

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ДВС С УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ

А.Н. Агафонов, д.т.н., проф.,

И.В. Слесаренко, В.Н. Гудзь, А.В. Горланов, Д.П. Пчельников, инженеры;
Военный инженерно-технический университет;

А.В. Разуваев, к.т.н., доц.; ОАО «Волжский дизель им. Маминых»

Применение подачи пара в проточную часть турбины приводит к улучшению воздухообмена и увеличению мощности двигателя.

Для оценки изменения основных технических характеристик высокофорсированных ДВС была разработана методика расчета, позволяющая определить эффективность предложенного метода. Проверка результатов теоретических исследований выполнена на экспериментальном стенде с усовершенствованной системой воздухообмена дизеля типа 6ЧН21/21.

Сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных подтвердило точность расчетов в пределах погрешности измерений (по расходу воздуха — не более 1,2 %, по температуре газов после турбины — не более 1,8 % и по удельному расходу топлива — не более 1,0 %).

Одной из важнейших задач сегодняшнего дня в области двигателестроения является создание высокоэффективных двигателей, способных работать с максимальным КПД во всем диапазоне нагрузок. Известно, что работа ДВС на нагрузках, близких к номинальным значениям, особенно для двигателей с высокой степенью форсировки, является наиболее тяжелой с точки зрения теплонапряженности (величина коэффициента избытка воздуха α — минимальна). Решение проблемы обеспечения оптимальных параметров работы ДВС на таких режимах может быть достигнуто за счет улучшения воздухообмена двигателя. Для дизелей с наддувом эта задача сводится к увеличению производительности компрессора за счет повышения мощности газовой турбины, для чего может быть использована энергия, полученная от утилизации теплоты ОГ.

Как показывают выполненные исследования [1–3], для улучшения воздухообмена в целях повышения экономичности и снижения теплонапряженности дизеля 6ЧН21/21 целесообразно заменить штатную на усовершенствованную систему воздухообмена (УСВ), в которой дополнительная мощность турбокомпрессора достигается путем подачи пара из системы утилизации теплоты дизеля в проточную часть газовой турбины.

Однако использовать в полной мере полученные результаты этих исследований для разработки системы УСВ ДВС с диаметром цилиндра 210 мм, высокой степенью форсировки ($P_{me} = 1,62$ МПа) не представляется возможным.

Для оценки перспективности применения УСВ на двигателях подобного класса разработана методика расчета, позволяющая оценить эффективность данного метода с точки зрения улучшения воздухообмена ДВС. В расчетах в качестве исходного принимался режим работы ДВС с высокотемпературным охлаждением (ВТО) [4]. При этом были приняты следующие допущения: значение температуры воздуха за компрессором и КПД турбокомпрессора не изменяются при работе турбины на парогазовой смеси; расход пара определяется на основании теплового баланса двигателя; давление пара принимается равным давлению отработавших газов перед турбиной. Поскольку перепад давлений рабочего тела в турбине при прочих равных условиях пропорционален его скорости и плотности:

$$\Delta p \sim \frac{\omega^2}{2g} \rho \sim \frac{V^2}{2g} \rho \sim \left(\frac{G^2 R^2 T^2}{p^2} \right) \frac{p}{RT} \sim \frac{G^2 RT}{p}, \quad (1)$$

при известном Δp_T газовой турбины, для случая УСВ получим:

$$\Delta p_T^{пр} = \Delta p_T \frac{(G_{пр})^2 R_{пр} T_{г1}^{пр} p_{г1}}{(G_T)^2 R_T T_{г1} p_{г1}^{пр}}, \quad (2)$$

где $T_{г1}$ — температура выпускных газов ДВС; $p_{г1}$ — давление выпускных газов ДВС; $T_{г1}^{пр}$ — температура парогазовой смеси перед газовой турбиной; $p_{г1}^{пр}$ — давление парогазовой смеси перед газовой турбиной.

Если принять допущение, что переход к УСВ сопровождается примерно одинаковыми приращениями степени расширения рабочего тела в турбине и степени повышения давления воздуха в компрессоре, то задача определения производительности компрессора сводится к определению параметров парогазовой смеси на входе в турбину, которая решается методом последовательных приближений. Результаты рас-

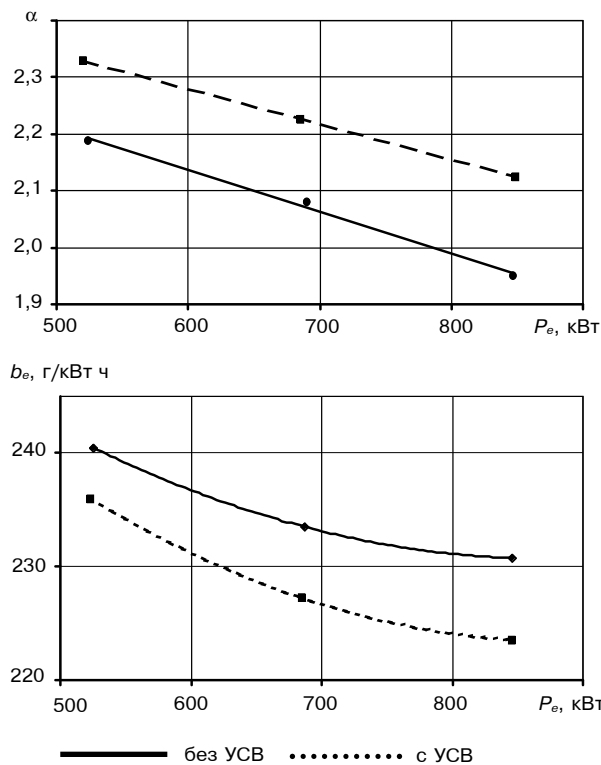


Рис. 1. Изменения коэффициента избытка воздуха и удельного эффективного расхода топлива ДВС с УСВ и без по нагрузочной характеристике ($n = 1500$ об/мин)

чета представлены в виде графических зависимостей на рис. 1 и 2.

Для подтверждения результатов теоретических исследований была разработана принципиальная схема ДВС с УСВ (рис. 3) и смонтирован экспериментальный стенд на базе высокофорсированного ДВС типа 6ЧН21/21.

В ходе проведения экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- проверка конструктивных решений УСВ и работоспособности ДВС с УСВ;
- оценка эффективности работы ДВС с УСВ по нагрузочной характеристике;
- проверка основных положений методики расчета параметров ДВС с УСВ.

Исследование работы высокофорсированного ДВС 6ЧН21/21 с УСВ проводилось по программе, состоящей из трех этапов.

На первом этапе было определено изменение параметров ДВС при работе с УСВ. Подача пара осуществлялась к выделенному участку соплового аппарата газовой турбины турбокомпрессора, эскиз которого представлен на рис. 4, а исполнение турбокомпрессора представлено на рис. 5. Общий вид ДВС с УСВ (экспериментальный стенд) представлен на рис. 6.

Измерение параметров работы ДВС проводилось на фиксированных мощностях по режимам

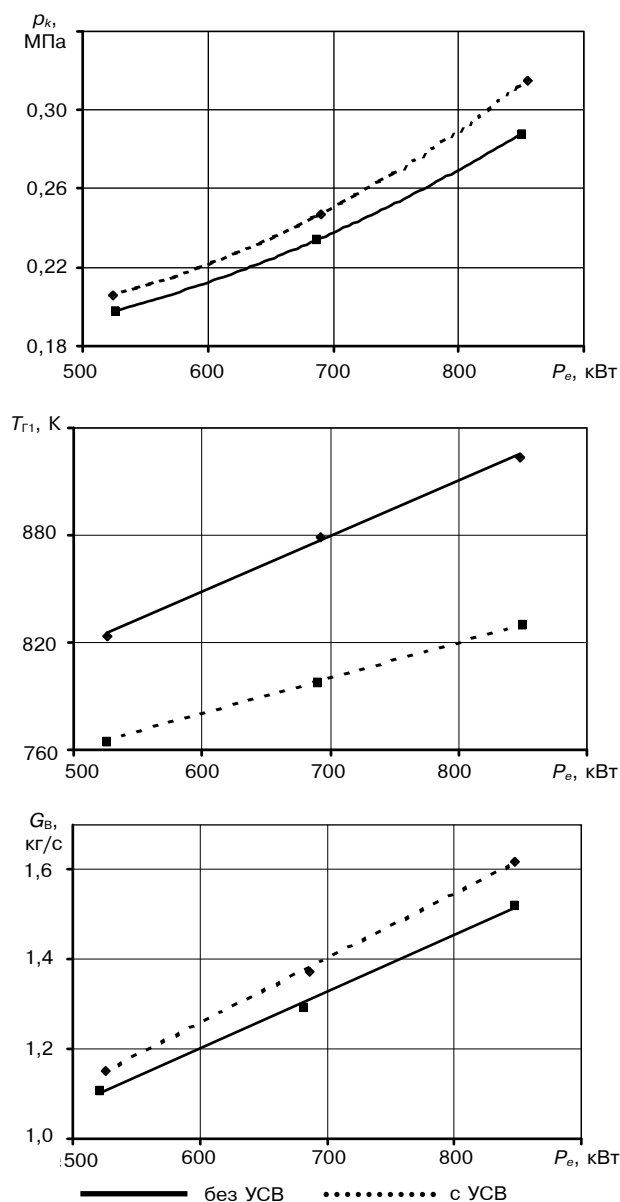


Рис. 2. Изменения давления наддувочного воздуха, температуры выпускных газов и расхода воздуха ДВС с УСВ и без по нагрузочной характеристике ($n = 1500$ об/мин)

тепловозной и нагрузочной характеристик, без использования и с использованием УСВ.

Пар подавался на турбину ДВС с УСВ с температурой $T_n = 402-406$ К и давлением 0,2–0,29 МПа. Параметры ДВС с УСВ, учитывая расход пара, полученный в ходе проведения эксперимента, сравнивались с данными, рассчитанными по разработанной методике.

Сводные экспериментальные и расчетные параметры работы ДВС с УСВ, а также экспериментальные параметры работы ДВС с ВТО при нагрузках 672 и 845 кВт представлены в табл. 1.

Результаты исследования показывают, что частота вращения ротора турбокомпрессора уве-

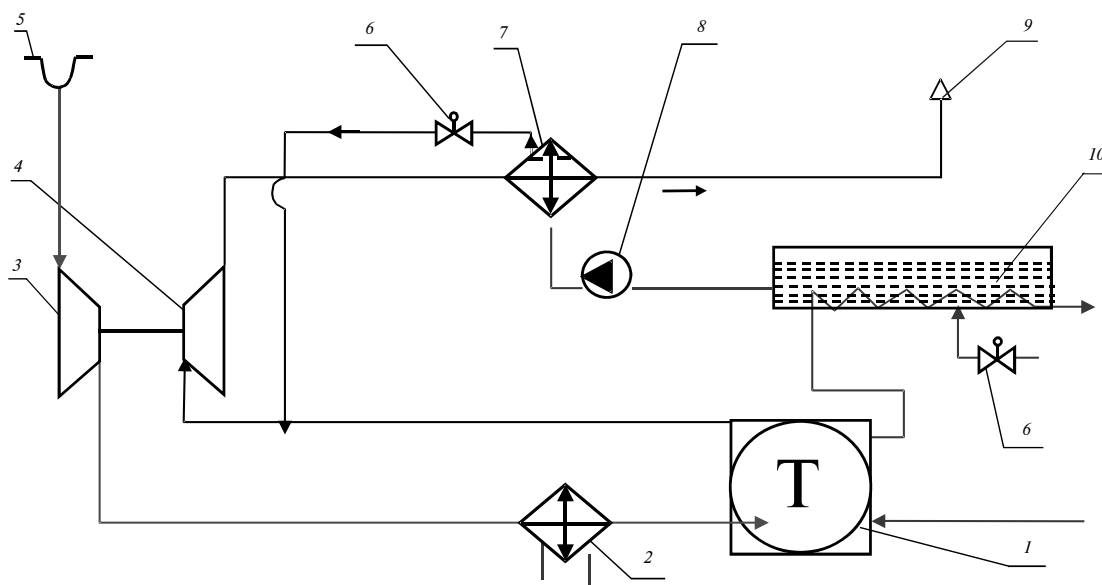


Рис. 3. Принципиальная схема ДВС с УСВ:

1 — двигатель внутреннего сгорания; 2 — охладитель надвучного воздуха; 3 — воздушный компрессор; 4 — газовая турбина; 5 — воздухозаборный патрубок; 6 — электроклапана; 7 — испаритель; 8 — автономный водяной насос; 9 — патрубок отвода отработавших газов; 10 — бак-аккумулятор горячей воды

Таблица 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ДВС с УСВ
ПО НАГРУЗОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ($n = 1500$ об/мин)

Наименование параметра	$P_e = 672$ кВт			$P_e = 845$ кВт		
	Эксперимент		Расчет	Эксперимент		Расчет
	ВТО	УСВ	УСВ	ВТО	УСВ	УСВ
Расход пара по эксперименту $G_{п}$, кг/с	—	0,0869	0,0869	—	0,1216	0,1216
Весовая доля пара в парогазовой смеси r_n , %	—	6	6	—	7,1	7,1
Весовая доля выпускных газов в парогазовой смеси r_t , %	100	94	94	100	92,9	92,9
Температура выпускных газов перед газовой турбиной $T_{г1}$, К	883	868	—	933	918	—
Температура парогазовой смеси перед газовой турбиной $T_{г1}^{пр}$, К	—	—	836	—	—	873
Давление рабочего тела перед газовой турбиной, $p_{г1}$, МПа	0,223	0,223	0,231	0,278	0,191	0,294
Давление надвучного воздуха на входе в ДВС p_k , МПа	0,228	0,236	0,233	0,293	0,304	0,306
Расход воздуха G_b , кг/с	1,307	1,346	1,336	1,525	1,57	1,59
Температура рабочего тела после газовой турбины $T_{г2}$, К	759	716	730	788	745	731
Индикаторный КПД η_i , %	46,0	46,8	46,7	45,1	45,8	46
Эффективный КПД η_e , %	36,8	37,44	37,36	36	36,64	36,8
Удельный эффективный расход топлива b_e , г/кВт·ч	233,9	230,9	230,4	230,5	227,5	225,5
Коэффициент избытка воздуха α	2,08	2,17	2,16	1,96	2,05	2,07

личивается на 800–1200 об/мин или 2,5–4,4 %, расход воздуха на 4–5,5 %, а снижение расхода топлива составило 2,4–3,0 г/кВт·ч или 1,0–1,3 %.

Указанный положительный эффект от применения УСВ объясняется тем, что подача пара на участок соплового аппарата турбины эквивалентна уменьшению пропускной способности последней, что приводит к увеличению среднего избыточного давления газов перед турбиной, сте-

пени расширения рабочего тела в ней и частоты вращения ротора турбокомпрессора. С ростом мощности агрегата наддува улучшается воздухо-снабжение ДВС, его индикаторные и эффективные показатели.

Сравнение полученных экспериментальных и расчетных данных свидетельствуют об их небольшом различии (по расходу воздуха — не более 1,2 %, по температуре газов после турбины —

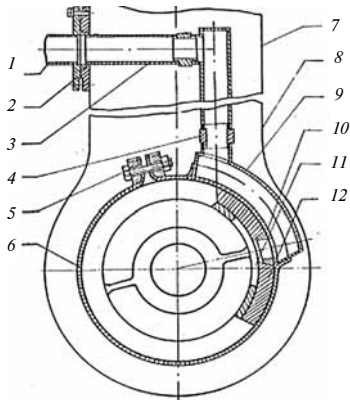


Рис. 4. Подвод пара к участку соплового аппарата:

1 — труба внешнего паропровода; 2 — фланец соединения; 3 — труба внутреннего паропровода; 4 — муфта соединения участков паропровода; 5 — стяжной болт; 6 — хомут крепления паропровода к корпусу соплового аппарата; 7 — корпус выхлопной трубы; 8 — корпус газовой турбины; 9 — специальный участок подвода пара; 10 — паропроводящий ниппель; 11 — сектор для подачи пара; 12 — защитный кожух газоприемного корпуса газовой трубы

не более 1,8 % и по удельному расходу топлива — не более 1,0 %). Таким образом, экспериментальные исследования ДВС с УСВ подтверждают правильность основных положений предложенной расчетной методики.

Одновременно эксперимент показал и большие возможности по повышению экономичности и снижению теплонапряженности, в частности крышки цилиндра. При работе ДВС на режиме $P_e = 845$ кВт и $n = 1500$ об/мин подача пара в газовую турбину составила 0,12 кг/с (432 кг/ч), расход воздуха увеличился на 0,055 кг/с (3,3 %), а коэффициент избытка воздуха на 0,09 (4,6 %), температура газов перед турбиной $T_{г1}$ снизилась на 15 градусов (1,6 %), удельный расход топлива b_e на 3 г/кВт·ч (1,3 %).

В то же время при условии подачи пара в количестве, равном расчетному, принимая за исходные данные для расчета экспериментальные параметры работы ДВС с ВТО для данного нагрузочного режима, а именно 0,196 кг/с (705 кг/ч), величины G_b и α должны увеличиться соответ-

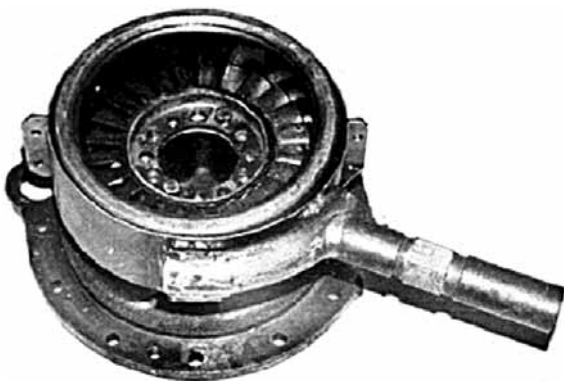


Рис. 5. Общий вид газоприемного корпуса газовой турбины с участком подвода пара

ственно на 6 и 8,7 %, а величины $T_{г1}$ и b_e должны уменьшиться соответственно на 87 °С (8,3 %), 6 г/кВт·ч (2,6 %). Наличие в схеме (см. рис. 3) автономного водяного насоса из-за его небольшой мощности (около 1 кВт) не оказывает существенного влияния на экономичность установки.

На втором этапе экспериментального исследования проводилась оценка эффективности УСВ при работе ДВС с повышенным сопротивлением на выпуске $P_{г2}$. Методика исследования в данном случае предусматривает определение параметров работы ДВС без УСВ и с УСВ при различных сопротивлениях на выпуске.

По результатам исследования, представленных в табл. 2, для трех режимов работы ДВС по нагрузочной характеристике можно сделать вывод, что использование УСВ компенсирует вредное влияние повышенного сопротивления на выпуске. Причем эффект от использования УСВ в этом случае будет тем выше, чем с большей мощностью работает ДВС и чем ближе температура газов перед турбиной к предельно допустимой. При работе ДВС с $P_e = 551$ кВт и $P_{г2} = 2,95$ кПа применение УСВ позволяет уменьшить $T_{г1}$ с 821 до 817 К (т. е. на 4 К), в то время как при работе ДВС с $P_e = 845$ кВт и $P_{г2} = 2,5$ кПа применение УСВ приводит к снижению $T_{г1}$ уже на 15° (с 933 до 916 К).

Это обстоятельство необходимо учитывать при создании ДВС с высокой степенью форсировки, так как оно позволяет увеличивать оговариваемые в технических условиях предельно

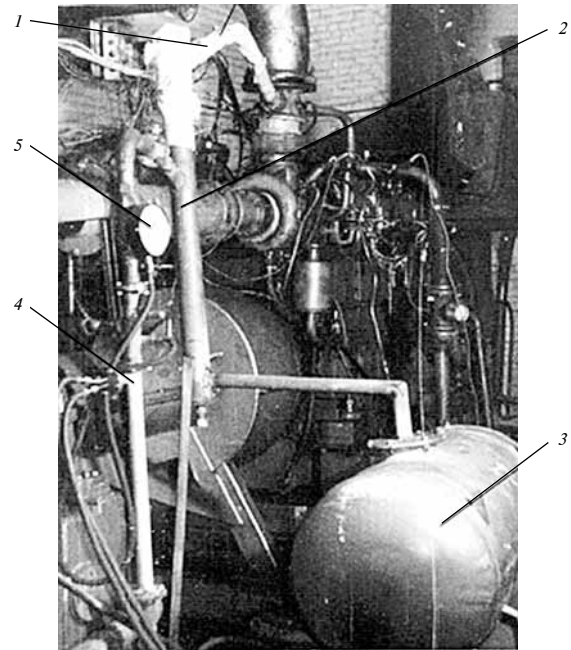


Рис. 6. ДВС, оборудованный УСВ (экспериментальный стенд):

1 — паропровод к турбокомпрессору; 2 — паросепаратор; 3 — бак паросепаратора; 4 — трубка Пито; 5 — манометр

Изменение параметров ДВС в зависимости от условий работы

Мощность ДВС, кВт при $n = 1500$ об/мин	Сопротивление на выпуске p_{v2} , кПа	Наличие УСВ	Удельный расход топлива b_e , г/кВт·ч	Температура выпускных газов перед газовой турбиной $T_{г1}$, К
551	1,85	Нет	239,4	816
	1,85	Есть	236,2	809
	2,95	Нет	240,4	821
	2,95	Есть	236,4	817
617	2,00	Нет	236,6	843
	2,00	Есть	234,2	834
	3,80	Нет	237,2	854
	3,80	Есть	234,5	844
845	2,5	Нет	230,5	933
	2,5	Есть	227,5	918

допустимые противодавления на выпуске. Действительно, из табл. 2 следует, что при нагрузках 551 и 617 кВт сопротивления на выпуске могут быть увеличены на 1,1–1,8 КПа без повышения температуры.

На третьем этапе исследования было проведено измерение температуры крышки цилиндра в целях определения влияния УСВ на показатели ее теплонапряженности.

В результате измерений было зафиксировано снижение температуры крышки цилиндров на 5–9 градусов при использовании УСВ даже при уменьшении расхода пара почти в два раза по сравнению с расчетным.

По ориентировочным оценкам авторов применение УСВ с расчетными расходами пара приведет к снижению температуры крышки не менее чем на 12–20°.

В результате применения УСВ, а также разработанной усовершенствованной конструкции крышки цилиндра со вставными седлами достигнуто снижение ее теплонапряженности и увеличение мощности двигателя на 4 % без повышения температурного уровня.

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований проверены варианты конструктивных решений по месту подвода пара к участку соплового аппарата турбокомпрессора; подтверждена эффективность разработанной УСВ и достаточная сходимость теоретических расчетов параметров работы ДВС с УСВ с полученными экспериментальными данными.

Литература

1. Кривов В.Г., Агафонов А.Н. Предложение по созданию комбинированных малых теплоэлектроцентралей на базе поршневых и газотурбинных двигателей с утилизацией теплоты // Двигателестроение. — 1998. — № 2. — С. 3–5.
2. Разуваев А.В. Повышение эффективности системы высокотемпературного охлаждения двигателей // Двигателестроение. — 1998. — № 2. — С. 9–11.
3. Агафонов А.Н., Сайданов В.О., Гудзь В.Н. Комбинированные энергетические установки объектов малой энергетики. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. — С. 25–37.
4. Кривов В.Г., Синатов С.А., Кабыш В.В., Аверьянов В.К. Исследование замкнутых систем жидкостного высокотемпературного охлаждения дизелей // Двигателестроение. — 1983. — № 5. — С. 10–13.

ПРЕДЛАГАЕМ РАЗМЕЩЕНИЕ РЕКЛАМЫ

ОРИЕНТИРОВОЧНЫЕ ТАРИФЫ НА 2 ПОЛУГОДИЕ 2007 ГОДА

Первая страница обложки	Полноцветная	17000 руб.
Вторая и третья страницы обложки	Полноцветная	15000 руб.
Четвертая страница обложки	Полноцветная	16000 руб.
Внутри журнала из расчета одна страница формата А4	Полноцветная	15000 руб.
	Черно-белая	13000 руб.