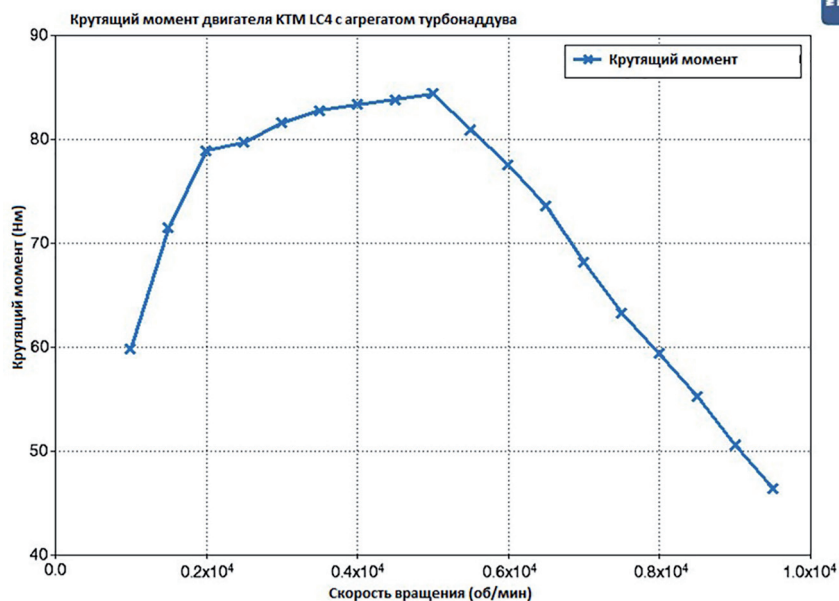


Рис. 6. Крутящий момент ДВС с ТК

делирования был выбран 1000 см³. При таком объеме крутящий момент составил около 90 Нм, однако характеристика кривой имела слишком резкий рост момента в начале оборотов и такое же резкое падение после достижения пиковых значений, что неприемлемо при использовании данного силового агрегата на гоночном автомобиле, так как управление таким болидом будет слишком затруднительно. В таком случае более низкие показатели крутящего момента ради выравнивания ха-

рактеристики в диапазоне оборотов, наиболее часто используемых в гоночных заездах автомобиля, выглядят более целесообразными.

Из графика мощности (рис. 7) видно, что она возросла практически во всем диапазоне оборотов и превысила заводской вариант мотора без турбокомпрессора и рестриктора. Так, со стандартным оснащением мотор имеет показатели мощности в 47 кВт, тогда как с турбокомпрессором и рестриктором мощность составила 50 кВт.

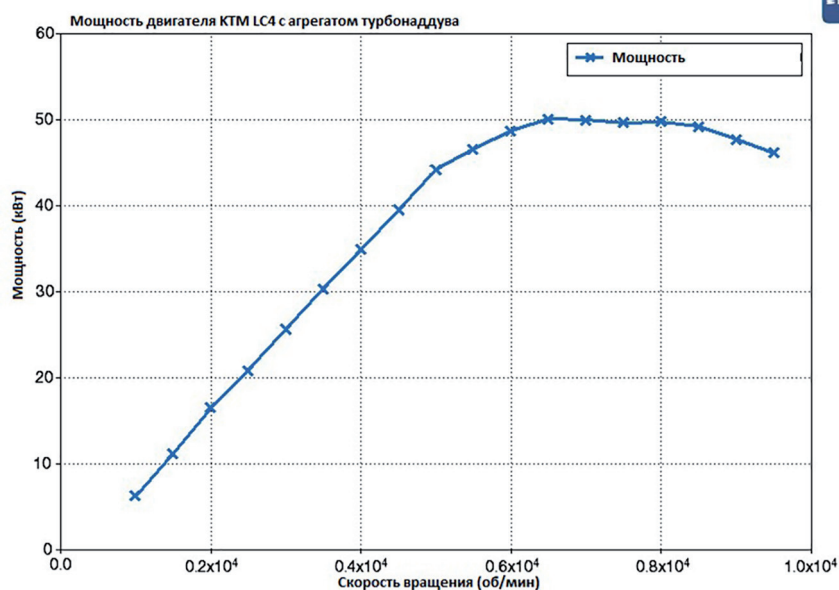


Рис. 7. Мощность ДВС с ТК

Характеристики и параметры турбокомпрессора

График (рис. 8) показывает зависимость выходного абсолютного давления (Бар) компрессора агрегата турбонаддува от частоты вращения двигателя (об/мин), которое создается во впускном тракте двигателя и всех его компонентах, таких как различные патрубки, а также ресивер, который имеет немаловажную функцию – сглаживать пульсации давления в системе впуска двигателя для улучшения харак-

теристики крутящего момента. Максимальное давление наддува составляет 43 кПа. Степень повышения давления $\Pi_k = 1,43$.

Компрессорная карта (рис. 9) – это график, описывающий конкретные характеристики компрессора в различных режимах его работы. В данном случае на карте компрессора в дополнение изображена линия его работы в данной системе ДВС с агрегатом турбонаддува. В целом, компрессор работает в зоне КПД более 50%, что относительно эффективно, однако, из

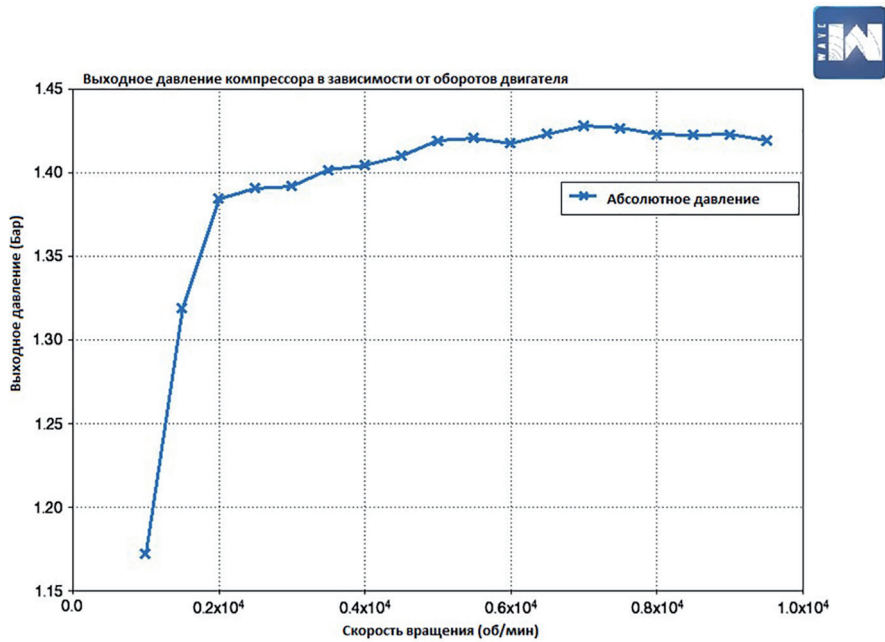


Рис. 8. Абсолютное выходное давление компрессора

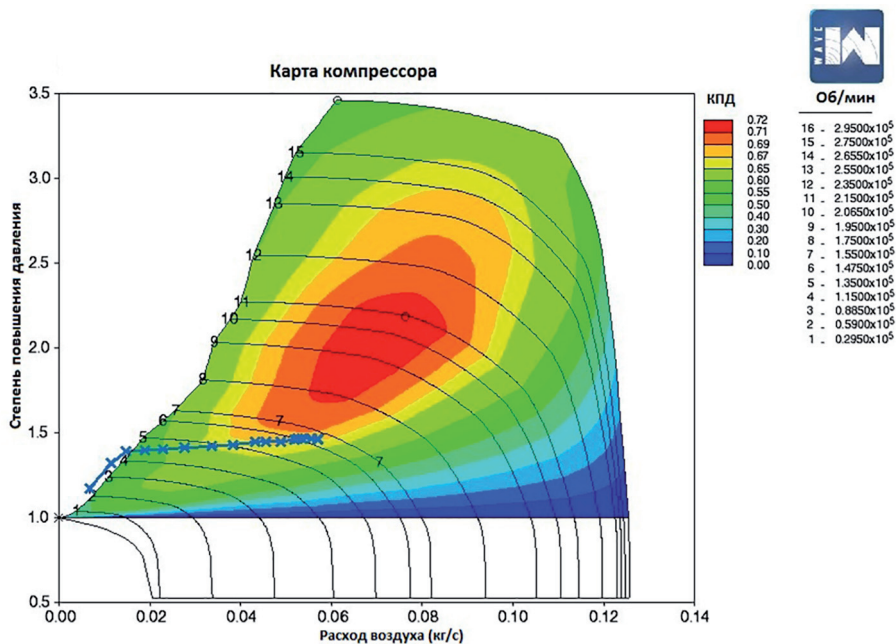


Рис. 9. Карта компрессора

графика можно сделать вывод, что компрессор несколько переразмерен для данного силового агрегата.

Карта турбины (рис. 10) – это график, описывающий характеристики турбины в различных режимах ее работы. На графике изображена зависимость степени понижения давления в турбине от оборотов. Также здесь изображена черным цветом линия работы турбины в данной системе агрегата турбонадува. Красная зона – это наиболее эффективный диапазон работы турбины при ее максимальном КПД. Как видно из графика, большая часть ее работы проходит в зоне наиболее высокого КПД, что говорит о том, что турбина подобрана вполне правильно для данной системы ДВС с агрегатом турбонадува.

Заключение

Из вышеизложенного видно, что установка агрегата турбонадува способна эффективно решить проблему ограничения количества воздуха, попадающего в двигатель из-за рестриктора. Характеристика крутящего момента значительно улучшилась и стала более ровной, исчез провал в диапазоне от 2000 до 5000 об/мин двигателя. Более того показатели крутящего момента и мощности превышают показатели заводского мотора без рестриктора и турбокомпрессора. Так, стандартные заводские показатели двигателя имеют следующие параметры: 47 кВт – мощность и 67 Нм – крутящий

момент. После установки рестриктора показатели мощности и крутящего момента падают до 38 кВт и 58 Нм, соответственно. При установке турбокомпрессора показатели двигателя значительно улучшаются, более того превышают показатели заводского варианта двигателя: мощность равна 50 кВт против 47 кВт, крутящий момент равен 84 Нм против 67 Нм. Такие показатели были достигнуты при давлении наддува 43 кПа, объеме ресивера 2 л и патрубке между рестриктором и компрессором с углом раскрытия 7 градусов.

Для получения более точных данных и достижения более высоких показателей необходимо провести полный цикл трехмерного математического моделирования всех компонентов системы впуска, предложить улучшенные геометрии рестриктора и ресивера. Особое значение следует придать дальнейшему изучению формы и объема впускного ресивера, геометрии рестриктора и входного патрубка в компрессор.

Литература

1. SAE International 2017-18 Formula SAE® Rules Preliminary, 2016. 183 p.
2. Brian Beach, Stoyan Hristov, Patrick Napier, Brian Robie, Paul Smith, Zachary Wilson Fsaе Turbo-System Design, 2010. 93 p.
3. Eric Griess, Kevin McCutcheon, Matthew Roberts Formula SAE Turbocharger System Development, 2012. 134 p.

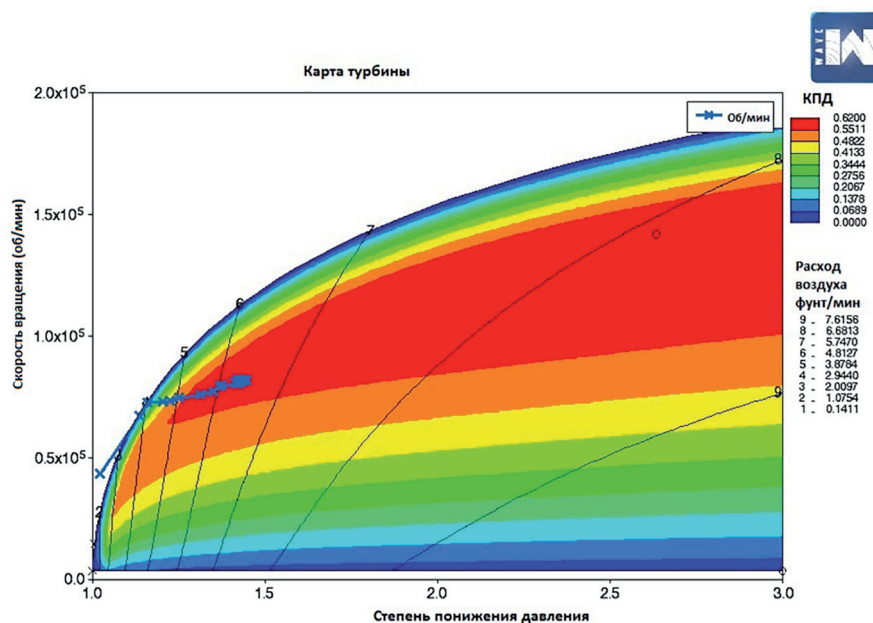


Рис. 10. Карта турбины

4. Julian Weber Automotive Development Processes, 2009. 312 p.
5. Ricardo Software WAVE User manual version 2016.1, 2016. 2936 p.
2. Brian Beach, Stoyan Hristov, Patrick Napier, Brian Robic, Paul Smith, Zachary Wilson Fsaе Turbo-System Design, 2010. 93 p.
3. Eric Griess, Kevin McCutcheon, Matthew Roberts Formula SAE Turbocharger System Development, 2012. 134 p.
4. Julian Weber Automotive Development Processes, 2009. 312 p.
5. Ricardo Software WAVE User manual version 2016.1, 2016. 2936 p.

References

1. SAE International 2017-18 Formula SAE® Rules Preliminary, 2016. 183 p.

ONE-DIMENSIONAL UNIVARIATE WORK SIMULATION OF TURBOCHARGED ENGINE WITH RESTRICTOR BEFORE COMPRESSOR INLET

M.G. Tatarov

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
angelo92@mail.ru

All over the world, and in Russia, especially, the engineering sports competitions "Formula Student" are gaining popularity. Formula Student – is an international competition held among students of technical universities, in order to get practical knowledge in the process of developing and building a Formula student class racecar. When creating a car, you must adhere to strict technical regulations. So, one of the limitations is the maximum engine capacity – 710 cubic meters, which, in itself, implies the use of a motorcycle engine. A mandatory condition is the presence of a restrictive nozzle (restrictor) which have 20 mm diameter and placing in the inlet system. This causes many problems when design-ing engine intake systems. However, it allowed using various systems of pressurization of engines. The most common and effective is the installation of the turbocharger. This helps to solve the problem of insufficient amount of air that entering to the engine. Moreover, with the correct configuration of all components of the intake system in combination with the turbocharger, it is possible to achieve power and torque exceeding the standard engine without a restrictive nozzle. The article presents the data obtained in the course of a one-dimensional simulation of the KTM LC4 engine with a turbocharger and a restrictor in the intake manifold. The purpose of the work is to reduce the negative influence of the restrictor on the power and torque parameters of the KTM LC4 engine by using a turbocharger. In the course of the work, an analysis was made of gas-dynamic processes occurring in various parts of the engine intake system that affect its output values based on numerical studies. Because of the research, the dependences of the output parameters of the engine (maximum power and maximum torque) on the parameters, shapes and sizes of various components of the intake system with a turbocharger.

Keywords: engine, restrictor, turbocharger, intake system, full-load curve.