

УДК 621.436.038.8

**Разработка, создание и исследование топливных систем
с саморегулированием давлений процесса впрыскивания топлива**

А. К. Каракаев

Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова

**Design, development and study of fuel systems
with the regulation of the pressure of injection of fuel**

A. K. Karakaev

S. Toraygyrov Pavlodar State University

Топливная система (ТС) с форсунами с глухим колпаком (ФГК) позволяет экономить топливо, уменьшить материальные, энергетические и трудовые затраты, улучшить гигиену труда, экологическую и пожарную безопасность при производстве, эксплуатации, ремонте и техобслуживании ТС и дизелей; повысить сроки службы распылителей, так как позволяет отказаться от системы слива дренажного топлива (ССДТ), упростить конструкции ТС и дизелей, демонтаж и монтаж ТС на дизель; повысить экономические, экологические и эффективные показатели дизелей в результате совершенствования процессов впрыскивания топлива (ПВ) и устранения ССДТ, а следовательно, уменьшить вредный выброс в атмосферу из-за совершенствования ПВ и рабочего процесса двигателя, укомплектовывать ФГК распылителями с повышенными диаметральными зазорами δ_r или изношенными распылителями (ИР), причём по мере роста δ_r и износа даже ИР экономичность дизеля возрастает.

Fuel system (FS) with forsunny with a blind cover (FBC) allows you to save fuel, reduce material, energy and labor costs, improve occupational health, environmental and fire safety in production, operation, repair and maintenance of fuel systems and diesel engines; to increase the service life of the sprayers, as it allows to refuse from system drain draining fuel (SDDF), to simplify the design of the vehicle and diesel engines, dismantling and installation of vehicle diesel; to improve the economic, environmental and efficient performance of

diesel as a result of improving processes of injection of fuel (IF) and eliminate SDDF, and consequently, to reduce the harmful emissions due to the improvement of IF and workflow engine, to complement the FBC nozzles with high diametrical clearance DC or worn nozzles (IR) in the process of operation, and the growth of DC, and wear even IR the efficiency of diesel increases.

Ключевые слова: форсунка, топливная система, форсунка с глухим колпаком, распылитель, разгерметизированный нагнетательный клапан.

Keywords: injector, fuel system, injection valve with blind cap, sprayer, razgermetizatsiey the discharge valve.

Фирмы «Tatra» и «Liaz» (ЧССР) устанавливают на дизели малогабаритные форсунки общей длиной 70 мм, причём среди НИОКР по усовершенствованию топливных систем (ТС) [1] выделяют работы по созданию бездренажных форсунок с глухим колпаком (ФГК) [2], а фирма «Motorpal» ТС с ФГК относит [3] к перспективным для дизелей с диапазоном N_e от 5 до 3500 кВт, в том числе и для дизелей с цилиндровой $N_e = 30-60$ кВт, предназначенных для промышленности, грузовых автомобилей и автобусов, причём они отвечают требованиям ЕЭК по токсичности отработавших газов (ОГ), экономичности и безопасности дизелей. По прогнозам фирмы «Motorpal» ФГК будут главным типом форсунок для ТС, разные модификации которой будут основой производственной программы фирмы. Установочный диаметр ФГК - 21мм. Игла с диаметром по направляющей части $d_H = 5$ мм изготовлена из инструментальной стали, распылитель выполнен с объёмом колодца распылителя $V_K = 0,6$ мм³, давление начала впрыскивания топлива $p_{ФОП}$, определяемое затяжкой пружины, регулируется шайбами до 20-25 МПа. Пружина выполнена с присадкой ванадия и имеет термическую стабилизацию. Под пружиной создан аккумулярующий объём, где остаточное давление топлива ($p_{ГО}$) в надыгольной полости (НП) достигает 9 МПа в зависимости от n , ускоряя посадку иглы и благоприятно сказываясь на параметрах ДВС. Рекомендуется демонтиро-

вать ФГК с ДВС для проверки и регулировки через каждые 100 тысяч км пробега. Техническим университетом (г. Брно) и НИИ двигателей и автомобилей (г. Прага) разработано новое поколение миниатюрных ФГК (МФГК) для высокооборотных двигателей, результаты которых [2] были доложены и одобрены на конгрессе СИМАК (Париж, 1983), на MOTOR-SYMPO (Высокие Татры, 1982, 1984), на 14-ой конференции силовой и транспортной техники (Karl-Marx-Stadt, 1984). Отсутствие системы слива дренажного топлива (ССДТ) позволяет поднять $p_{\Phi O}$ до 40 МПа. Создана МФГК с $d_{II} = 3$ мм и характерным $d_x = 2,2$ мм со штифтовыми (ШР) и многодырчатыми (МР) распылителями, длина которых по наружному диаметру $D_p = 11,3$ мм равна 15 мм, а диаметр удлиненной части распылителя, входящей в камеру сгорания (КС), равен 6 мм, длина ШР и МР (по D_p) равна 15 мм, а общая длина МР - 50,4 мм. Вся длина ФГК со ШР равна 70 мм. Для обработки седла в корпусе МР (на относительно большой глубине при малом $d_{II} = 3$ мм) на «Motorpal» разработана новая высокопродуктивная технология [2, 3]. Масса МФГК с МР составляет 33 %, а иглы – 20 % от значений масс этих элементов форсунки размера S, масса подвижных деталей уменьшена на 17 %, а со ШР эти соотношения еще более благоприятны. МФГК могут работать с $p_{\Phi O} = 28$ МПа, предполагается поднять $p_{\Phi O}$ до 40 МПа. Наряду с экономией материала создаются предпосылки для улучшения ПВ. Так, при $d_{II} = 11$ мм и $C_{II} = 1,8$ м/с, диаметрах нагнетательного трубопровода, равных 6 и 2 мм, и его длине в 700 мм, с распылителем ($d_{II} = 3$ мм), имеющим 5 отверстий с $d_c = 0,35$ мм, МФГК обеспечивает $V_{II} = 196$ мм³ при $n_H = 1000$ мин⁻¹ ($p_{\Phi OII} = 19$ МПа). Новое поколение МФГК имеет следующие преимущества [2] : простота установки на дизели (нет ССДТ), обеспечиваемость взаимозаменяемости распылителей по монтажу в корпусе форсунок разных типов (ФРТ), малые размеры выпускных клапанов; более удобное размещение, так как малый диаметр выступающей части распылителя в 6 мм позволяет размещать малогабаритную ФГК

ближе к центру КС, повышая прочность головки, возможность реализации высоких $p_{\phi 0}$ при относительно низком рабочем напряжении пружины, что улучшает параметры процесса впрыскивания топлива (ПВ) и повышает надёжность пружины и всей МФГК в эксплуатации; возможность применения в автотракторных дизелях в широком диапазоне N_e и n . Небольшие размеры МФГК согласуются с малыми размерами высокооборотных двигателей. Целесообразна установка их на всех типах дизелей.

Можно создать МФГК и на основе ТС с ФГК и РНК (рис. 1-3), успешно прошедшие РЭИ на МАЗ-500 и на дизелях КамАЗ, в которых достигается интенсификация ПВ путём повышения давления p_r в НП в результате подпитки НП топливом из линии высокого давления (ЛВД). Разгрузка НП в периоды между циклами (ПМЦ) ПВ, т. е. стабилизация ПВ, осуществляется через РНК (рис. 1, 3). Одновременно, в зависимости от режима работы, обеспечивается саморегулирование p_{r0} , p_r , $p_{\phi 0}$, p_{ϕ} , возрастающие с ростом N_e и n , что вызывает саморегулирование остальных параметров ПВ. Саморегулирование давлений начала и конца ПВ достигается в ТС с ФГК на рис. 1, когда длина разобщающего элемента РЭ ($l_{PЭ}$) меньше максимального хода иглы (y_{max}), т. е. $l_{PЭ} < y_{max}$ [4], а также при $l_{PЭ} \geq y_{max}$ [5], принцип работы которой такой же, как и ТС с ФГК на рис. 1.

Когда давление в кармане распылителя p_{ϕ} становится равным давлению $p_{\phi 0}$, игла 13 открывается, сжимая пружину и топливо над иглой. По мере достижения иглой упора НП и ПП сообщаются между собой через кольцевую проточку каналами, выполненными в виде пазов или отверстий в корпусе форсунки или верхнем торце иглы выше РЭ. Игла садится под действием совместных усилий пружины и повысившегося p_r , оно уже соизмеримо с p_{ϕ} , что резко сокращает этап выжимания (ЭВ). О потенциальных возможностях совершенствования ПВ и РПД с помощью рассмотренных выше ТС с ФГК и актуальность их подтверждают [6-8]. С ТС с ФГК [8], подобного [4, 5], применительно к судовому дизелю, до 5 % уменьша-

ется среднеэксплуатационный G_T из-за автоматического саморегулирования давлений начала и конца ПВ в зависимости от режима. НП в ПМЦ разгружается так, что игла открывается при необходимом $p_{\Phi O}$. Снижение p_T в ПМЦ осуществляется путём перетекания топлива из НП через РЭ 19 (рис. 1) в ЛВД 6, РНК (рис. 1, 3) в линию низкого давления (ЛНД). По мере понижения n_H время между последовательными циклами (ПЦ) увеличивается и возрастают время разгрузки и разгрузка НП, снижая остаточное $p_{ГО}$ в НП, что понижает $p_{\Phi O}$ и $p_{П OC}$ иглы и дополнительно повышается стабильность ПВ и уменьшается минимальная цикловая топлива ($V_{Ц min}$).

Из-за того, что в [5] $l_{PЭ} > y_{max}$ уменьшаются перетечки топлива в НП и облегчается регулировка ФГК на $p_{\Phi O П}$ и $p_{\Phi O}$, так как РЭ не выходит из направляющей поверхности распылителя, меньше изнашиваются кромки РЭ, что способствует повышению стабильности ПВ и равномерности дозирования топлива разными ФГК многоцилиндрового дизеля.

Применительно к дизелю А-41 на основе серийной ТС были разработаны и созданы ТС с ФГК [5], укомплектованные РНК с плоским ограничением хода клапана (ПРНК) без уплотнительных конусов, что на рис. 1, 3. На базе распылителей с диаметральной зазором $\delta_p = 15$ мкм и характерном $d_x = 3,6$ мм были изготовлены комплекты распылителей с разными $l_{PЭ}$, равными 0,5; 1,5; 3 мм, путём изготовления лысок 21 на иглах 13 (рис. 1).

Скоростные характеристики (СХ) ТС с ФГК протекают более благоприятно по мере понижения n_H до 600 мин^{-1} при всех $l_{PЭ}$, а при $l_{PЭ} = 0,5$ мм имеет место хорошая коррекция СХ по сравнению с серийной ТС уже до $n_H = 250-300 \text{ мин}^{-1}$, причём $p_{ГО}$ колеблется от 3 до 13-14 МПа, что приводит к существенному саморегулированию $p_{\Phi O}$, так как :

$$p_{\Phi O} = p_{\Phi O П} + p_{\Phi O Г}; p_{\Phi O Г} = p_{ГО} \cdot f_{II} / f_{II}'; f_{II} = \pi \cdot d_{II}^2 / 4; f_{II}' = \pi (d_{II}^2 - d_K^2) / 4. \quad (1)$$

При $d_x = 3$ мм ($d_H = 6$ мм) : $f_H / f'_H = 1,33$, а при $d_x = 3,6$ мм : $f_H / f'_H = 1,5625$. При изменении $p_{ГО}$ от 3 до 15 МПа ($d_x = 3,6$ мм) $p_{ФОГ}$ изменяется от 5 до 24 МПа (рис. 4).

Для моторных исследований был выбран вариант ФГК с $l_{PЭ} = 0,5$ мм и $p_{ФОП} = 10$ МПа, так как он более приемлем по $p_{ФО}$ для сравнения с серийной ТС с ФП при $p_{ФОП} = 17,5$ МПа, о чём свидетельствуют и сравнительные РХ (рис. 5). Каждая из РХ была снята после подрегулировки соответствующей ТС перед установкой на дизель, причём ТС с ФГК при $l_{PЭ} = 0,5$ мм и $p_{ФОП} = 10$ МПа работает с меньшей степенью неравномерности δ_H , а на $n_H = 950$ мин⁻¹ - $\delta_H = 0$, в то время как у серийной ТС $\delta_H = 76$ %, причём $p_{ГО}$ изменяется от 5 до 7,5 МПа, что приводит к изменению $p_{ФОГ}$ от 8 до 12 МПа (рис. 4). С учётом $p_{ФОП} = 10$ МПа $p_{ФО}$ изменяется от 18 до 22 МПа, т. е. при ФГК с малыми $l_{PЭ}$ обеспечивается автоматическое саморегулирование давлений начала и конца ПВ в зависимости от режима работы ТС.

Исследования на дизеле подтвердили результаты теоретических исследований, заложенные в основу создания изобретений, и безмоторных испытаний, показывая (рис. 6-8), что ФГК обеспечивает более экономичную работу в основном из-за совершенствования ПВ с автоматическим саморегулированием давлений начала и конца ПВ в зависимости от режима, о чём свидетельствуют и меньшие значения t_r , так как СДТ был незначителен из-за малых δ_p при ФП. По РХ (рис. 6) $p_{ГО}$ возрастает от 4,5 до 7,5 МПа ($p_{ФОГ}$ от 7 до 12 МПа) при изменении N_e от 0 до $N_{eНОМ}$, а по НХ (рис. 7) $p_{ГО}$ - от 4 до 7,5 МПа, а $p_{ФОГ}$ - от 6,3 до 12 МПа. Некоторое снижение p_Z при работе дизеля с ФГК по РХ, как показали индикаторные диаграммы, можно объяснить тем, что ПВ в цилиндры при ФГК начинается позже из-за роста $p_{ФО}$, связанного с ростом $p_{ГО}$, но заканчивается раньше из-за роста p_r к концу ПВ, которое соизмеримо уже с p_{ϕ} , и вызывает сокращение ПВ, интенсифицируя ПВ и повышая экономичность работы дизеля.

Преимущество опытной ФГК сильнее проявляется по мере снижения нагрузки, в особенности, на режимах ХХ, МНЧ. При работе дизеля с ФГК в диапазоне n от 800 до 1890 мин⁻¹ p_z практически не изменяется, в то время как при работе с ФП p_z снижается от 4,3 до 3,7 МПа с ростом n . Следует отметить, что дизель с ФП работает крайне неустойчиво и с сильной вибрацией уже при $n = 1000$ мин⁻¹, даже не удалось на ХХ выйти на $n = 800$ мин⁻¹ из-за неустойчивой работы и сильной вибрации двигателя, в то время как с ФГК двигатель работал устойчиво и мягко без вибраций и при $n = 800$ мин⁻¹ (рис. 8).

ТС с ФГК позволяют повысить сроки службы распылителей и форсунок, эффективно использовать изношенные распылители (ИР), причём по мере износа даже ИР повышаются эффективные, экономические и экологические показатели дизелей (ЭЭЭПД), что подтверждается и работами [9-11]. Применение В. С. Морозовой [9] бессливного процесса топливоподачи (БСПТ) на дизелях типа В-2 и Д-240 впервые обеспечило бесперебойную эксплуатацию буровых установок и тракторов на чистом газовом конденсате при температуре минус 55 °С в условиях Крайнего Севера и она справедливо констатирует, что это является практическим воплощением и развитием концепции государственной комплексной топливно-энергетической программы России на период до 2010 г, что улучшаются не только ЭЭЭПД, но и мощностные и надёжностные показатели дизелей : снижение g_e дизтоплива на 5-25 г/(кВтч), маловязкого топлива на 5,5-19 г/(кВтч), дымности и токсичности ОГ до 50 % при незначительном увеличении жёсткости рабочего процесса, повышение N_i , N_e и работоспособности распылителей, что БСПТ не требует новых сложных техпроцессов для производства и принята к внедрению в серийное производство на ЧТЗ для дизелей 12ЧН 15/18 и 6ЧН 15/16, а также может быть изготовлена для переоборудования штатных ТС, но, к сожалению, форсунка усложнена под-

пружиненным шариковым клапаном (ШК), что усложняет её изготовление и эксплуатацию.

Исследованиями на дизелях автотракторного назначения установлено [10, 11], что применение ТС с закрытым наддольным объёмом (ЗНО) уменьшает цикловую подачу топлива $V_{Ц}$ на полных нагрузках до 16 %, незначительно улучшает экономические и экологические показатели дизелей на режимах частичных нагрузок и частот вращения, а также холостого хода, что с усложнённой ТС с предельным клапаном (ПК) повышается давление впрыскивания $p_{ВПР}$ в 2 раза, сокращается $\varphi_{ВПР}$, устраняется подвпрыскивание, улучшается межцикловая стабильность давления топлива, величины $p_{НАЧ}$, $p_{ВПР}$ зависят от характеристик элементов ЛВД за НК и давления срабатывания ПК, что ТС с ПК улучшила ЭЭЭПД дизеля 2ЧН10,5/12 (Д-120 производства АО ВТЗ) в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов, например, при неизменных $\Theta_{ВПР}$ и $p_{Г}$ на M_{max} снижаются g_e на 10,9 г/(кВтч) или на 4,3 %, дымность в 2 раза, выбросы СО на 950 ppm или 28 %; на $N_{eНОМ}$ снижаются g_e на 6,2 г/(кВтч), дымность в 1,6 раза, выбросы СО на 114 ppm (7,9 %). Выбросы NO_x на этих режимах возросли соответственно на 6,3 и 1,1 %. Уменьшая $\Theta_{ВПР}$ на 5 градусов и регулируя давление ПК, снизили выбросы вредных веществ по оксидам углерода на 20 % и азота на 15 %. По данным Л. В. Грехова показатели дизеля 2ЧН10,5/12 с $p_{Г} = 30$ МПа, M_{max} при $n = 1400$ и 2000 мин⁻¹ улучшились соответственно : по экономичности на 15 и 7 г/(кВтч), выбросам СО в 1,86 и 1,62 раза, NO_x в 1,32 и 1,67 раза, дымность ОГ в 1,86 и 3 раза. Работы [9-11] подтверждают результаты, полученные автором с 1966 г. по ТС с гидрозатворными форсунками и с 1972 г. по ТС с ФГК, отличающиеся простотой конструкции (без каких-либо шариковых и перепускных клапанов). С 1977 г. ФГК с $\delta_p = 6-9$ мкм находились в рядовой эксплуатации на 48 тракторах и бульдозерах в 6 хозяйствах Павлодарской области РК.

К важнейшим преимуществам разработанных распылителей относятся возможность и целесообразность использования их на всех типах ТС, например, в насос-форсунках, в аккумуляторных ТС, в ТС с электронным управлением, в ТС с пружинным, гидравлическим и гидромеханическим запирающим (ФГК) [12-14], в том числе и в оригинальных ТС, разработанных в МГТУ имени Н. Э. Баумана [15-19] под руководством проф. В. И. Крутова, В. А. Маркова и В. И. Шатрова, в которых, например, применение пневмо-механического регулятора, воздействующего на дозирующий и фазирующий органы управления ТНВД, позволяет изменять $\Theta_{ВПР}$ в соответствии с требуемыми законами в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов и, тем самым, улучшить ЭЭЭПД, в особенности, транспортных, чему способствовало бы использование ТС с саморегулированием давлений начала и конца ПВ в зависимости от режима работы, например, [4, 5], на основе которых можно создать и малогабаритные форсунки с глухим колпаком без системы гидрозапирания форсунок и без ССДТ.

Литература:

[1] Sachse I. Motor SYMPO'84 - Internationale Verbrennungsmotorentagung in der CSSR // Kraftfahrzeugtechnik. - 1984. - № 12. - S. 365-367, 383.

[2] Indza Jaromir. Leköllose Einspritzventile für schnelllaufende Dieselmotoren // MTZ. - 1985 (46). - № 6. - S. 215-217.

[3] Колар К. Перспективная топливная аппаратура для дизельных двигателей // Тр. ЦНИТА. - 1985. - Вып. 85. - С. 106-112.

[4] Пат. 980 KZ, МКИ F02M 59 / 44. Топливная система для дизеля / А. К. Каракаев ; КазГТУ // Бюл. - 1994. - № 2.

[5] Пат. 977 KZ, МКИ F02M 59/44. Топливная система для дизеля / А. К. Каракаев; КазГТУ // Бюл. - 1994. - № 2.

[6] Астанский Ю. Л. Новый способ впрыска топлива с повышением давления посадки иглы распылителя // Двигателестроение. – 1983. – № 10. – С. 48-50.

[7] Астанский Ю. Л. Топливная система высокого давления дизеля с автоматическим регулированием давлений начала и конца впрыскивания топлива // Двигателестроение. – 1984. – № 12. – С. 29-32.

[8] А. с. 985384 СССР, МКИ³ F02M 59/44. Способ впрыска топлива в дизель и устройство для его осуществления / Ю. Л. Астанский и В. А. Осадин (СССР) // Б.И. - 1982. - № 48.

[9] Морозова В. С. Бессливный процесс топливоподачи для эффективного использования в дизелях различных углеводородных топлив : Автореф. ... дис. д-ра техн. наук : 05.04.02. - М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. - 1996. - 32 с.

[10] Коротнев А. Г. Топливные системы с аккумулярованием утечек в надьгольном объёме форсунок малотоксичных и экономичных дизелей : Дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02. -М.: - МГТУ имени Н. Э. Баумана. - 1999. - 150 с.

[11] Грехов Л. В. Научные основы разработки систем топливоподачи в цилиндры двигателей внутреннего сгорания : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.02. - М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана. - 1999. - 390 с.

[12] Каракаев А. К. Топливная система с гидрозапиранием форсунок как основа для создания дизелей с управляемыми параметрами впрыскивания топлива. – Павлодар : Кереку, 2016. – 201 с.

[13] Каракаев А. К. Повышение технико-экономических показателей дизелей путём рециркуляции отработавших газов : монография. – Павлодар : Кереку, 2016. – 70 с.

[14] Каракаев А. К. Топливные системы с бездренажными форсунками с глухим колпаком как простейшие и надёжные системы для саморегулирования процессов впрыскивания топлива в двигателях : монография. – Павлодар : Кереку, 2016. – 331 с.

[15] Крутов В. И., Марков В. А. Улучшение характеристик автотракторных дизелей изменением угла опережения впрыска топлива // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1993. - № 2. - С. 66-72.

[16] Марков В. А. Определение оптимальных законов управления углом опережения впрыскивания топлива // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1994. - № 4-6. - С. 65-71.

[17] Марков В. А., Шатров В. А., Карпов А. В. Исследование топливного насоса высокого давления с регулированием угла опережения впрыскивания топлива на безмоторном стенде // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1996. - № 7-9. - С. 72-76.

[18] Исследование топливного насоса высокого давления с регулированием угла опережения впрыскивания топлива на одноцилиндровой установке дизеля семейства КамАЗ / В. А. Марков, Л. Л. Михальский и В. А. Шатров // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1996. - № 10-12. - С. 56-63.

[19] Крутов В.И. и др. Безмоторные испытания опытного топливного насоса высокого давления с регулированием цикловой подачи топлива и угла опережения впрыскивания топлива / В. И. Крутов, А. В. Карпов, В. А. Марков и др. // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1994. - № 3. - С. 52-58.