

ТЕПЛОТЕХНИКА

Э. А. МКРТУМЯН, Р. С. АЙВАЗЯН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЗЕЛЯ А-41Т  
 В ВЫСОКОГОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Большое разнообразие конструкций дизелей, особенно их систем смесеобразования, и, в связи с этим, наличие существенных отличий между их потенциальными энергетическими возможностями создают большие трудности для приведения основных показателей (мощностей и удельных расходов топлива) различных дизелей к нормальным атмосферным условиям и, тем самым, ограничивают возможность их сравнения между собой. Трудности эти усугубляются при наличии большого парка дизелей, работающих как без наддува, так и с наддувом, и также на горных склонах различной высоты. Кроме того, определение основных показателей дизелей, выпускаемых в ряде промышленно-развитых стран (СССР, США, ФРГ и др.), производится по своим национальным стандартам с различной комплексацией, что еще более осложняет сопоставимость и оценку основных показателей.

Данная статья затрагивает лишь влияние атмосферных условий на мощностно-экономические параметры дизеля.

Рабочие процессы дизелей отличаются между собой значениями коэффициента избытка воздуха, в результате чего чувствительность их к высоте проявляется по-разному. Это обстоятельство, в основном, затрудняет разработку единого универсального уравнения [1] по приведению мощностей и экономичности дизелей различных типов к нормальным атмосферным условиям и наталкивает на необходимость решения этого вопроса для каждого типа дизелей отдельно.

С целью выявления совместного влияния барометрического давления и температуры окружающего воздуха на эффективные показатели дизеля А-41Т в нестандартных атмосферных условиях на ЮНИСНАТИ были проведены соответствующие теоретические и экспериментальные исследования.

Двигатель А-41Т является форсированным (с наддувом при помощи турбокомпрессора ТКР-11ЧТЗ) четырехцилиндровым, четырехтактным дизелем А-41, выпускаемым Алтайским моторным заводом.

При известных величинах относительного приращения мощностей  $\Delta N_e$  и эффективного к.п.д., вызванных изменением атмосферных условий от стандартных значений, уравнения для приведения мощностей  $N_e$  и удельного расхода топлива  $g$  двигателя можно представить в общем виде:

$$N_e = N_{e0} (1 + \Delta N_e); \quad g = \frac{g_0}{1 + \Delta g} \quad (1)$$

где

$$\Delta \bar{N}_0 = \Delta N_{0в} = \Delta \bar{N}_{0вх}; \quad \Delta \bar{\gamma}_0 = \Delta \bar{\gamma}_{0в} = \Delta \bar{\gamma}_{0вх}.$$

Индексом «0» обозначены данные, полученные в стандартных условиях или на исходной высоте. Величины с индексами «вх» и «вх» относятся к поправкам влияния соответствующих параметров воздуха на всасывание и газов на выходе.

Величины  $\Delta \bar{N}_0$  и  $\Delta \bar{\gamma}_0$  [в зависимости от относительных приращений давления  $\Delta \bar{P}_{0в}$ , температуры воздуха на выпуске  $\Delta \bar{T}_{0в}$  и противодавления (после турбины)  $\Delta \bar{P}_{0вх}$ ] получим, воспользовавшись известным методом малых отклонений, дифференцируя уравнения  $\bar{N}$  и  $\bar{\gamma}$  почленно и переходя от дифференциалов к конечным приращениям:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{N}_{0в} = \Delta \bar{\gamma}_{0в} &= 0,433 \bar{P}_{0в} - 0,577 \Delta \bar{P}_{0в}^2 - \\ &- 0,765 \Delta \bar{P}_{0в} \cdot \Delta \bar{T}_{0в} - 0,42 \Delta \bar{T}_{0в} - 0,194 \Delta \bar{T}_{0в}^2; \\ \Delta \bar{N}_{0вх} = \Delta \bar{\gamma}_{0вх} &= 0,131 \bar{P}_{0вх} - 0,052 \Delta \bar{P}_{0вх}^2 - 0,341 \Delta \bar{P}_{0вх} \cdot \Delta \bar{T}_{0в} - \\ &- 0,35 \Delta \bar{P}_{0вх} \cdot \Delta \bar{P}_{0в}. \end{aligned} \quad (2)$$

где числовые коэффициенты рассчитаны для номинального режима работы, беря за основу исходные параметры, полученные при испытании дизеля А-41Т в атмосферных условиях, равных стандартным.

Для проверки достоверности полученных значений эффективной мощности и удельного расхода топлива, рассчитанных по формулам (1), и для выявления влияния различных атмосферных условий на характерные параметры двигателя А-41Т и турбокомпрессора ТКР-11ЧТЗ на ЮНИС-11АТН были проведены серии испытаний указанного дизеля на различных геодезических высотах.

Программа испытаний включала: снятие нагрузочных и скоростных характеристик при работе дизеля на различных высотах над уровнем моря.

Для проведения испытаний в высокогорных условиях (табл. 1) была создана самоходная тормозная установка на базе грузового автомобиля КРАЗ-255Б, на платформе которого был смонтирован гидротормоз высокой точности фирмы «Фруд» (Англия).

Оценка работы двигателя и турбокомпрессора проводилась по часовому расходу воздуха, по коэффициенту избытка воздуха, по температуре газов перед турбиной, по степени повышения давления в компрессоре и по отношению давления наддува к давлению газов перед турбиной. Двигатель, предварительно обкатанный в течение 90 часов, испытывался в полной комплектации (с вентилятором, радиатором, генератором и воздухоочистителем). Температура масла и воды на всех высотах испытаний поддерживалась в пределах 85—90°C и 80—85°C.

Таблица 1

№ по взр.	Наименование района расположения принятой высоты	Высота над уровнем моря, $H$ , м	Барометрическое давление, мм рт. ст.	Температура окружающего воздуха, $^{\circ}C$	Влажность окружающего воздуха, $^{\circ}D$
1	Эчмиадзин	750	650	$21 \pm 1$	$40 \pm 10$
2	ЮНИИС—ПАТН	1250	664	$16 \pm 3$	$44 \pm 3$
3	Нор-Амберд	2000	607	$14 \pm 4$	$51 \pm 5$
4	Арагац	3250	512	$8 \pm 3$	$70 \pm 6$

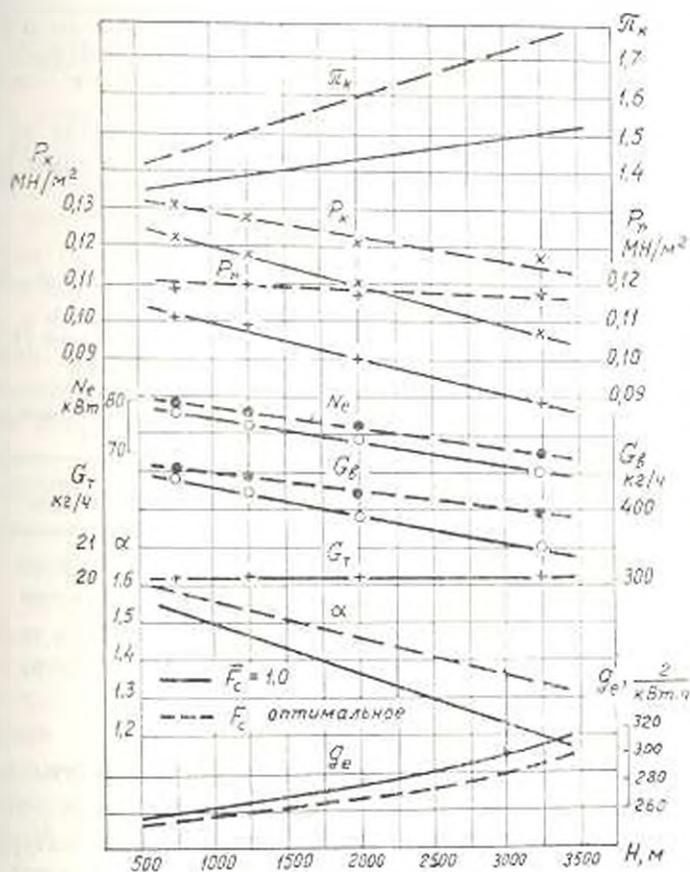


Рис. 1. Сравнительная высотная характеристика дизеля А-41Т при  $n = 1750$  об/мин: — при нормальном (заданном) проходном сечении соплового аппарата турбины; - - - при оптимальном проходном сечении соплового аппарата турбины на каждой высоте.

На рис. 1 приведены кривые изменения параметров двигателя и турбокомпрессора, построенные на основании данных, полученных при испытаниях двигателя на различных высотах над уровнем моря. Они-

ты были проведены при постоянном числе оборотов, равном 1750 об/мин для случая нормального сечения соплового аппарата турбины ( $P_c = 19,1 \text{ ат}$ ).

Следует, прежде всего, отметить положительное влияние турбоподдува на работу дизеля на высотах. Если при работе двигателя без поддува на высоте 3000 м дизель теряет мощность более чем на 22%, то при применении поддува существенная часть этих потерь компенсируется. Так, на высоте 750 м мощность двигателя по сравнению с необходимой (по заводским данным  $N_c = 82 \text{ кВт}$ ) при поддуве падает на 1,9% ( $N_c = 78,4 \text{ кВт}$ ), а без поддува ( $N_c = 66,2 \text{ кВт}$ ) — на 1,68% ( $N_c = 61,8 \text{ кВт}$ ), расход топлива растет на 2,7%; на высоте 2000 м мощность дизеля с поддувом падает до 72,8 кВт, что составляет 11,6%, а удельный расход топлива увеличивается на 9,75%; на высоте 3250 м падение мощности составляет 19,2%, а повышение удельного расхода топлива — 20,5% и т. д.

В табл. 2 приведены сравнения показателей двигателя на различных высотах по данным испытаний и полученных расчетным путем по уравнениям (1).

Таблица 2

Сопоставление показателей дизеля на различных высотах, полученных в реальных условиях и по расчетным уравнениям (1) для нормального сечения соплового аппарата турбины

Высота над уровнем моря $H$ , м	Мощность двигателя, кВт		Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	
	по расчету	по эксперименту	по расчету	по эксперименту
750	78,52	78,31	259,90	258,40
1250	75,55	75,36	270,64	267,52
2000	73,90	72,80	276,10	276,10
3250	67,70	66,51	303,28	306,00

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что составленные расчетные уравнения (1) достаточно точно отражают совместное влияние барометрического давления и температуры окружающего воздуха на мощность и экономичность дизеля А-41Т, снабженного турбокомпрессором ТКР-11.

Из рис. 1 видно, что с подъемом на высоту степень повышения давления в компрессоре ( $\pi_c$ ) существенно увеличивается. Если на высоте 750 м  $\pi_c = 1,36$ , то на высоте 3250 м  $\pi_c = 1,5$ . Это можно объяснить тем, что работа дизеля на высотах сопровождается некоторым саморегулированием турбокомпрессора, которое является следствием повышения температуры выхлопных газов перед турбиной ( $T_c$ ) и понижения противодавления за турбиной.

Несмотря на указанное увеличение  $\lambda$ , давление наддува ( $P_k$ ) в зависимости от высоты падает и на высоте 3250 м становится меньше 0,1 МН/м<sup>2</sup>. В соответствии с этим, часовой расход воздуха двигателем уменьшается до 350 кг, что, при постоянном расходе топлива ( $G_f$ ), ведет к снижению коэффициента избытка воздуха ( $\alpha$ ), ухудшению экономичности ( $g_e$ ) и повышению температуры выхлопных газов ( $T$ ).

Коэффициент избытка воздуха является одним из важнейших показателей, характеризующих протекание рабочего процесса двигателя. Если на высоте 750 м над уровнем моря при номинальном режиме  $\alpha = 1,54$  (рис. 1), то на высоте 3250 м величина  $\alpha$  уменьшается до 1,2, т. е. до такого значения, которое ниже предела, допустимого для рабочего процесса дизеля с неразделенной камерой сгорания.

Анализ особенностей различных способов смесеобразования в дизелях показывает, что для двигателей с непосредственным впрыском характерны высокие значения коэффициента избытка воздуха. Так, если для дизелей с вихревой камерой и предкамерой беззатопная работа обеспечивается при  $\alpha_{\text{мин}} = 1,15 \div 1,2$ , то для дизелей с неразделенной камерой смесеобразования меньшие значения коэффициента избытка воздуха ограничиваются, как правило, довольно высокими пределами ( $\alpha = 1,4 \div 1,35$ ) [2]. При работе двигателя А-11Т на высоте 1750 м значение  $\alpha$  в номинальном режиме достигает величины, равной 1,4, а на высоте 3000 м понижается до величины 1,23.

Таким образом, применяемые для наддува турбокомпрессоры при работе дизелей на высотах могут обеспечить подачу необходимого количества воздуха только в диапазоне ограниченных режимов и на определенных сравнительно небольших высотах. Это объясняется тем, что уменьшение расхода воздуха на высотах создает несогласованность гидравлической характеристики дизеля с пропускной способностью компрессора, что вызывает снижение к.п.д. компрессора и приводит к тому, что двигатель работает с высоким удельным расходом топлива.

Все это является следствием нарушения баланса работы турбины и компрессора с одной стороны, и дизеля и турбокомпрессора — с другой. Частичного восстановления этого баланса можно достичь применением регулирования турбокомпрессора, изменением проходного сечения соплового аппарата турбины.

На рис. 2 и 3 приведены показатели двигателя и турбокомпрессора в зависимости от относительного проходного сечения сопел при работе дизеля на различных высотах над уровнем моря.

Как видно из рис. 2, с уменьшением значения  $F_2$  от 1,15 до 0,8 степень повышения давления в компрессоре  $\lambda_k$  увеличивается от 1,26 до 1,41, т. е. на 11,9%; давление наддува  $P_k$  растет от 0,117 до 0,131 МН/м<sup>2</sup>; отношение давления наддува к среднему давлению газов перед турбиной  $P_k/P_2$  изменяется незначительно, оставаясь на уровне 1,1; эффективная мощность дизеля повышается от 77,0 до 79,4 кВт.

Таким образом, уменьшение  $F_2$  до значения 0,8 на высоте 750 м существенно улучшает показатели двигателя и компрессора, и в пределах  $F_2 = 0,8-0,7$  мощность двигателя  $N_e$  и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  остаются постоянными, а величины  $P_2/P_1$  и  $\eta_c$  уменьшаются. Для указанной высоты величина  $F_2 = 0,8$  является пределом, ниже которого в связи с понижением отношения  $P_2/P_1$  мощность двигателя падает. За этим пределом ухудшается наполнение цилиндров и растут насосные потери, расход газа через турбину уменьшается, что вызывает падение  $\eta_c$ , вследствие чего подача воздуха и двигатель ограничивается.

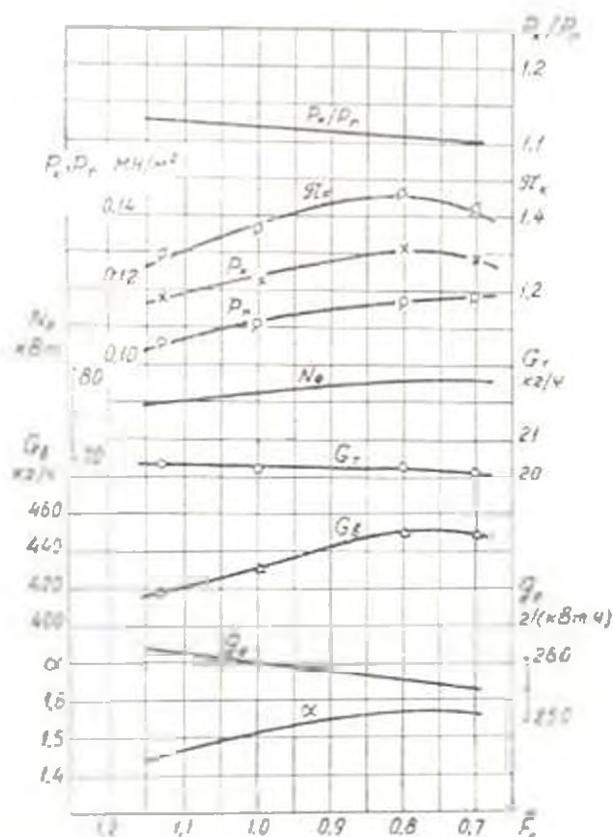


Рис. 2. Изменение параметров двигателя А 411 и турбокомпрессора ТКР-11 в зависимости от  $F_2$  при  $n = 1700$  об./мин и высоте 750 м.

Наиболее приемлемые параметры двигателя на высоте 1250 м получаются при уменьшении относительного значения проходного сечения сопел до 0,7. Дальнейшее уменьшение  $F_2$  на этой высоте едва ли улучшит работу дизеля, так как даже на высоте 2000 м такое уменьшение отрицательно влияет на показатели двигателя.

На высоте 2000 м в пределах  $F_2 = 1,0-0,7$  мощность двигателя увеличивается с 72,8 до 75,56 кВт. Несмотря на сравнительно небольшую

шое увеличение мощности (3,53%), вследствие увеличения часового расхода воздуха ( $G_s = 390 \pm 125$  кг/ч) существенно увеличивается коэффициент избытка воздуха (от 1,35 до 1,46). Значение  $P_k$  повышается от 0,110 до 0,119 МН/м<sup>2</sup>, а  $\pi_k$  — от 1,42 до 1,56.

Давление наддува на высоте 3250 м (рис. 3) при уменьшении  $F_c$  от 1,0 до 0,5 увеличивается на 20,6% (соответственно  $P_k = 0,097 \pm 0,117$  МН/м<sup>2</sup>), а расход воздуха растет от 350 до 395 кг/ч (12,9%).

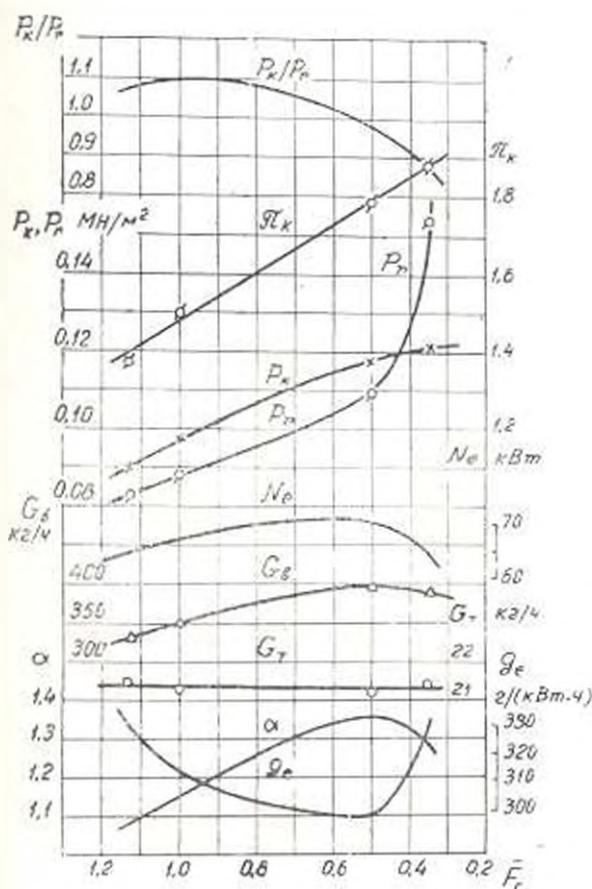


Рис. 3. Изменение показателей дизеля А-41 Т и турбокомпрессора ТКР-11 в зависимости от  $F_c$  при  $n = 1750$  об./мин и высоте 3250 м.

Уменьшение относительного проходного сечения сопел в пределах от 0,5 до 0,35 резко увеличивает противодавление двигателя перед турбиной  $P_r$ . Если при  $F_c = 0,55$   $P_r = 0,115$ , то при  $F_c = 0,35$   $P_r = 0,154$  МН/м<sup>2</sup>. Соответственно уменьшается и отношение  $P_k/P_r$  от 1,0 до 0,78 (рис. 3). Эффективная мощность двигателя в указанных пределах заметно уменьшается — от 69,85 до 64,34 кВт. Это объясняется тем, что влияние  $P_r/P_c$  на эффективную мощность двигателя не случайное, а вполне закономерное явление. Изменение  $N_e$  в зависи-

мости от  $P_1/P_2$  является следствием имеющих место изменений к.п.д. турбины (в связи с значительным уменьшением  $F_2$ ) и изменений коэф. ффриента наполнения.

Таким образом, максимум кривой  $\Delta \eta = f(F_2)$ , а, следовательно, и наиболее выгодное по мощности отношение  $P_1/P_2$  (обусловленное значением оптимального проходного сечения соплового аппарата турбины) для разных высот имеют различные, но вполне определенные значения.

### В ы в о д ы

1. Подсчитанные по составленным формулам и полученные по эксперименту (зачтоль до высоты 3250 м над уровнем моря) значения эффективной мощности и удельного расхода топлива показали удовлетворительную сходимость (с точностью до 1,5%).

2. Применение турбокомпрессора ТКР-11 с серийным сопловым венцом турбины дает возможность сохранить эффективную мощность двигателя А-41Т на высотах до 3200 м над уровнем моря, но при очень низком значении коэффициента избытка воздуха ( $\alpha = 1,2$ ).

3. Для каждой высоты показатели двигателя и турбокомпрессора имеют наилучшие значения при вполне определенном, оптимальном проходном сечении соплового аппарата турбины.

4. Для двигателя А-41Т с турбокомпрессором ТКР-11 установлены следующие оптимальные значения проходного сечения соплового аппарата турбины в зависимости от высоты:  $F_2 = 15,5 \text{ см}^2$  при  $H = 750 - 1700 \text{ м}$ ;  $F_2 = 12,2 \text{ см}^2$  при  $H = 1700 - 2500 \text{ м}$  и  $F_2 = 10,1 \text{ см}^2$  при  $H = 2500 - 3250 \text{ м}$ .

Увеличение количества подаваемого в дизель воздуха ( $G_2$  — соп-11) при работе дизеля А-41Т с оптимальными сечениями соплового аппарата до высоты 3250 м приводит к повышению эффективной мощности в среднем на 4,1% и снижению удельного расхода топлива на 3,7%.

ЮН ИС-СА-71

Получено 7. IV 1974

Э. А. М К Р Т Ч Я Н, Р. С. А Й В А З Я Н

Ա—41Т ԷՆԳԵԼԻ ՓՈՐՁԱՐԱՐՄԵՆԻՆ ՇԵՏՁՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ  
ԲԱՐՁՐ ԼՈՒՆԱՅԻՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Ս. Վ. Վ. Ս. Վ. Ս. Վ.

Հողվածք վերաբերվում է Ա—41Т տուրբոմեքոմպրեսորի տրակտորային շարժիչի վրա բարձրաարտանյութային ճնշման և չրջապատի օդի ջեռումատիձանի համապատկեր ազդեցության հետազոտություններին, և այն միջոցներին, որոնց օգնությամբ հնարարը է բարձրացնել դիզելի տեխնիկա-տնտեսական ցուցանիշ-

ներք մինչև այն մեծությունը, որ նա հանդես է բերում նորմալ մթնոլորտային պարամետրում աշխատելու:

Հետազոտությունների արդյունքները հնարավորության ևն սվել կազմելու A—A1T դիզելային շարժիչի հզորությունը և վառելիքի տեսակարար ծախսը նորմալ մթնոլորտային պայմանների բերող հաճախումներ: Բազա-հայտված է բարձունքային պայմանների ազդեցությունը (մինչև 3250 մ) փորձարկվող շարժիչի աշխատանքի վրա և առաջարկվում է բարձրությունից կախված դիզելների (ներմղումով) հզորության հարուստի փոխհատուցման արդյունավետ եղանակ:

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Шведский А. Н. Приведение мощности и расхода топлива дизелей без турбонаддува к стандартным атмосферным условиям. Труды НАТИ, вып. 220, М., 1972.
2. Орлин А. С. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Теория рабочих процессов поршневых и комбинированных двигателей. М., 1971.