

621.436

## КОНСТРУКЦИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РАСПЫЛИТЕЛЯ ФОРСУНКИ И ПОКАЗАТЕЛИ ТРАНСПОРТНОГО ДИЗЕЛЯ

*Д-р техн. наук В.А. МАРКОВ, д-р техн. наук С.Н. ДЕВЯНИН, асп. А.А. ЗЕНИН*

*Рассмотрены особенности процессов распыления топлива и смесеобразования в быстроходных дизелях транспортного назначения. Для улучшения процесса смесеобразования дизеля Д-245.12 С предложено использовать распылители с различной длиной распыляющих отверстий. Проведены экспериментальные исследования таких распылителей и показана возможность улучшения показателей дизеля при установке на его форсунки предложенных распылителей.*

Наиболее значимыми показателями работы транспортных дизелей являются топливная экономичность и токсичность отработавших газов (ОГ) [1,2]. Удовлетворение современных жестких требований по этим показателям возможно лишь при дальнейшем совершенствовании смесеобразования, оказывающего определяющее влияние на характер протекания рабочего процесса дизеля, его экономические и экологические показатели.

Реализуемый способ смесеобразования в дизеле предопределяет тип камеры сгорания (КС). Для транспортных дизелей разработаны разделенные (КС разделена на предкамеру или вихрекамеру и основную камеру), неразделенные и полуразделенные КС [3,4]. В последнее время разделенные КС почти повсеместно вытесняются неразделенными или полуразделенными камерами, обеспечивающими лучшие показатели топливной экономичности.

При использовании таких КС реализуется объемное или объемно-пленочное (пристеночное) смесеобразование. В дизелях с объемно-пленочным смесеобразованием впрыскивание топлива осуществляется в направлении пристеночной области КС в поршне с частичным попаданием топливного факела на боковые стенки КС и последующим распределением топлива по КС поперечно направленным к факелу воздушным вихрем. По показателям топливной экономичности, токсичности ОГ, динамики процесса сгорания и шумности работы двигателя с объемно-пленочным смесеобразованием занимают промежуточное положение между дизелями с разделенными КС и неразделенными КС с объемным смесеобразованием.

Такой способ смесеобразования реализован и в дизеле Д-245.12С (4 ЧН 11/12,5), выпускаемом Минским моторным заводом и устанавливаемом на малотоннажные автомобили ЗиЛ-5301 «Бычок» и автобусы Павловского автобусного завода (ПАЗ). В этом дизеле, имеющем полуразделенную камеру сгорания типа ЦНИДИ, организовано объемно-пленочное (пристеночное) смесеобразование [4]. Камера сгорания типа ЦНИДИ выполнена с диаметром горловины  $d_г=38$  мм, наибольшим диаметром камеры  $d_{к\ max}=62$  мм и глубиной  $h_к=29$  мм, а форсунки установлены в головке цилиндров со смещением  $\Delta l_ф=10$  мм (рис. 1).

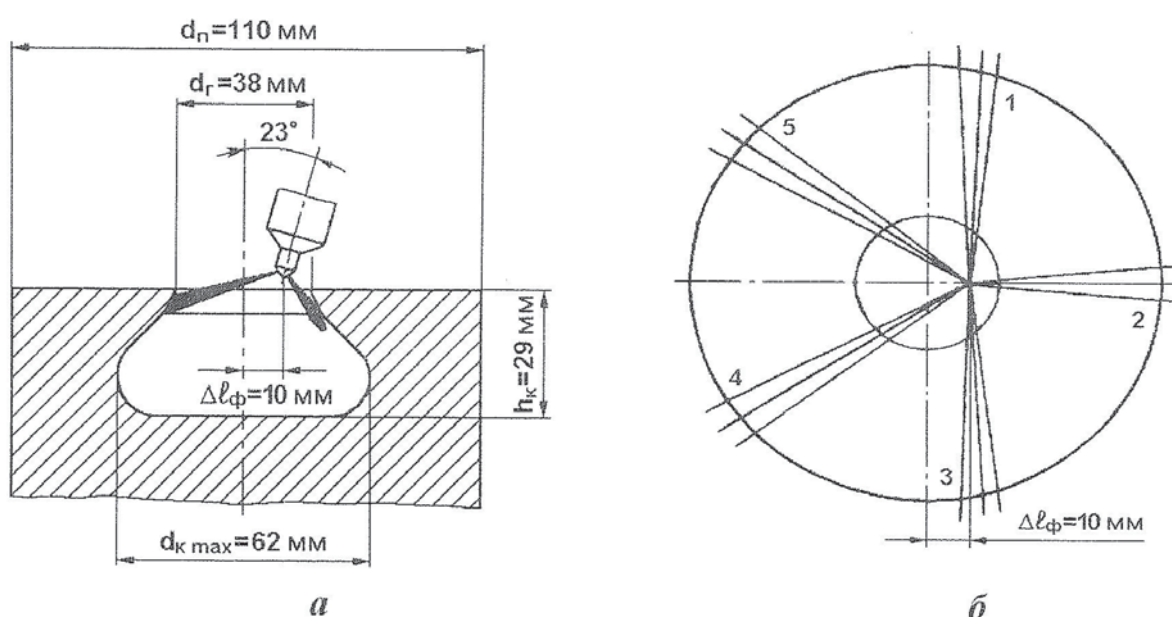


Рис. 1. Камера сгорания дизеля Д-245.12С со схемой расположения форсунки (а) и ориентация струй распыляемого топлива в КС (б): номера струй распыляемого топлива.

В исследуемом двигателе подача топлива осуществляется на горячие кромки горловины и внутренние стенки камеры сгорания вблизи горловины. Характерная особенность этой КС состоит в том, что диаметр горловины составляет примерно 30% от диаметра поршня. В результате на такте сжатия в КС наблюдается значительное торообразное вихревое движение воздуха, что и обеспечивает требуемое качество смесеобразования. Сравнительно большой диаметр горловины камеры способствует тому, что гидравлические потери при перетекании воздуха и топливовоздушной смеси на тактах сжатия и расширения сравнительно невелики, и топливная экономичность дизеля приближается к топливной экономичности дизелей с неразделенными КС.

Анализ работы дизелей с объемно-пленочным смесеобразованием показывает, что смесеобразование происходит как вследствие интенсивного движения воздушного заряда в КС дизеля, так и за счет энергии впрыскиваемого топлива [1,4]. Поэтому конструктивные особенности отдельных узлов и деталей топливоподающей аппаратуры ока-

зывают значительное влияние на экономические и экологические показатели дизельных двигателей. В первую очередь это относится к распылителю форсунки, конструкция которого должна обеспечить требуемые геометрические характеристики струй распыляемого топлива, структуру топливного факела и распределение топлива по объему КС. В дизелях с объемным смесеобразованием желательнее минимизировать количество топлива, попадающего на относительно холодные стенки КС и сравнительно плохо выгорающего в течение процесса сгорания. Увеличение доли объемного смесеобразования позволяет заметно улучшить топливную экономичность дизеля и уменьшить выбросы с ОГ несгоревших углеводородов и других продуктов неполного сгорания топлива.

Одним из наиболее значимых конструктивных параметров дизельной топливной аппаратуры является длина  $l_p$  распыляющих отверстий форсунки или отношение их длины  $l_p$  к диаметру  $d_p$  [1,5,6]. Этот конструктивный параметр определяется с учетом способа смесеобразования, формы КС, расположения форсунки в головке цилиндров, числа и расположения распыляющих отверстий в носке распылителя, уровня давления впрыскивания.

При организации процесса топливоподачи в дизелях размеры распыляющих отверстий форсунок выбирают таким образом, чтобы достичь наибольшей эффективности последующих процессов смесеобразования и сгорания. В частности, в дизелях с объемным смесеобразованием необходимо предотвратить попадание капель топлива на стенки камеры сгорания, обеспечить наиболее полный охват камеры сгорания струями распыляемого топлива, требуемую мелкость распыления, равномерное распределение капель топлива по объему воздушного заряда. При этом требуемая ориентация топливных струй в пространстве камеры сгорания достигается соответствующим расположением распыляющих отверстий, а параметры топливных струй - путем выбора диаметра и длины распыляющих отверстий.

Один из путей совершенствования процессов впрыскивания и распыления – оптимизация отношения длины распыляющего отверстия  $l_p$  форсунки к его диаметру  $d_p$ . Это объясняется особенностями истечения топлива через распыляющее отверстие. В современных дизельных топливных системах в процессе топливоподачи топливо от насоса под высоким давлением поступает в форсунку, воздействует на иглу 1 (рис. 2,а), поднимая ее, протекает через образовавшийся между иглой 1 и корпусом 2 кольцевой зазор 3 и поступает в полость 4 под иглой 1, где устанавливается давление впрыскивания  $p_{впр}$ . Под этим давлением топливо и поступает в распыляющее отверстие 5 форсунки.

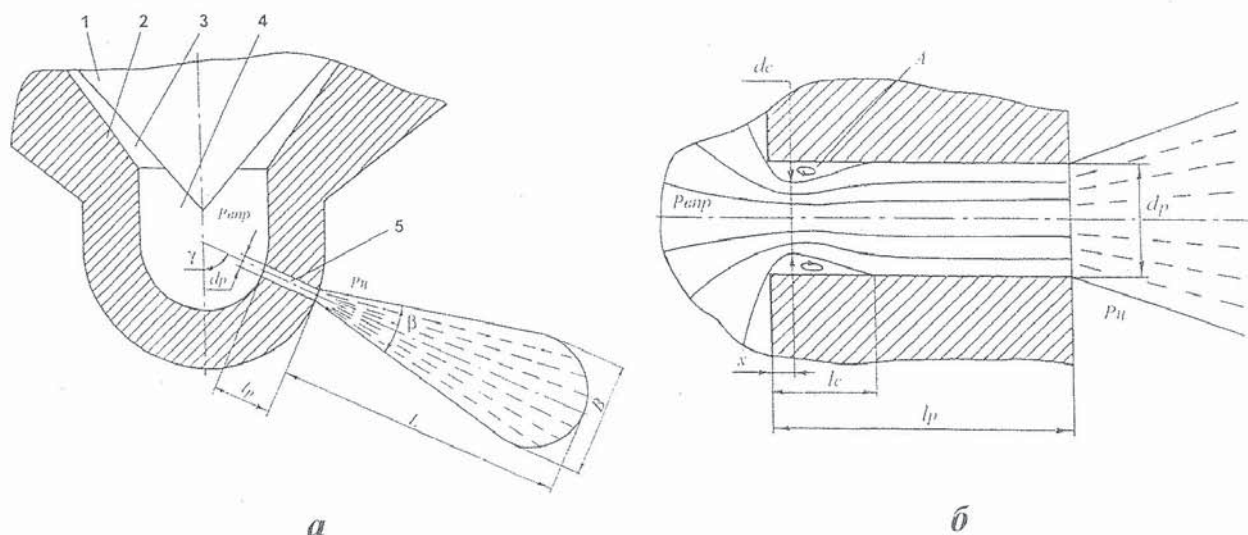


Рис. 2. Схема распылителя форсунки с геометрическими характеристиками струй распыляемого топлива и схема течения топлива по распыляющему отверстию форсунки

Непосредственно перед входом в распыляющее отверстие линии тока топлива искривляются (рис. 2,б), причем, их кривизна увеличивается от оси отверстия к его периферии. В результате возникает неравномерное поле распределения давлений и скоростей потока топлива. При этом минимальные давления (и максимальные скорости) достигаются в периферийных участках потока, где локальные давления могут оказаться ниже давления насыщенных паров топлива.

Характерно, что сразу за входным сечением распыляющего отверстия поток топлива сужается и возникает вихревое течение топлива (отрыв, зона *A* на рис. 2,б). Здесь зарождаются и развиваются кольцевые вихри, затем частично распадающиеся и увлекаемые топливом [7,8]. В таком периодическом нестационарном течении возникают пульсации давлений и скоростей в зоне отрыва, распространяющиеся на весь поток топлива в распыляющем отверстии. Таким образом, зародившиеся у входной кромки распыляющего отверстия вихри, приводят к усилению возмущения потока топлива в этом отверстии, оказывающему влияние на последующий распад струи. При этом форма линий тока, степень сжатия потока топлива (наименьший диаметр сжатия струи  $d_c$  в сечении  $x$ , длина участка  $l_c$ , рис. 2,б), размеры зоны отрыва, турбулизация потока топлива на выходе из распыляющего отверстия, параметры струи (длина  $L$ , ширина  $B$ , угол  $\beta$  раскрытия топливной струи, рис. 2,а), мелкость распыления топлива зависят от отношения длины распыляющего отверстия  $l_p$  к его диаметру  $d_p$  [9,10,11].

Указанная зависимость характеристик впрыскивания и распыления от отношения  $l_p/d_p$ , оказывающая влияние на параметры процесса смесеобразования, пре-

допределяет характер последующего сгорания топлива и, как следствие, показатели топливной экономичности и токсичности ОГ дизеля. Такая зависимость экономических и экологических показателей дизеля от величины  $l_p/d_p$  подтверждается и рядом проведенных ранее экспериментальных исследований [11,12].

Характерной особенностью упомянутого выше дизеля Д-245.12С является установка форсунок в головке цилиндров со смещением  $\Delta l_\phi=10$  мм относительно центральной оси камеры сгорания (см. рис. 1). Это приводит к тому, что различные струи, формируемые распылителем, обеспечивают различный характер процесса смесеобразования. Струи 4 и 5 (см. рис. 1,б), формируемые распыляющими отверстиями, наиболее удаленными от горловины камеры ЦНИДИ, отличаются наибольшей длиной и реализуют преимущественно объемное смесеобразование. Струя 2, имеющая наименьшую длину, напротив, обеспечивает преимущественно пленочное смесеобразования. Поэтому для обеспечения наилучших показателей дизеля Д-245.12С необходима оптимизация конструкции проточной части распылителя форсунки.

Оптимизация отношения  $l_p/d_p$  проведена при экспериментальных исследованиях дизеля Д-245.12С, имеющего топливную систему, включающую топливный насос высокого давления (ТНВД) фирмы Motorpal (Чехия) типа PP4M10U1f с диаметром плунжеров  $d_{пл}=10$  мм и их полным ходом  $h_{пл}=10$  мм и форсунки ФДМ-22 производства АО «Куроаппаратура» (г.Вильнюс), отрегулированные на давление начала впрыскивания  $p_{\phi_0}=22,0$  МПа. При испытаниях форсунки поочередно были оснащены комплектом серийных пятисопловых распылителей типа 145 производства Ногинского завода топливной аппаратуры (НЗТА) и опытными распылителями того же типа, дообработанными с целью оптимизации процесса топливоподачи.

Серийные распылители имели длину распыляющих отверстий  $l_p=0,90$  мм при их диаметре  $d_p=0,32$  мм и отношении  $l_p/d_p=2,81$ . При максимальном подъеме иглы форсунки  $h_{и \max}=0,26$  мм суммарная эффективная площадь распылителя в сборе равна  $\mu_p f_p=0,278$  мм<sup>2</sup>. Угловое расположение распыляющих отверстий распылителя НЗТА 145 приведено в табл. 1.

Таблица 1

## Расположение распыляющих отверстий распылителя НЗТА 145.

№ отверстия	Угловое расположение отверстия относительно штифта, град	Угол наклона отверстия относительно оси распылителя, град
1	8	62
2	90	71,5
3	172	62
4	237	52
5	303	52

Уменьшение доли топлива, попадающего на стенки КС, и, следовательно, увеличение доли объемного смесеобразования в исследуемом дизеле может быть достигнуто путем сокращения длины струй топлива, вытекающего из распыляющих отверстий, наиболее близких к стенкам КС. Ряд проведенных исследований показывает, что сокращения длины струй распыляемого топлива можно достичь путем уменьшения длины  $l_p$  распыляющих отверстий форсунки [11,12]. Поэтому для уменьшения доли пленочного смесеобразования в исследуемом дизеле целесообразно сформировать струи топлива различной длины  $L$ : желательно иметь длинные струи топлива в направлении удаленной от распыляющего отверстия форсунки стенки КС и короткие струи в направлении менее удаленной стенки КС. Серийные распылители, имеющие все пять распыляющих отверстий с одинаковыми геометрическими размерами, не могут обеспечить различную длину струй топлива при впрыскивании.

Для формирования струй распыляющими отверстиями с различной длиной  $l_p$  проведена дообработка носков распылителей серийных форсунок по схеме, представленной на рис. 3. Она заключалась в том, что два распыляющих отверстия, обращенные к удаленной стенке КС и образующие струи 4 и 5 (см. рис. 1,б), оставлены без изменений ( $l_p=0,90$  мм,  $d_p=0,32$  мм,  $l_p/d_p=2,81$ ), носок распылителя вблизи распыляющего отверстия, обращенного к наименее удаленной стенке и образующего струю 2, был сошлифован до длины распыляющего отверстия  $l_p=0,45$  мм ( $l_p/d_p=1,41$ ), носок распылителя вблизи двух оставшихся распыляющих отверстий, образующих струи 1 и 3, был сошлифован до длины распыляющего отверстия  $l_p=0,70$  мм ( $l_p/d_p=2,19$ ).

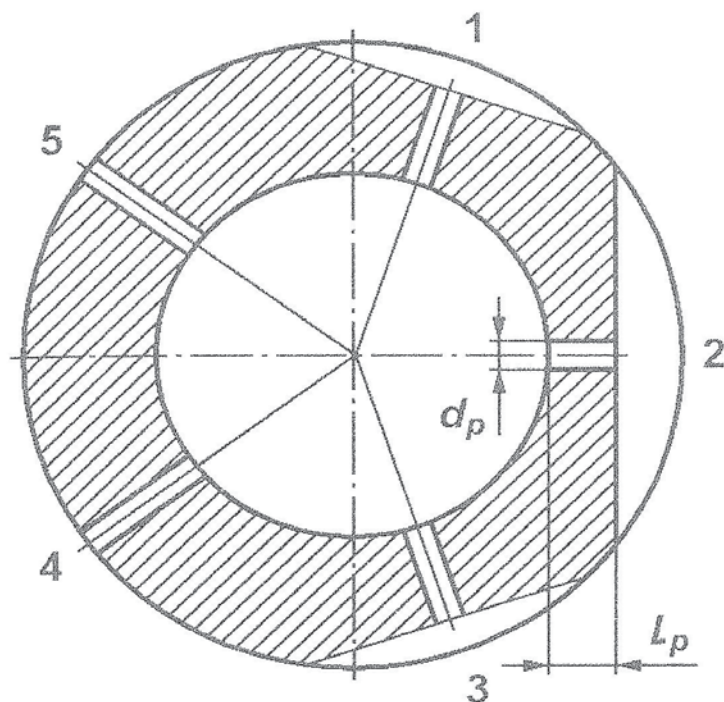


Рис. 3. Схема дообработки распыляющих отверстий распылителя форсунки: 1, 3 - распыляющие отверстия с длиной  $l_p \approx 0,75$   $l_{p \text{ нач}} = 0,70$  мм; 2 - распыляющее отверстие с длиной  $l_p = 0,50$   $l_{p \text{ нач}} = 0,45$  мм; 4, 5 - распыляющие отверстия с исходной (начальной) длиной  $l_p = l_{p \text{ нач}} = 0,90$  мм.

Программа исследований дизеля Д-245.12С с серийными и опытными распылителями на моторном стенде АМО «ЗиЛ» предусматривала работу двигателя на различных установившихся режимах, с частотой вращения коленчатого вала  $n$  от 850 до 2400  $\text{мин}^{-1}$  и нагрузкой - эффективным крутящим моментом дизеля  $M_e$  от 0 до 360 Н·м. Дизель исследовался при неизменном положении упора дозирующей рейки ТНВД (упора максимальной подачи топлива) с постоянным штатным для исследуемого дизеля установочным углом опережения впрыскивания топлива, равным  $\theta = 13^\circ$  поворота коленчатого вала до ВМТ. На первом этапе исследования проведены на режимах внешней скоростной характеристики дизеля в диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя  $n$  от 1000 до 2400  $\text{мин}^{-1}$ . Затем были определены показатели дизеля при его работе на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла.

Экспериментальные исследования проводились по методикам, регламентированным ГОСТ 14846-81 «Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний», Правилами 24-03 ЕЭК ООН (измерение дымности ОГ) и Правилами 49 ЕЭК ООН (определение удельных выбросов вредных веществ с ОГ). Моторный стенд был оборудован комплектом необходимой измерительной аппаратуры. Дымность ОГ измерялась с помощью ручного дымомера МК-3 фирмы Hartridge (Великобритания) с погрешностью

измерения  $\pm 1\%$ . Концентрации оксидов азота  $\text{NO}_x$ , монооксида углерода  $\text{CO}$ , газообразных углеводородов  $\text{CH}_x$  в ОГ определялись газоанализатором SAE-7532 японской фирмы YANACO с погрешностями измерения указанных компонентов  $\pm 1\%$ .

Результаты экспериментальных исследований дизеля Д-245.12С с серийными и опытными распылителями, проведенных на режимах внешней скоростной характеристики, представлены на рис. 4.

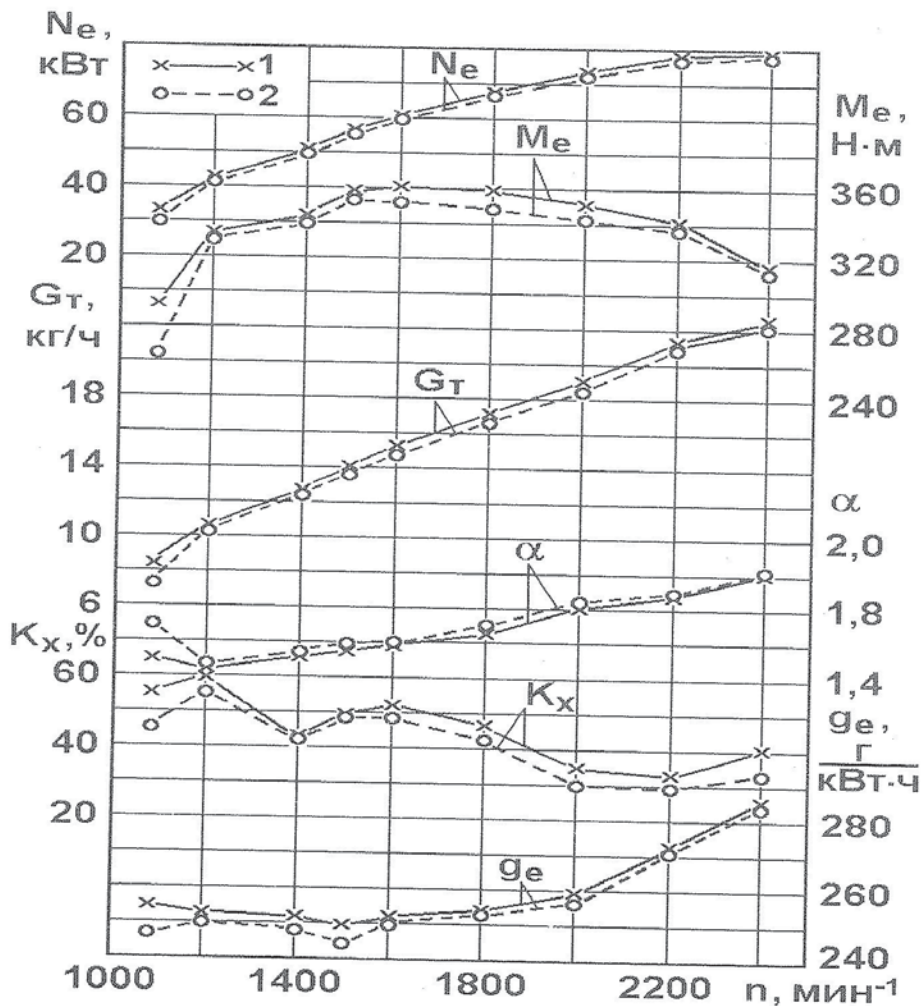


Рис. 4. Зависимость эффективной мощности  $N_e$ , крутящего момента  $M_e$ , расхода топлива  $G_T$ , коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , дымности ОГ  $K_x$  и удельного эффективного расхода топлива  $g_e$  от частоты вращения  $n$  дизеля Д-245.12С на режимах внешней скоростной характеристики при использовании серийных (1) и опытных (2) распылителей.

По данным рис. 4 следует отметить некоторое уменьшение подачи топлива при использовании опытных распылителей (с различной длиной  $l_p$  распыляющих отверстий) по сравнению с серийными (с одинаковой длиной  $l_p$  распыляющих отверстий). Это особенно заметно на режимах с низкой частотой вращения. Однако мощностные параметры дизеля (эффективный крутящий момент  $M_e$  и мощность  $N_e$ ) на номинальном скоростном режиме (при  $n=2400$  мин<sup>-1</sup>) примерно одинаковы при использовании рас-



пылителей обоих типов. Вместе с тем, удельный эффективный расход топлива  $g_e$  и дымность ОГ  $K_x$  заметно ниже при использовании опытных распылителей. Например, на режиме с  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$  замена серийных распылителей опытными приводит к снижению удельного расхода топлива  $g_e$  с 285,4 до 283,6 г/(кВт·ч) и дымности ОГ  $K_x$  - с 40 до 33% по шкале Хартриджа, т.е. на 17,5%. На режиме максимального крутящего момента при  $n=1500 \text{ мин}^{-1}$  удельные расходы топлива двигателя с серийными и опытными распылителями составили соответственно  $g_e=248,9$  и  $243,9$  г/(кВт·ч), а дымность ОГ  $K_x$  - 49,5 и 48,0% по шкале Хартриджа (снижение на 3,0%). Оценка показателей двигателя при его работе с исследуемыми распылителями на режимах с различной нагрузкой проведена по экспериментальным данным, полученным при работе дизеля на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла, предусмотренного Правилами 49 ЕЭК ООН (EURO-2). Данные по часовому расходу топлива  $G_{Ti}$ , представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что часовой расход топлива на различных нагрузочных режимах при  $n=1500$  и  $2400 \text{ мин}^{-1}$ , а также на режиме холостого хода при  $n=850 \text{ мин}^{-1}$  примерно одинаков при оснащении исследуемого дизеля серийными и опытными распылителями. Сравнительная оценка интегральной топливной экономичности дизеля с исследуемыми распылителями проведена по условному среднему на режимах 13-ступенчатого цикла эффективному расходу топлива, определяемому по выражению

$$g_e = \frac{\sum_{i=1}^k (G_{Ti} K_i)}{\sum_{i=1}^k (N_{ei} K_i)}, \quad (1)$$

где  $G_{Ti}$  - часовой расход топлива на  $i$ -том режиме;  $N_{ei}$  - мощность двигателя на этом режиме;  $K_i$  - коэффициент, отражающий долю времени каждого режима,  $k$  - число режимов. Полученные расчетные значения  $g_{e \text{ усл}}$  для дизеля с исследуемыми распылителями, представленные в табл. 2, показывают, что при замене серийных распылителей НЗТА на опытные условный средний на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла расход топлива  $g_{e \text{ усл}}$  снижается на 2,5 г/(кВт·ч).

Такое улучшение топливной экономичности при использовании опытных распылителей обусловлено улучшением качества процесса смесеобразования по сравнению с применением серийных распылителей.

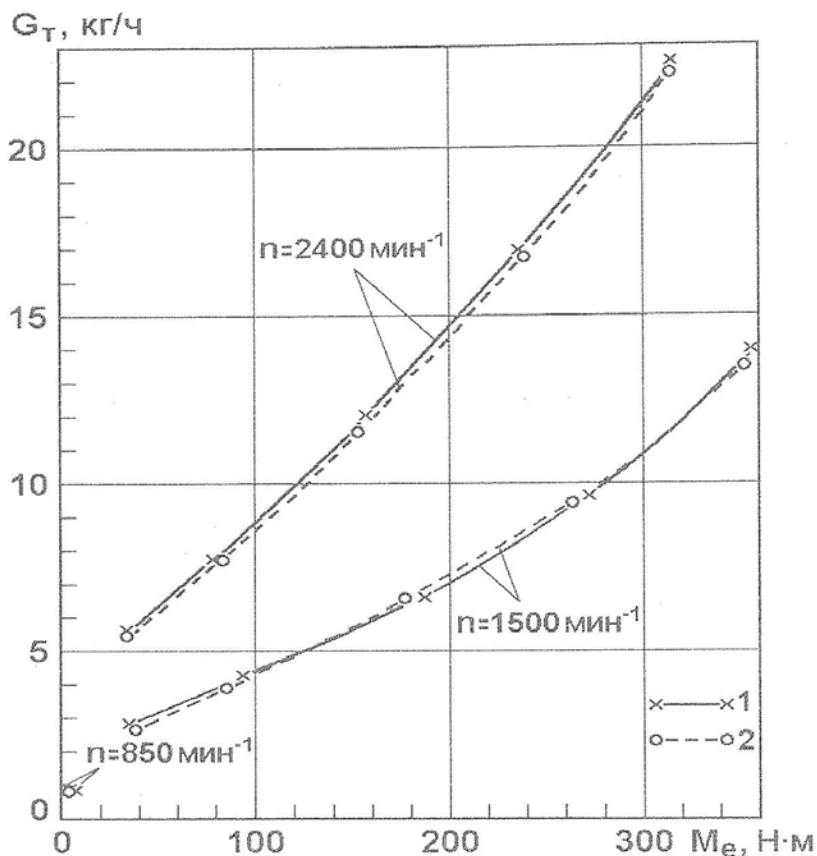


Рис. 5. Зависимость часового расхода топлива  $G_T$  от скоростного и нагрузочного режима (частоты вращения  $n$  и эффективного крутящего момента  $M_e$ ) дизеля Д-245.12С при использовании серийных (1) и опытных (2) распылителей.

Таблица 2

**Показатели дизеля Д-245.12С с распылителями различных типов.**

Вариант распылителей	Условный средний расход топлива на режимах 13-ступенчатого цикла, $g_e$ усл, г/(кВт·ч)	Удельные массовые выбросы токсичных компонентов при работе по 13-ступенчатому циклу, г/(кВт·ч)		
		$e_{NOx}$	$e_{CO}$	$e_{CHx}$
серийные распылители	272,6	5,749	7,872	2,207
опытные распылители	270,1	5,631	7,126	1,967

От геометрии проточной части распылителей зависит и токсичность ОГ двигателя, т.е. выбросы нормируемых токсичных компонентов ОГ - оксидов азота  $NO_x$ , монооксида углерода  $CO$ , углеводородов  $CH_x$ , а также эмиссия твердых частиц или сажи (углерода  $C$ ). Представленные на рис. 6 характеристики концентрации в ОГ одного из основных токсичных компонентов ОГ - оксидов азота  $C_{NOx}$  свидетельствуют о том, что замена серийных распылителей на опытные оказывает слабое влияние на содержание оксидов азота в ОГ.

Расчет интегральных на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла удельных массовых выбросов оксидов азота  $e_{\text{NOx}}$  проведен по формуле

$$e_{\text{NOx}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (E_{\text{NOxi}} K_i)}{\sum_{i=1}^{13} (N_{ei} K_i)}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{NOxi}}$  - массовый часовой выброс оксидов азота на  $i$ -том режиме. Полученные при расчете данные свидетельствуют о том, что оба типа исследуемых распылителей обеспечивают примерно одинаковые значения  $e_{\text{NOx}}$ : при использовании опытных распылителей интегральный массовый выброс оксидов азота на режимах 13-ступенчатого цикла  $e_{\text{NOx}}$  уменьшается с 5,749 до 5,631 г/(кВт·ч), т.е. на 2,1% по сравнению с серийными распылителями (см. табл. 2).

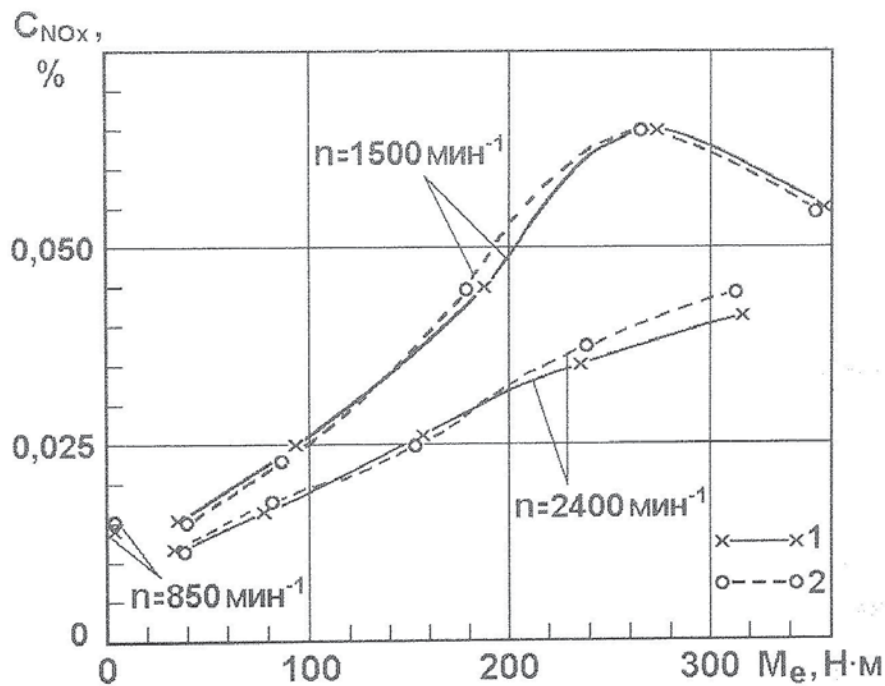


Рис. 6. Зависимость объемной концентрации в ОГ оксидов азота  $C_{\text{NOx}}$  от скоростного и нагрузочного режима (частоты вращения  $n$  и эффективного крутящего момента  $M_e$ ) дизеля Д-245.12С при использовании серийных (1) и опытных (2) распылителей.

Геометрия проточной части распылителя форсунки оказывает влияние и на эмиссию с ОГ продуктов неполного сгорания топлива - монооксида углерода СО и газообразных углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_x$ . Так, на большинстве исследуемых режимов замена серийных распылителей опытными приводит к снижению содержания в ОГ монооксида углерода  $C_{\text{CO}}$  (рис. 7). Это в первую очередь относится к режимам холостого хода при  $n=850 \text{ мин}^{-1}$  и неполных нагрузках ( $M_e < 200 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ) при  $n=1500$  и  $2400 \text{ мин}^{-1}$ . На режиме максимальной (номинальной) мощности (при  $n=2400 \text{ мин}^{-1}$ ) концентрации этого ток-

сичного компонента в ОГ при использовании серийных и опытных распылителей примерно одинаковы.

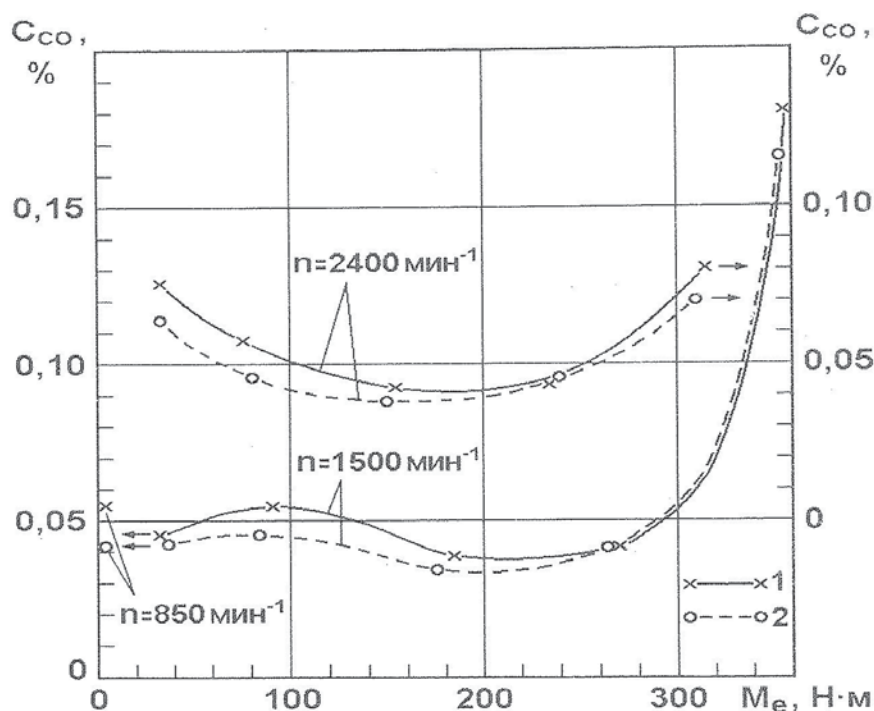


Рис. 7. Зависимость объемной концентраций в ОГ монооксида углерода  $C_{CO}$  от скоростного и нагрузочного режима (частоты вращения  $n$  и эффективного крутящего момента  $M_e$ ) дизеля Д-245.12С при использовании серийных (1) и опытных (2) распылителей.

Интегральные на режимах 13-ступенчатого испытательного цикла удельные массовые выбросы монооксида углерода  $e_{CO}$  рассчитаны по выражению

$$e_{CO} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (E_{COi} K_i)}{\sum_{i=1}^{13} (N_{ei} K_i)}, \quad (3)$$

где  $E_{COi}$  - массовый часовой выброс монооксида углерода на  $i$ -том режиме. Сравнение расчетных данных по удельным массовым выбросам CO показывает, что использование опытных распылителей позволяет снизить интегральный массовый выброс монооксида углерода на режимах 13-ступенчатого цикла  $e_{CO}$  с 7,872 до 7,126 г/(кВт·ч), т.е. на 9,5% по сравнению с серийными распылителями (см. табл.2).

Наибольший эффект от использования опытных распылителей получен по выбросам с ОГ газообразных углеводородов  $CH_x$ . Как следует из экспериментальных данных рис. 8 на всех исследованных режимах опытные распылители обеспечивают снижение концентрации в ОГ углеводородов  $C_{CH_x}$  по сравнению с серийными распылителями. Максимальное снижение концентрации  $CH_x$  в ОГ отмечено на режиме с  $n=1500$  мин<sup>-1</sup> и низкими нагрузками: при  $M_e=35...38$  Н·м замена серийных распылителей опытными приводит к снижению  $C_{CH_x}$  с 0,0710 до 0,0580%, а при  $M_e=86...92$  Н·м - к умень-

шению  $C_{\text{СНх}}$  с 0,0635 до 0,0510%. Такое уменьшение содержания  $\text{СН}_x$  в ОГ объясняется уменьшением количества топлива, попадающего на стенки КС, и улучшением качества процесса смесеобразования при использовании опытных распылителей.

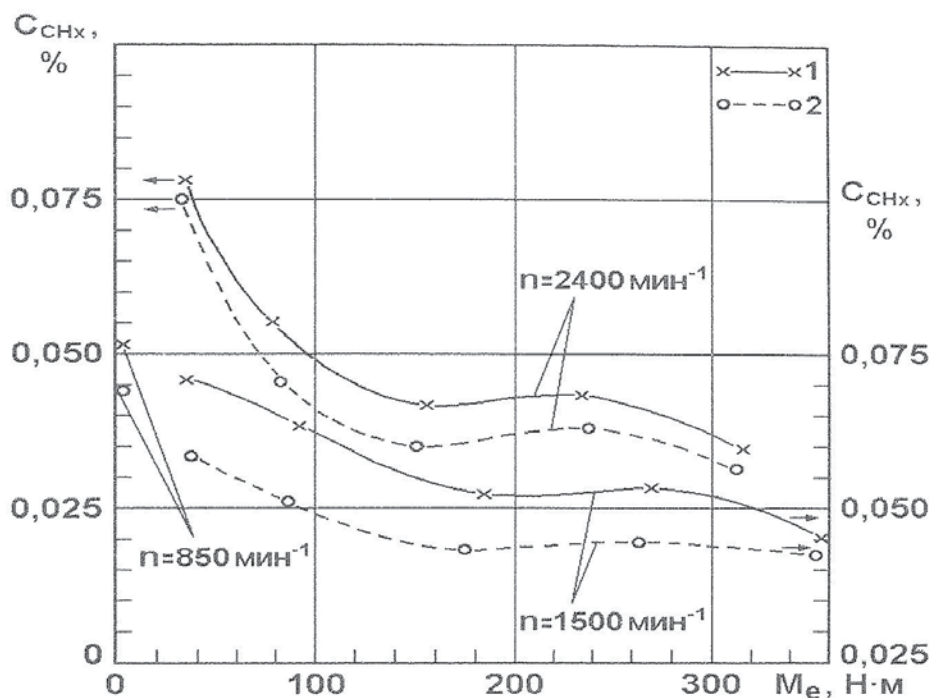


Рис. 8. Зависимость объемной концентрации в ОГ газообразных углеводородов  $C_{\text{СНх}}$  от скоростного и нагрузочного режима (частоты вращения  $n$  и эффективного крутящего момента  $M_e$ ) дизеля Д-245.12С при использовании серийных (1) и опытных (2) распылителей.

Проведенные расчеты интегральных удельных массовых выбросов газообразных углеводородов  $e_{\text{СНх}}$  по выражению

$$e_{\text{СНх}} = \frac{\sum_{i=1}^{13} (E_{\text{СНх}i} K_i)}{\sum_{i=1}^{13} (N_{ei} K_i)}, \quad (4)$$

где  $E_{\text{СНх}i}$  - массовый часовой выброс углеводородов на  $i$ -том режиме, также подтвердили значительное уменьшение  $e_{\text{СНх}}$  при переходе от серийных распылителей к опытным. При этом интегральный массовый выброс газообразных углеводородов на режимах 13-ступенчатого цикла  $e_{\text{СНх}}$  снизился с 2,207 до 1,967 г/(кВт·ч), т.е. на 10,9% (см. табл.2).

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность улучшения экономических и экологических показателей дизеля при замене серийных распылителей опытными, выполненными с распыляющими отверстиями различной длины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. Системы топливоподачи и управления дизелей: Учебник для ВУЗов. Второе издание. - М.: Изд-во «Легион-Автодата», 2005. - 344 с.
2. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. Токсичность отработавших газов дизелей - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 376 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей / В.П. Алексеев, В.Ф. Воронин, Л.В. Грехов и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. - М.: Машиностроение, 1990, - 288 с.
4. Марков В.А., Девянин С.Н., Мальчук В.И. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. - 360 с.
5. Топливные системы и экономичность дизелей / И.В. Астахов, Л.Н. Голубков, В.И. Трусов и др. - М.: Машиностроение, 1990, - 288 с.
6. Файнлейб Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: Справочник. - Л.: Машиностроение, 1990, - 352 с.
7. Кутовой В.А. Впрыск топлива в дизелях. - М.: Машиностроение, 1981. - 119 с.
8. Трусов В.И., Младенов М.Б. Влияние кавитации и вихреобразования в сопловом отверстии на мелкость распыления топлива // Труды МАДИ. - 1976. - Вып.126. - С. 46-53.
9. Распыливание жидкостей / Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Кличко, Б.В. Новиков и др. - М.: Машиностроение, 1977. - 208 с.
10. Трусов В.И., Дмитриенко В.П., Масляный Г.Д. Форсунки автотракторных дизелей. - М.: Машиностроение, 1977. - 167 с.
11. Паюсов В.И., Лукин Ю.А., Власова Н.К. Влияние относительной длины распыляющих отверстий форсунки на развитие топливного факела в форсированном быстроходном дизеле // «Совершенствование и создание форсированных двигателей»: Сб. - Труды ЦНИДИ. - 1982. - С. 73-78.
12. Повышение эффективности подачи и распыления топлива в дизелях / В.А. Марков, В.И. Мальчук, С.Н. Девянин и др. // Грузовик &. - 2003. - № 6. - С. 30-32; № 7. - С. 23-27; № 8. - С. 50-51.