

Расчётами исследованы 3- и 4-клапанные двигатели АЗЛК-21412 и –21416, конструкторская проработка которых была выполнена НАМИ-АЗЛК в 1987 г. Базовый 2-клапанный АЗЛК-21414 использовался для идентификации рабочего цикла, а результаты его расчёта – для сравнения с двигателями с управляемым воздухомоснабжением. Управление фазами и проходным сечением впускного канала в соответствии с механизмом газораспределения НАМИ осуществлялось угловым смещением впускного распредвала относительно выпускного и перекрытием одного из трёх впускных каналов и двух клапанов. Оптимизацией параметров неуправляемых моделей определён алгоритм ступенчатого углового смещения впускного распредвала управляемого АЗЛК-21416, обеспечивший 0-10% повышение энергетических показателей и уменьшение расхода топлива на 0-2%.

Расчётами 4-клапанного ЗМЗ-406.10 выполнено ТЗ базовой и дефорсированной модификаций (150 и 125 л.с. при 5200 и 4500 мин⁻¹): оптимизированы кулачки и левые ветви скоростных характеристик обоих двигателей за счёт углового сдвига распредвалов, уточнения фаз, подъёма клапанов, длины впускных патрубков. Двигатели с рекомендованными параметрами и алгоритмом ступенчатого изменения профилей впускных кулачков обеспечивают топливно-энергетические показатели на уровне лучших зарубежных аналогов. Дополнительно оптимизированы алгоритмы углового сдвига серийного впускного распредвала до 30° п.к.в. и изменения длины впускных патрубков, обеспечившие двигателю ЗМЗ-406.10 более высокие показатели, чем управляемого АЗЛК-21416. Рассмотренные разработки не потеряли актуальности и практической значимости для развития автомобильных ДВС.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ С РАДИАЛЬНОЙ ТУРБИНОЙ

Клима Й., (ООО *PBS Turbo*, Велка Битеш, Чешская Республика)

Вавра Р., (АО *Alta*, Брно, Чешская Республика)

Введение. Развитие транспорта и децентрализация производства электроэнергии ведет к росту использования поршневых двигателей, преимущества и выгоды которых по сравнению с газовыми турбинами находят применение прежде всего при низких мощностях. Сильная конкуренция ведет к повышению удельных мощностей, что уже в течение многих лет у поршневых двигателей нельзя представить без наддува.

Долгие годы разработка турбокомпрессоров (в дальнейшем ТК) исходила из сведений в области газовых турбин и авиационных двигателей. Поэтому первые ТК имели аксиальные турбины. Последовательные разработки в области наддува все меньших двигателей и стремление к компактности конструкции вели к использованию ТК с радиальной турбиной. В настоящее время для автомобилей они производятся уже в массовом масштабе.

Развитие радиальных машин. Разработку в области ТК можно разделить на три главных области:

- развитие компрессора, который подчиняется прежде всего росту сжатия;
- требования к компактности конструкции, что вело к использованию радиально-аксиальной турбины;
- разработка посадки ротора.

Компрессор. Основной параметр, характеризующий ТК, - сжатие - тесно связан с разработкой двигателей. Здесь имеются два фактора:

рост удельной мощности, который в настоящее время характеризуется продажей двигателей со средним эффективным давлением 2,0 – 2,4 МПа;

пределы содержания вредных веществ в выхлопных газах, когда главным образом требования к NOx ведут к переходу на цикл Миллера или Атkinsona, что в дальнейшем значительно повышает требования к сжатию в компрессоре.

При использовании в автомобилях, кроме того, требуется достаточная ширина рабочего поля компрессора таким образом, чтобы были покрыты все оборотные режимы двигателя и не происходил помпаж.

Еще до недавнего времени использовались компрессоры с радиальным выходом, которые для сжатия требуют самых низких оборотов, и их характеристика была достаточно широкой. Их производство технологически не было слишком трудоемким. В настоящее время производятся почти исключительно компрессоры, имеющие загнутые назад лопатки (рис. 1). Выходной угол колеблется в пределах 50 – 70° к касательной. Использование современных проектных методов позволило изготовить компрессоры, достигающих сжатия 5 с КПД действия 80% и выше (рис. 4). Они производятся на фрезерных станках с пятью управляемыми осями.

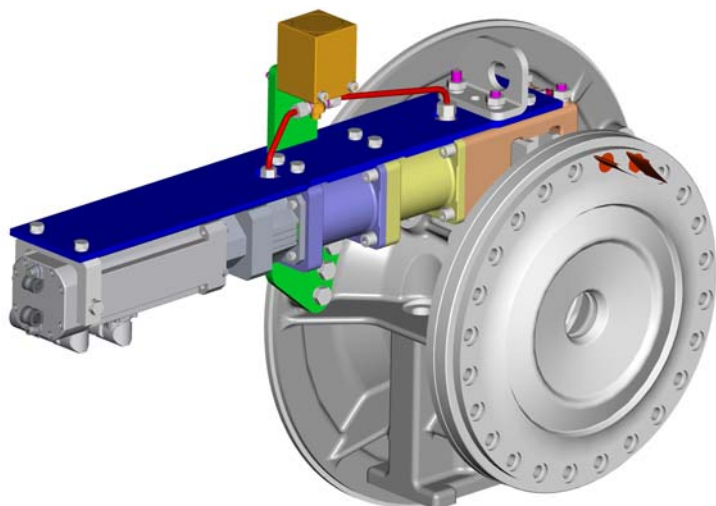
Турбина. Так же, как растет сжатие компрессора, растет и удельная работа турбины, хотя и несколько медленнее, благодаря улучшению КПД всех компонентов. Еще сегодня мы можем встретиться с ТК, где удельная работа турбины составляет около 100 кДж.кг⁻¹, но турбины ТК для современных двигателей уже справляются с удельной работой около 250 кДж.кг⁻¹. Современные проектные методы позволили достигнуть КПД турбинной ступени более 83%. Однако повышение КПД несет с собой еще одно требование к турбине - повышение ее пропускной способности. Необходимо сознавать, что, например, повышение КПД ТК с 57 до 62% означает необходимость увеличения пропускной способности турбины на 12%!



Рис. 1. Рабочие колеса турбокомпрессоров (слева: секционированное колесо с радиальным выходом, колесо с загнутыми назад лопатками, компрессор для высоких степеней сжатия)

ТК также подвержен сильному давлению в отношении достижения конкурентоспособной цены. По нашему мнению, это является одной из главных причин замены сложной в производственном отношении аксиальной турбины турбиной радиально-аксиальной. Выгодами, которыми нельзя пренебречь, являются более компактная конструкция и в большинстве случаев - снижение результирующей аксиальной силы. У ТК, производимых в массовом порядке, выгодой является также использование корпуса турбины без соплового аппарата, что в дальнейшем позволяет снизить расходы.

В последнее время у ТК возникает также требование к регулировке турбины. Конструкционное решение установилось на изменении сечения соплового аппарата – или путем поворачивания лопаток (напр., Borg Warner Turbo Systems),

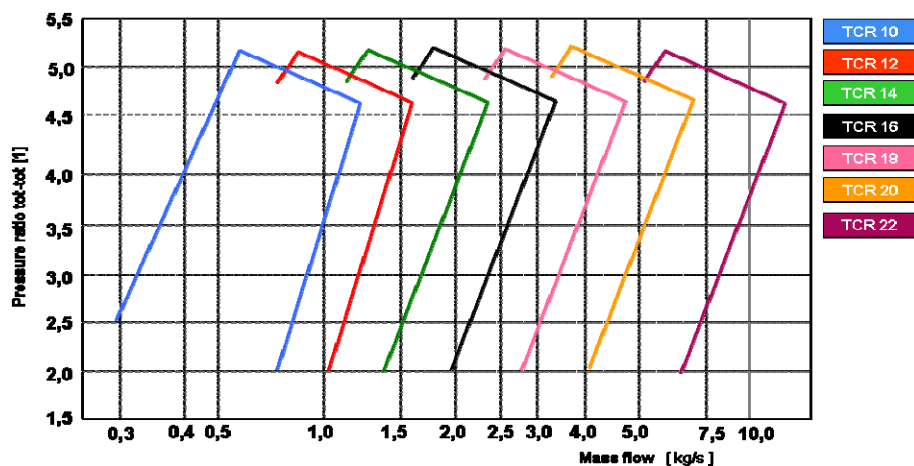


или изменения высоты лопаток путем передвижения диска (напр., Holset). Регулирование сечения соплового аппарата турбины подготовлено также у производителей крупных ТК, включая PBS Turbo, который предлагает не только собственный поворотный механизм, но и блок управления с электродвигателем (рис. 2).

Рис. 2. Поворотные лопатки соплового аппарата турбины нагнетателя TCR

Новая серия турбокомпрессоров PBS Turbo. В 2002 году фирмы MAN Diesel SE и PBS Turbo совместно начали разрабатывать новую серию ТК - TCR, которые ориентированы прежде всего на двигатели средних скоростей и мощностью от 280 до 6 000 кВт.

ТК подходят для различных типов применений. Рабочее поле отдельных типов серии представлено на рисунке 3. Для проектирования ТК был применен многолетний опыт обеих фирм в различных областях использования двигателей, а также самые современные инструменты для разработки проточных частей и их



структурного анализа. Большое внимание было уделено безопасности, для оценки которой разработаны и использованы новые расчетные инструменты.

Рис. 3. Рабочее поле турбокомпрессоров TCR

Рабочее поле ТК каждого размера покрывают два компрессора с различной геометрией лопаток таким образом, чтобы в соответствующей области достигались оптимальные параметры. В настоящее время мы работаем над разработкой компрессоров с еще более высокой степенью сжатия. Типичная характеристика компрессора изображена на рисунке 4. Конструкция колеса позволяет использовать алюминиевый сплав при сжатии, умеренно превышающем 5. Однако подшипники и вал рассчитаны также для колеса компрессора из титана, благодаря чему обеспечена возможность повышения степени сжатия в соответствии с потребностями заказчиков.

Большие усилия были приложены к разработке турбинной ступени, которая в целом была разработана с помощью CFD методов подобно компрессору. Проект был проверен в ходе множества испытаний, результаты которых дали возможность дальнейшей оптимизации.

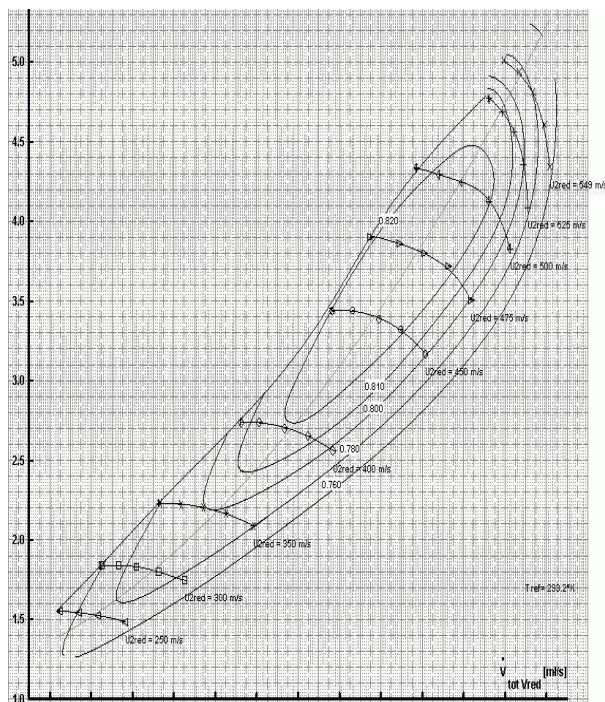


Рис. 4. Характеристика компрессора ТК TCR

Как видно из рис. 5, КПД современной радиально-аксиальной ступени выше по сравнению с предыдущим поколением нагнетателей, а также с аксиальной турбиной. Все три турбины, сравниваемые на рисунке, имеют практически одинаковую пропускную способность.

У новой турбинной ступени был достигнут значительный рост КПД в области низких степеней расширения. Это важно для двигателей, работающих во всем диапазоне мощностей (судна, тепловозы) - в прошлом при снижении мощности происходило

нарастание задымленности до видимого уровня. Повышение КПД при низких степенях расширения благоприятно сказывается при акселерации всей системы после скачкообразного нарастания нагрузки.

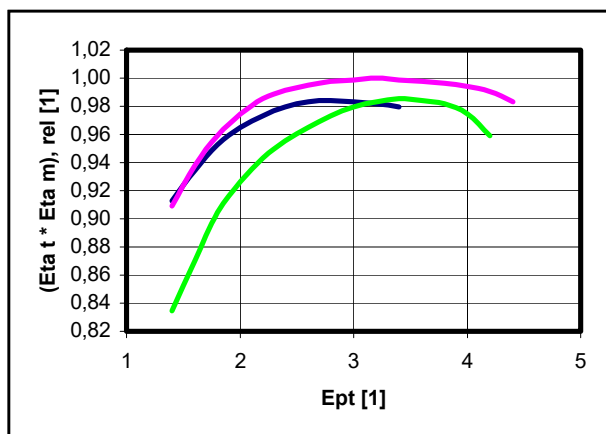


Рис. 5. КПД различных турбин ТК: зеленая кривая - старая радиальная турбина, оптимизованная для высоких степеней расширения, синяя-аксиальная турбина, красная-современная радиально-аксиальная турбина

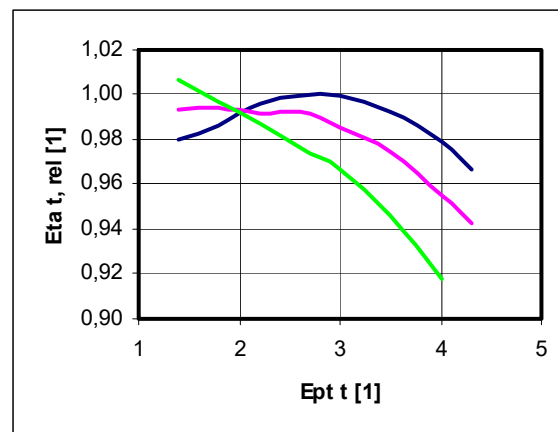


Рис. 6. Влияние реакции турбины на ее КПД (красным обозначен - проектная реакция, синим - реакция, сниженная на 10%, зеленым - реакция, повышенная на 9%)

Общеизвестна относительно высокая чувствительность радиально-аксиальной турбины к термодинамической реакции - см. рис. 6. Это свойство можно использовать для дальнейшей оптимизации поведения ТК в двигателе, когда мы можем оптимум КПД турбины сдвигать к более высоким или низким степеням расширения в соответствии с областью наиболее частой работы двигателя.

Использование турбокомпрессоров на двигателях. Как уже было отмечено в предыдущих абзацах, современные проектные методы вместе с экспериментами позволили у ТК с радиальной турбиной достигнуть очень высоких КПД в широком диапазоне. Кроме того, эта концепция дает возможность очень компактного конструкционного решения с минимальным количеством деталей. Это затем

проявляется относительно малым занятым пространством, высокой надежностью и простым техническим обслуживанием при эксплуатации. Последний упомянутый фактор становится все более важным, потому что заказчика сегодня интересуют не только термодинамические параметры и сумма начальных инвестиций. Заказчик хочет уже в самом начале знать, какими будут общие расходы на протяжении жизненного цикла изделия. Простота ТК TCR и легкая замена наиболее изнашиваемых деталей удерживают ремонтные расходы на очень низком уровне, что подтверждает и первый опыт эксплуатации.



Рис. 7. Турбокомпрессор TCR 16 в газовом двигателе ($P = 1050$ кВт $n = 1500$ мин⁻¹, топливо – природный газ)

Радиально-аксиальные турбины, таким образом, во все более широком объеме заменяют турбины аксиальные.

Выгоды радиально-аксиальной турбины используют и ТК вновь разработанной серии TCR, которые с самого начала задуманы как можно более универсальными. Их можно использовать для широкой шкалы жидких и газообразных видов топлива (напр., см. рис. 7). С этой точки зрения сконструированы уплотнения и выбраны материалы ключевых деталей. Выбрано простое, но очень жесткое крепление ТК к двигателю, в который интегрировано и распределение масла. Для двигателей с очень высокими температурами продуктов сгорания имеется в распоряжении охлаждаемый водой корпус подшипников. ТК могут быть поставлены с дальнейшими дополнениями, например, изоляцией корпуса турбины, очистителем воздуха, оборудованием для очистки компрессоров и турбины во время эксплуатации, датчиком оборотов, средствами для монтажа. Само собой разумеющимся является широкая техническая поддержка заказчиков.

Об универсальности использования свидетельствуют и исследования применения для тепловозного двигателя, когда с меньшими размерами колеса компрессора удалось достичь необходимого протока воздуха. Цель проекта – подготовить ТК с такими же присоединительными размерами (рис. 8). Само собой разумеющимся остается достижение высоких КПД и сохранение потенциала дальнейшего повышения степени сжатия. Расширение серии ТК TCR по направлению к меньшим протокам приносит для производителей двигателей также возможность решения с двумя меньшими ТК вместо одного большего.

В этом случае не только сокращается реакция группы наддува в случае изменения нагрузки, но и предлагается дальнейшая возможность регулирования, как, например, последовательный наддув или двухступенчатая наполняющая группа. Все можно комбинировать с регулированием клапанами, обтоком (By – pass) или использовать турбину с регулированием сечения соплового аппарата.

PBS Turbo и далее тщательно следит за шагами заказчика и готово включить их требования в свой план технического развития так, чтобы в максимальной степени помочь подготовить двигатели высшего качества, которые будут конкурентоспособны благодаря своим низким затратам, соответствуя одновременно имеющимся и предстоящим директивам.

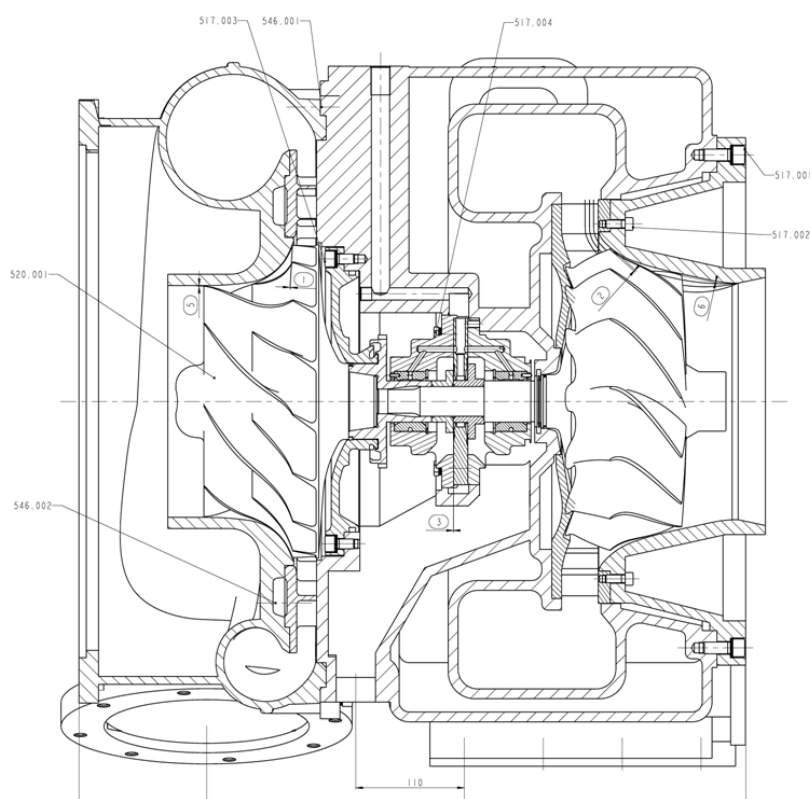


Рис. 8. Конструкционный проект ТК с радиально-аксиальной турбиной для тепловоза.

Заключение.

За последние пять лет MAN Diesel, составной частью которого является PBS Turbo, разработал новую серию ТК TCR с радиально-аксиальной турбиной с параметрами высшего кровеня, очень компактной конструкцией и легким техническим обслуживанием. Об-

ширная разработка предоставила возможность высокой нагрузки компрессорной и турбинной ступеней, что обеспечивает широкие возможности применения ТК в различных типах современных двигателей. В настоящее время завершается расширение серии по направлению к меньшим протокам при сохранении высоких коэффициентов полезного действия и других выгод, проверенных на большем количестве изделий серии и других типах. Это позволяет производителям двигателей думать о новых концепциях наддува и с опережением готовиться к новым требованиям рынка.

Благодарность. Авторы благодарят Министерство промышленности и торговли Чешской Республики, которое в рамках своих программ оказывает финансовую поддержку разработки ТК с радиальной турбиной (проекты FF-P2/109 и FI-IM3/213).

Литература:

1. Кадрножка, Я.: Лопаточные машины, CERM Брно, 2003
2. Кадрножка, Я.: Тепловые турбины и турбокомпрессоры, CERM Брно, 2004
3. Мацек, Я.; Климент, В.: Газовые турбины, Турбокомпрессоры и вентиляторы, ČVUT Прага, 2001
4. Moustapha, H.; Zalesky, M. F.; Baines, N.C.; Japikse, D.: Axial and Radial Turbines, Concepts NREC, 2003
5. Japikse, D.: Centrifugal Compressors – Design and Performance, Concepts ETI, 1996
6. Baines, N.C.: Fundamentals of Turbocharging, Concepts ETI, 2005
7. CIMAC Congress 2004, Kyoto
8. 5th Dessau Gas Engine Conference, Dessau, 2007
9. Отчёты о разработках PBS Turbo
10. Evolution, торгово-технический журнал SKF, AB SKF Göteborg, 2006