

Численное моделирование пористой насадки регенератора микрокриогенных газовых машин

© В.В. Кулик, Е.С. Навасардян, А.Н. Паркин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проведена оценка времени безотказной работы микрокриогенных газовых машин на стадии проектирования методами численного анализа с учетом влияния различных, в том числе и конструктивных, факторов. Для выполнения такой оценки предложено использовать многофакторный термогазодинамический анализ, основанный на интеграции накопленного опыта экспериментальных исследований и численного моделирования. Показан пример использования многофакторного термогазодинамического анализа к анализу узлов микрокриогенных газовых машин. Проведено численное 3D-моделирование структуры и гидродинамики пористого регенератора как основного узла, накапливающего риски. Выполнено сравнение результатов численного исследования зависимости гидросопротивления моделируемого регенератора от числа Рейнольдса с результатами расчета по корреляционным зависимостям зарубежных исследователей, которое показало высокую степень сходимости с зависимостями Танаки и Блаза. Данное сравнение служит основанием для использования приведенной модели в математической модели для последующих расчетов.

Ключевые слова: микрокриогенная газовая машина, пористая насадка, регенератор, регенеративный теплообменный аппарат, многофакторный термогазодинамический анализ, математическое моделирование, фактор трения, гидравлическое сопротивление

Введение. Микрокриогенные газовые машины (МКГМ) — важный элемент спутниковых систем навигации и связи. Одним из основных показателей надежности таких машин является время безотказной работы (комплексный и вероятностный показатели), понимание степени и характера влияния различных факторов на который позволяет определить глубину и очередность совершенствования аппаратов и узлов в ходе проектирования МКГМ [1].

Оценка времени безотказной работы МКГМ на стадии проектирования методами численного анализа и учет влияния различных, в том числе конструктивных, факторов на сегодня — актуальная и сложная задача. Ее решение проведем с помощью многофакторного термогазодинамического анализа (МФТГДА), в основе которого лежит интеграция накопленного опыта экспериментальных исследований и численного моделирования.

Многофакторный анализ МКГМ. Для расчета и анализа работы МКГМ выделим независимые факторы и зависимые от них показатели энергетической и термодинамической эффективности.

Независимые факторы включают:

- внешние факторы, характеризующие внешние воздействия на МКГМ;
- структурные факторы, характеризующие конструктивное исполнение машины;
- технические характеристики машины.

К *зависимым показателям энергетической и термодинамической эффективности* относятся: холодильный коэффициент; потребляемая мощность; холодопроизводительность.

Поиск ключевых факторов, оказывающих непосредственное влияние на зависимые показатели энергетической и термодинамической эффективности МКГМ, а также определение связи аналитических моделей МКГМ с конструктивным исполнением каждого конкретного ее узла или аппарата предлагается проводить с помощью МФТГДА.

Конечные цели МФТГДА — определение интегральных критериев, связывающих различные независимые факторы, а также оценка их влияния на показатели энергетической и термодинамической эффективности МКГМ. Условная схема МФТГДА представлена на рис. 1 (отметим, что на схеме отображены не все ключевые факторы, их список может быть дополнен в зависимости от широты исследования).

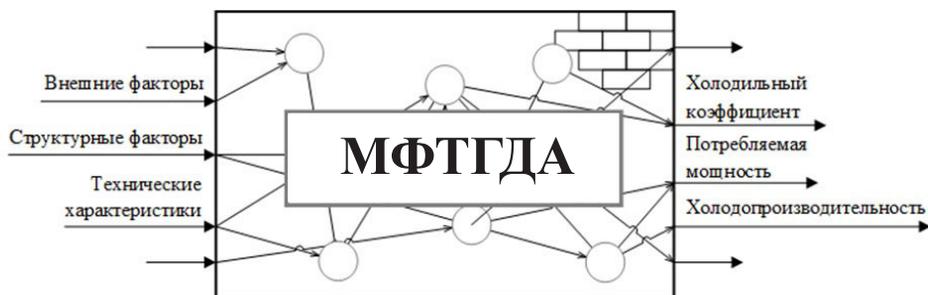


Рис. 1. Условная схема МФТГДА

Сопоставление независимых факторов с причинами отказов МКГМ. На стадии эскизного проекта МКГМ рассматривается как совокупность взаимодействующих функциональных элементов (деталей, узлов и т. п.). Структура каждого узла определяется в зависимости от степени проработки конструкции детали/узла машины и стадии анализа. В качестве узла может быть принята как отдельная деталь, так и сборочная единица.

В качестве примера для предметного рассмотрения методики анализа представлена схема сборки МКГМ Стирлинга с роторным приводом (рис. 2). Схема выстроена по основной спецификации на МКГМ и содержит все элементы конструктивного исполнения ма-

шины уже на стадии эскизного проектирования, отражая основные этапы сборки. Анализ функций плотности вероятности отказов каждого компонента (сборки/детали) даже при наличии статистически обобщенных данных на стадии проектирования довольно сложен для инженера-конструктора и требует специальных программных приложений с формированием собственной базы данных по отказам, которая ориентирована на конкретное производство МКГМ. В МФТГДА предлагается заменить комплексный вероятностный анализ отказа машины на основе определения коэффициентов функций плотности вероятности на более доступный качественный поиск накопления распределенных рисков по сборочным единицам, деталям и стандартным изделиям.

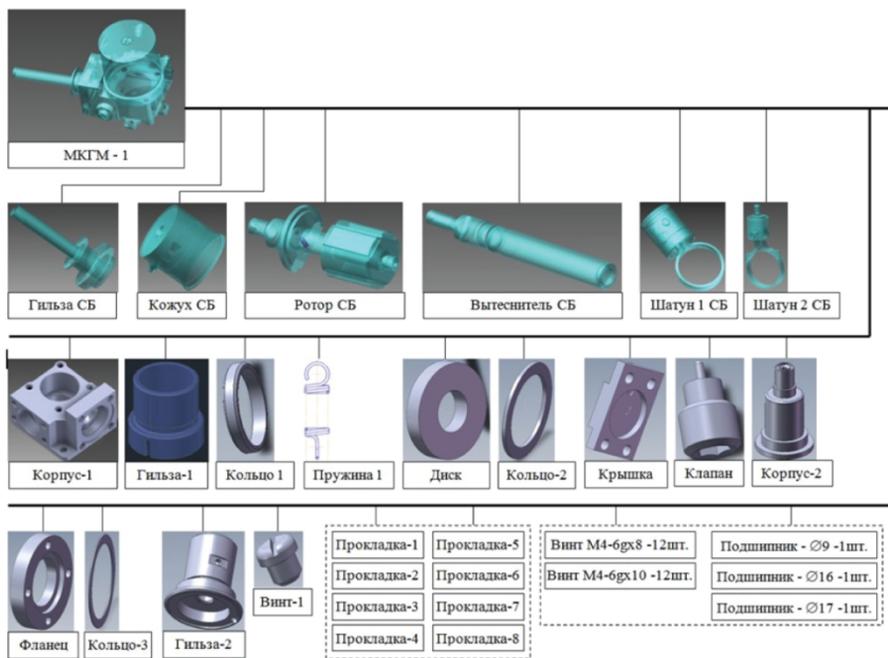


Рис. 2. Схема сборки МКГМ Стирлинга

В ходе эскизного проектирования возможны также поуровневый подход к анализу накопления рисков и построение диаграммы отказов для каждой единицы, входящей в сборку МКГМ отдельно. Информацию о видах отказов, функциональном назначении и компонентах целесообразно отобразить на диаграмме или в виде матрицы. На рис. 3 представлена диаграмма, отображающая итоговое качественное распределение видов отказов по элементам машины.

Так, используя базу видов отказов уже существующих МКГМ, можно провести анализ потенциальных видов отказов для нового об-

разца МКГМ непосредственно на стадии концептуального проектирования и выявить сборочные единицы и детали машины, конструктивная проработка которых окажет наибольшее влияние на итоговый показатель эффективности.

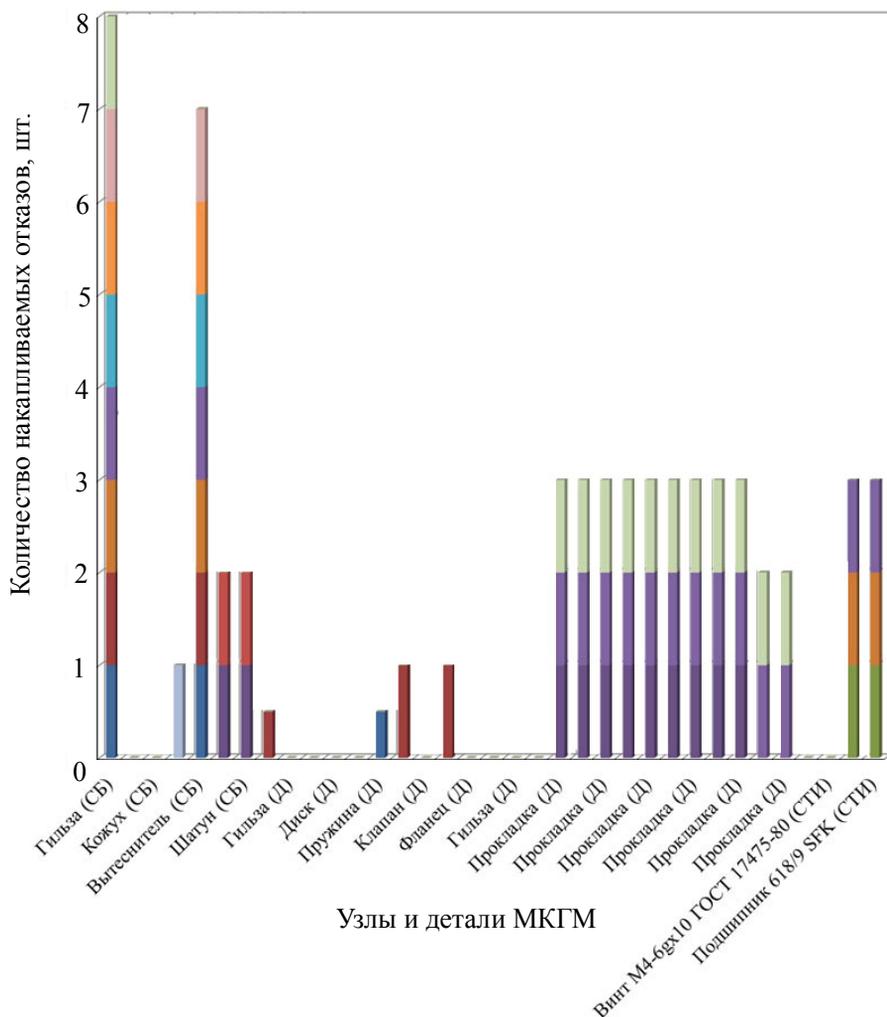


Рис. 3. Накопительная диаграмма отказов по каждому компоненту МКГМ по причине:

- — утечки рабочего вещества; ■ — роста температуры криостатирования; ■ — критических значений вибрации; ■ — критического роста гидросопротивления генератора и потребляемой мощности; ■ — износа; ■ — термического шока; ■ — разрушения вследствие напряженного состояния; ■ — заклинивания и задира; ■ — фреттинга; ■ — трещин; ■ — усталости; ■ — коррозии; ■ — механического разрушения

По данным, приведенным в диаграмме, можно сделать вывод о накоплении целого ряда отказов в элементах сборочной единицы гильзы, в состав которой входит подвижный поршень-вытеснитель

с регенеративной насадкой, а также отказов, связанных с работой уплотнительных элементов — прокладок.

Поиск модели для определения гидравлического сопротивления насадки. При рассмотрении узла поршня-вытеснителя, накапливающего наибольшее количество отказов, можно говорить о том, что регенератор определяет не только безотказность и долговечность, но и эффективность МКГМ [2, 3]. Для дальнейшего анализа причин отказа регенератора предлагается провести численные эксперименты для определения параметров работы регенеративного теплообменника.

В данной статье представлен пример стационарного расчета пористой насадки регенератора и протекания рабочего вещества через нее, в результате которого были определены гидравлические характеристики протекания рабочего вещества через насадку регенератора.

Регенератор — это микротеплообменный аппарат, представляющий собой цилиндрический корпус, заполненный пористой насадкой различного типа. Типы насадок, используемые для микротеплообменных аппаратов в настоящее время, показаны на рис. 4.

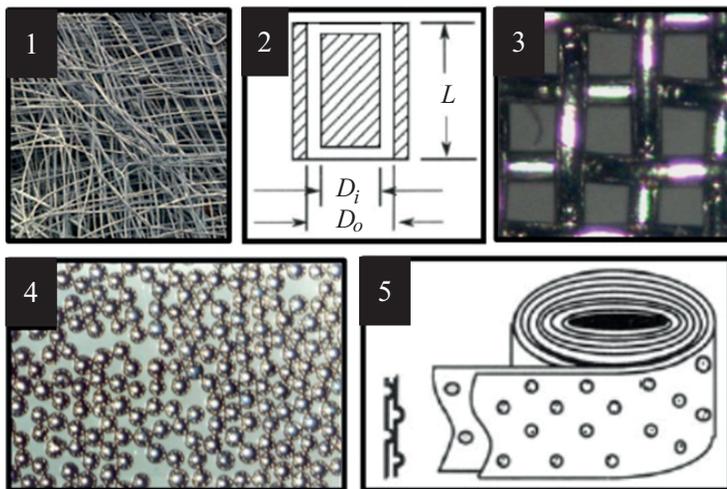


Рис. 4. Типы насадок регенератора:

1 — «путанка»; 2 — кольцевой зазор; 3 — сетчатая насадка; 4 — насыпная насадка; 5 — ленточная гофрированная фольга

Основными характеристиками насадок являются пористость и проницаемость. Для насадок разных типов характерны очень высокие значения объемной поверхности теплообмена и высокая интенсивность теплообмена между проницаемой пористой матрицей и протекающим сквозь нее теплоносителем из-за развитой поверхности соприкосновения, а также высокого гидравлического сопротивления (ГС).

Для применения в регенераторах МКГМ насадка должна обладать следующими характеристиками [4]:

- минимальным ГС в направлении движения теплоносителя;
- высокой теплопроводностью по направлению движения рабочего вещества;
- однородной структурой (равномерно пористой в рассматриваемом элементе объема);
- равномерной проницаемостью (отсутствием в объеме пористого материала закупоренных зон);
- высокими показателями теплоемкости и механической прочности.

Для построения 3D-модели регенератора и численного моделирования была выбрана сетчатая насадка, поскольку ее чаще остальных применяют для формирования регенераторов, работающих в диапазоне температур 300...70 К. Кроме того, для насадки данного типа можно найти наибольшее количество экспериментальных и аналитических данных [5–7].

Основные этапы моделирования гидродинамики в структуре регенератора. При построении модели пористой структуры сетки и рабочего вещества в качестве исходных данных характеристик сетки (рис. 5) были приняты значения:

Рабочее вещество	Гелий (газ)
Геометрические характеристики сетки:	
диаметр проволоки, d , мкм	30
шаг, t , мкм	63,5
характерный размер элементарного объема, a , мкм	444,5
количество слоев	10

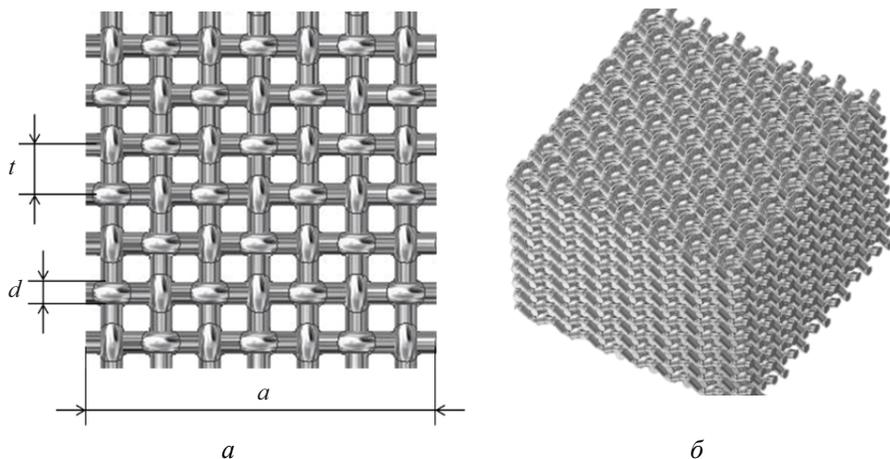


Рис. 5. 3D-модель сетки:

a — вид и размеры единичной сетки насадки регенератора; b — вид элементарного объема сетки насадки регенератора

Вид модели рабочего вещества представляет собой совокупность пор регенератора и участков стабилизации до и после выбранного элементарного объема (рис. 6).

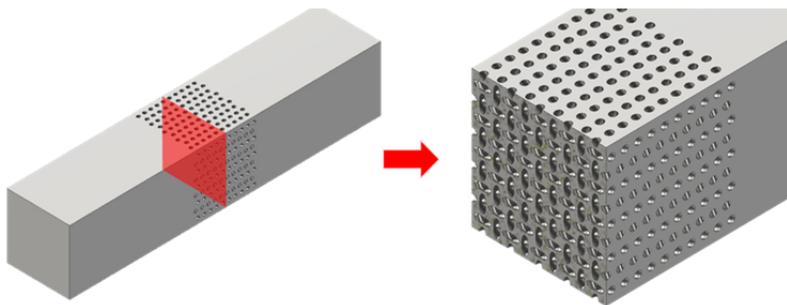


Рис. 6. Вид модели рабочего вещества, проходящего через элементарный объем регенератора

Основные параметры потока рабочего вещества через элементарный объем: скорость $V = \{0,25; 0,5; 1; 3; 5\}$ м/с, температура рабочего вещества $T = 300$ К, давление рабочего вещества на выходе из элементарного объема $P_{\text{вых}} = 3$ МПа. Основные размеры модели для определения ГС насадки приведены на рис. 7.

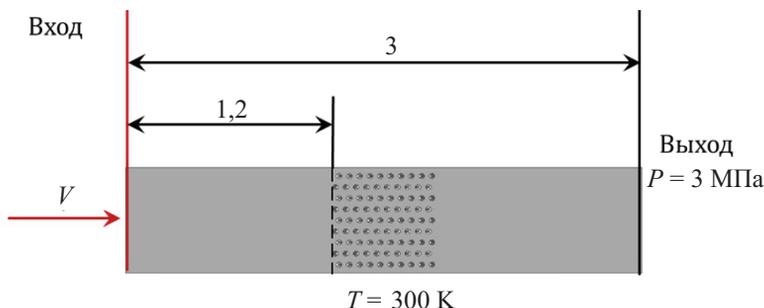


Рис. 7. Основные параметры и размеры (мм) расчетной модели при $V = \{0,25; 0,5; 1; 3; 5\}$ м/с

При построении сетки выбор типа и характера построения элементов ячеек сетки зависит от геометрии модели. В данном случае была построена сетка (рис. 8) с уплотнением размера ячеек в месте размещения пор регенератора со следующими основными характеристиками:

Вид сетки	Тетраэдральная
Общее количество ячеек	4 836 144
Минимальный размер ячейки, мкм	4
Фактор роста ячеек	1,2

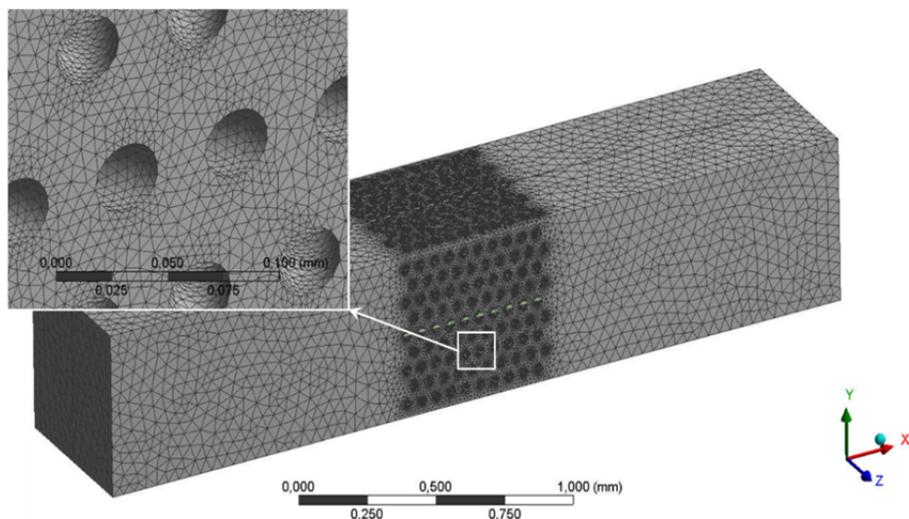


Рис. 8. Сетка модели рабочего вещества

Задание свойств рабочего тела и граничных условий в математическом пакете происходит в соответствии с выбранной геометрией сетки, рабочим веществом и основными параметрами потока. Граничные условия определены выбранной скоростью движения газа на входе и давлением на выходе.

В качестве модели турбулентности была выбрана простая двух-параметрическая модель $k-\varepsilon$ со стандартными пристеночными функциями (standart wall functions), в которой решаются два уравнения переноса, определяющие турбулентную скорость и масштаб длины. Стандартная $k-\varepsilon$ -модель получила широкое применение в решении практических инженерных задач, а устойчивость к ошибкам, экономичность и разумная точность для широкого диапазона турбулентных потоков делает ее наиболее применимой в промышленных задачах. Помимо прочего, эта модель была рекомендована как более точная для проведения математических экспериментов для микроструктур [8]. Постоянные коэффициенты для этой модели турбулентности получены опытным путем, и поэтому она является полуэмпирической [9, 10].

Решение было проведено по методу конечно-разностных элементов, его результатом являются значения и поля распределения статического давления, температур, скоростей и других параметров по исследуемому объему. На рис. 9 показано распределение статического давления по главному сечению пористого тела.

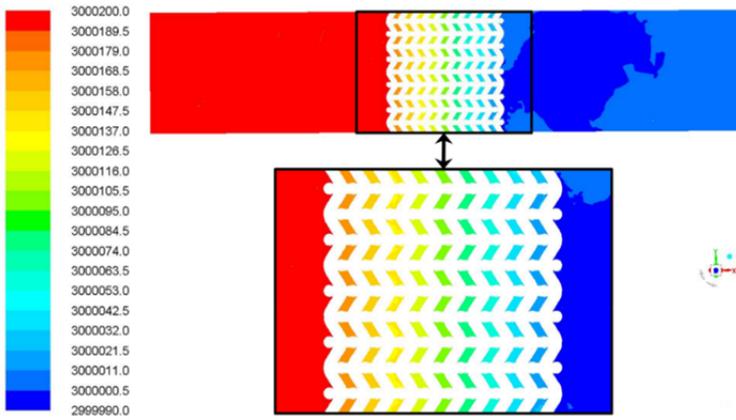


Рис. 9. Распределение статического давления (Па) по главному сечению пористого тела

Сопоставление результатов математического моделирования с экспериментальными данными из других научных работ. В настоящее время зарубежные ученые используют собственные корреляции, основанные на экспериментальных данных [11]. Перечислим основные из этих зависимостей:

1) фактор трения по уравнению Эргуна, основанный на экспериментальных данных по моделированию ГС сетчатой насадки,

$$f = \frac{230}{Re} + 2,6^{\circ};$$

2) фактор вязкостного трения из уравнения Эргуна,

$$f = 150 + 1,75 \frac{Re}{1 - \epsilon_0};$$

3) фактор трения, $f = C_{fd} + \frac{C_{sf}}{Re}$, с коэффициентами C_{fd} и C_{sf} , учитывающими тип структуры насадки.

Значения коэффициентов фактора трения, предложенных различными авторами, отражены в таблице.

Значения коэффициентов фактора трения, предложенных различными авторами

Автор корреляции	C_{sf}	C_{fd}
Геден/Вуд (Gedeon/Wood)	68,556	0,527
Тонг/Лондон (Tong/London)	44,710	0,324
Блаз (Blass)	47,245	0,489
Мийабе (Miyabe)	33,603	0,337
Танака (Tanaka)	40,741	0,532

Для сравнения на рис. 10 представлены значения фактора трения, полученные в результате математического моделирования, для различных значений числа Рейнольдса с разными корреляциями.

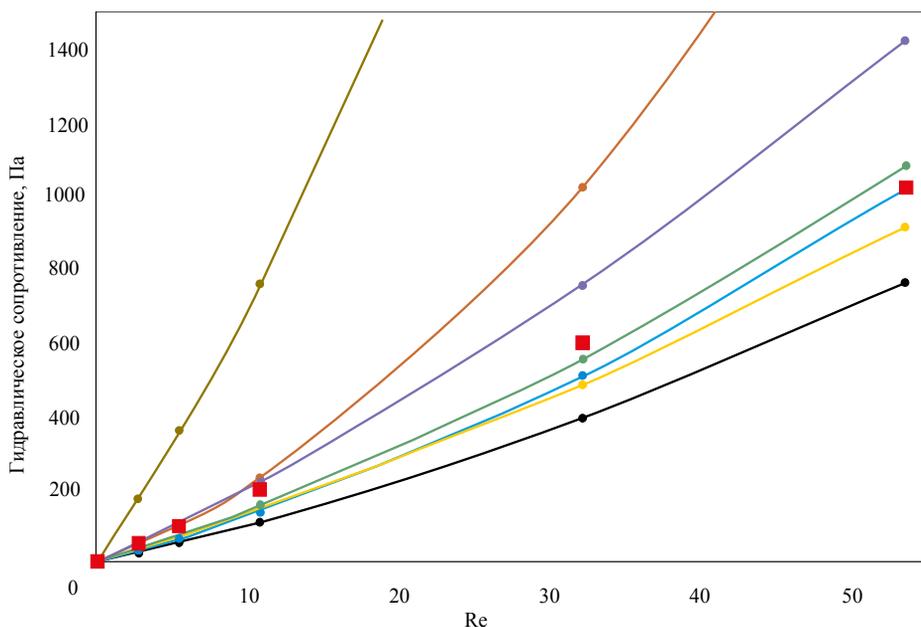


Рис. 10. Зависимость ГС от числа Рейнольдса для потока рабочего вещества через насадку регенератора:

— ГС по Блазу; — ГС по Гедену/Вуду; — ГС по Тонгу/Лондону; — ГС по Мийабе; — ГС по Танаке; — ГС математической модели; — ГС Эргуна; — ГС по кинетической функции трения из уравнения Эргуна

По результатам сравнения можно сделать вывод о том, что корреляционные коэффициенты, рекомендуемые Танакой и Блазом, имеют наибольшую сходимость:

- среднее значение отклонения с результатами Танаки 11,2 %, с наибольшим отклонением ~30 % при значении Re до 10;
- среднее значение отклонения с результатами Блаза 23,3 %, с наибольшим отклонением ~50 % при значении Re до 10.

По данным значениям при числах $Re > 10$ можно говорить о высокой степени сходимости результатов математического моделирования с результатами расчетов, предложенными зарубежными авторами.

На рис. 11 и 12 для сравнения представлены значения фактора трения f , полученные в результате математического моделирования для различных значений числа Рейнольдса при стационарной продувке элементарного объема насадки регенератора с аналогичными геометрическими характеристиками и исходными данными, и экспериментальные данные [5]. Уравнение линии тренда $y = 63,072x - 0,975$ (см. рис. 12).

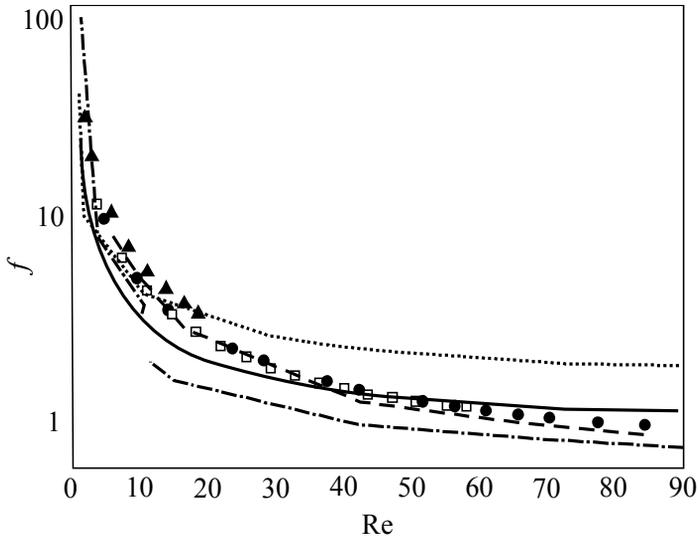


Рис. 11. Опубликованные экспериментальные данные и расчетное значение зависимости фактора трения f от числа Re :

--- — корреляция по Кейсу и Лондону (ПО REGEN3.2); — — корреляция Мийабе для сеток #250, #200; , \blacktriangle — сетка #400; \bullet — экспериментальные данные для сетки #200; \square — сетка #250; - - - — подобранный кривая $46,31 \cdot Re + 0,305$

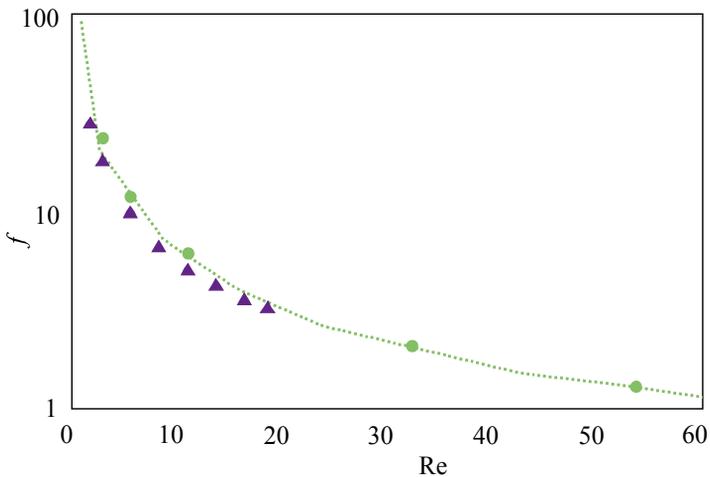


Рис. 12. Экспериментальные данные и расчетное значение зависимости фактора трения f от числа Re :

\bullet — ГС математической модели; \blacktriangle — экспериментальные данные; — степенная ГС математической модели

Заключение. В работе показан пример применения МФТГДА к анализу узлов МКГМ и численное 3D-моделирование структуры и гидродинамики пористого регенератора как основного узла, накапливающего риски. Указанный подход позволяет использовать в расчетах характеристику регенератора выбранной конструкции (размеры, тип сетки и т. п.) взамен обобщенных характеристик, что должно повысить точность дальнейшего моделирования.

Итоги проведенного сравнения результатов численного исследования зависимости гидросопротивления моделируемого регенератора от числа Рейнольдса с результатами расчета по корреляционным зависимостям зарубежных исследователей позволяют сделать вывод, что выбор корреляционных коэффициентов, предложенных Блазом и Танакой, в наибольшей степени подходят для дальнейших вычислений ГС протекания рабочего вещества через насадку генератора данного типа при заданных условиях. Среднее значение отклонения с результатами Танаки составляет 11,2 %, Блаза — 23,3 %.

Сравнение результатов численного моделирования зависимости фактора трения от числа Рейнольдса с экспериментальными данными показало высокую степень сходимости данных, среднее значение отклонения результатов составило 21,6 %, что говорит о возможности применения результатов моделирования для дальнейших исследований.

В результате расчетов было выведено уравнение для определения фактора трения в зависимости от числа Рейнольдса для потока со следующими характеристиками: число Рейнольдса должно находиться в диапазоне 10...100, температура рабочего вещества $T \sim 300$ К, давление рабочего вещества $P \sim 3$ МПа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Arkharov I.A., Navasardyan E.S., Simakov M.V. Microcryogenic gas machines in strategic satellite navigation, surveillance, and communications systems. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, vol. 51, no. 11, 12, pp. 765–770.
- [2] Nagimov R.R., Arkharov I.A., Navasardyan E.S. Problems and development of methods of dynamic simulation of cryogenic systems. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, vol. 52, issue 7, pp. 1–5.
- [3] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Navasardyan E.S., Antonov E.A. Modeling of processes in microcryogenic gas cooler. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, vol. 51, issue 9, pp. 649–655.
- [4] Пелевин Ф.В. Гидравлическое сопротивление пористых металлов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 2 (671), с. 42–52.
- [5] Nam K., Jeong S. Novel flow analysis of regenerator under oscillating flow with pulsating pressure. *Cryogenics*, 2005, vol. 45, pp. 368–379.
- [6] Trevizoli P., Liu Y., Tura A., Rowe A., Barbosa J. Experimental assessment of the thermal-hydraulic performance of packed-sphere oscillating-flow regenerators using water. *Experimental thermal and fluid science*, 2014, vol. 57, pp. 324–334.

- [7] Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П. Обобщение опытных данных по внутреннему теплообмену в пористых структурах. *Теплофизика высоких температур*, 2010, № 48 (3), с. 402–408.
- [8] Кулик В.В., Паркин А.Н., Навасардян Е.С. Обработка методики численного моделирования элементов микрокриогенных газовых машин с применением программного комплекса ANSYS Fluent на примере вязкого течения в канале малого диаметра с теплоотдачей. *Химическое и нефтехимическое машиностроение*, 2016, № 8, с. 14–19.
- [9] Chmielewski M., Gieras M. Three-zonal wall function for $k-\varepsilon$ turbulence models. *Computational methods in science and technology*, 2013, no. 19 (2), pp. 107–114. DOI: 10.12921/cmst.2013.19.02.107-114
- [10] *ANSYS Fluent User's Guide*. ANSYS, Inc. Release 15.0. Southpointe November 2013.
- [11] Thomas B., Pittman D. Update on the evaluation of different correlations for the flow friction factor and heat transfer of Stirling engine regenerators. *35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)*, 2000, pp. 76–84.

Статья поступила в редакцию 12.03.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кулик В.В., Навасардян Е.С., Паркин А.Н. Численное моделирование пористой насадки регенератора микрокриогенных газовых машин. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-8-1646>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на 13-й Международной научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития», состоявшейся 1–2 ноября 2016 г., Москва

Кулик Виктория Вячеславовна — аспирант кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: разработка математических моделей процессов гидродинамики и тепломассообмена в криогенных установках, исследование нестационарных процессов теплообмена в аппаратах микрокриогенных газовых машин. e-mail: vikakulik687@gmail.com

Наvasардян Екатерина Сергеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: процессы тепломассообмена в криогенных аппаратах, технология ожижения и разделения газов и газовых смесей, разработка пористых структур регенеративных теплообменных аппаратов методами современного 3D-моделирования. e-mail: navasard@mail.ru

Паркин Алексей Николаевич — старший преподаватель кафедры «Холодильная, криогенная техника. Системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: процессы тепломассообмена в криогенных аппаратах, технология ожижения и разделения газов и газовых смесей, моделирование процессов гидрогазодинамики и тепломассопереноса в низкотемпературных теплообменных аппаратах. e-mail: parkin.aleksey@list.ru

Numerical modeling of a honeycomb head for a regenerator used in microcryogenic gas systems

© V.V. Kulik, E.S. Navasardyan, A.N. Parkin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

We employed numerical analysis methods to assess time between failures for microcryogenic gas systems at the design stage, taking into account various factors, including structural parameters. We suggest using multi-factor heat, gas and fluid dynamics analysis, based on integration of accumulated experience in experimental investigations and numerical modelling. We provide an example of applying this multi-factor heat, gas and heat dynamics analysis to analysing units of microcryogenic gas systems. We conducted three-dimensional numerical modelling of structure and fluid dynamics in a honeycomb regenerator as the primary risk-accumulating unit. We compared the results of numerically investigating the drag in the regenerator we modelled as a function of the Reynolds number to the results of computations based on foreign researchers' correlation dependences, which showed a high degree of convergence with Tanaka's and Blase's dependences. This comparison forms the basis for using the model supplied in the mathematical model for further computations.

Keywords: *microcryogenic gas system, honeycomb head, regenerator, regenerative heat exchanger, multi-factor analysis in heat gas and fluid dynamics, mathematical modelling, friction factor, hydraulic resistance*

REFERENCES

- [1] Arkharov I.A., Navasardyan E.S., Simakov M.V. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, vol. 51, no. 11, 12, pp. 765–770.
- [2] Nagimov R.R., Arkharov I.A., Navasardyan E.S. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, vol. 52, issue 7, pp. 1–5.
- [3] Aleksandrov A.A., Arkharov I.A., Navasardyan E.S., Antonov E.A. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2016, vol. 51, issue 9, pp. 649–655.
- [4] Pelevin F.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 2 (671), pp. 42–52.
- [5] Nam K., Jeong S. *Cryogenics*, 2005, vol. 45, pp. 368–379.
- [6] Trevizoli P., Liu Y., Tura A., Rowe A., Barbosa J. *Experimental thermal and fluid science*, 2014, vol. 57, pp. 324–334.
- [7] Zeygarnik Yu.A., Ivanov F.P. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2010, no. 48 (3), pp. 402–408.
- [8] Kulik V.V., Parkin A.N., Navasardyan E.S. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie — Chemical and petroleum engineering*, 2016, no. 8, pp. 14–19.
- [9] Chmielewski M., Gieras M. *Computational methods in science and technology*, 2013, no. 19 (2), pp. 107–114. DOI: 10.12921/cmst.2013.19.02.107-114
- [10] ANSYS Fluent User's Guide. ANSYS, Inc. Release 15.0. Southpointe, 2013.
- [11] Thomas B., Pittman D. Update on the evaluation of different correlations for the flow friction factor and heat transfer of Stirling engine regenerators. *35th Inter-society Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC)*, 2000, pp. 76–84.

Kulik V.V., post-graduate student, Department of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in developing mathematical models for fluid dynamics and heat and mass transfer processes in cryogenic plants, investigating non-steady heat transfer processes in microcryogenic gas system assemblies.

e-mail: vikakulik687@gmail.com

Navasardyan E.S., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in heat and mass transfer in cryogenic assemblies, gas and gas mixture liquefaction and separation technology, developing honeycomb structures for regenerative heat exchangers employing contemporary 3D modelling methods. e-mail: navasard@mail.ru

Parkin A.N., Senior Lecturer, Department of Refrigeration, Cryogenic Engineering, Air Conditioning and Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in heat and mass transfer in cryogenic assemblies, gas and gas mixture liquefaction and separation technology, modelling gas and fluid dynamics and heat and mass transfer processes in low-temperature heat exchangers. e-mail: parkin.aleksey@list.ru