

УДК 621.4

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-110-120>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДИЗЕЛЯ ВОЗДУХОМ

Р.В. Якимушкин

Филиал военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии
А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Расчет эффективных показателей вихревого эжектора, применяемого в системе питания дизеля воздухом, является актуальной задачей, поскольку позволяет существенно уменьшить время на определение рациональных конструктивных параметров на стадии проектирования. Перспективным направлением, позволяющим с высокой физической адекватностью, «из первых принципов», моделировать аэродинамические процессы в вихревых аппаратах, является один из модификаций метода динамики частиц. Цель исследования – моделирование газодинамики в проточной части вихревого эжектора. **Материалы и методы.** В статье рассматривается способ имитационного математического моделирования эжектирующего и эжектируемого потоков в вихревом эжекторе. Предложенная модификация метода динамики частиц позволяет с помощью простых законов классической динамики описывать аэродинамические процессы, а при помощи программных средств системы Delphi 7 моделировать их. Приводятся дифференциальные уравнения, которые решаются методом Рунге-Кутты второго порядка. В результате решения определяются траектории движения элементов воздуха в вихревом эжекторе, позволяющие оценить эффективные показатели вихревых аппаратов.

Результаты. Для исследования модели разработана программа с возможностью в окне интерфейса задавать геометрические параметры вихревого эжектора, выводить на экран текущие значения параметров процесса.

Обсуждение и заключение. Предложенная математическая модель и реализующая ее компьютерная программа позволяют количественно оценить эффективность вихревых аппаратов на этапе их проектирования. Преимущество предлагаемой математической модели заключается в более точном расчете параметров вихревого потока от конструкции вихревого эжектора и физических свойств эжектирующего и эжектируемого потоков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: вихревой эжектор, наддув, охладитель наддувочного воздуха, метод динамики частиц, дизель, геометрические параметры.

Поступила 09.01.2020, принята к публикации 21.02.2020.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТИ. Автор выражает благодарность за нелегкий труд рецензентам, которые работали с настоящей статьей.

Для цитирования: Якимушкин Р.В. Математическая модель аэродинамических процессов в вихревых аппаратах системы питания дизеля воздухом. Вестник СибАДИ. 2020;17(1): 110-120. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-110-120>

© Якимушкин Р.В.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-110-120>

VORTEX DEVICES OF THE DIESEL AIR SUPPLY SYSTEM: MATHEMATICAL MODEL OF AERODYNAMIC PROCESSES

Roman V. Yakimushkin

Army General A.V. Khrulev Military Academy of Logistics,
Omsk, Russia

Introduction. The calculation of effective indicators of the vortex ejector used in the diesel air supply system is a pressing task as it allows significantly reducing time for determination of rational design parameters at the design stage. One of the modifications of the particle dynamics method is a promising direction, allowing with high physical adequacy, "from the first principles," to model aerodynamic processes in vortex devices. Therefore, the purpose of the paper is to develop a mathematical model of a vortex ejector.

Materials and methods. The paper discussed a method of the mathematical simulation of ejection and ejection flows in a vortex ejector. The proposed modification of the particle dynamics method allowed describing aerodynamic processes with the help of simple laws of classical dynamics, and modeling them with the help of software of the Delphi 7 System. The author presented differential equations, which were solved by the Runge-Kutt method of the second order. As a result of the solution, the authors determined paths of air elements movement in the vortex ejector, which allowed estimating effective parameters of vortex devices.

Results. To study the model, the author developed a program with the possibility to set geometric parameters of the vortex ejector in the interface window and to display the current values of the process parameters.

Discussion and conclusions. Proposed mathematical model and computer program make it possible to quantify efficiency of vortex devices at their design stage. The advantage of the proposed mathematical model lies in more accurate calculation of vortex flow parameters from the vortex ejector design and physical properties of ejecting and ejecting flows.

KEYWORDS: vortex ejector, turbocharged, charge air cooler, particle dynamics, diesel, geometric parameters.

Submitted 09.01.2020, revised 21.02.2020.

The author has read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

ACKNOWLEDGEMENTS. The author expresses his gratitude to the reviewers of the manuscript.

For citation: Yakimushkin R.V. Vortex devices of the diesel air supply system: mathematical model of aerodynamic processes. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):110-120. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-110-120>

© Yakimushkin R. V.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уровень развития технологий таков, что сегодня турбонаддувом оснащаются практически все дизели [1, 2]. В современных комбинированных дизелях плотность воздуха при использовании наддува увеличивают до трех раз, а в некоторых случаях и больше, что существенно повышает мощность и топливную экономичность [1]. Однако с повышением плотности воздуха значительно растет и его температура, что сказывается на тепловой напряженности дизеля [3, 4]. Возможность снижения тепловой напряженности цилиндропоршневой группы (ЦПГ), повышения плотности свежего заряда воздуха, поступающего в цилиндр дизеля за счет совершенствования и применения теплообменного оборудования на образцах бронетанкового вооружения (БТВ), существенно ограничены в виду дефицита свободного объема в моторно-трансмиссионном отделении (МТО) [5].

Широкое применение на БТВ охладителей наддувочного воздуха по типу «воздух-воздух» или «воздух-жидкость» традиционных схем, которые были предложены еще Рудольфом Дизелем, не являются достаточно эффективными [6]. На образцах БТВ, оснащенных комбинированным дизелем с охладителем наддувочного воздуха (ОНВ) для создания потока охлаждающего воздуха, классически нашли применение центробежные вентиляторы. Вентилятор, как правило, имеет механическую связь с силовой установкой (СУ) и приводится во вращение от коленчатого вала двигателя [7]. Использование данных схем требует значительной мощности, что приводит к снижению энергетических характеристик дизелей, применяемых на объектах БТВ. Требования к образцам БТВ, изложенные в руководящих документах, направлены на повышение энергетических характеристик дизеля, реализовать которые возможно путем эффективного использования энергии отработавших газов¹ [7, 8]. Для создания воздушного потока, испол-

няя роль вентилятора, удаления пыли из пылесборников воздухоочистителей, вентиляции МТО, нашли широкое применение устройства, работающие на отработавших газах – газоструйные насосы (эжекторы)².

Применение в конструкции таких эжекторов при всех своих положительных качествах имеют существенные недостатки, основной из которых – низкий коэффициент эжекции³ [9].

Известные способы создания воздушного потока через теплообменник ОНВ в забронированном пространстве БТВ не в полной мере позволяют обеспечить поддержание температуры воздуха, поступающего в цилиндр дизеля в области рациональных значений [6, 8]. Это указывает на существование потребности в разработке нетрадиционной аппаратуры, позволяющей реализовать необходимые для качественного протекания рабочего цикла комбинированного дизеля значения температуры наддувочного воздуха. Альтернативой струйных аппаратов (эжекторов) могут стать более эффективные вихревые эжекторы, такие устройства достаточно просты конструктивно, надежны и не требуют значительных материальных затрат на обслуживание⁴ [9].

Вихревой эжектор (ВЭ) позволяет организовать поток охлаждающего воздуха через ОНВ дизеля, используя энергию выхлопных газов. К настоящему времени предложен ряд конструкций ВЭ, которые обладают необходимыми параметрами для применения в обслуживающих системах дизеля [10, 11]. Несмотря на то, что в литературе можно найти экспериментальные и качественные теоретические оценки, отсутствуют комплексные теоретические подходы, позволяющие с высокой физической адекватностью, «из первых принципов», моделировать работу ВЭ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В последнее время для описания сложных аэродинамических процессов часто используют различные модификации метода динамики

¹ Усов О.А., Корольков Р.Н., Лойко А.В. Математическая модель дизельного двигателя для расчета режимов работы моторно-трансмиссионных установок военной гусеничной машины // 35-я Всероссийская конференция по проблемам науки и технологий, посвященная 70-летию Победы (Миасс, 16–18 июня 2015 г.): труды. Миасс, 2015. С. 114–121.

² Подвидз Л.Г., Кирилловский Ю.Л. Расчет струйных насосов и установок // Труды ВНИИ Гидромаш. 1968. Вып. 38. С. 44–96.

³ Умяров Х. Великий шелковый путь: вихри в колодцах // Техника молодежи. 2008. № 8. С. 20–24.

⁴ Умяров Х. Великий шелковый путь: вихри в колодцах // Техника молодежи. Там же.

частиц⁵ [12, 13, 14, 15]. В рамках данного метода воздушная среда дискретизируется на отдельные однотипные элементы в форме шара (рисунок 1). В элементы необходимо перенести физические свойства воздуха, в частности плотность, давление, температуру, которые связаны уравнением состояния идеального газа. В отличие от более грубого приближения сплошной среды в методе динамики частиц элементы могут двигаться в пространстве как

отдельные физические тела, подчиняясь законам классической динамики. В модели учитывается взаимодействие элементов как между собой, так и с рабочими поверхностями вихревого эжектора (рисунок 2). Дискретизация газовой среды на отдельные элементы позволяет воспроизводить такие сложные явления, как вихри, турбулентные процессы, смешивание разнотипных газов, кавитацию.

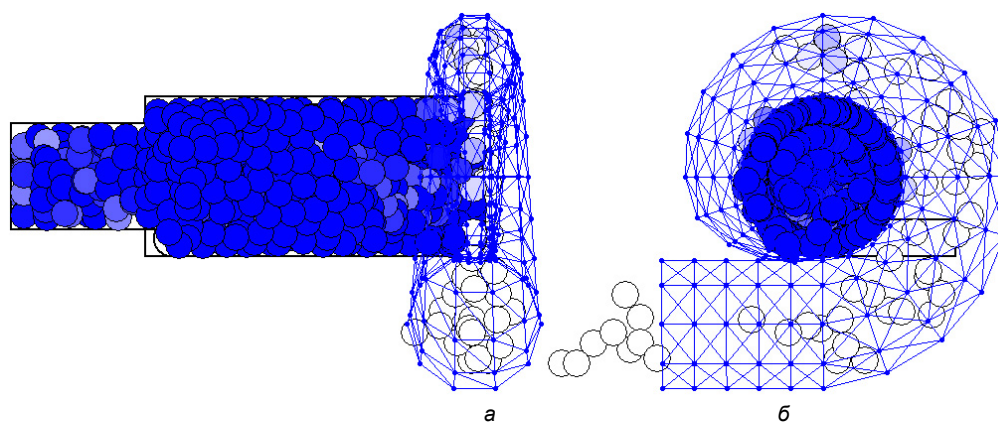


Рисунок 1 – Представление вихревого эжектора в модели: проекции XZ (а) и YZ (б)

Figure 1 – Representation of the vortex ejector in the model: projections XZ (a) and YZ (b)

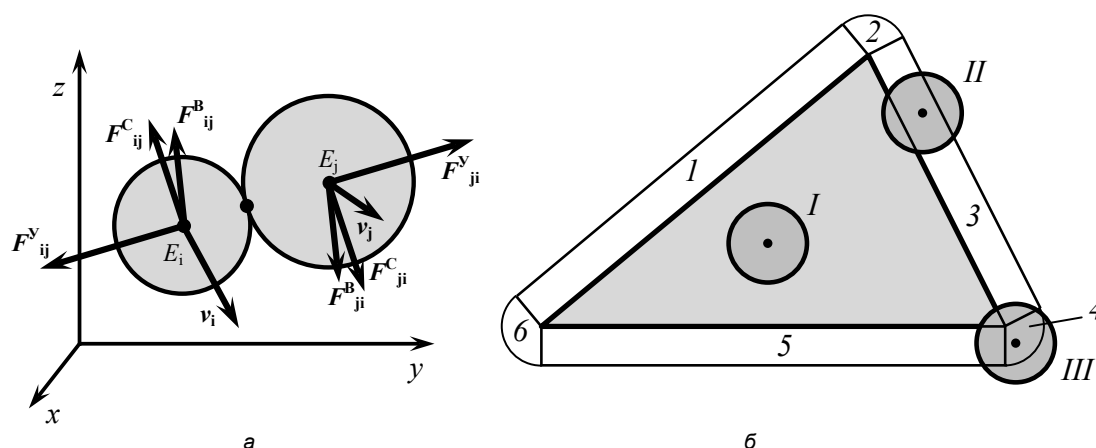


Рисунок 2 – Силы взаимодействия, возникающие при контакте двух элементов газа (а) и между элементом газа и элементом рабочей поверхности эжектора (б): F^v – упругие силы; F^c – силы сухого трения; F^b – силы вязкого трения. Жирным шрифтом обозначены векторные величины

Figure 2 – Forces of interaction arising at contact of two elements of gas (a) and between element of gas and element of working surface of ejector (b): F^v – elastic forces; F^c – dry friction forces; F^b – viscous friction forces. Vector values are indicated in bold

⁵ Кравцевич Л.И., Прибыток П.В., Савицкий В.В. Программные средства для моделирования процессов в жидкостях методом молекулярной динамики // Сборник работ 64-й научной конференции студентов и аспирантов БГУ. Минск, 2007. С. 45–48.

В модели приняты следующие допущения:

- элементы воздуха (либо выхлопных газов) движутся по законам классической динамики, взаимодействуя между собой и с рабочими поверхностями вихревого эжектора;
- элемент воздуха (либо выхлопных газов) является однородным в пространстве. В пределах всего элемента постоянна объемная плотность, температура, давление;
- передача тепла между элементами описывается классическим уравнением теплопроводности;
- механические свойства элементов воздуха (либо выхлопных газов) зависят только от четырех параметров: диаметра, массы, коэффициентов жесткости и вязкости;
- механическое взаимодействие описывается в линейном упруго-вязком приближении.

Каждый элемент газа i задается в модели девятью переменными: декартовыми координатами его центра x_i, y_i, z_i ; компонентами его скорости v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} , а также параметрами состояния газа: удельным объемом V_i , давлением P_i , температурой T_i .

Механическое движение каждого элемента описывается на основе второго закона Ньютона:

$$\begin{aligned}
 & i = 1 \dots N_3; \\
 & m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{xj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{xj}) \right) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), \quad r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \\ & 0, \quad r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \end{aligned} \right\} + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ \begin{aligned} & c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(x_i - x_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{xi} - v_{x\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{xi} - v_{x\Pi j}) \right) c_{ij} \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), \quad r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \\ & 0, \quad r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \end{aligned} \right\}; \\
 & m_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{yj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{yj}) \right) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), \quad r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \\ & 0, \quad r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \end{aligned} \right\} + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ \begin{aligned} & c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(y_i - y_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{yi} - v_{y\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{yi} - v_{y\Pi j}) \right) c_{ij} \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), \quad r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \\ & 0, \quad r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \end{aligned} \right\}; \\
 & m_i \frac{d^2 z_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_3} \left\{ \begin{aligned} & c_{ij} \left(\frac{d_i + d_j}{2} - r_{ij} \right) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{zj}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_j|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{zj}) \right) c_{ij} \left(r_{ij} - \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2} \right), \quad r_{ij} < \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \\ & 0, \quad r_{ij} \geq \alpha_0 \frac{d_i + d_j}{2}; \end{aligned} \right\} + \\
 & + \sum_{j=1}^{N_{\Pi}} \left\{ \begin{aligned} & c_{i-\Pi j} \left(\frac{d_i}{2} - r_{i-\Pi j} \right) \frac{(z_i - z_{i-\Pi j})}{r_{i-\Pi j}} + \left(k_{ij}^C \frac{v_{zi} - v_{z\Pi j}}{|\vec{v}_i - \vec{v}_{\Pi j}|} + k_{ij}^B (v_{zi} - v_{z\Pi j}) \right) c_{ij} \left(r_{i-\Pi j} - \alpha_0 \frac{d_i}{2} \right), \quad r_{i-\Pi j} < \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \\ & 0, \quad r_{i-\Pi j} \geq \alpha_0 \frac{d_i}{2}; \end{aligned} \right\} - m_i g,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где i – номер элемента; N_3 – количество элементов; m_i – масса элемента; t – время; j – номер элемента, находящегося в контакте с i -м элементом; c_{ij} – коэффициент жесткости взаимодействия элементов i и j , рассчитываемый через объемный модуль упругости газа; k_{ij}^C и k_{ij}^B – коэффициенты сухого и вязкого трения элементов i и j друг о друга; d_i – диаметр i -го элемента; r_{ij} – расстояние между центрами элементов i и j ; α_0 – коэффициент ограничения взаимодействия между элементами; N_{Π} – количество элементарных поверхностей вихревого эжектора; $c_{i-\Pi j}$, k_{ij}^C и k_{ij}^B – коэффициенты жесткости, сухого и вязкого трения при взаимодействии элемента i с поверхностью j ; $r_{i-\Pi j}$ – расстояние от центра i -го элемента до j -й поверхности; $x_{i-\Pi j}$, $y_{i-\Pi j}$, $z_{i-\Pi j}$ – декартовы коор-

динаты точки проекции центра элемента i на поверхность j ; $V_{x\pi j}$, $V_{y\pi j}$, $V_{z\pi j}$ – компоненты скорости центра j -й элементарной поверхности; $|\dots|$ – модуль вектора; g – ускорение свободного падения. Межэлементное расстояние r_{ij} определяется по теореме Пифагора

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}.$$

Дифференциальные уравнения (1) содержат независимые переменные и решаются методом Рунге-Кутты второго порядка⁶. В результате решения системы дифференциальных уравнений второго порядка получаются функции $x_i(t)$, $y_i(t)$, $z_i(t)$, определяющие траектории движения элементов воздуха в вихревом эжекторе и позволяющие оценить коэффициент эжекции.

Для задания элементарных поверхностей вихревого эжектора используются аналитические уравнения, позволяющие определить расстояние $r_{i\pi j}$ между центром элемента i и элементарной поверхностью j .

Помимо механического движения элементов происходит изменение состояния газа в пределах одного элемента. Моделирование изменения состояния газа производится в следующей последовательности:

1) при механическом перемещении элемент по-новому касается соседних элементов, изменяются действующие силы, на основе чего рассчитывается новое значение давления газа в элементе;

2) при изменении давления газа в пределах элемента изменяется объем;

3) рассчитывается новое значение давления рабочего газа с использованием приближения идеального газа и уравнения адиабатного процесса. Адиабатное приближение принято, так как за малый промежуток времени Δt изменение состояния газа выражено сильнее, чем отвод тепла:

$$P_u^\tau = P_u^{\tau-1} \left(\frac{V_u^{\tau-1}}{V_u^\tau} \right)^{\frac{i+2}{i}}, \quad (2)$$

где P_u^τ и $P_u^{\tau-1}$ – давление рабочего газа в пределах элемента на текущем и предыдущем

шагах интегрирования; V_u^τ и $V_u^{\tau-1}$ – объем элемента на текущем и предыдущем шагах интегрирования; i – количество степеней свободы молекул газа, принятое для выхлопных газов и воздуха равным $i = 5$;

4) изменение объема приводит к изменению радиусов элементов и к новому контакту между элементами, за счет чего возникают силы;

5) под действием результирующей силы элемент совершает элементарное перемещение;

6) на каждом шаге интегрирования t производится расчет давления на элемент:

$$P_i^\tau = \frac{\sum_{j=1}^{N_j} |\vec{F}_{ij}|}{k_\phi \cdot \pi \cdot d_\phi^2}, \quad (3)$$

где k_ϕ – коэффициент формы, позволяющей учесть несплошность заполнения пространства шарообразными объектами.

Рабочие поверхности вихревого эжектора представлены в модели совокупностью фрагментов цилиндрических поверхностей и плоскостей, переходящих друг в друга. В процессе моделирования элементарные поверхности сохраняют неподвижность. Основу эжектора составляют три цилиндрические поверхности: приемная камера, сопло пассивного потока, сопловой ввод (см. рисунок 1). Для того чтобы представить в модели сложную геометрию конфигурацию спиральной камеры «улитки» и ее переход в диффузор, используется совокупность 522-х элементарных треугольников, стыкующихся между собой.

Если элемент поверхности Π_j контактирует с элементом газа i , в соответствии с (1) между ними возникают упругие силы и силы трения. Для расчета данных сил необходимо на каждом шаге численного интегрирования определять, контактирует ли элемент газа с треугольным элементом поверхности. Если контактирует, то как именно контактирует: с центральной частью поверхности (вариант I на рисунке 2, б), с ребром (вариант II) или с углом (вариант III). После этого определяется расстояние $r_{i\pi j}$ от центра элемента до плоскости, на основе которого рассчитывается упругая сила отталкивания, а также направление действия силы (отрезок $E_i - E_{i\pi j}$, где E_i и $E_{i\pi j}$ –

⁶ Подвидз Л.Г., Кирилловский Ю.Л. Расчет струйных насосов и установок // Труды ВНИИ Гидромаш. 1968. Вып. 38. С. 44–96.

центр элемента и проекция центра элемента на плоскость элементарной поверхности). В варианте II определяется проекция на ребро, в варианте III в качестве $E_{\text{инп}}$ используется вершина треугольника.

Проверка контакта элемента газа i с внутренней частью треугольника Π_j (вариант I) осуществляется в два этапа. Определяется проекция центра элемента (x_i, y_i, z_i) на плоскость треугольного элемента, затем проверяется, попадает ли точка проекции внутрь треугольника. Для определения проекции на основе формул аналитической геометрии составляется уравнение плоскости, заданной через три точки – вершины T_{j1}, T_{j2}, T_{j3} треугольника

$$\begin{vmatrix} x - x_{j1} & y - y_{j1} & z - z_{j1} \\ x_{j2} - x_{j1} & y_{j2} - y_{j1} & z_{j2} - z_{j1} \\ x_{j3} - x_{j1} & y_{j3} - y_{j1} & z_{j3} - z_{j1} \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

где x, y, z – координаты пробной точки, принадлежащей плоскости; x_{j1}, y_{j1}, z_{j1} – координаты вершины треугольника T_{j1} ; x_{j2}, y_{j2}, z_{j2} – вершины T_{j2} ; x_{j3}, y_{j3}, z_{j3} – вершины T_{j3} . После раскрытия определителя данное уравнение преобразуется к виду

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (5)$$

где A, B, C, D – параметры уравнения плоскости. Далее уравнение плоскости нормируется делением всех параметров на длину вектора, нормального к плоскости $\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}$:

$$\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}x + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}y + \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}z + \frac{D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} = 0. \quad (6)$$

В дальнейшем нормированные параметры обозначаются индексом «н»:

$$A_n x + B_n y + C_n z + D_n = 0. \quad (7)$$

На основе нормированного уравнения плоскости рассчитывается расстояние $r_{i-\Pi j}$ от центра элемента (x_i, y_i, z_i) :

$$r_{i-\Pi j} = |A_n x_i + B_n y_i + C_n z_i + D_n|. \quad (8)$$

Любой треугольный элемент эжектора касается лишь малого количества (ориентировочно от 0 до 10) элементов газа, поэтому на данном этапе расчета исключаются из рассмотрения все неконтактирующие элементы газа по условию $r_{i-\Pi j} > d_i/2$. Благодаря этому существенно ускоряются машинные вычисления.

Для определения взаимодействия элемента с внутренней частью треугольного элемента (по варианту I) сначала определяется проекция центра элемента на плоскость данного треугольника. По известным координатам нормального к треугольнику вектора $\{A_n, B_n, C_n\}$ и расстоянию $r_{i-\Pi j}$ от точки до плоскости определяется проекция $E_{\text{инп}}(x_{\text{инп}}, y_{\text{инп}}, z_{\text{инп}})$ путем смещения вдоль нормального вектора

$$\begin{aligned} x_{\text{инп}} &= x_i - A_n \cdot r_{i-\Pi j}; \\ y_{\text{инп}} &= y_i - B_n \cdot r_{i-\Pi j}; \\ z_{\text{инп}} &= z_i - C_n \cdot r_{i-\Pi j}. \end{aligned} \quad (9)$$

Проверка попадания точки $E_{\text{инп}}$ внутрь треугольника T_j осуществляется путем сравнения площадей треугольников: сумма площадей трех треугольников, построенных на вершинах исходного треугольника и точке $E_{\text{инп}}$, должна равняться площади всего треугольника T_j , то есть,

$$S(\Delta T_{j1} T_{j2} T_{j3}) = S(\Delta E_{\text{инп}} T_{j2} T_{j3}) + S(\Delta T_{j1} E_{\text{инп}} T_{j3}) + S(\Delta T_{j1} T_{j2} E_{\text{инп}}). \quad (10)$$

Когда суммарная площадь треугольников $\Delta E_{\text{инп}} T_{j2} T_{j3}, \Delta T_{j1} E_{\text{инп}} T_{j3}, \Delta T_{j1} T_{j2} E_{\text{инп}}$ больше площади элементарного треугольника $S(\Delta T_{j1} T_{j2} T_{j3})$, принимается решение, что точка $E_{\text{инп}}$ лежит вне треугольника T_j . В этом случае элемент газа либо вообще не контактирует с данной элементарной поверхностью, либо может контактировать с ней по ребру или вершине элементарного треугольника, для чего производятся дополнительные аналогичные расчеты.

В случае контакта элемента газа с треугольным элементом поверхности производится расчет сил упругости, сухого и вязкого трения (по формуле (1)).

В начальный момент времени модельный вихревой эжектор равномерно заполняется элементами воздуха. Для создания входного потока воздуха элементы появляются по одному во входной трубе через определенный промежуток времени и под действием образующегося давления движутся в тангенциальном направлении к камере завихрения эжектора.

Разработанная модель позволяет определить влияние геометрических параметров вихревого эжектора, параметров входного потока на показатели эффективности вихревого эжектора, которая определяется коэффициентом эжекции. Данный коэффициент определяется по известному уравнению:

$$\eta = \frac{Q_{\text{пас}}}{Q_{\text{акт}}}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{пас}}$ и $Q_{\text{акт}}$ – расход активного и пассивного потоков.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования модели разработана компьютерная программа «Программа для моделирования вихревого эжектора со спиральной камерой» (рисунок 3)⁷ [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. Программа предназначена для моделирования работы вихревого эжектора **со спиральной камерой** и позволяет моделировать движение потоков воздуха в эжекторе на основе метода динамики частиц. В окнах интерфейсной формы задаются основные геометрические параметры вихревого эжектора, скорость и угол входа эжектирующего потока. В процессе работы программа выводит на экран две проекции эжектора и элементов газовой среды, текущие значения параметров процесса (рисунок 4). Программа применима для широких диапазонов геометрических параметров вихревого эжектора, **спиральной камеры** и параметров эжектирующего и эжектируемого потоков [22].

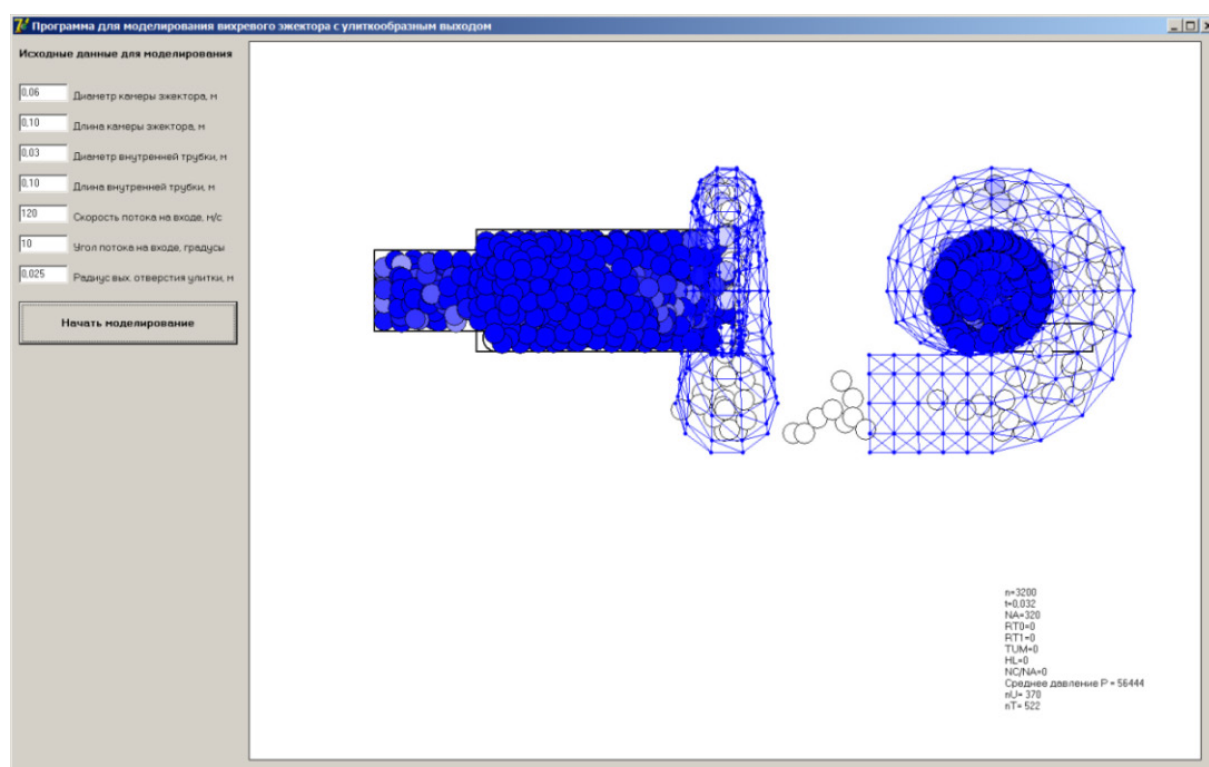


Рисунок 3 – Интерфейсная форма ввода исходных данных для моделирования вихревого эжектора со спиральной камерой и элементов воздушной среды

Figure 3 – Interface form of input of initial data for simulation of vortex ejector with spiral chamber and air medium elements

⁷ Ахметов Ю.М., Зангиров Э.И. [и др.]. Визуализация структуры потока газа в вихревой трубе методом численного моделирования // Мавлютовские чтения: Всеросс. молодеж. науч. конф.: материалы конф. в 5 т. Том 1. Уфа : УГАТУ, 2014. С. 115–116.

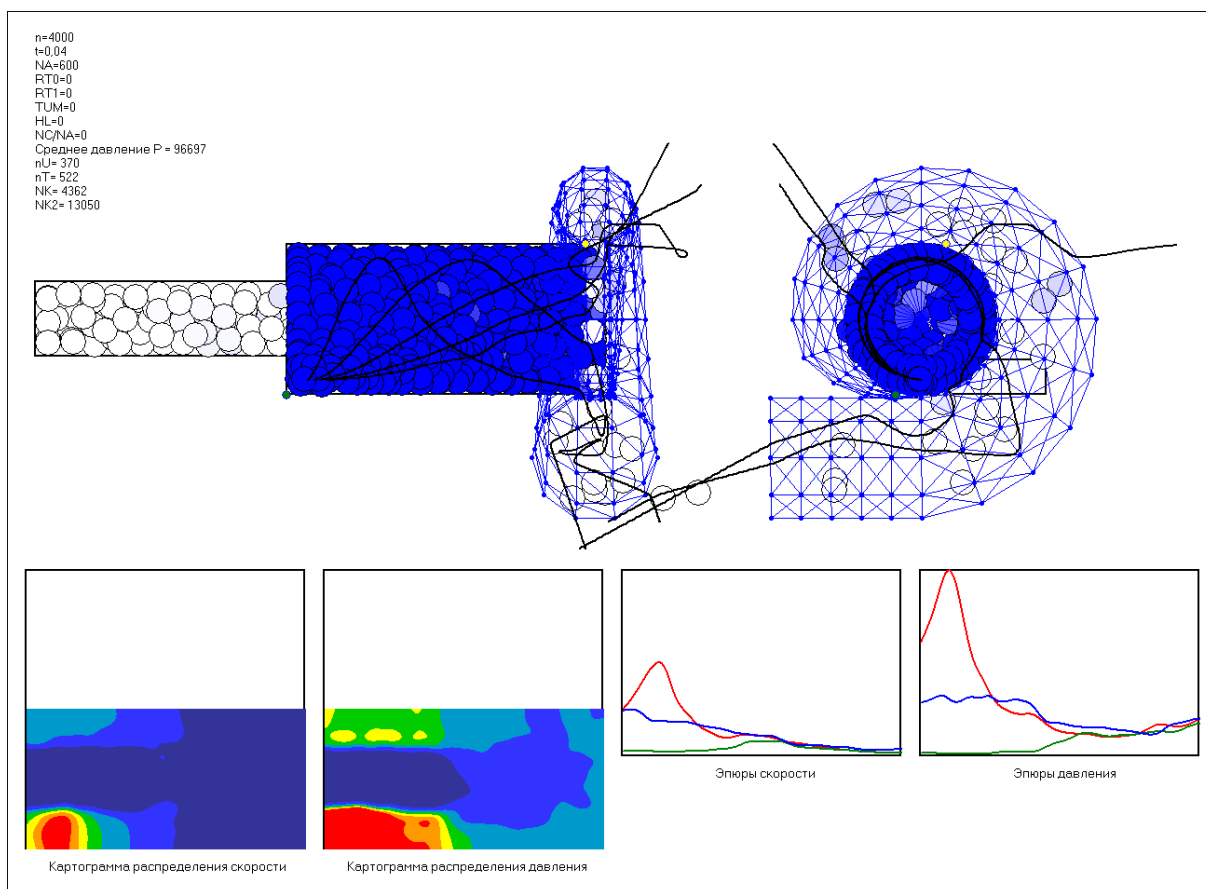


Рисунок 4 – Интерфейсная форма вывода результатов моделирования: двух проекций вихревого эжектора со спиральной камерой и элементов воздушной среды, текущих значений параметров

Figure 4 – Interface form of simulation results output: two projections of vortex ejector with spiral chamber and air medium elements, current values of parameters

Эффективность эжектора оценивается по графическим материалам воспроизводимой программой для ЭВМ. Траектории движения элементов газа позволяют оценить характер вихревого движения газа (см. рисунок 4). Так, на представленной геометрической конфигурации вихревого эжектора, при длине камеры смешения около 60 мм, газ совершает в камере смешения около 1,5 витков, прежде чем уходит в спиральную камеру «улитку».

Количественные характеристики вихревого движения определяют по картограммам распределения скорости движения газа и давления в камере смешения (см. рисунок 4). Скорость движения газа и давление максимальны у эжектирующего сопла (в нижней левой части картограммы) и минимальны в осевой области у эжектируемого сопла.

Характер изменения скорости и давления внутри камеры смешения исследуется по эпюрам (см. рисунок 4). Так, область газа, движущегося с высокой скоростью (более 100 м/с), имеет протяженность 13 мм в левой части камеры смешения. А область газа, имеющего высокое давление (более 200 кПа), имеет протяженность около 11 мм в левой части камеры смешения.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие в настоящее время методики расчета вихревого эжектора в основном основаны на экспериментальных данных и не дают выбрать конструктивные и режимные параметры, обеспечивающие заданное значение коэффициента эжекции. Предлагаемая математическая модель и реализующая ее

компьютерная программа позволяют количественно оценить эффективность эжектора при его различных конструктивных и технологических параметрах, способствуют оптимальному подбору вихревого эжектора на этапе проектирования комбинированного дизеля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лашко В.А., Бердник А.Н. Пути совершенствования систем газотурбинного наддува комбинированных поршневых двигателей // Вестник ТОГУ. Хабаровск. 2010. № 4 (18). С. 91–100.
2. Луценко В.А., Хасанов Р.Р., Хайруллин А.Х., Гуреев В.М. Исследование работы элементов турбокомпрессора двигателя внутреннего сгорания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение М., МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 12 (693). С. 20–29.
3. Тузов Л.В., Бережнев В.И. Анализ теплонапряженности судовых дизелей // Вестник ГУМРФ СПб. 2012. № 4 (16). С. 18–25.
4. Шабалин Д.В., Рослов С.В., Килунин И.Ю., Смолин А.А. Стабилизация параметров наддувочного воздуха с целью обеспечения оптимальных значений коэффициента избытка воздуха в широком диапазоне скоростных и нагрузочных режимов работы дизеля // Омский научный вестник. 2014. № 3. С. 102–105.
5. Шабалин Д.В. Повышение эффективности рабочего цикла дизеля оптимизацией температуры заряда воздуха // Сборник научных трудов ВА МТО им. генерала армии А.В. Хрулёва. СПб: ВУНЦ СВ «ВАМТО», 2017. С. 34 – 40. Инв. № 45707.
6. Мырзахметов Б.А., Кадыров Ж.Н., Кочетков А.В. Силовые энергетические установки // Военный вестник. 2011. № 3. С. 27–29.
7. Малозёмов А.А. Математическая модель двигателя на основе системы дифференциальных уравнений энергетического и массового балансов // Научный вестник. Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин. Челябинск: ЧВВАКИУ, 2006. Выпуск 18. С. 8–15.
8. Селиванов Н.И. Потенциальные тяговые характеристики тракторов на снежном покрове // Вестник КрасГАУ: науч.-техн. журн. 2005. Вып. 7. С. 200–207.
9. Prabakaran J., Vaidyanathan S. Effect of orifice and pressure of counter flow vortex tube // Indian Journal of Science and Technology. 2010. Vol. 3, № 4. pp. 374–376.
10. Пиралишвили Ш.А., Гурьянов А.И., Иванов Р.И. Разработка инфракрасного газового горелочного устройства на базе вихревого эжектора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). Самара. 2007. № 2. С. 82–86.
11. Кукис В.С., Шабалин Д.В. Физико-математическая модель вихревых труб для регулирования температуры наддувочного воздуха // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 1. С. 129–133.

12. Богомолов С.В., Кузнецов К.В. Метод частиц для системы уравнений газовой динамики // Математическое моделирование. 1998. Т. 10. № 7. С. 93–100.
13. Monaghan J. Smoothed Particle Hydrodynamics // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1992. Vol. 30. P. 543–574.
14. Бровченко И.А. Применение методов частиц в задачах с неструктурированными сетками // Математичні машини і системи. 2010. № 3. С. 111–115.
15. Малышев В.Л., Марьин Д.Ф., Моисеева Е.Ф., Гумеров Н.А., Ахатов И.Ш. Ускорение молекулярно-динамического моделирования неполярных молекул при помощи GPU // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2014. № 3(1). С. 126–133.
16. Тарасов Д.С., Изотова Е.Д., Алишева Д.А., Акберова Н.И. GPAMM – программный пакет для расчетов молекулярной динамики на графических процессорах // Математическое моделирование. 2009. Т. 21. № 3. С. 31–40.
17. Кураев А.А., Рак А.О., Колосов С.В., Корновский А.А., Храмов А.Е. Быстрый алгоритм численного интегрирования уравнений движения крупных частиц в приборах СВЧ // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 3. С. 8–13.
18. Hafner J. Atomic-Scale Computation Materials Science // Acta Mater. 2000. Vol. 48. Pp. 71–92.
19. Ахметов Ю.М., Зангиров Э.И. Численное моделирование течения газа в вихревых устройствах // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20. № 2(72). С. 66–73.
20. Wu Y.T., Ding Y., Ji Y.B. Experimental research on vortex tube // Journal of Chemical Industry and Engineering. 2005. Vol. 56. Pp. 41–44.
21. Богомолов С.В., Кузнецов К.В. Метод частиц для системы уравнений газовой динамики // Математическое моделирование. 1998. Т. 10. № 7. С. 93–100.
22. Юрченко Д. Численное моделирование течения в вихревой трубе с использованием ANSYS Fluent // ANSYS Advantage. 2009. № 11. С. 35–37.

REFERENCES

1. Lashko V.A., Berdnik A.N. Puti sovershenstvovaniya sistem gazoturbinnogo nadduva kom-binirovannyh porshnevyyh dvigatelej [Ways to improve gas turbine supercharging systems of combined piston engines]. *Vestnik TOGU*. 2010; 4(18): 91–100 (in Russian).
2. Lushchenko V.A., Hasanov R.R., Hajrullin A.H., Gureev V.M. Issledovanie raboty elementov turbokompressora dvigatelya vnutrennego sgoraniya [Study of operation of elements of turbo compressor of internal combustion engine]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroyeniye*. Moskva MG TU im. N.E. Bauman. 2017; 12(693): 20–29 (in Russian).
3. Tuzov L.V., Berezhnev V.I. Analiz teplotnyayazhennosti sudovyh dizelej [Analysis of heat stress of ship's diesel engines]. *Vestnik GUMRF*. 2012; 4(16): 18–25 (in Russian).

4. Shabalin D.V., Roslov S.V., Kilunin I.YU., Smolin A.A. Stabilizatsiya parametrov nadduvochnogo vozduha s cel'yu obespecheniya optimal'nykh znachenij koefitsienta izbytko vozduha v shirokom diapazone skorostnykh i nagruzochnykh rezhimov raboty dizelya [Stabilization of inflatable air parameters in order to ensure optimal values of air excess coefficient in a wide range of speed and load modes of diesel engine operation]. *Omskij nauchnyj vestnik*. 2014; 3: 102–105 (in Russian).
5. Shabalin D.V. Povyshenie effektivnosti rabocheho cikla dizelya optimizatsiej temperatury zaryada vozduha [Improving Efficiency of Diesel Operating Cycle by Optimization of Air Charge Temperature]. *Sbornik nauchnykh trudov VA MTO im. Generala armii A.V. Hrulyova*. 2017; 45707: 34–40 (in Russian).
6. Myrzahmetov B.A., Kadyrov Zh.N., Kochetkov A.V. Silovye energeticheskie ustanovki [Power Plants]. *Voennyj vestnik*. 2011; 3: 27–29 (in Russian).
7. Malozyomov, A.A. Matematicheskaya model' dvigatelya na osnove sistemy differentsial'nykh uravnenij energeticheskogo i massovogo balansov [Mathematical model of the engine based on the system of differential equations of energy and mass balances]. *Nauchnyj vestnik. Povyshenie effektivnosti silovykh ustanovok kolesnykh i gusenichnykh mashin*. 2006; 18: 8–15 (in Russian).
8. Selivanov N.I. Potentsial'nye tyagovye harakteristiki traktorov na snezhnom pokrove [Potential traction characteristics of tractors on snow cover]. *Vestnik KrasGAU*. 2005; 7: 200–207 (in Russian).
9. Prabakaran J., Vaidyanathan S. Effect of orifice and pressure of counter flow vortex tube. *Indian Journal of Science and Technology*. 2010; 3, no 4: 374–376.
10. Piralishvili Sh.A., Gur'yanov A.I., Ivanov R.I. Razrabotka infrakrasnogo gazovogo gorelochnogo ustrojstva na baze vihrevogo ezhektora [Development of an infrared gas burner device based on a vortex ejector]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Korolyova (nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2007; 2: 82–86 (in Russian).
11. Kukis V.S., Shabalin D.V. Fizikomatematicheskaya model' vihrevykh trub dlya regulirovaniya temperatury nadduvochnogo vozduha [Physical and mathematical model of vortex pipes for regulation of supercharging air topics]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2015; 1: 129–133 (in Russian).
12. Bogomolov S.V., Kuznecov K.V. Metod chastic dlya sistemy uravnenij gazovoj dinamiki [Method of particles for the system of equations of gas dynamics]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1998; 10. No 7: 93–100 (in Russian).
13. Monaghan J. Smoothed Particle Hydrodynamics. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1992; 30: 543–574.
14. Brovchenko I.A. Primenenie metodov chastic v zadachah s nestrukturirovannymi setkami [Application of methods of particles in tasks with unstructured grids]. *Matematichni mashini i sistemi*. 2010; 3: 111–115 (in Russian).
15. Malyshev V.L., Mar'in D.F., Moiseeva E.F., Gumerov N.A., Ahatov I.SH. Uskorenie mo-lekulyarno-dinamicheskogo modelirovaniya nepolyarnykh molekul pri pomoshchi GPU [Acceleration of molecular-dynamic modeling of non-polar molecules with the help of GPU]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2014; 3(1): 126–133 (in Russian).
16. Tarasov D.S., Izotova E.D., Alisheva D.A., Akberova N.I. GPAMM – programmnyj paket dlya raschetov molekulyarnoj dinamiki na graficheskikh processorah [GPAMM – software package for calculations of molecular dynamics on graphics processors]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2009; 21. No 3: 31–40 (in Russian).
17. Kuraev A.A., Rak A.O., Kolosov S.V., Koronovskij A.A., Hramov A.E. Bystryj algoritm chislennogo integrirvaniya uravnenij dvizheniya krupnykh chastic v priborah SVCH [Fast algorithm of numerical integration of equations of motion of large particles in microwave devices]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2014; 84. No 3: 8–13 (in Russian).
18. Hafner J. Atomic-Scale Computation Materials Science. *Acta Mater.* 2000; 48: 71–92.
19. Ahmetov YU.M., Zangirov E.I. CHislennoe modelirovanie techeniya gaza v vihrevykh ustrojstvakh [Numerical simulation of gas flow in vortex devices]. *Vestnik UGATU*. 2016; 20. no 2(72): 66–73 (in Russian).
20. Wu Y.T., Ding Y., Ji Y.B. Experimental research on vortex tube. *Journal of Chemical Industry and Engineering*. 2005; 56: 41–44.
21. Bogomolov S.V., Kuznecov K.V. Metod chastic dlya sistemy uravnenij gazovoj dinamiki [Method of particles for the system of equations of gas dynamics]. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1998; 10. No 7: 93–100 (in Russian).
22. Yurchenko D. Chislennoe modelirovanie techeniya v vihrevoj trube s ispol'zovaniem ANSYS Fluent [Numerical flow simulation in the vortex tube using ANSYS Fluid]. *ANSYS Advantage*. 2009; 1: 35–37 (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Якимущин Роман Васильевич – адъюнкт, кафедра боевых гусеничных, колесных машин и военных автомобилей, Филиал военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева Министерства обороны Российской Федерации, г. Омск (ОАБИИ), ORCID ID 0000-0002-4173-0478 (644098, г. Омск, 14 Военный городок, e-mail: yroman1983v@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Roman V. Yakimushkin – Postgraduate Student, Army General A.V. Khrulev Military Academy of Logistics, ORCID ID 0000-0002-4173-0478 (644098, Russia, Omsk, 14 Voynyi gorodok, e-mail: yroman1983v@mail.ru).