

Владимир Александрович Зенкин родился в 1983 г. Студент кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

V.A. Zenkin (b. 1983) — student of the Bauman Moscow State Technical University.

Андрей Сергеевич Кулешов родился в 1956 г., окончил в 1979 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области моделирования рабочих процессов в поршневых двигателях.

A.S. Kuleshov (b. 1956) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1979. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Reciprocating Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of simulation of working processes in reciprocating engines.

УДК 621.436.138

В. В. Курманов, О. В. Олисевиц,
С. Д. Скороделов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ С РАЗГРУЖЕННЫМ ОТ ДАВЛЕНИЯ ТОПЛИВА УПРАВЛЯЮЩИМ КЛАПАНОМ

Приведены конструкция электрогидравлической форсунки системы топливоподачи дизеля и описание ее работы. Составлена математическая модель и разработана программа для расчета приведенной электрогидравлической форсунки. Приведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.

Возможности дальнейшего совершенствования традиционных топливоподающих систем с механическим и гидромеханическим управлением в настоящее время практически исчерпаны. Современный этап развития топливоподающей аппаратуры основывается на переходе к системам с микропроцессорным управлением процессом подачи топлива. Это позволяет повысить точность дозирования в каждом рабочем цикле дизеля и улучшить качество сгорания в цилиндрах двигателя. Основное распространение среди современных систем топливоподачи получают аккумуляторные системы типа Common Rail.

На ведущих отечественных предприятиях отрасли и в исследовательских институтах ведутся работы по созданию и организации серийного производства отечественных аккумуляторных систем типа Common Rail. Эти работы требуют тщательного расчетно-экспериментального анализа преимуществ и недостатков выполненных конструктивных решений и, в первую очередь, электрогидравлических форсунок (ЭГФ), являющихся основным исполнительным органом топливной системы.

В ЭГФ существующих типов основным элементом конструкции является управляющий клапан и его привод. В ЭГФ, выпускаемых фирмами BOSCH и SIEMENS (Германия), применяются шариковые управляющие клапаны, однако, они имеют ряд недостатков, основными из которых являются повышенный расход топлива, затрачиваемого на управление топливной форсункой, и повышенные давления топлива на управляющий клапан, что приводит к необходимости увеличения мощности применяемого электромагнита (расчетный анализ такой ЭГФ приведен в ряде работ¹).

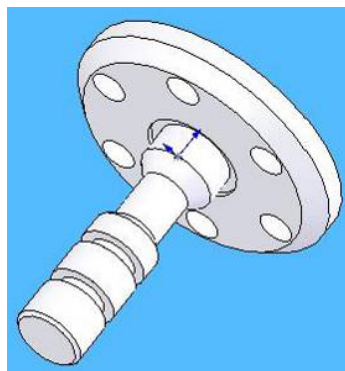


Рис. 1. Управляющий клапан ЭГФ

Одним из решений этих проблем является применение разгруженного от давления топлива управляющего клапана. При применении такого клапана указанные недостатки минимизируются. Электрогидравлические форсунки такого типа выпускаются фирмой DELPHI (США) для аккумуляторных систем DCR.

В настоящей работе приведены результаты расчетно-экспериментального исследования ЭГФ фирмы DELPHI. Рассматриваемая топливная форсунка имеет однозатворный управляющий клапан (рис. 1), выполненный с коническим затвором и поршнем, разгружающим клапан от осевых сил, создаваемых давлением топлива. Этим снижаются необходимые силы пружины, запирающей клапан, и электрического привода; благодаря этому уменьшаются габаритные размеры и инерция клапана и, что особенно важно для оптимизации конструктивного исполнения ЭГФ, имеется большая свобода выбора места установки управляющего клапана.

Работа топливной форсунки и управляющего клапана заключается в следующем (рис. 2). Топливо из аккумулятора подводится в камеру управления 12 форсунки через жиклер 13 камеры управления. При отсутствии тока на обмотке электромагнита пружина клапана 1 прижимает его к седлу 7 и разъединяет камеру 12 и дренажную полость 6 форсунки, давление топлива в камере прижимает иглу 10 к седлу распылителя.

При подаче управляющего импульса электромагнит поднимает клапан управления 5 и открывается слив в полость 6 форсунки через

¹Корнилов Г. С., Мазинг М. В., Пинский Ф. И., Голубков Л. Н. Аккумуляторная система топливоподачи как средство улучшения экономических и экологических показателей автомобильных дизелей // Экология двигателя и автомобиля: Сб. науч. тр. – М.: НАМИ, 1998. – С. 141–150.

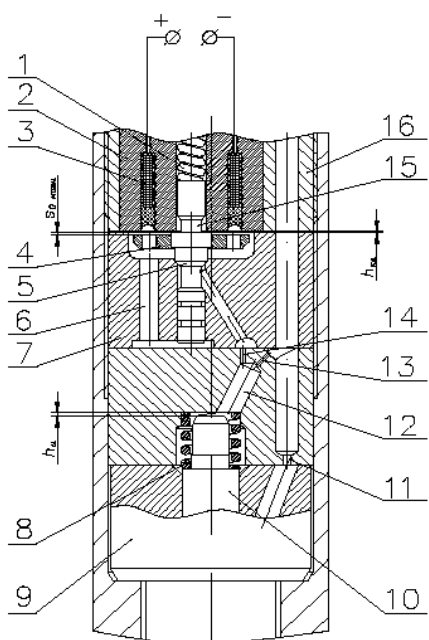


Рис. 2. Конструкция ЭГФ:

1 — пружина клапана; 2, 3, 4 — сердечник, обмотка, якорь электромагнита; 5 — управляющий клапан; 6 — дренажная полость; 7 — седло клапана; 8 — пружина иглы распылителя; 9, 10, 11 — корпус, игла и жиклер распылителя; 12 — камера управления; 13 — жиклер камеры управления; 14 — управляющий жиклер; 15 — толкатель управляющего клапана; 16 — корпус форсунки

допущения: давление топлива в аккумуляторе постоянное; движение топлива в топливопроводе одномерное; коэффициент гидравлического трения постоянный; процессы в топливной системе изотермические; плотность топлива ρ и скорость звука a в топливе имеют постоянные значения; деформации деталей под действием высокого давления малы и ими можно пренебречь; силы трения в зазорах прецизионных кинематических пар не учитываются; соударения подвижных деталей с упорами абсолютно не упругие, поскольку деформации деталей не вносят в расчет заметной погрешности; соударения подвижных деталей с упорами абсолютно неупругие и деформации деталей вследствие соударений отсутствуют; давления в акустически коротких объемах (V_k, V_ϕ, V_p , рис. 3) в текущий момент времени одинаковы во всех точках; сжимаемостью объема топлива между конусом иглы распылителя и сопловыми отверстиями, а также между жиклером 14 и управляющим клапаном 5 пренебрегаем (см. рис. 2).

управляющий жиклер 14. При этом давление в камере 12 над иглой распылителя снижается, что приводит к ее подъему и впрыскиванию топлива. Скорость снижения давления определяется разностью эффективных проходных сечений жиклеров 13 и 14.

При отключении управляющего сигнала пружина 1 возвращает клапан 5 на седло, камера 12 и дренажная полость 6 разобщаются и давление топлива в камере 12 повышается до уровня давления в топливном аккумуляторе. Суммарное давление топлива и пружины, действующей на иглу распылителя сверху, превышает давление топлива снизу, что приводит к посадке иглы и окончанию впрыскивания топлива.

Цикловая подача топлива и фаза впрыскивания определяются продолжительностью и фазами открытия управляющего клапана 5.

При построении математической модели и расчетном анализе аккумуляторной топливной системы (АТС) данной ЭГФ приняты следующие

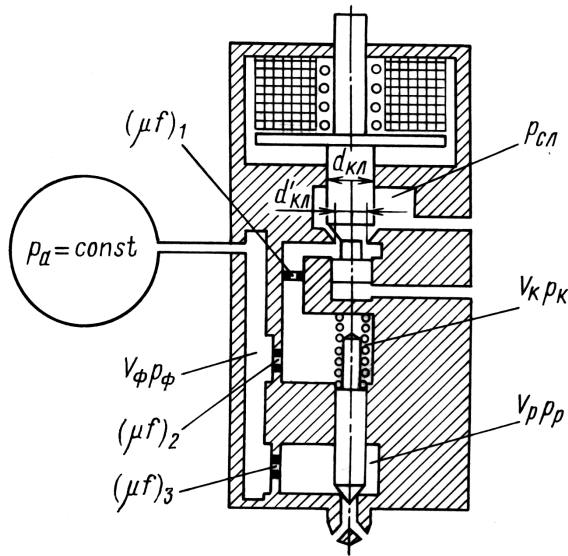


Рис. 3. Расчетная схема АТС с форсункой, имеющей разгруженный от давления топлива управляющий клапан

Непосредственно при расчете вводим следующие ограничения.

При $y \leq 0$ и $F_{и}^{\Sigma} < 0$ принимаем $y = 0$ и $c_{и} = 0$; при $y \geq y_{\max}$ и $F_{и}^{\Sigma} > 0$ принимаем $y = y_{\max}$ и $c_{и} = 0$, где $c_{и}$ — скорость подъема иглы форсунки; y — текущий подъем иглы форсунки; y_{\max} — максимальный подъем иглы форсунки; $F_{и}^{\Sigma}$ — суммарная сила, действующая на иглу форсунки.

При $h_{кл} \leq 0$ и $F_{кл}^{\Sigma} < 0$ принимаем $h_{кл} = 0$ и $c_{кл} = 0$; при $h_{кл} \geq h_{кл \max}$ и $F_{кл}^{\Sigma} > 0$ принимаем $h_{кл} = h_{кл \max}$ и $c_{кл} = 0$, где $c_{кл}$ — скорость движения управляющего клапана; $h_{кл}$ — текущий подъем клапана; $h_{кл \max}$ — максимальный подъем клапана; $F_{кл}^{\Sigma}$ — суммарная сила, действующая на управляющий клапан.

Расчетная схема АТС с топливной форсункой с разгруженным от давления топлива управляющим клапаном приведена на рис. 3.

Уравнения неустановившегося движения вязкой сжимаемой жидкости с учетом указанных допущений о постоянных значениях плотности топлива ρ и скорости звука a в топливе, пренебрегая конвективными членами уравнений, можно записать в виде системы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial \tau} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2kc = 0; \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho \frac{\partial c}{\partial x} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Первое уравнение системы (1) — это уравнение движения, представляющее собой выражение закона сохранения импульсов для одномерного неустановившегося движения вязкой жидкости, второе уравнение — уравнение неразрывности, выражающее закон сохранения массы.

Неустановившееся движение топлива в топливopоводе моделируется с учетом прямых и обратных волн давления, передвигающихся навстречу друг другу со скоростью, равной скорости звука. Величину $F(\tau - L/a)$ для прямой волны, прибывающей к форсунке, и $W(\tau)$ — для обратной, прибывающей к топливному аккумулятору, умножают на величину $e^{-k(L/a)}$, учитывающую потери на гидравлическое трение. Здесь L — длина топливopовода.

Уравнение граничных условий во входном сечении топливopовода (при $p_0 = p_a$) преобразуется в простое выражение

$$F(\tau) = p_a - p_0 + W(\tau)e^{-kL/a} = W(\tau)e^{-kL/a}.$$

В выходном сечении топливopовода требуется вычислить скорость топлива c и величину $W(\tau - L/a)$ для обратной волны

$$c = \frac{1}{a\rho} [p_0 - p_\phi + 2F(\tau - L/a)e^{-kL/a}];$$

$$W(\tau + L/a) = p_0 - p_\phi + F(\tau - L/a)e^{-kL/a},$$

где p_ϕ — давление в топливной форсунке, определяемое с помощью системы уравнений граничных условий, которые описывают процессы, протекающие в ЭГФ:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_\phi}{dt} &= \frac{1}{aV_\phi} \left(f_\tau \frac{1}{a\rho} \left(p_0 - p_\phi + 2F \left(t - \frac{L}{a} \right) e^{-k\frac{L}{a}} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \sigma_2 (\mu f)_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_\phi - p_k|} - \sigma_3 (\mu f)_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_\phi - p_p|} \right); \\ \frac{dp_p}{dt} &= \frac{1}{aV_p} \left(\sigma_3 (\mu f)_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_\phi - p_p|} - (\mu f)_\phi \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_p - p_\Pi|} - c_\Pi f_\Pi \right); \\ \frac{dp_k}{dt} &= \frac{1}{aV_k} \left(\sigma_2 (\mu f)_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_\phi - p_k|} - (\mu f)_{\Sigma_{кл}} \sqrt{\frac{2}{\rho} |p_\phi - p_{сл}|} + c_\Pi f_\Pi \right); \\ \frac{dc_\Pi}{dt} &= \frac{1}{M_\Pi} ((f_\Pi - f'_\Pi) (p_p - p_{p0}) + f'_\Pi p'_p - \delta_\Pi y - f_\Pi p_k); \\ \frac{dy}{dt} &= c_\Pi; \\ \frac{dc_{кл}}{dt} &= \frac{1}{M_{кл}} \left(F_{эм} - F_{пр0} - \delta_{кл} h_{кл} + \sigma_{кл} (f_{кл} - f'_{кл}) \frac{p'_k + p_{сл}}{2} \right); \\ \frac{dh_{кл}}{dt} &= c_{кл}, \end{aligned} \right\} (2)$$

где V_ϕ , p_ϕ и V_p , p_p — объем и давление в полостях форсунки и распылителя; V_k , p_k — объем и давление в полости управления; p_Π — давление в цилиндре двигателя; p'_p — давление топлива в полости между конусом иглы и сопловыми отверстиями распылителя; p'_k — давление

топлива в полости управления, действующее перпендикулярно; L — длина топливопровода высокого давления от топливного аккумулятора до форсунки; p_0 — начальное давление топлива в топливопроводе высокого давления; $p_{\text{сл}}$ — давление топлива в полости слива форсунки; $(\mu f)_1$, $(\mu f)_2$ и $(\mu f)_3$ — эффективные проходные сечения жиклеров 11, 13 и 14 (см. рис. 2); $(\mu f)_\phi$ — эффективное проходное сечение форсунки; $(\mu f)_{\Sigma\text{кл}}$ — суммарное эффективное проходное сечение управляющего клапана; $M_{\text{и}}$, $f_{\text{и}}$ — масса иглы распылителя и площадь его поперечного сечения; $M_{\text{кл}}$, $f_{\text{кл}}$ — масса и площадь клапана; $F_{\text{эм}}$ — сила электромагнита; $F_{\text{пр}0}$ — начальная сила пружины клапана; $\delta_{\text{и}}$ и $\delta_{\text{кл}}$ — жесткость пружины иглы и клапана.

В системе уравнений (2) первые три представляют собой уравнения объемного баланса топлива в полостях форсунки V_ϕ , V_p , V_k соответственно. Следующие четыре уравнения являются уравнениями динамического равновесия иглы распылителя форсунки и управляющего электромагнитного клапана и связанных с ними подвижных частей.

Сила электромагнита $F_{\text{эм}}$ рассчитывается по формулам:

$$F_{\text{эм}} = \frac{\tau}{\Delta\tau} \left(\frac{a}{b + (h_{\text{max}} - h_{\text{кл}})} \right)$$

при $\tau \leq \Delta\tau$;

$$F_{\text{эм}} = \left(\frac{a}{b + (h_{\text{max}} - h_{\text{кл}})} \right)$$

при $\tau > \Delta\tau$; здесь τ — текущее значение времени; $\Delta\tau$ — время нарастания тяговой силы электромагнита без учета ее зависимости от размера магнитного зазора ($h_{\text{max}} - h$); h_{max} — максимальный ход управляющего клапана; a и b — постоянные электромагнита.

Ступенчатая функция $\sigma_2 = +1$ при выполнении условия $p_\phi \geq p_k$ и $\sigma_2 = -1$ при условии $p_\phi < p_k$. Ступенчатая функция $\sigma_3 = +1$ при $p_\phi \geq p_p$ и $\sigma_3 = -1$ при условии $p_\phi < p_p$.

Текущее эффективное проходное сечение форсунки $(\mu f)_\phi$ рассчитывается с учетом его изменения в зависимости от положения иглы распылителя.

Суммарное эффективное проходное сечение через жиклер 14 и управляющий клапан

$$(\mu f)_{\Sigma\text{кл}} = \frac{(\mu f)_1 \mu_k f_{\text{ш}}}{\sqrt{(\mu f)_1^2 + (\mu_k f_{\text{ш}})^2}}.$$

Давление в распылителе p'_p рассчитывается по формуле

$$p'_p = \left(\frac{(\mu f)_\phi}{(\mu f)_c} \right)^2 (p_p - p_{\text{ц}}) + p_{\text{ц}};$$

давление в камере управления p'_k — по формуле

$$p'_k = \frac{(\mu f)_1^2 p_k + (\mu_k f_{ш})^2 p_{сл}}{(\mu f)_1^2 + (\mu_k f_{ш})^2}.$$

Новизна данной математической модели заключается в ее уточнении для ЭГФ с разгруженным от давления топлива управляющим клапаном.

Программа гидродинамического расчета данной топливной форсунки разработана и отлажена для персонального компьютера IBM PC на языке программирования C++.

Программа расчета составлена из условий обеспечения точности расчета и уменьшения шага расчета в зависимости от продолжительности управляющего импульса. В состав программы входят блоки расчетов интегральной и дифференциальной характеристик топливоподачи, давлений в ЭГФ, подъема иглы распылителя и управляющего клапана а также их скоростей. Следует отметить, что программа позволяет выполнять расчеты предварительных впрысков топливной форсунки, а также последующих после основного впрысков топлива, что, в свою очередь, приближает данные расчетного анализа ЭГФ к технически необходимым характеристикам топливоподачи.

Программа экспериментальных исследований ЭГФ включала в себя определение следующих параметров:

- требуемых характеристик электромагнита;
- характеристик дозирования топлива;
- гидравлического КПД форсунки;
- динамических параметров работы топливной форсунки;
- расходных характеристик форсунки.

Испытания проводились на аккумуляторной установке, выполненной на базе регулировочного стенда Friedmann&Maier A1027.

Аккумуляторная установка включает в себя ТНВД на базе “Компакт-40”, аккумулятор высокого давления объемом 700 см³ с регулируемым клапаном—ограничителем давления и управляющий программно-аппаратный комплекс EControl v.3 разработки фирмы EControl (Ярославль).

Форсунка соединялась с аккумулятором высокого давления топливопроводом высокого давления длиной 435 мм с увеличенным до 4 мм внутренним диаметром. Это необходимо для снижения сопротивления в трубопроводе.

Генерирование электрических управляющих сигналов, а также осциллографирование динамических параметров работы форсунки осуществлялись с помощью управляющего комплекса EControl v.3.

Параметры работы форсунки исследовались в диапазонах давлений 30...120 МПа и цикловых подач 0...120 мм³. Давление топлива в аккумуляторе поддерживалось изменением производительности ТНВД.

Давление топлива на входе в насос 0,08...0,1 МПа, температура 18...24 °С. Вязкость топлива 5,5 сСт при температуре окружающей среды $t = 20$ °С.

Силу тока в обмотке электромагнита регистрировали, измеряя падение напряжения на шунтирующем резисторе, включенном последовательно с обмоткой.

Характеристику впрыскивания определяли с помощью датчика, выполненного по схеме BOSCH, чувствительным элементом являлся пьезодатчик давления Т-2500.

Гидравлический КПД форсунки определялся как отношение расходов топлива через распылитель и форсунку.

Для минимизации случайных погрешностей и влияния электрических помех на результаты измерений при проведении осциллографирования с помощью управляющего комплекса динамические параметры определялись как средние значения по нескольким последовательно взятым циклам на установившемся режиме.

Для уменьшения влияния электрических помех на результаты испытаний осциллограммы характеристик впрыскивания аппроксимировались численным методом по формуле

$$y'_i = y_i - \sum_{j=1}^{12} a_j (y_{i+1-j} - y_{i-12}),$$

где y'_i — значение параметра y в момент времени τ_i на аппроксимированной кривой; y_i — значение параметра y в момент времени τ_i на исходной кривой; a_j — коэффициенты весоности.

Значения коэффициентов весоности a_j выбраны экспериментально для обеспечения линейного сглаживания осциллограмм.

Испытания показали, что характеристики $q_{ц} = f(\tau_{упр})$ дозирования топлива ЭГФ имеют гладкий линейный характер (рис. 4) практически на всех режимах работы форсунки.

Форма характеристики впрыскивания близка к трапецевидной. При

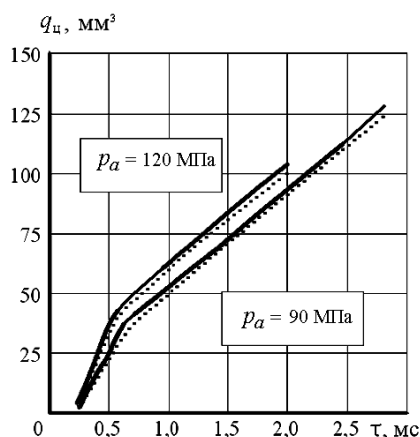


Рис. 4. Характеристика подачи топлива $q_{ц} = f(\tau)$:

— — экспериментальные значения; - - - - расчетные значения

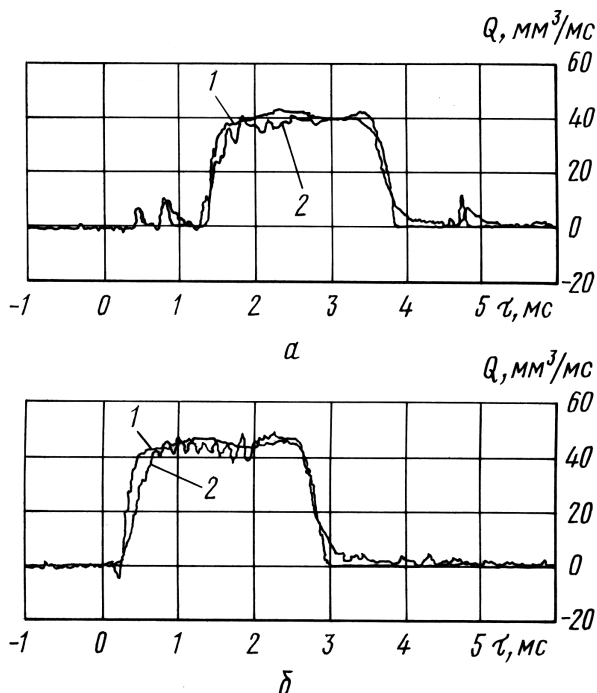


Рис. 5. Характеристика впрыскивания топлива при $p_a = 90$ МПа и $q = 104$ мм³ (а) и $p_a = 120$ МПа и $q = 97,3$ мм³ (б):

1 и 2 — расчетная и экспериментальная характеристики впрыскивания топлива

уменьшенных подачах ($q_{ц} = 0 \dots 20$ мм³) характеристики имеют треугольную форму.

На рис. 5 приведены характеристики впрыскивания топлива, видно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями цикловых подач при изменении давления в аккумуляторе от 30 до 120 МПа и диапазоне продолжительности управляющего импульса $\tau = 1,5 \dots 2,0$ мс не превышает 5,5 %, что позволяет использовать разработанную математическую модель и программу гидродинамического расчета для анализа аккумуляторных топливных систем сложных конструкций на практике.

Статья поступила в редакцию 22.12.2006

Василий Васильевич Курманов родился в 1949 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Канд. техн. наук, директор инженерно-конструкторского центра ОАО «ЯЗДА». Автор более 50 научных работ в области топливоподающей аппаратуры и тепловых машин.

V.V. Kurmanov (b. 1949) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Ph. D. (Eng.), director of engineering and constructor center — open stock company «ОАО «ЯЗДА». Author of more than 50 publications in the field of fuel supply apparatus and thermal machines.