

Программный комплекс для моделирования процесса впуска газа в произвольный набор приемных емкостей

В. В. Гаркуша¹, С. Р. Шакиров^{1,3}, С. И. Шпак², В. В. Яковлев¹

¹ *Институт вычислительных технологий СО РАН
Новосибирск, Россия*

² *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия*

³ *Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия*

Аннотация

В работе представлен программный комплекс для моделирования динамических процессов прохождения рабочего газа через произвольный набор емкостей, соединенных произвольным набором трубопроводов. Проведены расчеты для различных комбинаций соединений емкостей, в том числе моделирующие сложные аэродинамические установки ИТПМ СО РАН.

Ключевые слова

компьютерное моделирование, гиперзвуковые аэродинамические трубы, математические модели

Благодарности

Реализация представленного проекта проводилась при поддержке гранта РФФИ №18-07-01033

Для цитирования

Гаркуша В. В., Шакиров С. Р., Шпак С. И., Яковлев В. В. Программный комплекс для моделирования процесса впуска газа в произвольный набор приемных емкостей // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2019. Т. 17, № 4. С. 23–32. DOI 10.25205/1818-7900-2019-17-4-23-32

Software Complex for Modeling the Gas Inlet Process in an Arbitrary Set of Reception

V. V. Garkusha¹, S. R. Shakirov^{1,3}, S. I. Shpak², V. V. Yakovlev¹

¹ *Institute of Computational Technologies SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

² *Khrstianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

³ *Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation*

Annotation

The paper presents a software package for modeling the dynamic processes of the working gas passing through an arbitrary set of tanks connected by an arbitrary set of pipelines. Calculations were carried out for various combinations of tank joints, including modeling complex aerodynamic installations of ITAM SB RAS.

Keywords

computer simulation, hypersonic wind tunnels, mathematical models

Acknowledgements

The implementation of the project as presented was supported by RFBR grant № 18-07-01033

For citation

Garkusha V. V., Shakirov S. R., Shpak S. I., Yakovlev V. V. Software Complex for Modeling the Gas Inlet Process in an Arbitrary Set of Reception. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2019, vol. 17, no. 4, p. 23–32. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7900-2019-17-4-23-32

Введение

Проведение экспериментальных исследований в современных условиях, связанных с оптимизацией расходов всех ресурсов, приводит к существенному росту компьютерного моделирования процесса исследований [1–3], предваряющего, а иногда и заменяющего сам эксперимент. В данной работе приводятся модельные уравнения, позволяющие считать большой набор задач, связанных с процессами перетекания газа через комбинацию емкостей, произвольно соединенных сетью трубопроводов друг с другом.

Постановка задачи

Задана произвольная комбинация соединения трубопроводами емкостей (до 7), каждая из которых имеет выходное и входное отверстия. На рис. 1 схематически изображена одна из емкостей. В качестве параметров задаются объем емкости и площади выходных отверстий. Входные отверстия одной емкости имеют площадь соответствующего выхода другой емкости. На любой входной трубопровод может быть установлен «обратный» клапан, который пропускает поток газа только в одну сторону – на вход в емкость. В качестве начальных данных задаются значения температуры и давления газа, а также температура стенки и коэффициент теплопередачи.

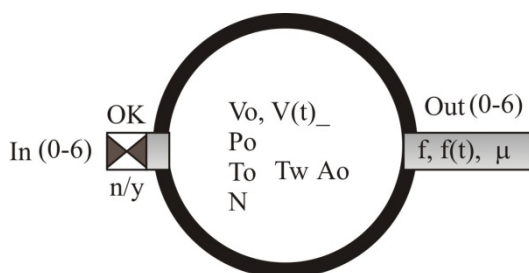


Рис. 1. Схема геометрии и параметры емкостей
Fig. 1. Geometrical scheme and parameters of tanks

На рис. 1: In – входной трубопровод, ОК – обратный клапан (n / y – нет / есть), Out – выходной трубопровод, $f, f(t)$ – площадь сечения трубопровода, $V_0, V(t)$ – объем емкости, P_0 – давление, T_0 – температура газа, T_w – температура стенки, N – подводимая внешняя энергия, μ – коэффициент сопротивления трубопроводов, A_0 – коэффициент теплоотдачи, (0–6) – номер емкости, к которой ведет трубопровод.

Для выбранной емкости можно задать подвод внешней энергии и, также для выбранной емкости (не обязательно этой же), можно задать в необходимом пользователю интервале времени закон изменения объема или площади сечения выходного трубопровода. Одна емкость имеет особый статус и является источником газа для всех остальных емкостей, и в ней можно задать закон и время открытия вентиля для впуска газа в систему.

Вывод основных уравнений вытекания газа из емкости при внезапном открытии выходного трубопровода приведен в [1], поэтому здесь представлены только конечные результаты. Для каждой емкости решается система следующих уравнений:

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{dt} &= \frac{\gamma-1}{V} \left(-\frac{dQ}{dt} - \sum_j G_j I - \frac{P\gamma}{\gamma-1} \frac{dV}{dt} \right), \\
\frac{d\rho}{dt} &= \frac{1}{V} \left(-\sum_j G_j - \rho \frac{dV}{dt} \right), \\
T &= \frac{P}{R\rho}, \\
G &= \frac{f m P_h \sigma(b)}{\sqrt{T_h}}, \\
\sigma(b) &= \begin{cases} 1, & b \leq b_{кр} \\ \sqrt{b^{k_2} - b^{k_3}}, & b > b_{кр} \end{cases}, \\
b &= \frac{P_l}{P_h}, \quad k_2 = \frac{2}{\gamma}, \quad k_3 = \frac{\gamma+1}{\gamma}, \\
m &= \begin{cases} \sqrt{2\gamma/(\gamma-1)/R}, & b \leq b_{кр} \\ \sqrt{\gamma/R(2/(\gamma+1))^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}}, & b > b_{кр} \end{cases}, \\
P_l &= P_h - \frac{\mu \cdot G^2}{2\rho \cdot g}, \\
\frac{dQ}{dt} &= A P^{2/3} (T_w - T)^{4/3} F_k - N.
\end{aligned}$$

Здесь P – давление газа, T – температура газа (T_w – температура стенки), G – массовый расход газа (расход вытекающего из емкости газа считается положительным), I – энтальпия, V – объем емкости, ρ – плотность газа, μ – коэффициент сопротивления трубопровода, Q – тепловая энергия газа, A – коэффициент теплоотдачи газа, N – мощность подводимой внешней энергии, F_k – площадь поверхности емкости, γ – отношение теплоемкостей газа C_p/C_v , R – газовая постоянная, g – ускорение свободного падения, $b_{кр}$ – критическое значение, разделяющее до- и сверхзвуковое течение, индекс $j = 0, \dots, n$ – количество емкостей, подсоединенных к расчетной емкости. Индексы l (h) относятся к параметрам той из двух емкостей, соединенных трубопроводом, в которой давление ниже (выше), чем в расчетной.

Для моделирования процессов прохождения газов через систему емкостей, на основе приведенных выше уравнений, был создан программный комплекс, который позволяет задавать все нужные для расчета данные (геометрию, начальные значения) и провести необходимые расчеты. Результаты отображаются на экране в виде цифровых значений и/или в виде графиков заданных параметров. Для численного решения приведенных уравнений была выбрана неявная схема первого порядка для представления их в конечных разностях. Количество итераций схемы и шаг интегрирования задается пользователем до начала счета. Конфигурация и начальные параметры могут сохраняться для дальнейших расчетов. Результаты счета могут быть сохранены в текстовых файлах на любом этапе счета.

На рис. 2 представлено окно программы для работы с начальной информацией, а на рис. 3 – окно для работы с текущими результатами счета.

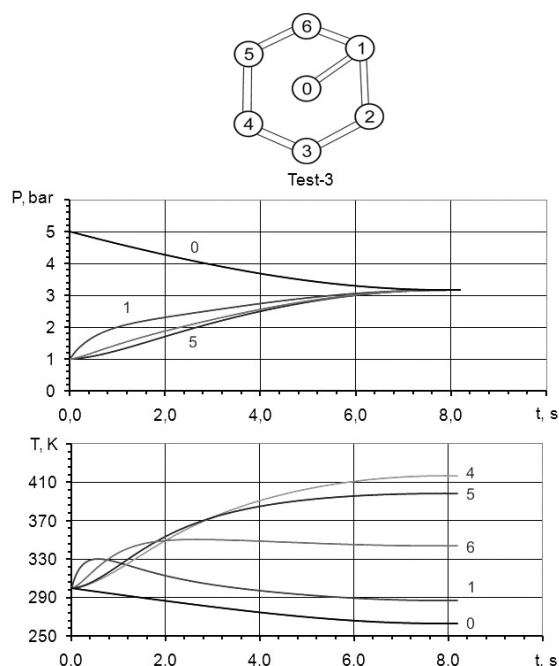


Рис. 4. Результаты расчета (комбинация – кольцо)

Fig. 4. Calculation results (combination – ring)

Из емкости 0, идентичной всем остальным, подается воздух под давлением 5 бар и, как видно из графиков, давления в емкостях выравниваются примерно через 7 с (верхний график рис. 4). Температуры ведут себя по-другому. В емкости 0 температура падает из-за внезапного расширения при вытекании газа в емкость 1. В емкости 1 температура газа сначала повышается из-за адиабатического сжатия, а далее она падает по мере утекания воздуха в другие емкости. Самое большое значение температуры достигается в емкости 4, где сходятся два потока (через емкости 0-1-2-3-4 и через емкости 0-1-6-5-4).

На рис. 5 представлены результаты моделирования этой же конструкции, только к емкости 4 подведен источник энергии мощностью 10 кВт, который работает в течение 3 с (верхний график, Test-5) и дополнительно разрешен теплообмен со стенками емкостей (нижний график, Test-6). В результате теплообмена почти все тепло, полученное от адиабатического сжатия и от источника, уходит в стенки емкостей. Результаты по расчету давлений во всех трех случаях (Test-3, Test-5, Test-6) практически идентичны, поэтому приводятся только для одного из них на рис. 4.

В следующем примере была посчитана комбинация из трех емкостей 0-1-2. Объем емкости 1 меняется с заданной частотой и амплитудой, а на входе в емкость 2 стоит «обратный клапан». Результаты расчета представлены на рис. 6. Видно, что давление (верхний график) и температура (нижний график) во второй емкости (график 2) растут по мере накачки газа в нее из первой емкости, что моделирует процесс накачки с помощью насоса.

Следующий пример показывает результаты моделирования процесса запуска аэродинамической трубы ИТПМ «Транзит-М», мнемосхема которой показана на рис. 7. Работа трубы моделируется комбинацией емкостей, показанных там же (рис. 8).

Процесс пуска состоит из нескольких этапов. Сначала из внешней емкости (в расчете – 0) заполняются емкости 1 и 2, которые моделируют накопительные баллоны, и омический подогреватель (емкость 3), который греет воздух примерно до 600 К. Затем открывается соединение емкостей 6-5-4 (которые моделируют вакуумную емкость, рабочую часть и форкамеру трубы, соответственно) с емкостью 3 и происходит вытекание подготовленного рабочего газа

из емкостей 3-1-2. Емкость 0 на это время отключается. В результате всего процесса через емкость 5 (рабочую часть трубы, где устанавливается исследуемая модель – летательный аппарат или его часть) проходит рабочий газ с давлением 5 бар и температурой 430 К, создавая после 8 секунд режим постоянных величин давления длительностью до 400 мс, что проиллюстрировано графиком 5 на рис. 8. Изменяя начальные данные задачи и времена переключения процессов, можно подобрать необходимые экспериментатору параметры режима потока рабочего газа (давление, температуру, длительность режима).

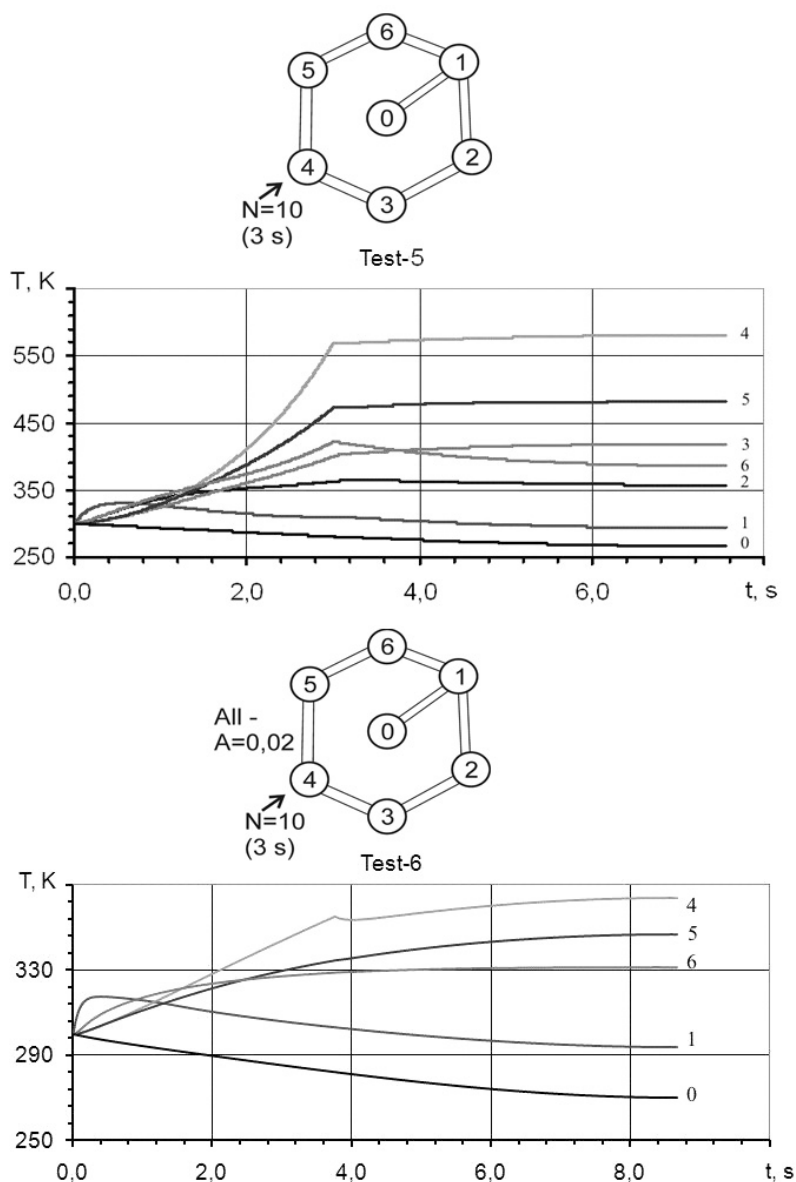


Рис. 5. Результаты расчета (с теплообменом)

Fig. 5. Calculation results (with heat exchange)

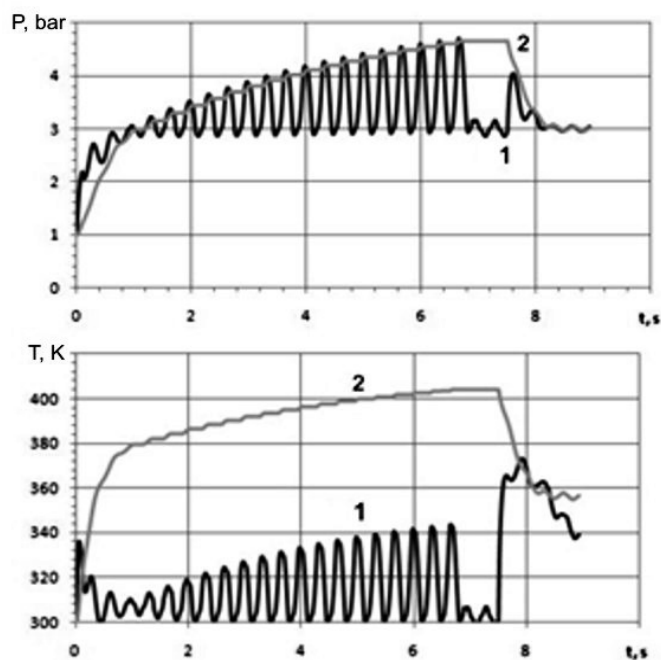


Рис. 6. Результаты расчета с изменением объема 1 емкости
Fig. 6. Calculation results with changing volume of one tank

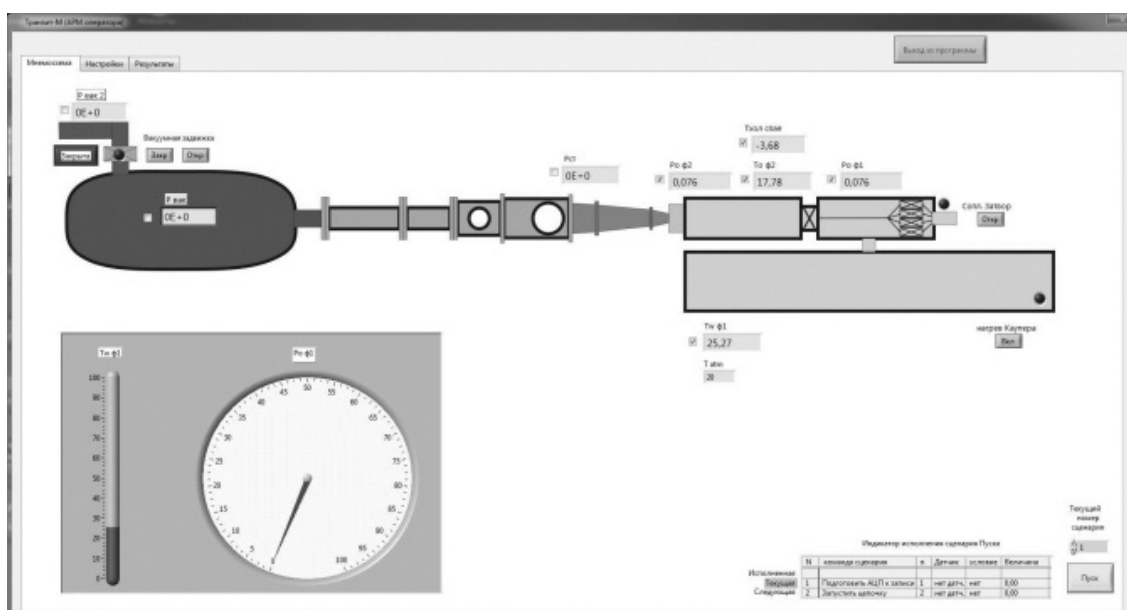


Рис. 7. Мнемосхема установки «Транзит-М»
Fig. 7. Mnemonic scheme of wind tunnel "Transit-M"

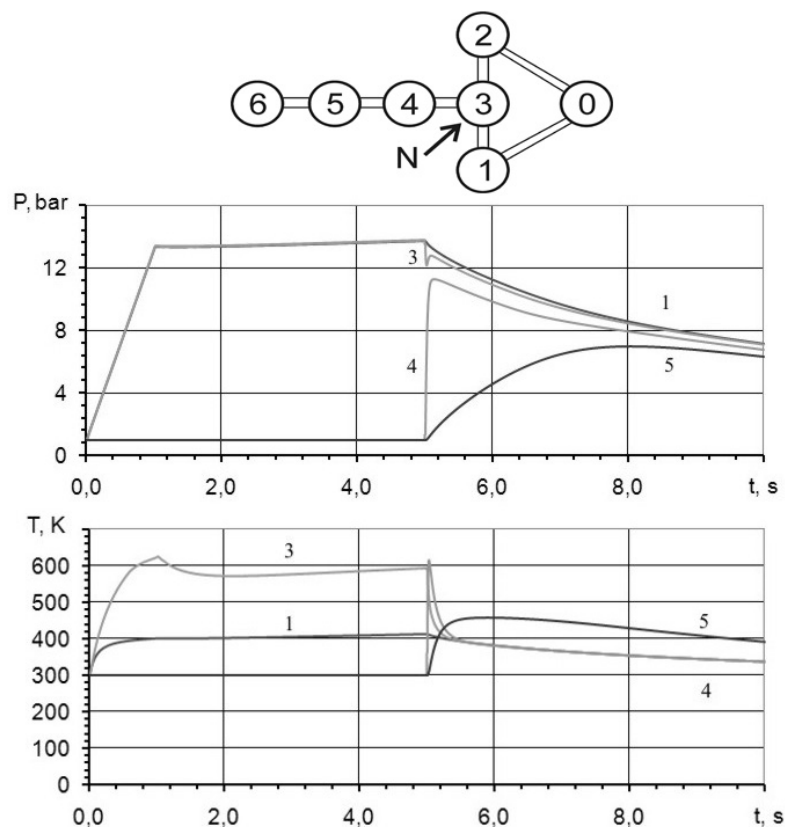


Рис. 8. Результаты моделирования пуска трубы «Транзит-М»
Fig. 8. The simulation results of the start of the wind tunnel "Transit-M"

Заключение

Разработан программный комплекс для моделирования динамических процессов прохождения рабочего газа через произвольный набор емкостей, соединенных произвольным набором трубопроводов. Задавая необходимые параметры (геометрию системы и начальные данные), можно моделировать процесс пуска различных аэродинамических установок, исследовать динамические характеристики таких систем. В работе представлены результаты расчетов для различных комбинаций соединений емкостей, в том числе моделирующих реальные аэродинамические установки ИТПМ СО РАН. Практическая значимость разработанного комплекса заключается в том, что он позволяет повышать результативность проводимых экспериментов, экономить энергоресурсы, а также выдавать рекомендации по компоновке установок на этапе конструирования, что существенно сокращает время, необходимое на их создание.

Список литературы

1. Звегинцев В. И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. 1: Установки для научных исследований. Новосибирск: Параллель, 2014. 551 с.
2. Гаркуша В. В., Гилев В. М., Шпак С. И., Яковлев В. В. Автоматизированное рабочее место оператора высокоскоростной аэродинамической трубы кратковременного действия.

вия // Международный журнал экспериментального образования. 2015. No. 12-1. С. 29–30.

3. **Звегинцев В. И., Шиплюк А. Н., Шпак С. И.** Математическая модель источника рабочего газа для гиперзвуковой аэродинамической трубы АТ-304 // Proceedings of the 15th International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR'2010) Novosibirsk, 2010. № 24. С. 1–7. CD-ROM.

References

1. **Zvegintsev V. I.** Gas-dynamic installation short-acting. Part 1: Settings for scientific research. Novosibirsk, Parallel, 2014, 551 p. (in Russ.)
2. **Garkusha V. V., Gilev V. M., Shpak S. I., Yakovlev V. V.** Automated workplace for a high-speed wind tunnel short-acting. *International Journal of Experimental Education*, 2015, no. 12-1, p. 29–30. (in Russ.)
3. **Zvegintsev V. I., Shipluk A. N., Shpak S. I.** Mathematical model of the working gas source for hypersonic wind tunnel AT-304. In: Proceedings of the 15th International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR'2010). Novosibirsk, 2010, no. 24, p. 1–7. CD-ROM. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию
Received
04.06.2019

Сведения об авторах

Гаркуша Владимир Владимирович, заведующий сектором измерительных систем и приборостроения; Институт вычислительных технологий СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090, Россия)
vgar49@mail.ru

Шакиров Станислав Рудольфович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерных систем, Новосибирский государственный технический университет (пр. К. Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия); заведующий конструкторско-технологическим отделом, Институт вычислительных технологий СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090, Россия)
ShakirovSR@ict.nsc.ru

Шпак Сергей Иванович, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер лаборатории гиперзвуковых технологий; Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)
shpak@itam.nsc.ru

Яковлев Владимир Владимирович, младший научный сотрудник лаборатории информационной информатики; Институт вычислительных технологий СО РАН (пр. Академика Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090, Россия)
vy82@mail.ru

Information about the Authors

Vladimir V. Garkusha, Head of the measurement systems and instrumentation; Institute of Computational Technologies SB RAS (6 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
vgar49@mail.ru

Stanislav R. Shakirov, PhD; Assistant professor of Laser systems Department, Novosibirsk State Technical University (20 K. Marx Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation); Head of Design-Technological Department; Institute of Computational Technologies SB RAS (6 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
ShakirovSR@ict.nsc.ru

Sergey I. Shpak, Ph.D.; lead engineer; Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
shpak@itam.nsc.ru

Vladimir V. Yakovlev, junior scientist; Institute of Computational Technologies SB RAS (6 Academician Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)
vy82@mail.ru