

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ РАЗЛИЧНЫХ РЯДОВ

Г.Е. Ципленкин, к.т.н., В.И. Иовлев, к.т.н., Р.С. Дейч, к.т.н.
ООО «ТУРБОКОМ»

Выполнен анализ изменения массогабаритных показателей турбокомпрессоров (ТК) на основе совершенствования рядов фирм АВВ и MAN, занимающих лидирующее положение в производстве и повышении их технического уровня.

Показано, что переход от бесконсольной конструктивной схемы к консольной позволяет существенно снизить массу и габариты ТК, что облегчает их компоновку на двигателе.

Одна из основных тенденций развития двигателестроения состоит в форсировании двигателей по цилиндровой и агрегатной мощностям, что стимулирует фирмы, выпускающие турбокомпрессоры (ТК), к разработке их новых рядов с более высокими степенями повышения давления и одновременным получением максимально возможного КПД. В настоящей статье выполнен анализ изменения массогабаритных показателей на основе развития рядов ТК фирм АВВ и MAN, занимающих лидирующие позиции в их разработке и производстве.

В настоящее время фирма АВВ выпускает следующие ряды ТК:

- VTR/4–Classic — ТК бесконсольной конструктивной схемы с осевой турбиной [1];
- RR, TPS — ТК с консольным расположением колес и радиальной турбиной [2, 6];
- VTC, TPL/A, TPL/B — ТК с консольным расположением колес и осевой турбиной [3–5].

ТК типа TPL с осевой турбиной являются последней разработкой фирмы и предназначены для четырехтактных дизелей с индексом А, для двухтактных дизелей с индексом В. Новый ряд TPS с радиальной турбиной рассчитан на достижение степени повышения давления до 5.

Фирма MAN выпускает два ряда ТК с осевой турбиной NA/S(NAT9) и TCA и три ряда ТК с радиальной турбиной NR/R, NR/S и TCR [7]. TCA и TCR — новые ряды ТК с современными параметрами.

Расход воздуха двигателем при заданной степени повышения давления определяет размеры рабочих колес (РК). Последние задают радиаль-

ную протяженность корпусных деталей и величину их проходных сечений для воздуха и газа. Размер ТК по оси, кроме того, зависит от его конструктивной схемы (консольная или бесконсольная) и типа турбины (радиальная или осевая). Таким образом, расход воздуха двигателем определяет габаритные размеры ТК, которые с учетом конструктивного исполнения определяют и массу ТК.

При увеличении размеров корпусов повышается КПД ТК, но до определенных пределов. При переходе за оптимальные габаритные размеры (и массы) ощутимого повышения КПД ТК не наблюдается. Таким образом, конструктор ТК должен решить задачу оптимизации по достижению максимального КПД при приемлемых массогабаритных показателях.

Расход воздуха в первом приближении прямо пропорционален квадрату наружного диаметра РК компрессора. Если бы соблюдалось полное подобие при переходе от одного типоразмера к другому, то объем и масса турбокомпрессоров были бы пропорциональны кубу диаметра рабочих колес и имели бы степенную зависимость от расхода воздуха с показателем 1,5. Удельные показатели — масса и объем, отнесенные к расходу воздуха, имели бы степенную зависимость с показателем 0,5. Плотность компоновки турбокомпрессора — отношение массы к объему — будет постоянной.

Указанные зависимости характеризуют качество проектирования ТК, и в логарифмических координатах они близки к линейным. В первом приближении соотношения между массой, объемом и плотностью компоновки ТК может быть представлено в виде обобщенного уравнения вида $P = aG^m$, где P — искомый оптимальный параметр (масса, объем или плотность компоновки). В таблице представлены численные значения этих уравнений в зависимости от максимального расхода воздуха через ТК на основании информации, имеющейся в источниках [1–7]. На рис. 1–7 уравнения представлены в графической форме.

Максимальные расходы воздуха определялись для ТК фирмы АВВ по полям расходов при степени повышения давления 4,0 для рядов

Таблица

Зависимости массы (M), объема (V) и плотности турбокомпрессоров (ρ) от расхода воздуха (G)

Тип ТК (фирма)	Масса, кг	Объем, м ³	Плотность, кг/м ³
Турбокомпрессоры с осевой турбиной			
VTR/4 (ABB)	$M = 70,1 G^{1,46}$	$V = 0,0976 G^{1,43}$	$\rho = 718 G^{-0,02}$
TPL/A и B (ABB)	$M = 56,4 G^{1,3}$	$V = 0,0487 G^{1,48}$	$\rho = 998 G^{-0,121}$
TCA (MAN)	$M = 33,4 G^{1,55}$	$V = 0,0539 G^{1,49}$	$\rho = 620 G^{0,06}$
NA/S (MAN)	$M = 100 G^{1,21}$	—	—
Турбокомпрессоры с радиальной турбиной			
TPS/F33 (ABB)	$M = 40 G^{1,22}$	$V = 0,0251 G^{1,43}$	$\rho = 1590 G^{-0,207}$
RR (ABB)	$M = 52,5 G^{1,56}$	$V = 0,062 G^{1,64}$	$\rho = 856 G^{-0,115}$
TCR (MAN)	$M = 45,5 G^{1,24}$	Нет данных	Нет данных
NR/S (MAN)	$M = 102 G^{1,04}$	$V = 0,112 G^{1,32}$	$\rho = 912 G^{-0,267}$
NR/R (MAN)	$M = 104 G^{1,14}$	$V = 0,141 G^{0,936}$	$\rho = 739 G^{0,200}$

VTR, VTC и TPL; 3,5 для RR и 4,5 для TPS. Для ТК фирмы MAN максимальные расходы воздуха были рассчитаны исходя из мощности двигателя и по удельному расходу воздуха на единицу мощности [7].

Габаритные объемы рассчитаны с учетом воздухоприемного патрубка (за исключением ТК TPS) (см. рис. 4, 5).

Значения коэффициентов в приведенных уравнениях с совместным рассмотрением их графических зависимостей позволяют оценить изменение указанных параметров. Коэффициент a характеризует положение найденной параметрической зависимости относительно оси расхода. Чем меньше его значение, тем меньше требуются масса и габаритный объем для обеспечения заданного расхода воздуха при том же значении коэффициента m . Коэффициент m определяет

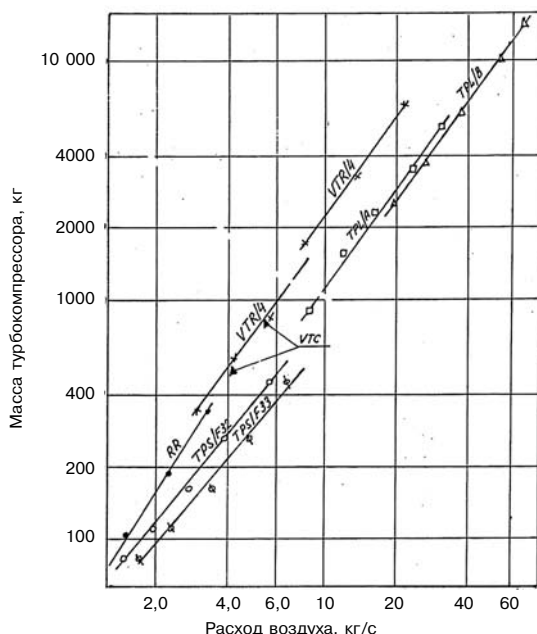


Рис. 1. Зависимость от расхода воздуха массы турбокомпрессоров различных рядов фирмы ABB

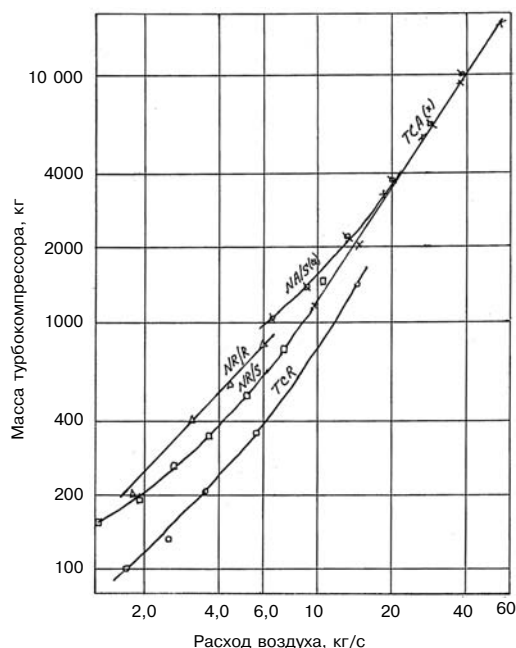


Рис. 2. Зависимость от расхода воздуха масс турбокомпрессоров различных рядов фирмы MAN

наклон кривой к оси расходов. Чем больше его значение, тем чувствительнее изменение массы и объема ТК от расхода воздуха при переходе к большему типоразмерам.

Зависимости массы ТК от расхода воздуха (рис. 1–3) показывают, что по мере совершенствования их конструкции расходы воздуха через турбокомпрессор увеличиваются. Это хорошо видно при сравнении рядов VTR и TPL, RR и TPS (см. рис. 1) и NR/R, NR/S и TCR (см. рис. 2). По массам ТК ряд VTR разделяется на две груп-

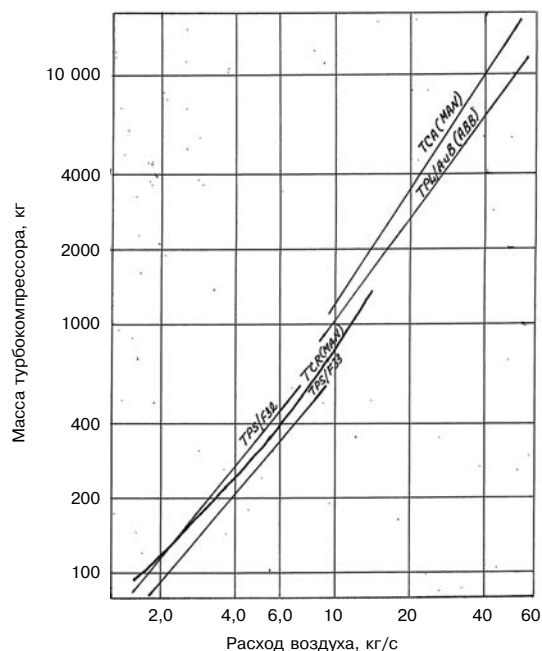


Рис. 3. Сравнение масс турбокомпрессоров различных рядов фирм ABB и MAN

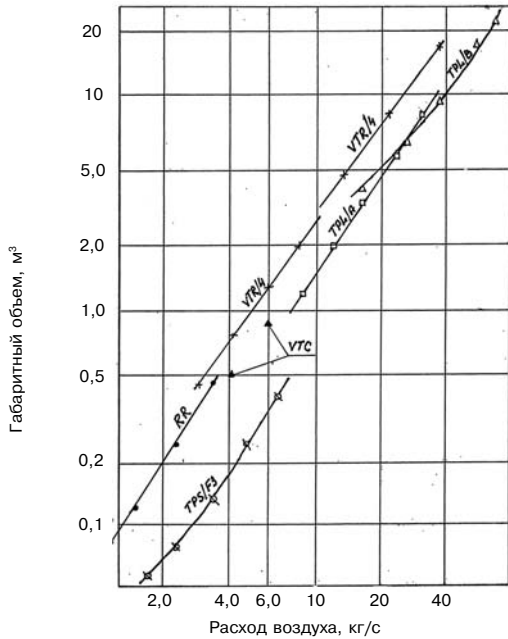


Рис. 4. Зависимость от расхода воздуха габаритных объемов турбокомпрессоров различных рядов фирмы ABB

пы, но степенная зависимость рассчитана для всего ряда, так же, как для ТК рядов TPL/A и TPL/B. В зависимостях, связывающих массу и объем турбокомпрессоров ряда VTR с расходом воздуха, значение показателя степени m приближается к теоретически достижимому, равному 1,5, что указывает на высокое качество их массогабаритных показателей.

Переход фирмой ABB от бесконсольной конструктивной схемы ТК VTR к консольной ТК TPL позволил дополнительно снизить массу и габариты ТК. Значения коэффициентов a и m для

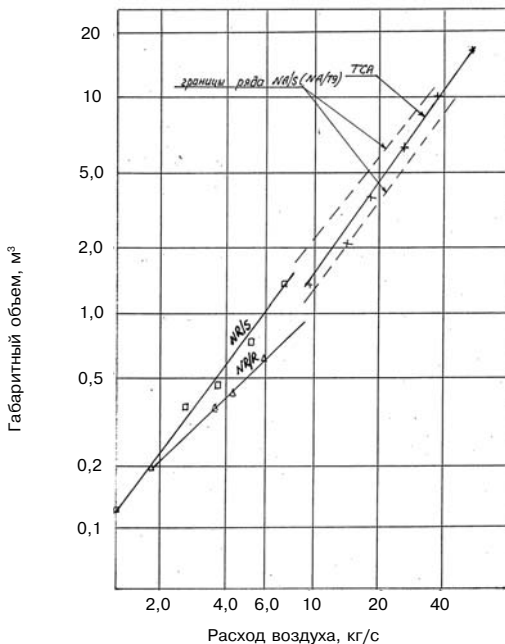


Рис. 5. Зависимость от расхода воздуха габаритных объемов турбокомпрессоров различных рядов фирмы MAN

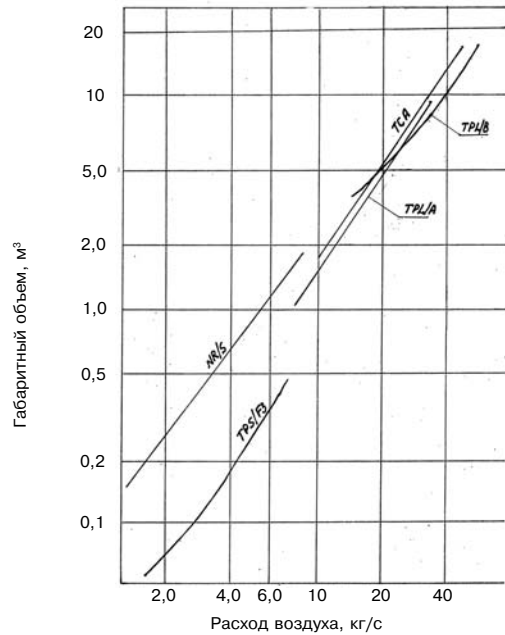


Рис. 6. Сравнение габаритных объемов турбокомпрессоров различных рядов фирм ABB и MAN

ряда TPL (см. таблицу) еще ниже, чем для ряда VTR. Причем если для массы ТК коэффициент a уменьшается на 20 %, а m на 10 %, то для его объема при мало изменившемся показателе m коэффициент a уменьшился в два раза. Поэтому для ТК ряда TPL наиболее заметен выигрыш при больших расходах, для которых и предназначен этот ряд ТК.

ТК ряда VTC — консольные. Массы и габариты ТК этого ряда близки к аналогичным параметрам ТК консольного ряда RR (см. рис. 1 и 4). Для турбокомпрессоров с осевой турбиной NA/S и TCA фирмы MAN расхождение в массах ТК имеет место только для меньших типоразмеров, для больших типоразмеров зависимости совпадают (см. рис. 2). Это объясняется тем, что турбокомпрессоры NA/S так же, как и TCA, являются консольными, и все имеющиеся возможности для снижения их массы уже использованы.

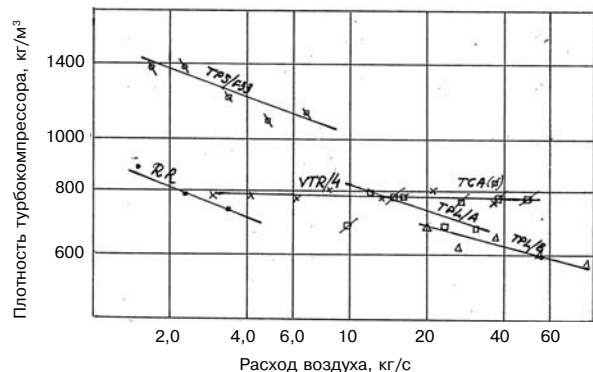


Рис. 7. Зависимость плотности турбокомпрессоров различных рядов фирмы ABB и ряда TCA фирмы MAN

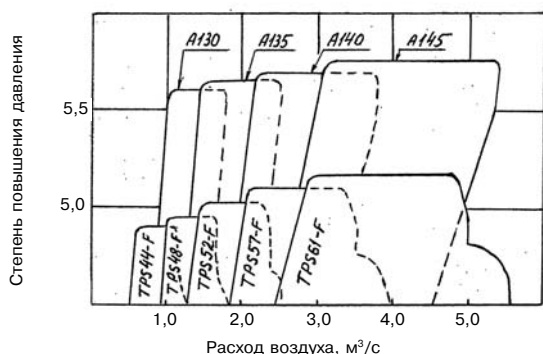


Рис. 8. Сопоставление полей расходов воздуха турбокомпрессоров TPS-F и TA100

Сопоставление масс турбокомпрессоров фирм АВВ и МАН (см. рис. 3) показывает, что для ТК с радиальной турбиной зависимости близки. Следует учитывать, что массы ТК TPS приведены без входного патрубка или фильтра-глушителя. Для ТК TCR нет информации, учтен ли он.

ТК с осевой турбиной ряда TPL фирмы АВВ при равных массах обеспечивают более высокий расход воздуха, чем ТК ряда TCR фирмы МАН.

Если для современных турбокомпрессоров фирмы АВВ (см. рис. 4) характерно, что при одинаковом объеме расход воздуха возрастает, то для турбокомпрессоров фирмы МАН такой тенденции не наблюдается (см. рис. 5). Переход от ряда ТК NR/R к более прогрессивному ряду NR/S привел к увеличению габаритных размеров. Связано это с тем, что у исходного ряда проходные сечения корпусных деталей были несколько зажаты, и для повышения КПД их пришлось увеличивать. К сожалению, по ТК ряда TCR нет информации о габаритных размерах. Для ряда NA/S габаритные размеры по длине и высоте заданы в ограниченном диапазоне значений, поэтому на рис. 5 приведены границы габаритных объемов, в зону которых (как раз в центр) попадает габаритный объем нового ряда TCA. Сопоставление габаритных объемов ТК TPL и TCA (см. рис. 6) показывает, что они близки, хотя ряд TPL тот же расход воздуха обеспечивает при меньшем габаритном объеме.

Таким образом, приведенный анализ показывает, что по мере совершенствования турбокомпрессоров их металлоемкость в целом снижается, что позволяет тот же самый расход воздуха обеспечить применением ТК с меньшей массой и габаритными размерами.

Зависимости удельных масс и объемов, отнесенных к расходу, эквивалентны зависимостям абсолютных значений, поэтому эти зависимости не приводятся.

Параметром, характеризующим качество турбокомпрессора, является плотность компоновки ТК, то есть отношение его массы к объему. Построенные зависимости плотности турбоком-

прессоров различных рядов фирмы АВВ показывают, что для ряда ТК VTR плотность практически постоянна (см. рис. 7). Для остальных рядов с увеличением размера ТК плотность их компоновки падает. Высокие значения плотностей для ТК ряда TPS объясняется тем, что их объем рассчитан без учета воздухоприемного патрубка. С учетом этого объема плотности ТК рядов TPL и TPS лягут на одну кривую. Следует отметить, что ТК с радиальной турбиной в силу особенностей конструкции имеют более высокую плотность, чем ТК с осевой турбиной. Эта тенденция сохраняется до расходов менее 10 кг/с, а при больших расходах значения плотностей, по видимому, будут ложиться на одну линию.

Для турбокомпрессоров фирмы МАН плотность компоновки рассчитана только для ряда TCA, для которого имеется полная информация о значениях массы и габаритных размерах (см. рис. 7). Для этого ряда плотность постоянна и близка к плотности ТК ряда VTR, в то время как плотность ТК ряда TPL убывает, что также свидетельствует о более эффективном использовании металла в ТК этого ряда.

ТК с радиальной турбиной имеют более простую конструкцию и позволяют получить более высокие КПД, поэтому фирмы АВВ и МАН уделяют особое внимание развитию этой конструкции. Фирма МАН разработала самый большой ТК TCR22 с расходом воздуха до 18 кг/с [8], а фирма АВВ — ряд ТК A100-H со степенью повышения давления до 5,8 при расходе до 6 кг/с (рис. 8) [9]. ТК A100-H имеют габаритные и присоединительные размеры, аналогичные ряду ТК TPS-F, но они позволяют получить те же расходы при более высоких степенях повышения давления.

Литература

1. АВВ Turbochargers. VTR — The Classic. Product Information.
2. АВВ Turbochargers. RR — The Runner. Product Information
3. АВВ Turbochargers. VTC — The Compact. Product Information.
4. АВВ Turbocharging. TPL..A — The 4-Stroke Power pack. Product Information.
5. АВВ Turbocharging. TPL..B — The 2-Stroke Engines. Product Information.
6. АВВ Turbocharging. TPS..F — New compact turbochargers for very high pressure rations. Product Information.
7. Exhaust Gas Turbochargers. Programme 2009, MAN Diesel.
8. Schmuttermair H., Hilgenfeld L., Bartholomae K., Kneip S. Application & field experience of the new MAN Diesel turbocharger series TCR. Paper № 221, CIMAC 2007, Vienna.
9. A100-H The new single-stage turbocharging for high speed engines. Magazine Turbo, Number 2/2008.