

Исследование резервов повышения энергоэффективности дизелей за счёт подогрева топлива

Рецензия эксперта на статью получена 29.12.2018 [Expert review on the article received December 29, 2018].

Значительные резервы улучшения топливной экономичности поршневых двигателей с воспламенением от сжатия скрыты в подогреве поступающего в цилиндры топлива при работе двигателя на режимах малых и средних нагрузок.

Подогрев топлива перед подачей его в цилиндры должен оказать определённое влияние на процессы смесеобразования и сгорания, так как вызовет изменение его физических свойств (вязкости, поверхностного натяжения, сжимаемости, плотности, испаряемости и др.). Целесообразность введения предварительного подогрева топлива вытекает из того, что нагрев жидкого топлива в цилиндре дизеля является необходимым элементом подготовки его к сгоранию. Следовательно, предварительный подогрев топлива исключит лимитирующее влияние этого процесса на развитие смесеобразования и сгорания в двигателе.

Подогрев топлива вызовет уменьшение его плотности. Зависимость этих параметров можно наблюдать из уравнения Д.И. Менделеева:

$$\rho_t = \rho_0(1 - kt), \quad (1)$$

где ρ_t — плотность при t , °C; k — модуль расширения жидкости. Снижение плотности при подогреве топлива до насоса приведёт к уменьшению его весового количества, поданного за цикл при неизменном положении рейки ТНВД. С уменьшением плотности топлива вследствие уменьшения живой силы капель снизится дальность факела [1].

Температура топлива, его вязкость и поверхностное натяжение тесно связаны между собой и оказывают определяющее влияние на качество распыливания.

Зависимость поверхностного натяжения топлива от температуры может быть выражена следующей формулой [2]:

$$\sigma_t = \sigma_0 - k(1 - t_0), \quad (2)$$

где σ — поверхностное натяжение, дН/см; k — постоянная, равная 0,07–0,10.

Подогрев топлива перед подачей его в цилиндры оказывает определённое влияние на процессы смесеобразования и сгорания, так как вызывает изменение его физических свойств (вязкости, поверхностного натяжения, сжимаемости, плотности, испаряемости и др.)

На рис. 1 показана зависимость вязкости топлива от температуры.

Снижение вязкости топлива с ростом температуры приведёт к увеличению утечек его через зазоры прецизионных пар топливopодающей аппаратуры (к некоторому изменению закона подачи топлива) и к возрастанию неравномерности подачи по цилиндрам, особенно при малых цикловых подачах. Однако в быстроходных дизелях процессы подачи топлива протекают в очень небольшие промежутки времени, и большую часть этого времени прецизионные пары соприкасаются с топливом, находящимся под высоким давлением, что влечёт за собой увеличение вязкости топлива.

Снижение вязкости, а также поверхностного натяжения топлива положительно влияет на качество его распыливания [1]. Объясняется это тем, что происходящее при нагреве расширение топлива приводит к ослаблению сил взаимодействия между его молекулами внутри и в поверхностном слое. Причём чем меньше величина этих сил, тем быстрее будет происходить распад струи и тем мельче будут капли топлива.

Можно предположить, что с уменьшением величины цикловой подачи влияние подогрева топлива на качество его распыливания будет несколько ослабевать вследствие возрастания относительной величины начального и конечного периодов впрыска, когда истечение топ-

УДК 62-69. Научная специальность: 05.04.02.

Исследование резервов повышения энергоэффективности дизелей за счёт подогрева топлива

Денис В. Шабалин, д.т.н., профессор кафедры боевых гусеничных, колёсных машин и военных автомобилей; Олеся А. Кургузова, к.т.н., доцент кафедры технологии производства, Омский автобронетанковый инженерный институт

В статье приведено теоретическое обоснование возможности улучшения топливной экономичности дизелей за счёт подогрева поступающего в цилиндры двигателя топлива. Представлены результаты расчётно-теоретического исследования влияния температуры топлива на его физические свойства. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о наличии неиспользованного до настоящего времени резерва улучшения топливной экономичности дизелей за счёт подогрева поступающего в цилиндры двигателя топлива.

Ключевые слова: эффективность, запас хода, топливная экономичность, силовая установка, подогрев топлива.

UDC 62-69. Number of scientific specialty: 05.04.02.

Research of reserves of increasing the energy efficiency of diesels by heating fuel

Denis V. Shabalin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Military Tracked, Wheeled Vehicles and Military Vehicles; Olesja A. Kurguzova, PhD, Associate Professor, the Department of Production Technology, Omsk Automobile and Armored Engineering Institute (OmAAEI, Omsk city)

The article presents a theoretical justification for the possibility of improving the fuel efficiency of diesel engines by heating the fuel entering the engine cylinders. The results of theoretical and theoretical studies of the effect of fuel temperature on its physical properties are presented. The results obtained convincingly testify to the presence of a reserve of improved fuel efficiency of diesel engines unused to date due to the heating of the fuel entering the engine cylinders.

Key words: efficiency, power reserve, fuel efficiency, power plant, fuel heating.

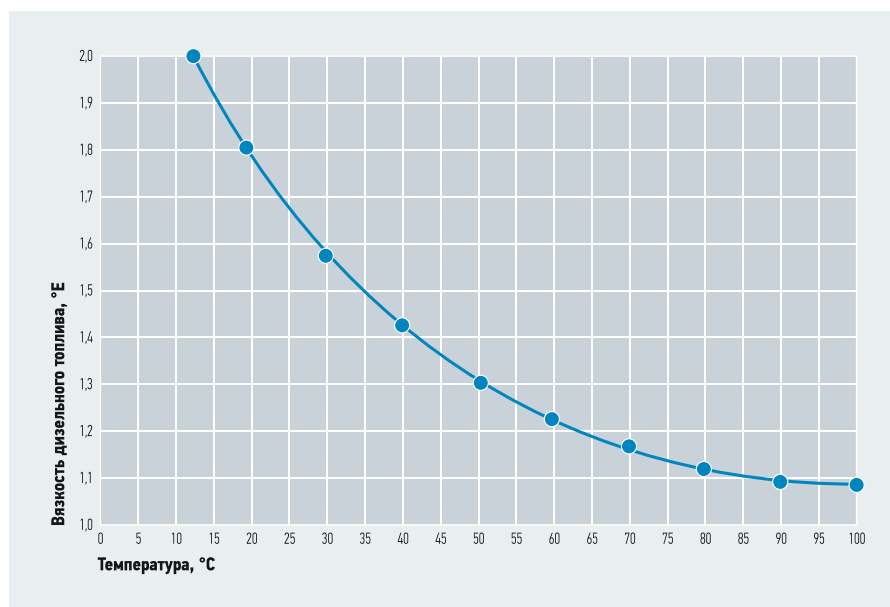


Рис. 1. Зависимость вязкости дизельного топлива от его температуры

лива происходит при сильном дросселирующем воздействии на него неполного открытия иглы форсунки.

Большое влияние на процесс впрыска оказывает сжимаемость топлива. Из рис. 2 видно, что с ростом температуры топлива сжимаемость его непрерывно возрастает. Это отражается на характере подачи топлива при его нагреве. Повышение температуры топлива перед форсункой должно привести к увеличению периода задержки впрыска и его продолжительности.

С ростом температуры топлива испаряемость его возрастает, что должно оказать заметное влияние на процесс смесеобразования. При этом обнаружено, что влияние испаряемости топлива на показатели работы двигателя с вихрекамерным смесеобразованием значительно слабее, чем у двигателей с непосредственным впрыском топлива, так как темпера-

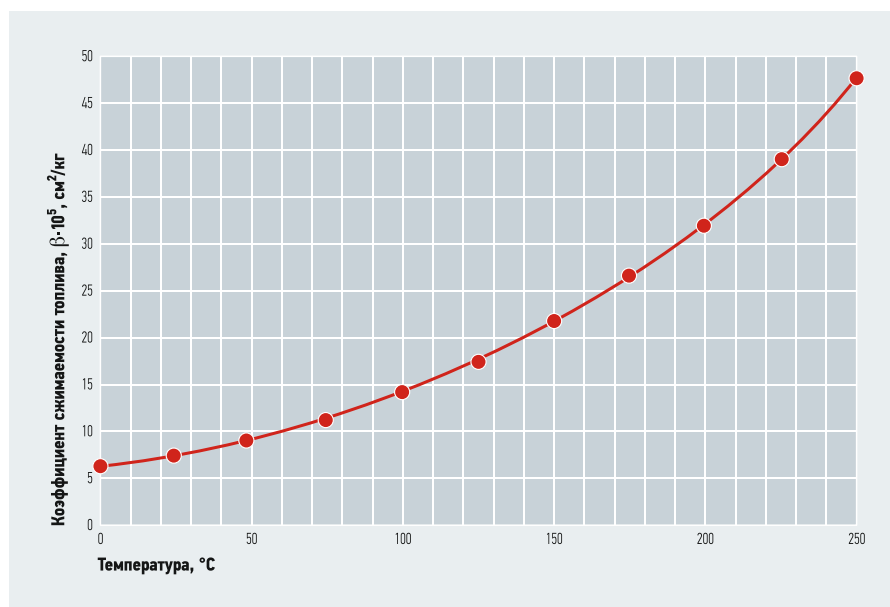


Рис. 2. Зависимость коэффициента сжимаемости топлива от его температуры

туры в вихревой «горячей» камере более высокие, чем в неразделённой. Отсюда можно сделать вывод, что с уменьшением величины цикловой подачи топлива, то есть с уменьшением теплового состояния двигателя, различия в испаряемости топлив будут проявляться в большей степени. По этой же причине эффект от подогрева топлива должен возрастать с уменьшением величины цикловой подачи топлива.

Процесс испарения многокомпонентных жидкостей, к числу которых относятся и жидкие топлива нефтяного происхождения, весьма сложен, так как на него оказывают влияние общее давление среды, характер течения газовой среды у поверхности жидкости и др. Поэтому

решение задачи испарения топлива в факеле с учётом всех действующих факторов чрезвычайно сложное.

Для приближенной оценки влияния начальной температуры топлива на испарение его капель, впрыснутых в цилиндр. Можно воспользоваться методикой, основанной на предположении о изотермическом равновесном испарении капли и мгновенном нагреве поверхностного слоя её до температуры равновесного испарения [1].

Для упрощения решения задачи принято допущение об отсутствии относительных скоростей между каплей и воздухом в течении всего периода испарения.

Таким образом, процесс испарения рассматривается как изотермический в условиях молекулярной диффузии и кондукторного теплообмена, когда значения критерия Нуссельта $Nu = 2$.

Количество испаряющегося топлива:

$$-d(V_k \rho_t) = \beta f_k \rho dt, \quad (3)$$

здесь β — коэффициент испарения, отнесённый к разности парциальных давлений. В условиях молекулярной диффузии $\beta = 2K_p/d_k$, где K_p — коэффициент диффузии паров в воздухе при температуре испарения и давлении воздушного заряда.

Подставляя выражение для β , объёма V_k и поверхности f_k капли в уравнение (2), получим:

$$\frac{d}{d\tau}(-d_{k\tau}^3) = \frac{12 K_p \rho}{\rho_t} d_{k\tau}, \quad (4)$$

где $d_{k\tau}$ — диаметр капли через промежуток времени τ от момента впрыска.

Интегрируя выражение (3) с учётом того, что величины K_p , ρ и ρ_t являются постоянными, получим:

$$d_{k\tau}^2 = d_k^2 - \frac{8 K_p \rho}{\rho_t}, \quad (5)$$

где d_k — диаметр капли в начальный момент времени.

Из выражения (5), приравнявая $d_{k\tau}$ к нулю, находим время полного испарения капли:

$$\rho_0 = \frac{d_k^2 \rho_t}{8 K_p \rho}. \quad (6)$$

Коэффициент диффузии найдём из выражения:

$$K_{p0} = K_p \frac{t_k}{273 \rho_v}, \quad (7)$$

где t_k — температура равновесного испарения капли; K_{p0} — коэффициент диффузии, отнесённый к градиенту парциальных давлений (по данным Д.Н. Вырובה [3] для дизельных топлив коэффициент составляет $0,121 \times 10^{-4}$ м/ч).

Температура равновесного испарения определяется путём приравнивания величины притока тепла к капле, расходу её на нагрев, испарение и перегрев паров:

$$\alpha(t_b - t_k) \beta (d_s - p_0) \Delta i. \quad (8)$$

Для принятых условий протекания процесса испарения выражение (8) можно представить в следующем виде:

$$\lambda(t_b - t_k) = K_p(p_s - p_0) \Delta i, \quad (9)$$

где λ — коэффициент теплопроводности воздуха; t_k — температура поверхности капли; p_s — парциальное давление насыщенных паров у поверхности испаряющейся жидкости при температуре; p_0 — парциальное давление паров жидкости в окружающей среде ($p = 0$); Δi — увеличение теплосодержания топлива, $\Delta i = (i_n + i_{пер} - i_0)$.

Теплосодержание насыщенных паров при температуре испарения определяется по формуле:

$$i_n = 60 + 0,56 t_{к}, \quad (10)$$

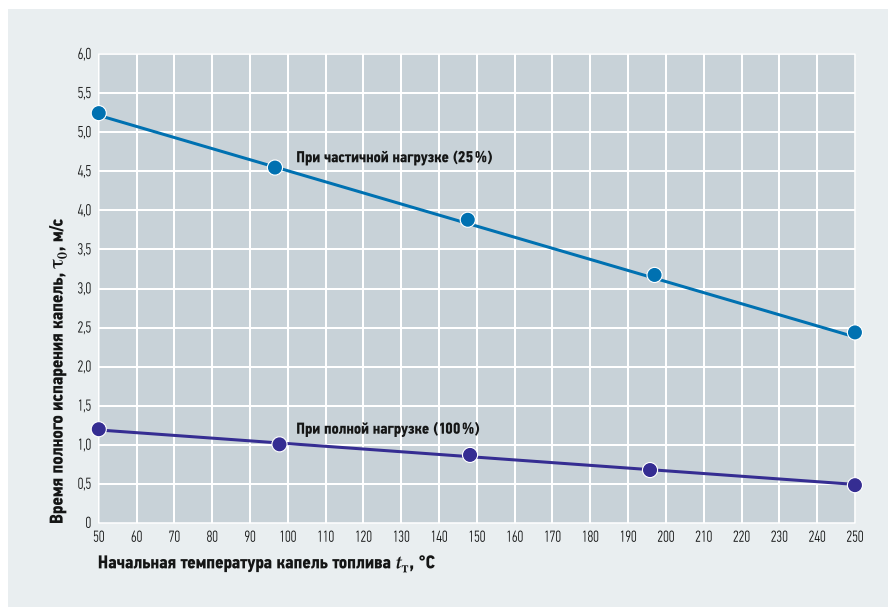


Рис. 3. Влияние начальной температуры капель топлива на время полного их испарения

Тепло перегрева паров можно найти из выражения:

$$i_{пер} = 0,5 \frac{t_b - t_k}{2}, \quad (11)$$

где 0,5 — теплоёмкость паров топлива.

Теплосодержание жидкого топлива при температуре впрыска определяется:

$$i_0 = c_{ж} t_T, \quad (12)$$

где t_T — температура топлива, подаваемого в цилиндр; $c_{ж}$ — средняя теплоёмкость дизельного топлива в интервале температур от 0°C до t_T .

Представленные результаты убедительно доказывают наличие до настоящего времени не в полной мере использованного резерва улучшения топливной экономичности дизелей за счёт подогрева поступающего в цилиндры двигателя топлива

Зависимость давления насыщенного пара от температуры с достаточной точностью может быть выражена следующим уравнением:

$$p_s = A e^{\frac{B}{T_k}}, \quad (13)$$

где A и B — константы, характеризующие свойства испаряющейся жидкости (для дизельного топлива $A = 6 \times 10^7$, $B = 4,15 \times 10^3$ кг/м². После подстановки в уравнение (6) выражений, его составляющих определим температуру равновесного испарения топлива.

На рис. 3 приведены результаты расчёта времени полного испарения капель топлива t_0 в зависимости от начальной температуры t_T . Расчёт производился применительно к двум режимам работы дизеля 1Ч 16/18 при полной нагрузке $Ne = 100\%$ (линия 1) и частичной $Ne = 25\%$

(линия 2). Из рис. 3 видно, что температура топлива оказывает значительное влияние на скорость испарения капель. При этом время полного испарения капли находится в линейной зависимости от начальной температуры топлива.

Из выражения (32) следует, что время полного испарения капли пропорционально квадрату её диаметра, что свидетельствует о большом влиянии на этот процесс качества распыливания топлива.

В используемой методике расчёта не учитывается тот факт, что с ростом температуры топлива будет изменяться и тонкость его распыливания. Поэтому в действительности влияние предварительного подогрева топлива на интенсивность его испарения будет более сильным.

Таким образом, представленные выше результаты расчётно-теоретического исследования влияния температуры топлива на его физические свойства убедительно доказывают наличие до настоящего времени не в полной мере использованного резерва улучшения топливной экономичности дизелей за счёт подогрева поступающего в цилиндры двигателя топлива. Это говорит о необходимости проведения ряда дополнительных теоретических и экспериментальных исследований для установления зависимостей влияния температуры топлива на показатели рабочего цикла двигателя, а также тепловую напряжённость его деталей, что и предопределяет направления дальнейших исследований авторов. ●

1. Марков В.А. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. — М.: Изд-во МГТУ, 2007. 360 с.
2. Астахов В.И., Трусов В.И., Хачинян А.С. и др. Подача и распыливание топлива в дизелях. — М.: Машиностроение, 1971. 359 с.
3. Марков В.А., Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Иващенко Н.А. Работа дизелей на нетрадиционных топливах. — М.: Легион-Автодата, 2008. 464 с.

References — see page 94.

Research of reserves of increasing the energy efficiency of diesels by heating fuel. Pp. 70–72.

Denis V. Shabalin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Military Tracked, Wheeled Vehicles and Military Vehicles; **Olesja A. Kurguzova**, PhD, Associate Professor, the Department of Production Technology, Omsk Automobile and Armored Engineering Institute (OmAAEI, Omsk city)

-
1. Markov V.A. *Vpryskivanie i raspylivanie topliva v dizeljah* [Injection and atomization of fuel in diesel engines]. Moscow. *Izd-vo MGTU* [Publishing House of the National Research University Moscow State of Civil Engineering (NRU MGSU)]. 2007. 360 p.
 2. Astahov V.I., Trusov V.I., Hachinjan A.S. et al. *Podacha i raspylivanie topliva v dizeljah* [Feed and atomization of fuel in diesel engines]. Moscow. *Mashinostroenie* ["Mechanical Engineering" Magazine]. 1971. 359 p.
 3. Markov V.A., Gajvoronskij A.I., Grehov L.V., Ivashhenko N.A. *Rabota dizelej na netradicionnyh toplivah* [The work of diesel engines on unconventional fuels]. Moscow. *Legion-Avtodata* ["Legion-Auto-date" Publishing House]. 2008. 464 p.