

Д. Д. М а т и е в с к и й, А. Е. С в и с т у л а,
А. В. Е с ь к о в, Е. С. С и л а е в

ОПТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ МАССОПЕРЕНОСА ПОТОКА РАСПЫЛЕННОГО ТОПЛИВА

Исследованы процессы смесеобразования в двигателе внутреннего сгорания. Исследования проводились оптическим времяпролетным методом на экспериментальном стенде распыления топлива в атмосферных условиях. Определена скорость массопереноса порций топлива через выбранные оптические сечения потока.

Принято считать, что создание дизелей новых типов с прогрессивными технико-экономическими характеристиками, а также возможность форсирования и перевода существующих дизельных установок на тяжелые марки топлива неразрывно связаны с проблемой организации процессов сгорания, которые во многом определяют надежность и экономичность работы двигателей. Скорость химических реакций определяется локальными значениями концентраций, температур, которые, в свою очередь, связаны со скоростями движения капель топлива, следовательно, основная проблема сгорания в дизелях заключается в чрезвычайно сложном процессе смесеобразования, который сопровождается интенсивными фазовыми превращениями и межфазовым теплообменом. Аналитически исследовать данную задачу в общем виде в настоящее время не представляется возможным, а упрощения, обычно используемые при этом, приводят либо к заметному искажению исследуемого явления, либо касаются частных вопросов. Хорошо известно, что и комплексное экспериментальное изучение процессов смесеобразования, ввиду их нестационарности и быстротечности (2...8 мс), исключительно затруднено.

Необходима организация процесса смесеобразования, исключаящая неоднородность топливно-воздушной смеси. Для увеличения эффективности использования воздушного заряда цилиндра, лучшего распределения топлива по окислителю необходимо использовать специальные методы исследования развития топливной струи, взаимодействия ее с окружающей средой и стенками камеры сгорания, позволяющие установить связь показателя эффективности использования воздушного заряда цилиндра с параметрами топливной струи, геометрией камеры сгорания и др. От скорости частиц в струе зависит доля топлива, попадающая на стенки камеры сгорания и определяющая процесс догорания.

В Алтайском государственном техническом университете (АлтГТУ) на кафедре “Экспериментальная физика” совместно с кафедрой ДВС ведутся исследования и работы по созданию цифровых систем на базе интегральных мало- и среднеформатных фотодиодных структур для исследования мелкодисперсных движущихся потоков. Накоплен опыт создания быстродействующих устройств для оптической диагностики высокоскоростных двухфазных потоков детонационного напыления покрытий и импульсных дисперсных потоков распыления топлива. Для проведения исследований АлтГТУ имеет необходимую опытно-технологическую базу (топливные стенды MOTOR PAL, MIRKEZ, одноцилиндровый двигатель УК-2).

Для создания обобщенной модели фазообразования продуктов в процессах дизельного смесеобразования необходима достоверная информация о связи тонкой пространственно-скоростной и дисперсионной структуры топливной струи с динамикой цикла топливоподачи в реакционной системе. Такая информация позволит определить пути оптимизации фазового состава целевого продукта. С помощью быстродействующего инфракрасного времяпролетного устройства, разработанного в АлтГТУ, определяют скоростные характеристики импульсных потоков и регистрируют динамику изменения давления топлива в трубопроводе перед форсункой.

Поток распыленного топлива, движущийся нормально к направлению распространения струи, пронизывает световое излучение в нескольких сечениях [1]. Методика определения скорости массопереноса импульсного дисперсного потока распыления топлива сводится к однозначному определению интервала времени транспортирования дисперсного потока через сечения i и $i + 1$ одинаковых масс жидкости в произвольный момент времени впрыска t (рис. 1):

$$\int_0^t g_i(t) dt = \int_0^{t+t_{hi}} g_{i+1}(t) dt,$$

$$g_i(t) = QLn [J_i(t)],$$

где $g_i(t)$ — интенсивность капель импульсного дисперсного потока в i -м сечении в произвольный момент времени впрыска; t_{hi} — интервал времени транспортирования топлива через заданные сечения; Q — константа преобразования измерительного устройства; $J_i(t)$ — относительная интенсивность светового излучения, прошедшего через аэродисперсный поток за период развития в i -м сечении.

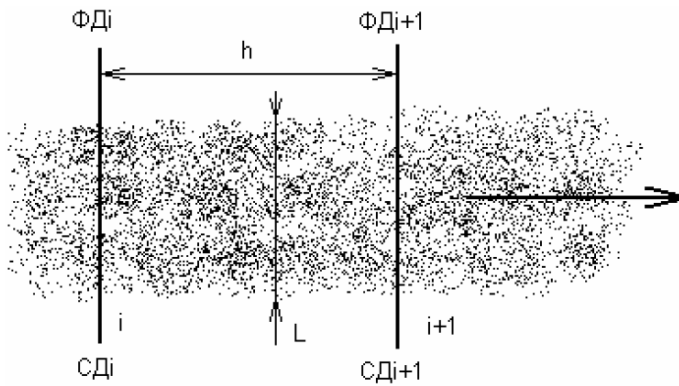


Рис. 1. Схема метода определения скоростных характеристик потока

По закону Бугера–Ламберта–Бера относительную интенсивность светового излучения, прошедшего через среду, можно представить как

$$J(t) = \frac{I(t)}{I_0} = \exp \{-\alpha n L\}, \quad (1)$$

где $I(t)$ — интенсивность светового излучения, прошедшего через импульсный дисперсный поток в произвольный момент времени впрыска; I_0 — интенсивность светового излучения в отсутствие дисперсного потока; α — оптический коэффициент импульсного дисперсного потока; n — концентрация частиц в объеме импульсного дисперсного потока, пронизанного световым излучением; L — толщина импульсного дисперсного потока в соответствующем сечении.

От значения параметра оптической толщины среды $\tau = \alpha n L$ в формуле (1) зависит вид рассеяния световой волны. Если $\tau < 0,1$, то рассеяние считается однократным, если $0,1 < \tau < 0,3$, тогда необходимо учитывать второе приближение многократного рассеяния, а если $\tau > 0,3$, тогда имеет место многократное рассеяние. В разреженных облаках, когда плотность капель мала, используют приближение однократного рассеяния. Полагаем, что очень небольшое число капель находится на пути световой волны и рассеянная волна определяется однократным рассеянием на каплях. При увеличении плотности капель необходимо учитывать затухание вдоль пути распространения волны из-за поглощения и рассеяния. Здесь используют первое приближение многократного рассеяния. При распространении световых монохроматических волн в случайных средах с невысокой плотностью капель используют либо приближение однократного рассеяния, либо теорию многократного рассеяния в первом приближении. С увеличением плотности среды случайных рассеивателей возрастает роль некогерентной интенсивности рассеянного излучения по сравнению с когерентной при малой плотности капель, и начинают сказываться эф-

факты многократного рассеяния. Анализируя поведение параметра τ в среде с переменной плотностью, каковой и является поток распыляемой жидкости (дизельного топлива), можно найти геометрическую область, в которой будет применима теория однократного или многократного рассеяния в первом приближении [2].

По мере удаления от распылителя в направлении оси топливного потока оптическая плотность среды будет увеличиваться, а затем — уменьшаться от некоторой максимальной величины τ до нуля с неявным максимумом на расстоянии 50 мм от отверстия распылителя, где $\tau < 0,3$ [3]. Оценка осуществлялась при условии впрыска топлива в воздух с атмосферным давлением. На расстоянии свыше 50 мм от отверстия распылителя, где вступают в силу соотношения концентраций и скоростей для основной зоны развития потока, световая волна, нормально пронизывающая тело потока, испытывает однократное преломление, что позволяет оценить концентрацию капель в анализируемом объеме потока.

Интенсивность $g_i(t)$ и концентрация $n_i(t)$ частиц в анализируемом объеме импульсного дисперсного потока, пронизанного световым излучением, в i -м сечении в момент времени t равны соответственно

$$g_i(t) = \frac{N_i(t)}{t_0} \quad \text{и} \quad n_i(t) = \frac{N_i(t)}{V},$$

где $N_i(t)$ — количество частиц, находящихся в объеме импульсного дисперсного потока, пронизанного световым излучением, в произвольный момент времени впрыска в i -м сечении; V — объем потока, пронизанного световым излучением.

После преобразований получим

$$n_i(t) = g_i(t) \frac{t_0}{V}. \quad (2)$$

Выходной сигнал $U_i(t)$ i -го фотодатчика имеет вид

$$U_i(t) = SI_i(t), \quad (3)$$

где S — чувствительность фотодатчика.

Тогда $g_i(t)$ — интенсивность частиц в анализируемом объеме V импульсного дисперсного потока, пронизанного световым излучением, находится по величине относительной интенсивности светового излучения, прошедшего через импульсный дисперсный поток, из выражения:

$$\frac{U_i(t)}{U_0} = \frac{SI_i(t)}{SI_0} = J_i(t) = \exp \left\{ -\frac{\alpha L g_i(t) t_0}{V} \right\} = \exp \{ -Q g_i(t) \},$$

где U_0 — выходной сигнал фотодатчика в отсутствие импульсного дисперсного потока; Q — константа преобразования измерительного устройства.

Масса M_i импульсного дисперсного потока, прошедшая через i -е сечение потока за время t_i , равна

$$M_i = \int_0^{t_i} g_i(t) dt.$$

При малых базовых расстояниях h толщина L импульсного дисперсного потока в i -м сечении приблизительно равна толщине этого потока в сечении $i + 1$. Частицы импульсного дисперсного потока, прошедшие через i -е сечение, обязательно проходят через $(i + 1)$ -е сечение за интервал времени t_{hi} транспортирования, т.е. через сечения i и $i + 1$ пройдет одинаковая масса потока:

$$M_i = M_{i+1}.$$

Условие равенства порций вещества импульсного дисперсного потока, прошедших через сечения i и $i + 1$, преобразуется к виду

$$\int_0^{t_i} g_i(t) dt = \int_0^{t_{i+1}} g_{i+1}(t) dt.$$

Проведя несложные подстановки в приведенные формулы, получим выражение для определения интервала времени t_{hi} транспортирования по величине сигналов фотодатчиков, расположенных в соответствующих сечениях:

$$\int_0^{t_i} LnU_i(t) dt = \int_0^{t_{i+1}} LnU_{i+1}(t) dt,$$

$$t_{hi} = t_i - t_{i+1}.$$

Таким образом, для произвольного момента времени впрыска интервал времени транспортирования t_{hi} импульсного дисперсного потока через соседние сечения i и $i + 1$ находят из равенства массы вещества импульсного дисперсного потока M_i , перенесенной через оба сечения при малых базовых расстояниях. Скорость импульсного дисперсного потока $v_i(t)$ определяют из отношения базового расстояния между сечениями i и $i + 1$ ко времени транспортирования потока через эти сечения в произвольный момент времени впрыска по формуле

$$v_i(t) = \frac{h}{t_{hi}}.$$

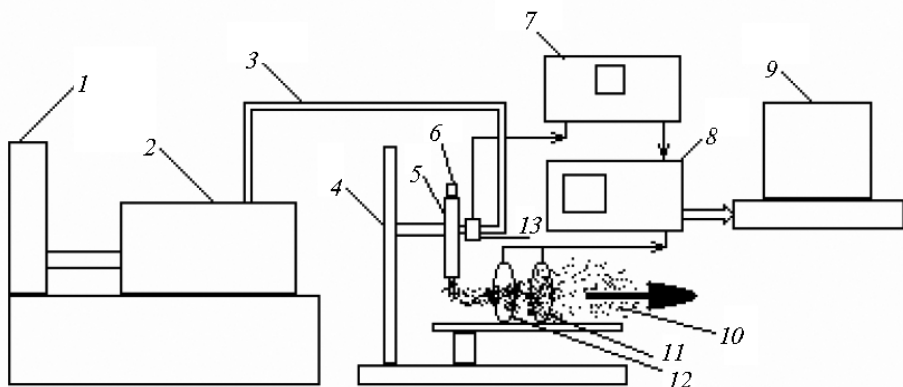


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

В результате определяют скорость переноса массы потока в произвольный момент времени между любыми двумя сечениями, расположенными на малом расстоянии друг от друга. Время развития потока, по которому регистрируют относительную интенсивность прямо прошедшего излучения, состоит из H интервалов t_0 , на каждом из которых определяется скорость переноса массы потока. Отсюда можно получить гистограмму распределения скоростей частиц импульсного дисперсного потока между любыми двумя сечениями за время его развития.

На базе топливного стенда MIRKEZ разработан и апробирован измерительный стенд для получения скоростных характеристик топливного потока. Устройство может быть адаптировано под любой стенд для испытаний и регулировки топливной аппаратуры как с прерывистой, так и с непрерывной подачей топлива.

На стенде MIRKEZ 1 (рис. 2) установлен насос 2 высокого давления. Топливо под давлением по трубопроводу 3 поступает в форсунку 5, установленную на штативе 4. Распылитель 6 форсунки генерирует дисперсный топливный поток 10 через сечения 11 и 12. Сечение состоит из кольца, в котором расположены светоизлучатель и фотодатчик. С фотодатчика электрический сигнал поступает на цифровой осциллограф 8 (С9-8), и далее в цифровой форме в ЭВМ 9. Параллельно осуществляется регистрация динамики изменения давления тензодатчиком 13, сигнал с которого обрабатывается на специальном тензометрическом усилителе 7 (УТ4-1) и подается на вход цифрового осциллографа 8. С осциллографа сигналы передаются в ЭВМ 9 для дальнейшей обработки и получения результатов. Работа осциллографа синхронизируется от вала топливного насоса 2, установленного на топливный стенд [4]. На рис. 2 также отображен индуктивный датчик хода иглы распылителя 6, который подключался к другому каналу тен-

зометрического усилителя 7. Одновременная регистрация по времени давления в трубопроводе перед форсункой и оптической интенсивности излучения, прошедшего через топливно-воздушный поток, позволяет получить более полную информацию о дисперсном топливном потоке.

В качестве источников излучения в оптической головке применяются светодиоды 3Л108А на основе Ga с максимальным током 100 мА и максимальной мощностью 1,5 мВт на длине волны $\lambda_{\max} = 0,94$ мкм. Светодиод выбирали, исходя из значения корреляционного коэффициента согласования спектральных характеристик излучателя и приемника k_λ [5]. Оптимальным является использование фотодиода на основе Si и светодиода на основе GaAs, для которых $k_\lambda = 0,91$.

На рис. 3 приведены графики изменения оптической плотности топливного потока в сечениях на расстоянии 5 и 10,3 см от носика распылителя по его оси с пятью сопловыми отверстиями $d = 0,25$ мм, установленного на форсунку ФД-22. Опыты проводили при атмосферных условиях (впрыск в открытое пространство), частота вращения вала топливного насоса — 500 мин^{-1} , расход топлива — $100 \text{ мм}^3/\text{цикл}$. По оси абсцисс указано время в мс, по оси ординат — относительная оптическая плотность в градациях АЦП. Из рисунка видно, что время развития потока в первом сечении составляет 6 мс, а во втором — более 8 мс.

Выбор оптимального расстояния h между сечениями (см. рис. 1) определяется тем, что при малом h относительно некоторого расстояния, рассеянное излучение от светодиода в первом сечении попадает в поле зрения и регистрируется фотодиодом во втором сечении. Для уменьшения влияния этого эффекта в оптической системе светодиодов используют диафрагму, ограничивающую диаграмму направленности излучения. С другой стороны, чрезмерное увеличение расстояния h приводит к заметному изменению параметров топливно-воздушной струи, выходящему за рамки оговоренного допущения равенства масс топлива в сечениях. При экспериментах с впрыском топлива в атмосферу расстояние изменялось в пределах от 10 до 53 мм.

Из графиков на рис. 3 видно, что начало впрыска сопровождается резким (80 градаций за 200 мкс) уменьшением интенсивности световой волны, регистрируемой фотодиодом. В результате наблюдается подъем напряжения на выходе схемы обработки сигнала от фотодиода из-за прохождения уплотненной головной части струи с высокой концентрацией капель топлива. Спад же сигнала в конце впрыска относительно плавный (80 градаций за 2 мс), что объясняется процессом распада жидкой струи и образованием шлейфа из мелких капель, следующих за основной массой потока [6]. После пролета основной части

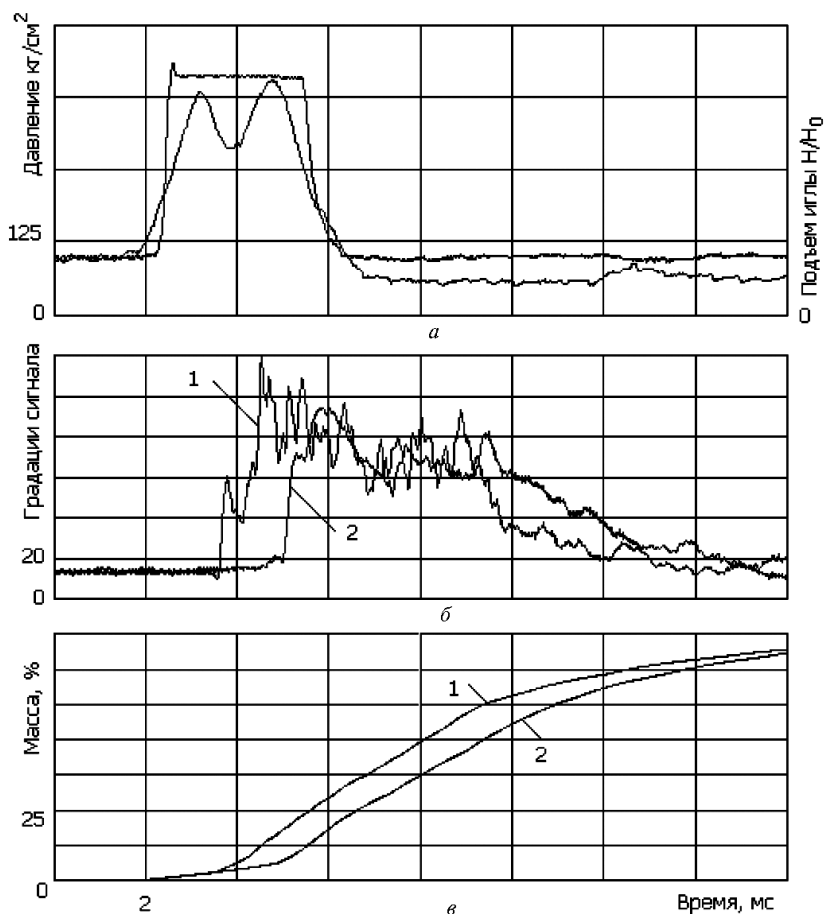


Рис. 3. Зависимость динамики работы распылителя и характеристики топливного потока от времени:

a — изменение давления в трубопроводе перед форсункой и характеристика подъема иглы распылителя; *b* — изменение оптической плотности топливного потока в сечениях на расстоянии 5 и 10,3 см от носика распылителя; *c* — изменение массы потока в первом и во втором сечениях

потока через сечения мелкая фракция топлива в хвосте потока движется с относительно малой скоростью и образует топливно-воздушную взвесь, остающуюся в диагностической камере. Избавиться от этого недостатка можно, продувая диагностическую камеру с оптическими сечениями воздухом с минимальной скоростью топливного потока. Генерация топливного потока на стенде — это периодический процесс, к началу которого в диагностической камере не должно находиться остатков взвеси от предыдущего впрыска. При максимальной частоте вращения вала топливного насоса 1000 мин^{-1} время между впрысками составит 60 мс и этого времени достаточно для продува воздухом объема ($\approx 50 \text{ см}^3$) диагностической камеры, при этом скорость воздуха составит 3,5 м/с.

Регистрация динамики давления топлива в трубопроводе перед форсункой позволит объяснить получаемые результаты распределения скоростей топливных масс в потоке. На рис. 3, *a* приведен график изменения давления в трубопроводе перед форсункой по времени. График имеет два максимума, что свидетельствует о сложном характере впрыска — с провалом давления и возможным “подвпрыском” при частоте 500 мин^{-1} вращения вала топливного насоса. С увеличением частоты высота второго максимума уменьшается и при 750 мин^{-1} провал давления исчезает.

Исследование скорости топливного потока по приведенной методике по зарегистрированному изменению интенсивности световой волны дает интегральную характеристику впрыска — изменение массы потока, проходящего через выбранные сечения (см. рис. 3, *в*).

Из интегральной характеристики определяют время задержек порций масс топлива, выраженных в %, и, зная базовое расстояние, строят гистограмму распределения скоростей масс топливного потока (рис. 4).

Из рисунка видно, что скорость частиц в зоне измерительных сечений имеет сложный характер распределения. Основная масса частиц, вероятно, находящихся в головной части топливного потока, встречая сопротивление неподвижной среды, движется со скоростью 10...20 м/с. Частицы топлива, находящиеся в шлейфе потока, могут двигаться с большими скоростями, но масса их намного меньше. Большая масса частиц в головной части свидетельствует о переобогащении этой зоны топливом. Повышение давления впрыска, мероприятия по дополнительному диспергированию топлива — все это позволяет “сгладить” гистограмму распределения, уменьшить концентрацию частиц в головной части. Всплеск скорости до 100 м/с предположительно может определяться пульсацией потока.

Распределение массы потока по скорости будет зависеть от параметров истечения потока из соплового отверстия, от расстояния до

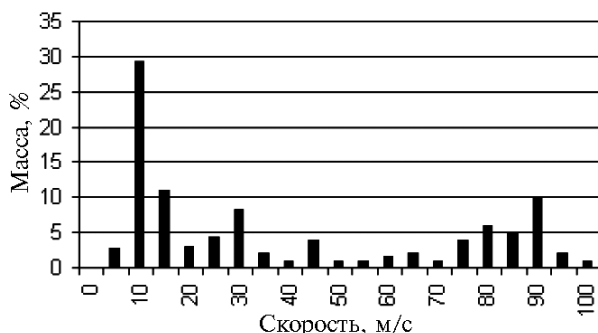


Рис. 4. Гистограмма распределения масс топлива в потоке по скоростям

измерительных сечений, от свойств жидкости и т.д. При соблюдении режимных параметров неизменными, можно определить влияние конструктивных факторов распылителя (отклонение от эталона в процессе массового производства).

Приведенная методика определения скоростных характеристик массопереноса топливного потока дает предпосылки к созданию стенда для комплексной диагностики топливных распылителей в условиях массового производства с целью разбить их на группы однотипных параметров [6]. Такой подход предполагает принятие производственного эталона — распылитель и топливный насос с наилучшей скоростной характеристикой впрыска.

Созданный экспериментальный стенд позволяет исследовать процесс распыления топлива, регистрировать скорость массопереноса и динамику изменения давления в трубопроводе перед форсункой в процессе реального времени и при различных частотах вращения вала топливного насоса. На кафедре экспериментальной физики АлтГТУ имеется необходимая документация по стенду для определения скоростных характеристик топливного потока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евстигнеев В. В., Гуляев П. Ю., Еськов А. В. Способ определения скорости импульсного аэродисперсного потока. Патент на изобретение № 2147749.
2. Г. В а н д е Х ю л с т. Рассеяние света малыми частицами. – М.: ИЛ, 1961. – 536 с.
3. Семидетнов Н. В. Анализ характеристик топливного факела как объекта исследования лазерным доплеровским методом // Двигателестроение. – 1983. – № 12. – С. 5–8.
4. Еськов А. В., Евстигнеев В. В., Гончаров В. Д., Ламов П. В. Оптический контроль процесса формирования топливного потока при впрыске // Информационный листок № 02-088-02 АЦНТИ. Изд-во оперативной полиграфии Алтайского ЦНТИ, 2002.
5. С х е м ы автоматики с фоточувствительными и излучающими полупроводниковыми приборами. – М.: Энергия, 1972. – 78 с.
6. С в и с т у л а А. Е., М а т и е в с к и й Д. Д., Гуляев П. Ю., Еськов А. В. Экспериментальное исследование характеристик топливных струй дизельных форсунок // Двигателестроение. – № 1. – 1999. – С. 29–31.

Статья поступила в редакцию 1.08.2004

Дмитрий Дмитриевич Матиевский родился в 1940 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Двигатели внутреннего сгорания”, проректор по научной работе Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Автор более 200 научных работ в области совершенствования рабочего процесса для создания экономичных и малотоксичных форсированных дизелей.

D.D. Matievsky (b.1940), D. Sc. (Eng.), professor of “Internal Combustion Engines” department, pro-rector for science of the Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov. Author of over 200 publications in the field of modernization of operation process to create an efficient and low-toxic forced diesel engine.

Андрей Евгеньевич Свистула — канд. техн. наук., доцент кафедры ДВС АлтГТУ.

A.Ye. Svistula — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Internal Combustion Engines” department of the Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov.

Александр Васильевич Еськов — канд. техн. наук., доцент кафедры экспериментальной физики АлтГТУ.

A.V. Yeskov — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Experimental Physics” department of the Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov.

Евгений Сергеевич Силаев — аспирант кафедры экспериментальной физики АлтГТУ.

Ye.S. Silaev — post-graduate of “Experimental Physics” department of the Altai State Technical University n.a. I.I. Polzunov.

ЖУРНАЛ “ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА имени Н.Э. БАУМАНА”

В журнале публикуются наиболее значимые результаты фундаментальных и прикладных исследований и совместных разработок, выполненных в МГТУ имени Н.Э. Баумана и других научных и промышленных организациях.

Журнал “Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана” в соответствии с постановлением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования Российской Федерации включен в перечень периодических и научно-технических изданий, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал издается в трех сериях: “Приборостроение”, “Машиностроение”, “Естественные науки” — с периодичностью 12 номеров в год.

Подписка по каталогу “Газеты, журналы” агентства “Роспечать”

Индекс	Наименование серии	Объем выпуска	Подписная цена (руб.)	
		Полугодие	3 мес.	6 мес.
72781	“Машиностроение”	2	250	500
72783	“Приборостроение”	2	250	500
79982	“Естественные науки”	2	250	500

Подписывайтесь и публикуйтесь!

Адрес редакции: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Тел.: (495) 263-62-60.

Факс: (495) 265-42-98; 263-67-07.

E-mail: press@bmstu.ru