

УДК 621.928.37+629.78

**ВИХРЕВАЯ ОЧИСТКА ГАЗА НАДДУВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ**© 2015 В. В. Бирюк<sup>1</sup>, А. А. Шиманов<sup>1</sup>, Д. А. Оноприенко<sup>2</sup>,  
А. В. Смородин<sup>2</sup>, А. И. Шепелев<sup>2</sup><sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)  
<sup>2</sup>АО "РКЦ "Прогресс", г. Самара

В статье рассматривается одна из проблем системы наддува топливных баков РН с использованием газового аккумулятора давления. В качестве газового аккумулятора давления используется гелий, смешанный с газогенераторными газами, что позволяет увеличить удельный объем газа наддува и уменьшить массу системы. Газогенераторный газ содержит в себе углеродные частицы, которые способствуют быстрому засорению фильтрующего элемента, что приводит к нештатной ситуации и падению давления наддува. Для эффективной и безотказной работы системы наддува баков РН с газовым аккумулятором давления было предложено использование вихревого аппарата сажеочистки. Были рассмотрены различные типы вихревых аппаратов сажеочистки. Выбран наиболее подходящий тип вихревого аппарата сажеочистки для системы наддува топливных баков РН – противоточный циклон. Был спроектирован необходимый вихревой аппарат сажеочистки и построена трёхмерная модель его проточной части. Была получена конечно-элементная сетка и проведены настройки граничных условий. Проведено численное моделирование процесса сажеочистки в противоточном циклоне с помощью ANSYS Fluent. Построены поля распределения частиц сажи и их характер движения в противоточном циклоне.

*Давление, система наддува, бак, ракета-носитель, гелий, двигатель, компонент топлива, теплообменный аппарат, смеситель, газогенераторный газ, газогенератор, насос, степень очистки газа, углеродистые частицы, вихревой аппарат газоочистки, противоточный циклон, массовый расход, закрученный поток, численное моделирование.*

doi: 10.18287/1998-6629-2015-14-1-112-120

На начальной стадии проектирования имеется возможность широкого выбора принципиально различных систем наддува топливных баков ракеты-носителя (РН) (газогенераторные, автогенераторные, с газовым аккумулятором давления и др.) [1].

Выбор типа системы наддува топливных баков РН является наиболее важным при проектировании, так как проблемы, возникающие при её отработке, зависят от первоначального выбора принципа наддува и конструктивной реализации его в изделии.

В статье рассматривается одна из проблем системы наддува топливных баков РН с использованием газового аккумулятора давления. Как правило, в качестве газового аккумулятора давления (газа наддува) используют нейтральный газ – гелий.

Для увеличения удельного объёма газа наддува и, следовательно, уменьшения массы системы часто применяют охлаждённый газ наддува с последующим его нагревом в теплообменном аппарате, который значительно повышает эффективность системы наддува топливных баков изделия. Часто в качестве теплообменного аппарата используют газогенератор двигателя.

В двигательной установке (ДУ) ракеты-носителя с турбонасосной системой подачи компонентов топлива в камеру сгорания для получения газа наддува можно использовать сам газогенераторный газ или смешанный генераторный газ с газом наддува. Газогенераторный газ имеет температуру около 850<sup>0</sup>С, низкую молекулярную массу и, как правило, обладает восстановительными свойствами.

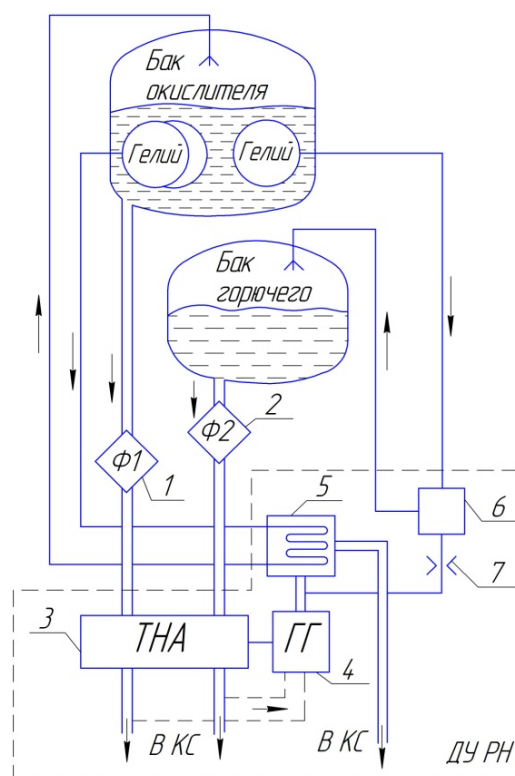


Рис. 1. Схема наддува топливных баков РН

с турбонасосной системой подачи компонентов топлива в камеру сгорания:

- 1 - фильтр в расходной магистрали окислителя; 2 - фильтр в расходной магистрали горючего;  
 3 - турбонасосный агрегат; 4 - газогенератор; 5 - теплообменный аппарат наддува бака "О";  
 6 - смеситель в системе наддува бака "Г"; 7 - жиклёр регулирования температуры генераторного газа

Высокотемпературный генераторный газ перед попаданием в баки РН необходимо предварительно охладить. В данном случае для охлаждения применяется захлаженный гелий. Вследствие низкой молекулярной массы расход газа получается небольшим, однако такой газ из-за его восстановительных свойств можно использовать только для наддува бака горючего. Часто проектируют систему наддува, предусматривая наличие двух теплообменных аппаратов: через один подается газ для наддува бака горючего, а через другой – газ с окислительными свойствами, обеспечивающий наддув бака окислителя [2]. Была предложена система наддува бака, указанная на рис. 1 [3].

В результате проведенного анализа работы экспериментальной установки системы наддува бака горючего РН, а также по результатам дополнительных испытаний ДУ отдельно от РН (рис.2) было установлено, что суммарная масса сажи соста-

вила 2,6 кг за время работы ДУ РН  $\tau = 210$  с.

Дисперсный анализ показал, что сажа состоит из частиц углерода, представляющих собой слипшиеся в крупные фракции (до 1,5 мм) мелкие частицы углерода (до 5 мкм). Слипанию частиц способствуют масла тяжелых конденсированных ароматических углеродов, образующихся вместе с частицами углерода при коксовке топлива. При помещении сажи в керосин вымываются масла (растворяются в керосине) и частицы сажи рассыпаются на более мелкие фракции. С целью исключения попадания неметаллических углеродистых частиц в газ наддува бака горючего предложено применять вихревой аппарат газоочистки, установив его после смесителя генераторного газа с гелием.

Для выбора вихревого аппарата газоочистки были рассмотрены следующие варианты:

- прямоточный циклон;
- противоточный циклон;
- вихревой пылеулавливатель (соплового и лопаточного типов);
- радиальный пылеулавливатель.

По результатам проработки конструкции, метода улавливания частиц и

степени очистки газа был выбран противоточный аппарат газоочистки – противоточный циклон (рис. 3). Такие циклоны широко применяются для отделения дисперсных частиц из газов и используются для сухой очистки газов в различных отраслях промышленности.

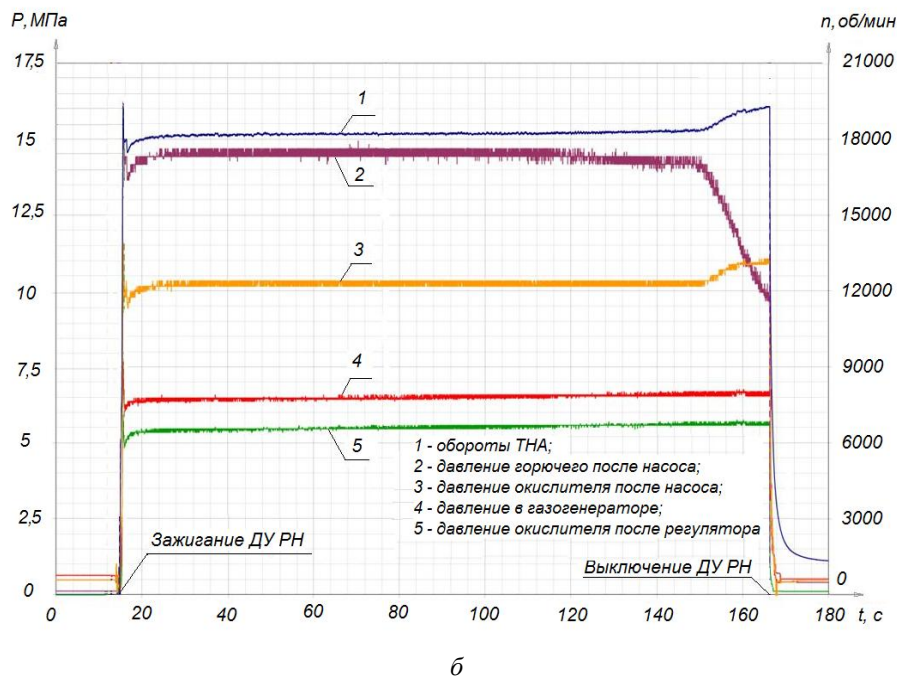
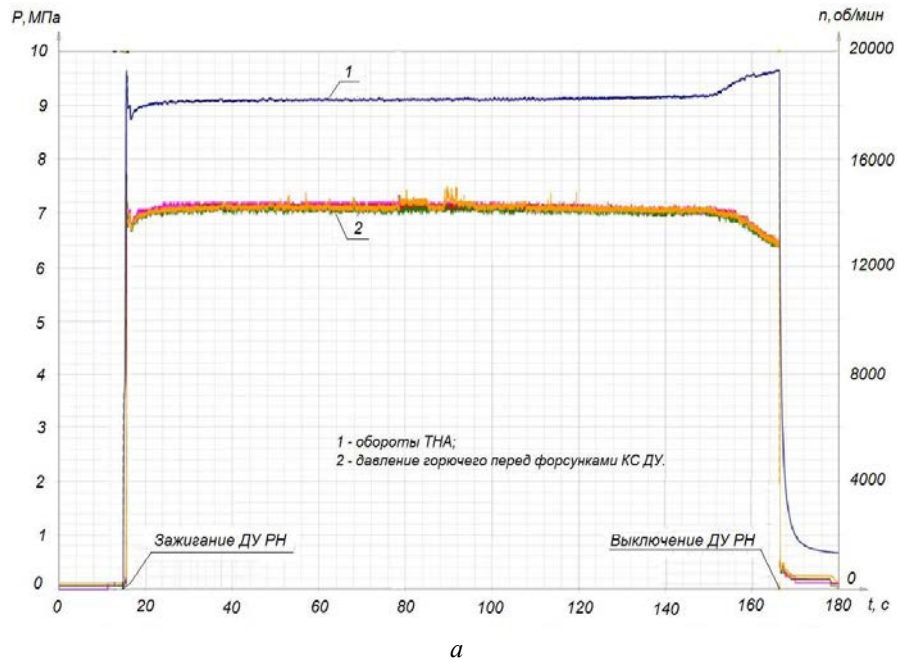


Рис.2. Изменение параметров системы наддува топливных баков РН в ходе экспериментального исследования:

а – изменение давления горючего перед форсунками КС ДУ;

б – изменение давления компонентов топлива после насоса ДУ

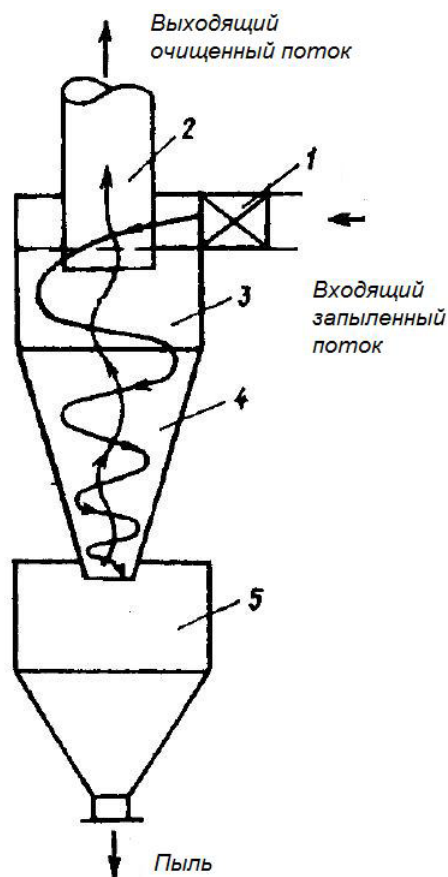


Рис.3. Схема противоточного циклона:  
 1 – тангенциальный входной патрубок;  
 2 – вертикальный отводящий патрубок;  
 3 – цилиндрическая камера; 4 – коническая камера; 5 – пылеосадительный бункер

Скорость удаления частиц пропорциональна осаждающей силе. Из-за очень малой массы мелких частиц гравитационное осаждение оказывается слишком медленным и малоэффективным процессом для частиц размером менее 100 мкм. При использовании инерционного эффекта

скорость улавливания резко повышается. Благодаря этому можно уменьшить размер оборудования и расширить диапазон эффективного улавливания до частиц размером около 20 мкм. Для некоторых циклонов предельный размер улавливаемых частиц составляет 5...10 мкм [4].

В циклонных осадителях (рис.4) запылённому газу сообщают вращательное или вихревое движение, чтобы подвергнуть частицы воздействию центробежной силы. Запылённый газ через входной патрубок 1 с большой скоростью по касательной поступает в цилиндрическую камеру 3 циклона и совершает движение по конической камере 4 по нисходящей спирали. Под действием центробежной силы, возникающей при вращательном движении потока, пылевидные частицы перемещаются к стенкам циклона. Пыль отделяется от воздуха при переходе газового потока из нисходящего в восходящий и по конической камере 4 попадает через пылевыпускное отверстие в пылеосадительный бункер 5. Очищенный газовый поток устремляется вверх, в центр конической камеры, проходя по всей её длине, и выходит наружу циклона через вертикальный отводящий патрубок 2 [5,6].

На основе анализа различных конструкций противоточных циклонов [7,8] и полученных экспериментальных данных, указанных в табл.1, были выполнены расчёты геометрических параметров противоточного циклона для очистки газогенераторных газов при наддуве баков РН (рис. 4) [9].

Таблица 1. Исходные данные для расчёта противоточного циклона

№	Наименование параметра	Номинальное значение
1	Диаметр эквивалентного проходного сечения подводящего патрубка, мм	25
2	Рабочее тело	Смесь генераторного газа с гелием
3	Температура рабочего тела, К	От 420 до 650
4	Давление со стороны выхода циклона, МПа	От 0,15 до 0,10
5	Назначенный ресурс циклона, не менее, с	210
6	Суммарная масса сажи, кг	2,6

Для численного моделирования процесса сажеочистки была построена трёхмерная модель проточной части противоточного циклона с помощью САД-системы (рис. 5). Затем полученная трёхмерная модель была экспортирована в Ansys Design Modeler, где были назначены границы входа, выхода и сборника сажи. После этого с помощью Ansys Meshing трёхмерная модель была разбита на конечно-элементную сетку. Минимальный размер элемента – 0,3 мм, максимальный – 5 мм, количество элементов 2 241 608. Далее в САЕ пакете Ansys Fluent были выполнены все необходимые настройки: заданы давление на входе и выходе, выбрано рабочее тело и заданы его свойства. Для моделирования частичек сажи использовалась модель Discrete Phase. Форма частичек была выбрана сферической. Материал частичек – углерод, размер от 5 мкм до 1,5 мм с методом распределения диаметров *rosin-gammler*.

Частицы углерода впрыскиваются перпендикулярно плоскости входа. Интенсивность впрыскивания частиц равна шагу расчёта.

Далее были настроены граничные условия сажеосадительного бункера. Для проведения расчёта было сделано следующее допущение: частичка сажи, соприкасаясь со стенкой бункера, считается прилипшей к нему и не участвует в дальнейшем расчёте. Поэтому в настройке стенок бункера во вкладке DPM в разделе Boundary Cond. Type было выбрано trap.

После этого был задан временной шаг, равный 0,1 с, и проведено численное моделирование противоточного циклона.

По результатам численного моделирования на различных режимах работы эффективность данного противоточного циклона составляет не менее 90%. Поля распределения частиц сажи и характер их движения внутри противоточного циклона представлены на рис. 6 и 7.

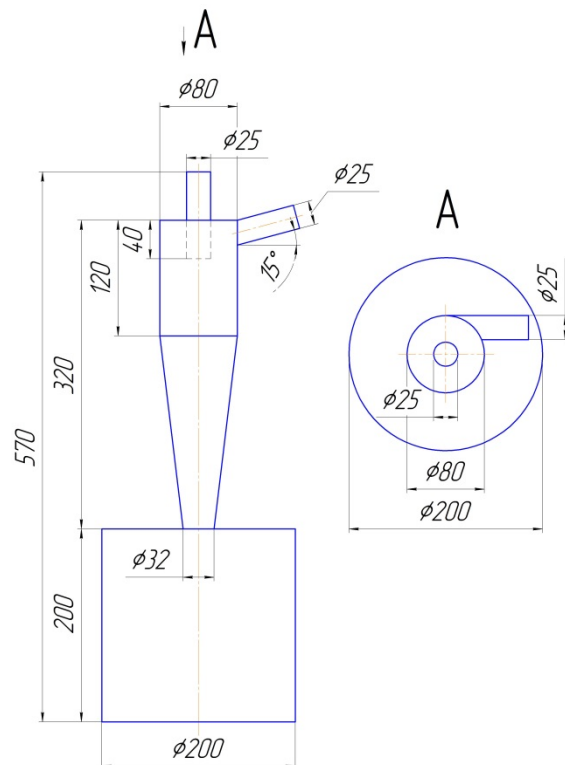


Рис. 4. Геометрические параметры противоточного циклона

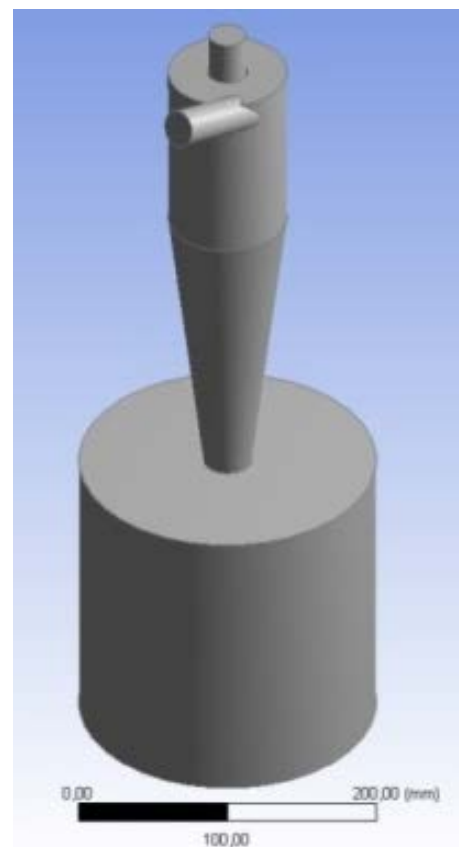


Рис. 5. Трёхмерная модель проточной части противоточного циклона



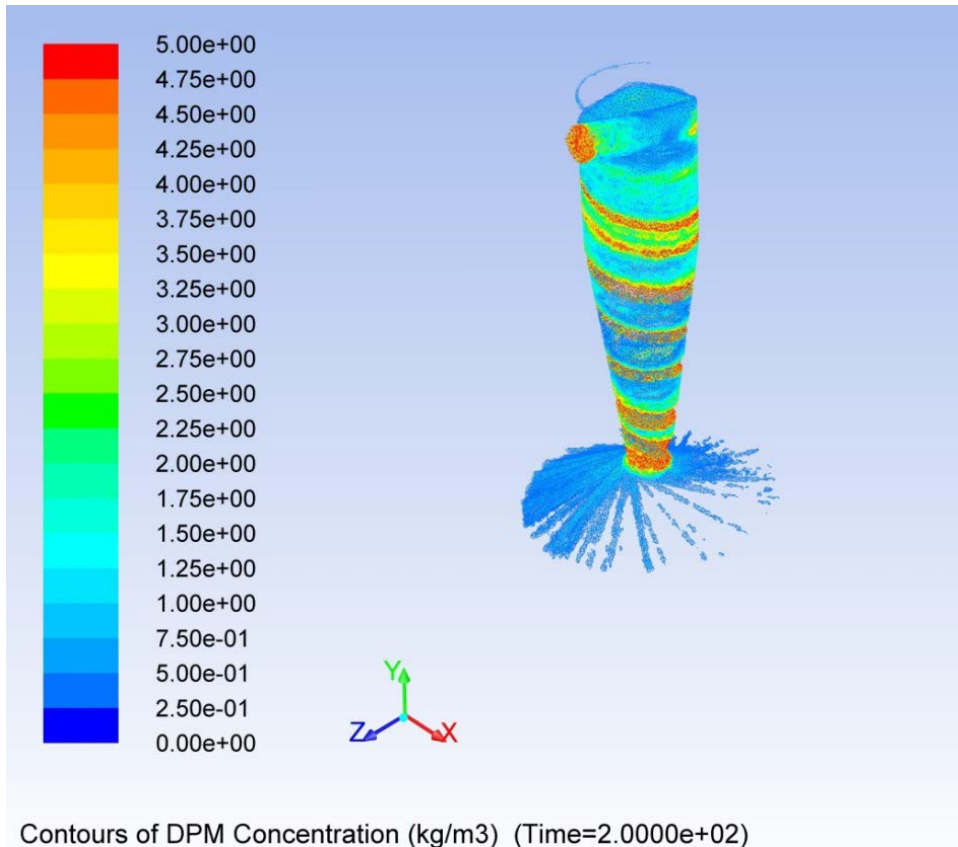


Рис. 6. Поле распределения частиц сажи в циклоне на установившемся режиме течения газа

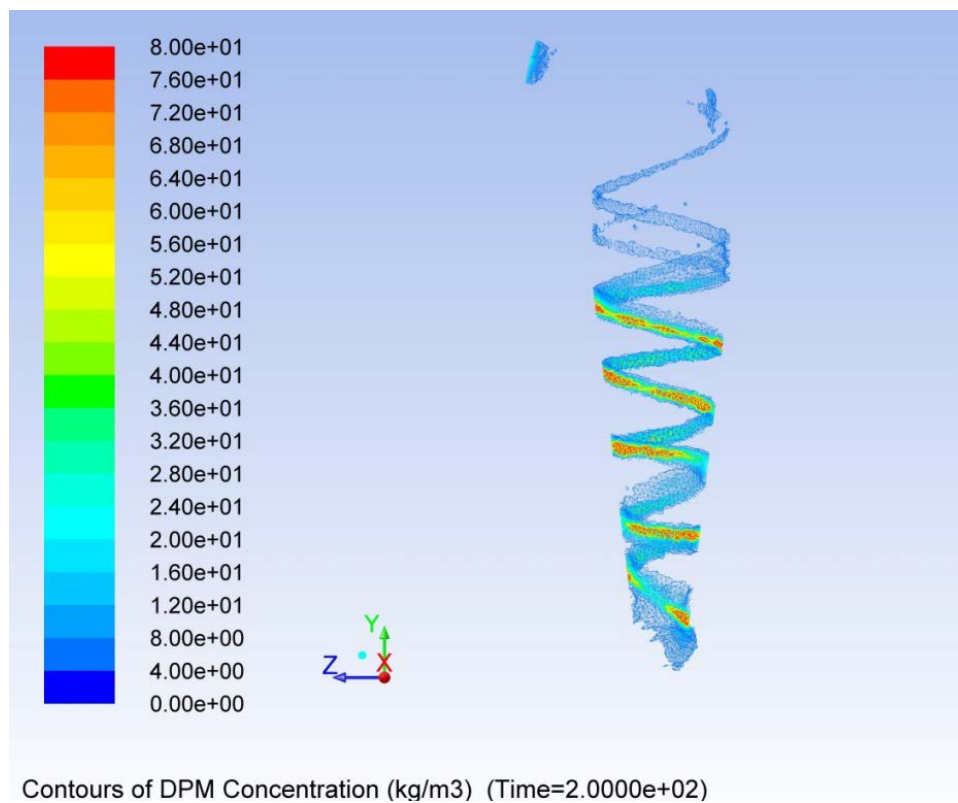


Рис. 7. Характер движения частиц сажи в циклоне на установившемся режиме течения газа

В результате проведённых исследований были выполнены и решены следующие задачи:

– проведён анализ современного развития вихревых аппаратов газоочистки и выбор аппарата газоочистки;

– подобраны оптимальные геометрические параметры циклона для очистки газа наддува топливного бака горючего РН от неметаллических углеродистых частиц (сажи);

– выполнен предварительный анализ результатов расчёта очистки газового потока, который показал, что степень очистки газа составляет не менее 90% на уста-

новившемся режиме работы противоточного циклона.

Таким образом, по результатам полученных характеристик противоточного циклона можно сделать вывод о возможности применения вихревого аппарата газоочистки в системе бортового наддува топливных баков РН без доработки изделия в части теплообменного аппарата и конструкции подачи компонентов топлива в ДУ.

Работы выполнены сотрудниками ЦКП САМ-технологий на оборудовании ЦКП в рамках соглашения RFMEFI59314X0003.

### Библиографический список

1. Двигательные установки ракет на жидком топливе / под ред. О.Н. Прядкина. М.: Мир, 1966. 404 с.

2. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 488 с.

3. Бирюк В.В., Смородин А.В., Шепелев А.И., Оноприенко Д.А. Система наддува топливных баков ракеты-носителя с использованием тепла генераторного газа // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3(41), ч. 1. С. 35–39.

4. Гиргидов А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб.: Издательство Политехнического университета, 2007. 546 с.

5. Асламова В.С. Прямоточные циклоны. Теория, расчёт, практика. Ангарск: Ангарская государственная техническая академия, 2008. 233 с.

6. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. Самара: Оптика, 1997. 348 с.

7. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. М.: Стройиздат, 1981. 296 с.

8. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки: учебное пособие. Пенза: Издательство государственного университета, 2005. 210 с.

9. Зиганшин М.Г., Колесник А.А., Посохин В.Н. Проектирование аппаратов пылеочистки. М.: Экопресс-3М, 1998. 504 с.

### Информация об авторах

**Бирюк Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: вихревой эффект и его применение в технике, тепломассообмен, термодинамика.

**Шиманов Артём Андреевич**, инженер кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) E-mail: [tema444st@mail.ru](mailto:tema444st@mail.ru). Область научных интересов: рабочие процессы тепловых и холодильных машин, тепломассообмен, термодинамика.

**Онопrienко Денис Александрович**, инженер-конструктор, АО «РКЦ «Прогресс». E-mail: [den\\_ssau@mail.ru](mailto:den_ssau@mail.ru). Область научных интересов: проектирование, изготовление и эксплуатация ракет-носителей, теплообмен, термодинамика.

**Смородин Алексей Валерьевич**, главный конструктор РН «Союз-2-1в», АО «РКЦ «Прогресс». E-mail: [lex.samara@rambler.ru](mailto:lex.samara@rambler.ru). Область научных

интересов: проектирование, изготовление и эксплуатация ракет-носителей, теплообмен, термодинамика.

**Шепелев Алексей Иванович**, главный конструктор – начальника отделения, АО «РКЦ «Прогресс». E-mail: [uran\\_74@mail.ru](mailto:uran_74@mail.ru). Область научных интересов: проектирование, изготовление и эксплуатация ракет-носителей, теплообмен, термодинамика.

## VORTEX CLEANING OF FUEL TANK PRESSURANT GAS

© 2015 V. V. Biryuk<sup>1</sup>, A. A. Shimanov<sup>1</sup>, D. A. Onoprienko<sup>2</sup>,  
A. V. Smorodin<sup>2</sup>, A. I. Shepelev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

<sup>2</sup>Space Rocket Center “Progress” plc, Samara, Russian Federation

One of the problems of space launch vehicle fuel tanks using gas pressure accumulators is dealt with in the article. Helium mixed with gas generator gases is used as a pressure gas accumulator, which makes it possible to increase the specific volume of pressurant gas and decrease the mass of the system. Gas generator gas comprises carbon particles that cause fast clogging of the filter, which leads to a contingency and charge pressure drop. The use of soot-cleaning vortex apparatus was suggested for efficient fail-safe operation of the tank pressurization system. Different types of vortex soot-cleaning devices were considered. A reverse-flow cyclone was chosen as the most appropriate type of vortex soot cleaner for a fuel tank pressurization system. The required soot cleaner was designed and its flow part was modeled. A finite element mesh was obtained and boundary conditions were set. Numerical modeling of the soot cleaning process was carried out in a reverse-flow cyclone with the help of ANSYS Fluent. Fields of soot particle distribution and the character of their motion in the reverse-flow cyclone were plotted.

*Pressure, pressurization system, tank, booster rocket, helium, engine, propellant component, heat exchanger, mixer, gas-generating gas, gas-generating, pump, efficiency of gas cleaning, carbon particles, gas purification vortex device, reverse-flow cyclone, mass flux, swirl flow, numerical modeling.*

## References

1. *Dvigatel'nye ustanovki raket na zhidkom toplive / pod red. O.N. Pryadkina* [Propulsion systems of liquid-propellant rockets / edited by O. N. Pryadkin]. Moscow: Mir Publ., 1966. 404 p.
2. Dobrovolsky M.V. *Zhidkostnye raketnye dvigateli* [Liquid-propellant rocket engines]. Moscow: Bauman State Technical University Publ., 2005. 488 p.
3. Biryuk V.V., Smorodin A.V., Shepelev A.I., Onoprienko D.A. System of pressurization of the fuel tank of a launch vehicle using the heat of generator gas. *Vestnik of the Samara State Aerospace Universi-*
- ty. 2013. No. 3(41), part 1. P. 35-39. (In Russ.)
4. Girgidov A.D. *Mekhanika zhidkosti I gaza (gidravlika)* [Fluid Dynamics (hydraulics)]. St. Petersburg: Izdatel'stvo Politekhicheskogo universiteta, 2007. 546 p.
5. Aslamova V.S. *Pryamotochnye tsiklony. Teoriya, raschet, praktika* [Uniflow cyclone. Theory, calculation, practice]. Angarsk: Angarsk State Technical Academy Publ., 2008. 233 p.
6. Merkulov A.P. *Vikhrevoy effect i ego primeneniye v tekhnike* [Vortex ef-



fect and its application in engineering]. Samara: Optima Publ., 1997. 348 p.

7. Pirumov A.I. *Obespylivanie vozdukha* [Dedusting of air]. Moscow: Sroyizdat Publ., 1981. 296 p.

8. Vetoshkin A.G. *Protsessy i apparaty pyleochistki: uchebnoe posobie* [Pro-

cesses and devices of dedusting. Textbook]. Penza: Izdatel'stvo gosudarstvennogo universiteta, 2005. 210 p.

9. Ziganshin M.G., Kolesnik A.A., Posokhin V.N. *Proektirovanie apparatov pyleochistki* [Design of dedusting devices]. Moscow: Ecopress-3M Publ., 1998. 504 p.

### About the authors

**Biryuk Vladimir Vasilyevitch**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [tep\\_lotex\\_ssau@bk.ru](mailto:tep_lotex_ssau@bk.ru). Area of Research: vortex effect and its application in engineering, heat and mass exchange, thermodynamics.

**Shimanov Artem Andreevich**, engineer, Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: [tema444st@mail.ru](mailto:tema444st@mail.ru). Area of Research: work processes of heat engines and refrigerators, heat and mass exchange, thermodynamics.

**Onoprienko Denis Aleksandrovich**, design engineer, Space Rocket Center "Progress" plc, Samara, Russian Federation. E-

mail: [den\\_ssau@mail.ru](mailto:den_ssau@mail.ru). Area of Research: launch vehicle designing, production and operation, heat and mass exchange, thermodynamics.

**Smorodin Alexey Valerievich**, chief designer of the launch vehicle "Soyuz-2-1v", Space Rocket Center "Progress" plc, Samara, Russian Federation. E-mail: [lex.samara@rambler.ru](mailto:lex.samara@rambler.ru). Area of Research: launch vehicle designing, production and operation, heat and mass exchange, thermodynamics.

**Shepelev Aleksey Ivanovich**, chief designer, Space Rocket Center "Progress" plc, Samara, Russian Federation. E-mail: [uran\\_74@mail.ru](mailto:uran_74@mail.ru). Area of Research: launch vehicle designing, production and operation, heat and mass exchange, thermodynamics.