



Георгий Александрович Щеглов родился в 1972 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1996 г. Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Аэрокосмические системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области динамики и прочности конструкций аэрокосмических систем, вычислительных методов в гидроупругости.

G.A. Shcheglov (b. 1972) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1996. Ph. D. (Phys.-Math.), assoc. professor of “Aerospace Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of dynamics and strength of structures of aerospace systems, computation methods in hydro-elasticity.

---

УДК 621.436.052

Ю. А. Гришин, В. А. Зенкин,  
В. С. Рогов

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗООБМЕНА ДВУХТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Проведено численное моделирование нестационарного течения в расчетных областях с подвижными границами. Составлен соответствующий программный комплекс трехмерного моделирования, и выполнены расчеты газообмена двухтактных двигателей, которые показали хорошее согласование с результатами соответствующих экспериментов.*

**Ключевые слова:** метод крупных частиц, подвижная граница, распад разрыва, газообмен.

Газообмен — важнейшая составная часть рабочего процесса поршневых двигателей. Скорости потоков, покидающих цилиндры при выпуске, поля скоростей и давление в цилиндре, полученные в результате впуска, являются определяющими факторами для оценки коэффициентов очистки, наполнения, продувки, вихревого числа, величины обратного заброса на впуск и, как следствие, организации рабочего процесса в цилиндрах. Поэтому корректное выполнение расчетов газообмена необходимо для достоверного определения мощности, удельного расхода топлива, дымности и токсичности отработавших газов и других важнейших эксплуатационных и экологических показателей двигателя. Особенно сложный пространственный нестационарный характер имеют процессы газообмена в двухтактных двигателях [1].

Одним из наиболее удобных и эффективных численных методов для расчетного анализа пространственных нестационарных потоков является метод крупных частиц (МКЧ) [1–3] и его неявная модификация, повышающая скорость и точность вычислений [4–7].

Следует отметить, что авторские расчетные соотношения конечно-разностных ячеек всех численных методов, в том числе и МКЧ, записаны для ячеек фиксированной формы, т.е. могут быть применены только к расчетным областям неизменной конфигурации. При моделировании же нестационарного газообмена в поршневых двигателях совершенно необходимо учитывать изменение проходного сечения органов впуска и выпуска и, что особенно важно, движение поршней, в результате чего изменяются форма и объем расчетной области на каждом расчетном шаге. Объем цилиндра в дизельных двигателях изменяется более чем на порядок.

В работах [1, 3] отмечена необходимость решения задачи о подвижных границах, предложены расчетные соотношения, однако они требуют определенного уточнения, в частности, с точки зрения интегральных законов сохранения и возможности применения дробных ячеек, необходимых в МКЧ для реализации расчета в областях со сложной конфигурацией.

Рассмотрим находящуюся на границе расчетной области  $i$ -ю ячейку, объемом  $q_i$ , из слоя ячеек, расположенных вдоль оси координат  $X$  (рис. 1). Если в начальный момент ячейка была целой, то  $q_i = \Delta x \Delta y \Delta z$ . Если же граница отсекает от целой ячейки фрагмент сложной формы, то можно применять аппарат дробных ячеек, описанный в работе [2]. Однако при большой густоте разбивки расчетной сетки отсекаемую часть всегда можно представить в виде параллелепипеда, и тогда  $q_i = \Delta x_i \Delta y \Delta z$ , где  $\Delta x_i < \Delta x$ . Пусть вследствие расчетного шага  $\Delta t$  граница сдвигается по направлению  $X$  со скоростью  $u_r$  на величину  $u_r \Delta t$ . В результате объем  $i$ -й ячейки изменится до величины

$$\bar{q}_i = q_i - u_r \Delta t \Delta y \Delta z. \quad (1)$$

Для определения давления  $p_r$  на границе воспользуемся соотношением между параметрами на фронте элементарной простой волны, получающейся в результате распада произвольного разрыва при начале движения границы со скоростью  $u_r$  или, иначе, — из формулы сохранения инварианта Римана  $r^-$  при переходе через фронт этой волны [8, 9]:

$$dr^- = dp - a \rho du = 0,$$

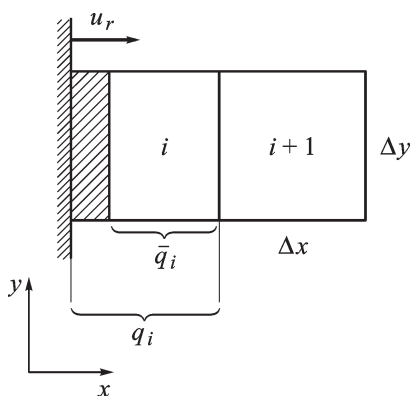


Рис. 1. К расчету предварительного этапа МКЧ

где  $a = \sqrt{kp/\rho}$  — скорость звука,  $\rho$  — плотность. Отсюда в конечных разностях можно записать

$$p_\Gamma = p_i + a_i \rho_i (u_\Gamma - u_i). \quad (2)$$

Теперь нужно определить параметры после перемещения границы. При этом очевидно должны выполняться интегральные законы сохранения, записанные для одномерного представления [8, 9], поскольку перемещение и изменение параметров происходит вдоль координаты  $X$ :

$$\oint (\rho dx - \rho u dt) = 0; \quad (3)$$

$$\oint [\rho u dx - (p + \rho u^2) dt] = 0; \quad (4)$$

$$\oint \left[ \rho \left( e + \frac{u^2}{2} \right) dx - \rho u \left( e + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) dt \right] = 0; \quad (5)$$

здесь  $e$  — удельная внутренняя энергия. Для калорически совершенного газа  $e = p/\rho(k-1)$ .

Используя конечно-разностное представление и учитывая обозначения (1), из уравнения сохранения массы (3) для плотности в ячейке после изменения объема получаем новое значение:

$$\bar{\rho}_i = \rho_i \frac{q_i}{\bar{q}_i}. \quad (6)$$

Уравнение сохранения количества движения (4) в конечных разностях преобразуется к виду

$$\bar{\rho}_i \bar{q}_i \bar{u}_i = \rho_i q_i u_i + (p_\Gamma - p_i) \Delta t \Delta y \Delta z, \quad (7)$$

из которого можно выразить значение скорости  $\bar{u}_i$  после перемещения границы:

$$\bar{u}_i = \frac{\rho_i q_i u_i}{\bar{\rho}_i \bar{q}_i} + \frac{p_\Gamma - p_i}{\bar{\rho}_i \bar{q}_i} \Delta t \Delta y \Delta z. \quad (8)$$

В уравнениях (7) и (8) для правой границы ячейки принимается начальное значение давления  $p_i$ , поскольку пока на этой границе, т.е. за шаг  $\Delta t$ , никаких процессов не происходит; взаимодействие с ячейкой  $i+1$  будет рассмотрено на последующих этапах расчета.

Теперь из уравнения сохранения энергии (5) можно получить простую формулу для определения полной энергии  $\bar{E}_i$  после смещения границы. Параметр полная энергия, равная произведению удельной энергии на массу,  $E = (e + u^2/2) M = (e + u^2/2) \rho q$  используется в алгоритме МКЧ. Значение полной энергии изменяется только в результате работы, совершаемой границей  $\Gamma$ :

$$\bar{E}_i = E_i + p_\Gamma (q_i - \bar{q}_i). \quad (9)$$

Совокупность соотношений (1), (2), (6), (8) и (9) представляет собой “предварительный” этап, позволяющий учесть изменение параметров в ячейке, прилегающей к движущейся границе расчетной области. За этим этапом следуют стандартные явные эйлеров и лагранжев этапы МКЧ [1–3] или неявная модификация [4–7].

Отметим также, что для организации рациональной процедуры численного расчета следует назначать некоторое

относительное предельное значение объема  $\bar{q}_i$ , например 0,25, которое можно рассматривать как отдельную ячейку. Если же в результате перемещения границы относительный объем окажется меньше 0,25,  $i$ -ю ячейку следует присоединить к  $(i + 1)$ -й ячейке.

С помощью описанной модификации МКЧ были выполнены расчеты газообмена нескольких двухтактных комбинированных силовых установок.

На рис. 2 показан разрез малооборотного двухтактного судового двигателя 6ДКРН 76/155 фирмы Зульцер с петлевой продувкой и наддувом. Давление и температура наддувочного воздуха  $p_k = 2,22$  бар,  $T_k = 338$  К; частота вращения  $n = 119$  об/мин. На рис. 3 показана условная схема расчетной области, включающая цилиндр с движущимся поршнем, впускными (продувочными) и выпускными окнами, впускной ресивер большого объема. В двигателе две группы по три цилиндра объединены общим коллектором, в котором после цилиндров в целях улучшения характеристик петлевой продувки установлены вращающиеся заслонки, перекрывающие выбросы свежего заряда в конце продувки (см. рис. 2). На схеме расчетной области в целях упрощения вращающиеся заслонки заменены сдвижными. Закон их движения обеспечивает необходимую функцию изменения площади проходного сечения. В расчетной схеме учтено взаимное влияние трех цилиндров, рабочие циклы которых, очевидно, смещены по фазе.

Экспериментальные исследования с записью давления в цилиндре этого двигателя при газообмене были выполнены С.В. Камкиным [10]. Результаты расчета и эксперимента приведены на рис. 4, видно хорошее согласование этих результатов.

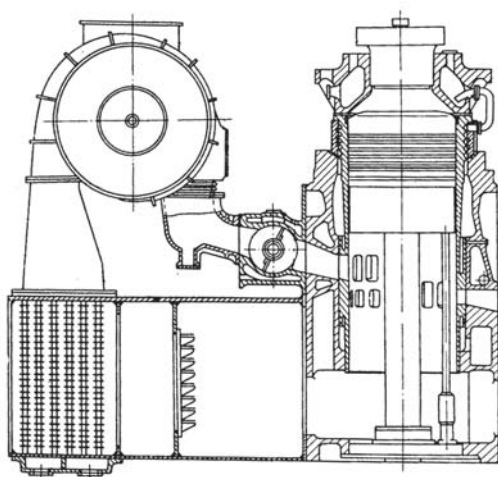


Рис. 2. Разрез двигателя 6ДКРН 76/155

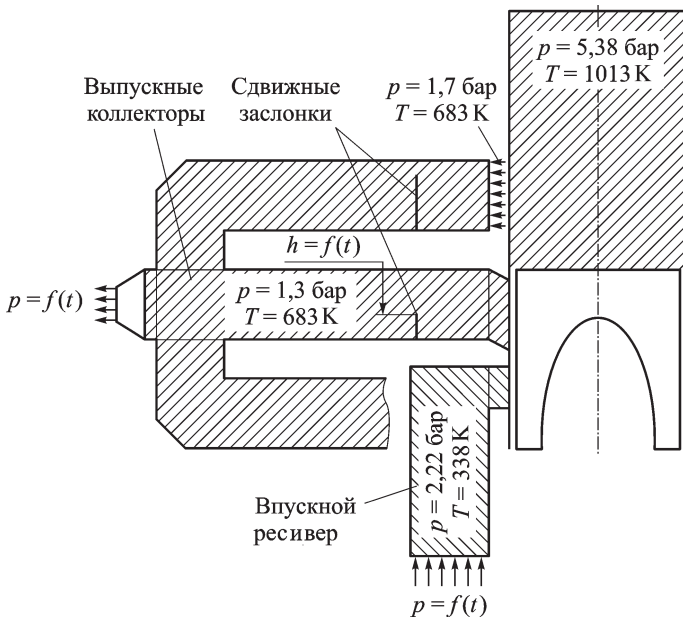


Рис. 3. Схема расчетной области двигателя 6ДКРН 76/155

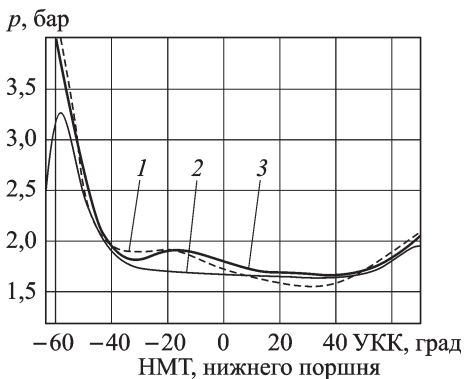


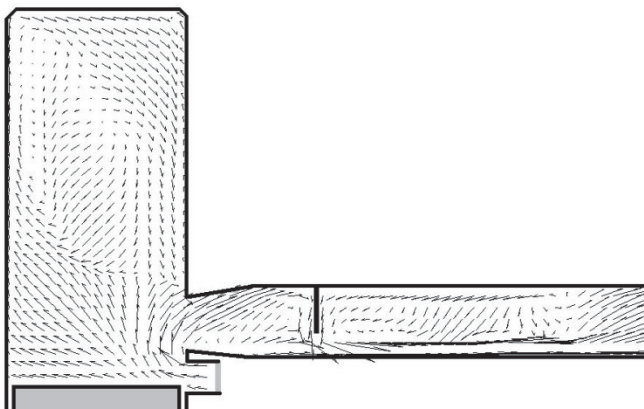
Рис. 4. Экспериментальные (1) и расчетные (2, 3) кривые изменения давления в цилиндре (1, 3) и перед заслонкой (2) на выпуске двигателя 6ДКРН 76/155

Особенности петлевого движения, так же как и изменение давления в цилиндре при продувке, в значительной мере определяются формой и сложным характером наклона выпускных и особенно впускных (продувочных) окон.

На рис. 6 показан разрез отечественного двигателя ДН20,7/2х25,4 с противоположно движущимися поршнями и прямоточной продувкой, частотой вращения  $n = 850$  об/мин, углом заклинки поршней  $12^\circ$ , давлением и температурой наддувочного воздуха  $p_k = 2,058$  бар,  $T_k = 338$  К. На кафедре “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана были проведены экспериментальные исследования одноцилин-

Следует отметить, что значение давления в момент окончания впуска позволяет определить все необходимые параметры для последующего расчета рабочего процесса: коэффициенты наполнения, продувки и др.

На рис. 5 показано поле скоростей в продольном сечении расчетной области. Хорошо виден петлевой характер движения продувочного воздуха, а также загроможденные потоки выдвинувшейся заслонкой, препятствующей прорыву свежего заряда на выпуск. Особенности петлевого движения, так же как и изменение давления в цилиндре при продувке, в значительной мере определяются формой и сложным характером наклона выпускных и особенно впускных (продувочных) окон.

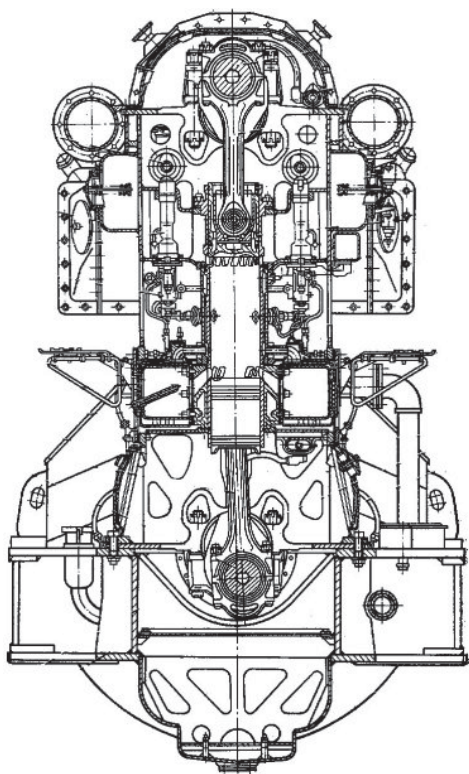


**Рис. 5.** Поле скоростей в продольном сечении цилиндра двигателя БДКРН 76/155

дрового отсека ОД100 этого двигателя с записью давления в процессе газообмена. Условная схема расчетной области для проведения трехмерного моделирования газообмена отсека, включающая цилиндр с движущимися поршнями, пояса впускных и выпускных окон, а также впускной и выпускной ресиверы, показана на рис. 7.

Экспериментальные и расчетные кривые изменения давления в цилиндре и в выпускном ресивере при газообмене, которые показывают хорошее согласование, приведены на рис. 8.

На рис. 9, *а* и *б* приведены соответствующие поля скоростей в продольном и поперечном сечениях расчетной области. Из рис. 9, *а* видно, что основные потоки при продувке цилиндра проходят вдоль его стенок, в центре образуется вихревой шнур с преимущественно обратным направлением течения. Это обусловлено необходимостью закрутки воздушного заряда в цилиндре, которая задается наклонами впускных окон в осевом, тангенциальном и окружном направлениях. Такая картина течения отмечается многими исследователями газообмена двухтактных двигателей с прямоточной продувкой.



**Рис. 6.** Разрез двигателя ДН20,7/2х25,4



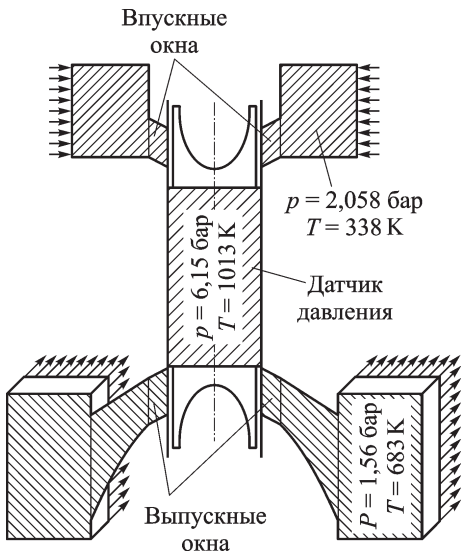


Рис. 7. Схема расчетной области отсека двигателя ОД100

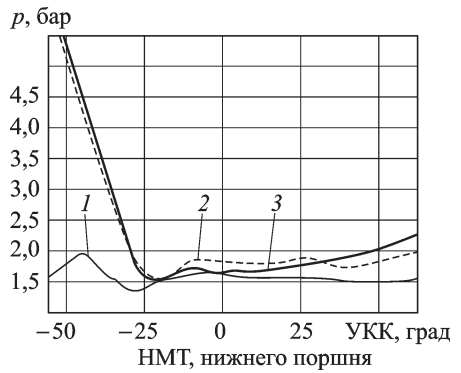


Рис. 8. Экспериментальные (2) и расчетные (1, 3) кривые изменения давления в цилиндре (2, 3) и выпускном ресивере (1) отсека ОД100

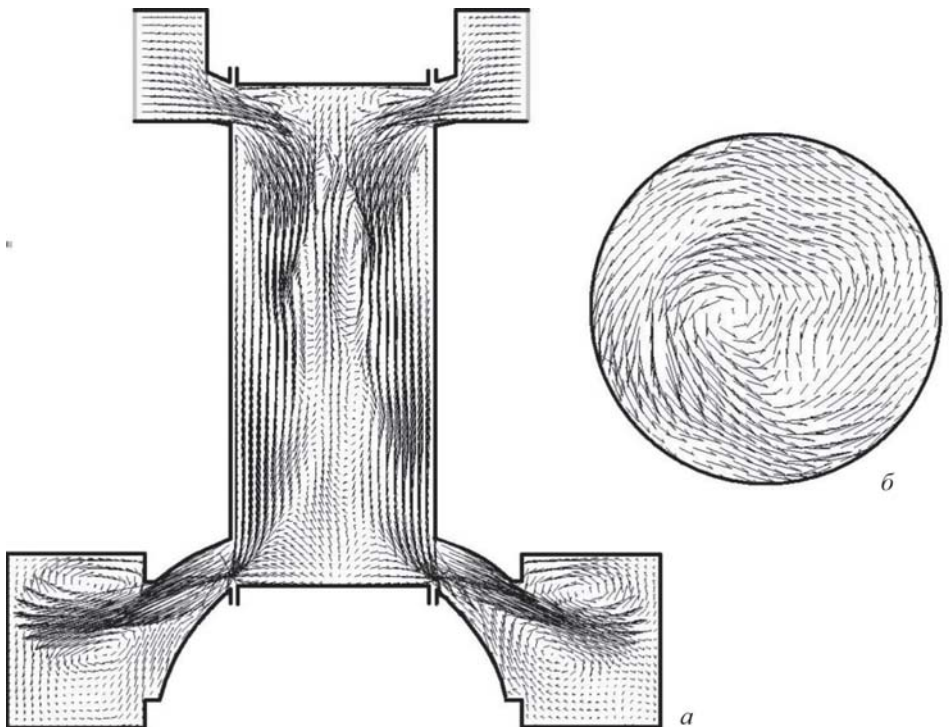


Рис. 9. Поле скоростей в продольном (а) и поперечном (б) сечениях цилиндра ОД100

Закрутка воздушного заряда хорошо видна на поле скоростей в поперечном сечении цилиндра (см. рис. 9, б). В целях определения вихревого числа заряда в цилиндре после закрытия впускных окон, необходимого для последующего расчета рабочего процесса, выполняется операция суммирования по всем ячейкам расчетной области в цилиндре. Более точное значение характеристики закрутки заряда перед впрыском топлива можно определить при сходе противоположного движения поршней к центральной мертвой точке.

Полученные результаты показывают, что разработанное дополнение к численному методу крупных частиц в виде специального предварительного этапа позволяет с высокой точностью выполнять пространственные расчеты в областях с подвижными границами. Представленная версия МКЧ дает возможность проводить численные исследования в целях оптимизации геометрии поясов впускных и выпускных окон двухтактных двигателей, каналов в головках и клапанов четырехтактных двигателей для получения необходимых характеристик их рабочего процесса. Очевидной является и возможность применения данной разработки для численного моделирования в проточных частях и объемах с подвижными границами в различных образцах техники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К р у г л о в М. Г., М е д н о в А. А. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1988. – 360 с.
2. Б е л о ц е р к о в с к и й О. М., Д а в ы д о в Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. – М.: Наука, 1982. – 391 с.
3. Л о б о в Н. В. Моделирование рабочего процесса в двухтактном одноцилиндровом двигателе внутреннего сгорания. – Пермь: Изд-во Пермь ГТУ, 2003. – 81 с.
4. Г р и ш и н Ю. А. Экономичные аналитико-численные алгоритмы метода крупных частиц // Числ. иссл. актуальн. пробл. машиностр. и механ. сплошн. и сыпуч. сред методом крупных частиц: в 5 т.; Под ред. Ю.М. Давыдова. – М.: Нац. Акад. прикл. наук, 1995. – Т. 4. – С. 1277–1289.
5. Г р и ш и н Ю. А., К а р и м о в А. Н., К у л е ш о в А. С. Доводка элементов газоздушного тракта двигателей с помощью математической модели пространственного течения газа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. – 1991. – № 4. – С. 39–43.
6. Г р и ш и н Ю. А. Новые схемы метода крупных частиц и их использование для оптимизации газоздушных трактов двигателей // Математическое моделирование. – РАН, 2002. – Т. 14, № 8. – С. 51–55.
7. Г р и ш и н Ю. А., З е н к и н В. А., К у л е ш о в А. С. Расчетное исследование характеристик впускных окон двухтактных двигателей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. – 2007. – № 4. – С. 39–43.
8. Р о ж д е с т в е н с к и й Б. Л., Я н е н к о Н. Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. – М.: Наука, 1978. – 688 с.
9. Г р и ш и н Ю. А., В о л к о в К. И. Исследования нестационарных явлений в газоздушных трактах ДВС // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия “Машиностроение”. – 2002. – № 4. – С. 80–85.



Статья поступила в редакцию 11.07.2008

Юрий Аркадьевич Гришин родился в 1947 г., окончил в 1971 г. Уфимский авиационный институт им. С. Орджоникидзе. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 160 научных работ в области газовой динамики и расчетно-экспериментальных исследований двигателей.



Yu. A. Grishin (b. 1947) graduated from the Ufa Aviation Institute n.a. S. Ordzhonikidze in 1971. D. Sc. (Eng.), professor of “Reciprocating Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 160 publications in the field of gas dynamics and design and experimental research of engines.

Владимир Александрович Зенкин родился в 1983 г., окончил в 2007 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 3 научных работ в области численного моделирования газовой динамики.



V.A. Zenkin (b. 1983) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2007. Post-graduate of “Reciprocating Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 publications in the field of numerical simulation of gas dynamics.

Владимир Сергеевич Рогов родился в 1937 г., окончил в 1961 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Доцент кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 40 научных работ в области расчетно-экспериментальных исследований поршневых двигателей.



V.S. Rogov (b. 1937) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Assoc. professor of “Reciprocated Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 40 publications in the field of design and experimental research of reciprocating engines.