

ДВИГАТЕЛЕ СТРОЕНИЕ

№ 3 (249)
июль–сентябрь 2012

Санкт-Петербург

РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Кукис В.С., Куколев М.И., Костин А.И.,
Дворцов В.С., Ноздрин Г.А., Абакишин А.Ю.*

Перспективы улучшения характеристик
двигателя Стирлинга

Еникеев Р.Д., Домбровский О.П., Гарипов М.Д.

Экспериментальные характеристики двухтактного
бензинового двигателя с высокой степенью сжатия

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Иванов Д.А., Засухин О.Н.

Повышение конструктивной прочности
машиностроительных материалов в результате
сочетания термической и газимпульсной обработки

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

Аттия А.М.А., Кульчицкий А.Р.

Влияние структуры водотопливной эмульсии на
экологические и экономические показатели дизеля

Пушин В.П.

Применение метода электропроводности для
анализа структуры дизельной сажи

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ДВИГАТЕЛЕЙ

Назаров А.Д.

Способ компенсации суммарной неуравновешенной
массы деталей КШМ двигателей V-8
при их изготовлении и ремонте

Герасиди В.В., Жук А.Н., Николаев Н.И.

Применение твердых материалов для очистки
проточной части турбокомпрессоров

Васькевич Ф.А., Калинин О.Д.

Особенности конструкции ТНВД дизеля 5S70MC-C
и их влияние на технико-экономические показатели

ГИПОТЕЗЫ. ДИСКУССИИ

Жмудяк Л.М., Жмудяк А.Л., Абрамов Е.Г.

Результаты математического моделирования
однопоршневого свободнопоршневого двигателя

НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Совке С. и др.

Контроль выбросов NO_x в мощных газовых
двигателях по давлению в цилиндре
(материалы конгресса CIMAC 2010)

Новости Барнаултрансмаш

Новости ЗМЗ

Новости ОАО «Звезда»

Новости ОАО КАМАЗ

Новости ЧТЗ

Новости ЗАО «Трансмашхолдинг»

ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES

*Kukis V.S., Kukolev M.I., Kostin A.K., Dvortsov V.S.,
Nozdrin G.A., Abakshin A.Ju.*

3 Ways to Improve Performance
of External Combustion Engines

Yenikeev R.D., Dombrovsky O.P., Garipov M.D.

7 Optimization of Two-Stroke High Compression Rate
Petrol Engine

CONSTRUCTION MATERIALS

Ivanov D.A., Zasukhin O.N.

12 Controlled Gas Explosion Technology Combined with
Thermal Treatment Improves Strength of Construction
Materials

ENVIRONMENTAL ISSUES

Attyyah A.M.A., Kulchitsky A.R.

16 Influence of Water/Fuel Emulsion Structure on Engine
Fuel Efficiency and Environmental Performance

Pushnin V.P.

21 Analysis of Engine Soot Structure with Electrical Con-
duction Method

OPERATION AND MAINTENANCE ISSUES

Nazarov A.D.

26 Compensation of Total Unbalanced Mass
of V-8 Engines in Process of Their Manufacturing
and Repair

Gherasidi V.V., Zhuk A.N., Nicolaev N.I.

31 Cleaning of Turbocharger Air-Gas Channel With
Hard Materials

Vaskiewich F.A., Kalinin O.D.

34 Fuel Injection Pumps of Marine Engine Type
5S70MC-C: Factory Settings Specifics

HYPOTHESES AND DISCUSSIONS

Zhmudyak L.M., Zhmudyak A.L., and Abramov Ye.G.

37 Simulated Operation of a Free-Piston (Single-Piston)
Engine

ENGINE BUILDING NEWS

S. Sofke at al.

40 Controlling NO_x Emissions of Large Gas Engines
Based on In-Cylinder Pressure Measurement (papers
of CIMAC 2010)

11 News from BARNAULTRANSMASH

15 News from ZMZ

20 News from ZVEZDA

36 News from KAMAZ

39 News from ChTZ

52 News from TRANSMASHHOLDING

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

ПРЕДПРИЯТИЯ

В.А. Шелеметьев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
В.А. Рыжов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
Е.С. Васюков	<i>техн. директор</i>	<i>ЗАО УК БМЗ, г. Брянск</i>
В.А. Егоров	<i>ген. директор</i>	<i>ОАО РУМО, Н. Новгород</i>
А.К. Лимонов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО РУМО, Н. Новгород</i>
М.В. Бояркин	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО ХК «Барнаултрансмаш», г. Барнаул</i>
В.М. Гребнев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково</i>
Р.Х. Хафизов	<i>зам. гл. констр. по двиг.</i>	<i>ОАО КАМАЗ, г. Набережные Челны</i>
А.А. Матюшин	<i>генеральный директор</i>	<i>ОАО ЗМЗ, г. Заволжье</i>
В.И. Федышин	<i>директор</i>	<i>МАН Ферросталь, Санкт-Петербургский филиал</i>
В.В. Коновалов	<i>1-й зам. ген.директора</i>	<i>ОАО «Звезда», Санкт-Петербург</i>
В.С. Мурзин	<i>дир.-гл. конструктор</i>	<i>ООО ГСКБ «Трансдизель», г. Челябинск</i>
А.П. Маслов	<i>вед. инж.-конструктор</i>	<i>ООО ГСКБ «Трансдизель», г. Челябинск</i>
А.С. Калюнов	<i>начальник ИКЦ</i>	<i>ООО НЗТА, г. Ногинск</i>

НИИ

Н.И. Троицкий	<i>ген. директор</i>	<i>ОАО НИИД, Москва</i>
В.С. Папонов	<i>ген. директор</i>	<i>ОАО НИКТИД, г. Владимир</i>
Д.П. Ильющенко-Крылов	<i>гл. инженер</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.А. Сорокин	<i>зав. отделом</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.И. Ерофеев	<i>нач. отдела</i>	<i>1 ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург</i>
В.В. Альт	<i>директор</i>	<i>ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск</i>
Ю.А. Микутенко	<i>президент</i>	<i>ООО НПХЦ «Миакрон-Нортон»</i>
Б.А. Зеленев	<i>директор</i>	<i>НТЦ ПМТ ФГУП ЦНИИМ, Санкт-Петербург</i>
А.М. Махмудов	<i>с.н.с.</i>	<i>ФГУП ГНЦ РФ «ЦНИИ им. А.Н. Крылова», Санкт-Петербург</i>

ВУЗЫ

Ю.В. Гальшев	<i>зав. кафедрой ДВС</i>	<i>СПбГПУ, Санкт-Петербург</i>
Н.Д. Чайнов	<i>проф. кафедры Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
О.К. Безюков	<i>зав. кафедрой ТК СДВС</i>	<i>ФГОУ ВПО СПГУВК, Санкт-Петербург</i>
А.А. Иванченко	<i>зав. кафедрой СЭУ</i>	<i>ФГОУ ВПО СПГУВК, Санкт-Петербург</i>
Л.В. Тузов	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ФГОУ ВПО СПГУВК, Санкт-Петербург</i>
А.С. Пунда	<i>проф. кафедры ДВС</i>	<i>ФГОУ ВПО ГМА им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
В.К. Румб	<i>проф. кафедры ДВС и АСЭУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
А.В. Смирнов	<i>нач. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИТИ, Санкт-Петербург</i>
В.О. Сайданов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИТИ, Санкт-Петербург</i>
А.А. Обозов	<i>профессор кафедры ТД</i>	<i>ФГБОУ ВПО БГТУ, г. Брянск</i>
С.П. Косырев	<i>профессор кафедры</i>	<i>БИТТУ фил. ГОУ ВПО СГТУ г. Балаково</i>
А.В. Разуваев	<i>профессор кафедры ТАМ</i>	<i>БИТТУ фил. ГОУ ВПО СГТУ г. Балаково</i>

Издатель журнала — ООО «ЦНИДИ-Экосервис», Санкт-Петербург.

Журнал издается при поддержке ФГОУ ВПО «Военный инженерно-технический институт» (ВИТИ), филиал академии тыла и транспорта, Санкт-Петербург.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук (www.vak.ed.gov.ru).

Электронные версии журнала (2005–2012 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Выпускающий редактор Н.А. Вольская
Редактор инф. отдела Г.В. Мельник
Ст. редактор О.Д. Камнева
Верстка — А.В. Вольский

Сдано в набор 03.09.12
Подписано в печать 20.09.12
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7
Зак. 177. Тираж 1000 экз.
Цена договорная

Адрес редакции журнала: 191123, Санкт-Петербург, а/я 65
наб. Робеспьера, д.10, корп. А-А, офис 14

Тел.: (812) 719-73-30
Факс: (812) 719-73-16

E-mail: ecology@rdiesel.ru
www.ecology-npf.narod.ru

**ДВИГАТЕЛЕ
СТРОЕНИЕ**

Типография «СВЕТЛИЦА»
Лиц. ПД № 2-69-618, 196158,
Санкт-Петербург, Московское шоссе, 25, 215

© Журнал «Двигателестроение». 2012. № 3 (249)

ПЕРСПЕКТИВЫ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ СТИРЛИНГА

В.С. Кукис, д.т.н., проф.

Южно-Уральский государственный университет

М.И. Куколев, д.т.н., А.И. Костин, к.т.н., доц., В.С. Дворцов, асп., Г.А. Ноздрин, асп.,

А.Ю. Абакшин, асп.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

В работе представлены возможные направления исследований по совершенствованию характеристик двигателей с внешним подводом теплоты, а именно: улучшение методики аналитического расчета, численное моделирование элементов двигателей в среде FLUENT, применение бесшатунного силового механизма, применение диссоциирующих газов в качестве рабочего тела, а также вихревой холодильной трубки для разделения рабочего тела во внутреннем контуре с использованием эффекта Ранка–Хильша.

Новая стратегия России, определяющая основные принципы деятельности страны в Северном Ледовитом океане, предусматривает разработку и строительство нового научного арктического, торгового арктического и ледокольных флотов [1]. Особая роль в будущем отводится созданию подводных научных, транспортных и технологических аппаратов.

В качестве анаэробных энергетических установок подводных аппаратов в настоящее время используются и планируются к применению тепловые двигатели, электрохимические генераторы и источники тока, термоэмиссионные преобразователи [2].

Среди тепловых двигателей представляются наиболее перспективными двигатели Стирлинга (ДС).

В настоящее время создано большое количество маломощных модельных двигателей с внешним подводом теплоты (ДВПТ), работающих по циклам, близким к циклу Стирлинга. Однако конструкций ДВПТ мощностью в десятки и сотни кВт, выпускаемых серийно в мире, — единицы. Остается актуальной задача совершенствования существующих расчетных моделей и методик для получения более точных значений основных параметров ДВПТ на ранних стадиях проектирования.

Совершенствованием расчетных моделей и методик занимались в разные годы Ю.В. Красивский, В.С. Кукис, А.Я. Коган, В.И. Евенко,

И.М. Приходько, С.И. Ефимов, А.И. Лушпа и другие исследователи. К сожалению, сегодня результаты многих выполненных работ труднодоступны или вовсе утрачены.

При расчетах рабочих параметров ДС на ранних стадиях проектирования в подавляющем большинстве случаев используется метод Шмидта. Заметим, что метод Шмидта недостаточно точно описывает реальные конструкции двигателей, поэтому полученные результаты расчетов затруднительно использовать в дальнейшем проектировании.

Одним из направлений совершенствования метода Шмидта является учет постоянных объемов с разной температурой рабочего тела (РТ) в этих объемах (Методика Ноздрина). Предлагаемая методика, в отличие от известных, наиболее приближена к реальным процессам, протекающим в двигателях. Результаты, полученные при ее применении, имеют сравнительно меньшие погрешности, позволяя тем самым рассчитать не только осредненные цикловые параметры, но и их мгновенные значения.

Методика позволяет рассчитать необходимые индикаторные параметры проектируемого двигателя с учетом влияния конструкции основных узлов, выявить направления их дальнейшей модернизации.

Расчеты выполняются при следующих допущениях:

- рабочее тело (РТ) — идеальный газ;
- движение поршней происходит по синусоидальному закону;
- утечки РТ отсутствуют;
- поток РТ квазистационарен.

В основе методики лежит принцип разбиения объема двигателя на полости, в каждой из которых происходит подвод или отвод теплоты при заданных коэффициентах теплоотдачи, через определенную поверхность теплообмена за время одного расчетного шага. Этот процесс в общем виде описывается уравнением:

$$\Delta Q_{i \rightarrow i+1} = \alpha_i \cdot \tau \cdot S_i \cdot (T_{wall} - T_{wf(i)}),$$

где i — номер текущего шага; Q — количество теплоты, подведенной к РТ [Дж]; α — коэффи-

коэффициент теплоотдачи [Вт/(м²·К)]; τ — время одного шага [с]; S — площадь поверхности теплообмена [м²]; T_{wall} — температура стенки [К]; T_{wf} — температура РТ [К].

Тогда, зная распределение масс в объемах двигателя,

$$T_{wf(i+1)} = T_{wf(i)} + (\Delta Q_{i \rightarrow i+1} / m_i \cdot c),$$

где: m — масса РТ [кг]; c — теплоемкость РТ [Дж/(кг·К)].

Задание частных начальных условий позволяет:

- получить зависимость температуры РТ от угла поворота коленчатого вала в каждой полости;
- рассчитать суммарную подведенную и отведенную теплоту.

При известном распределении температур в полостях двигателя, давление в полостях на каждом расчетном шаге рассчитывается по зависимости

$$p_i = (m_i \cdot R \cdot T_{wf(i)} / v_i),$$

где p — давление РТ [Па]; R — газовая постоянная РТ [Дж/(кг·К)]; v — объем полости [м³].

Таким образом, имеется возможность построить индикаторную диаграмму ДС и рассчитать все необходимые осредненные цикловые параметры.

В качестве примера представлены распределение чисел Рейнольдса (рис. 1) и температуры РТ (рис. 2) в нагревателе ДС по углу ПКВ.

Улучшение характеристик ДС связано также с решением задачи моделирования процессов теплообмена во внутреннем контуре ДС.

Задача может решаться численными методами с применением системы уравнений Навье—Стокса или с использованием программы FLUENT 6.1.

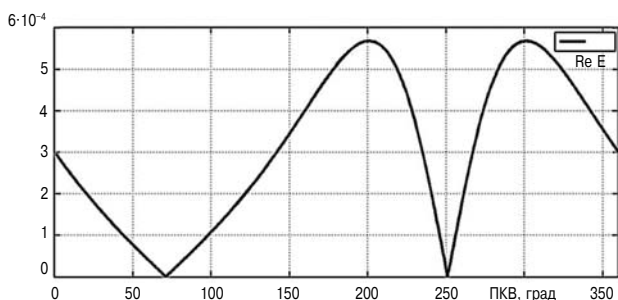


Рис. 1. Распределение чисел Рейнольдса в нагревателе

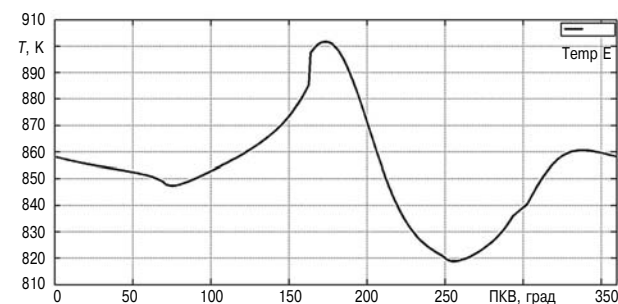


Рис. 2. Распределение температуры в нагревателе

Так, для моделирования движения поршней ДВПТ использовался метод динамической расчетной сетки. Задача решалась в двухмерной осесимметричной постановке на сетке максимального размера 12 120 ячеек. Моделировалась работа ДВПТ компоновочной модификации α с диаметрами горячего и холодного цилиндров 0,1 м, ходами поршней 0,07 м, диаметром трубки регенератора 0,01 м и длиной 0,2 м, длиной регенератора 0,05 м.

В качестве граничных условий были заданы температуры стенок горячего и холодного цилиндров 500 К и 300 К. На стенке трубки регенератора и поверхностях поршней были заданы условия теплоизоляции. На поверхности материала регенератора задана температура 460 К. Движение поршней и температуры стенок цилиндров и регенератора заданы в соответствии с предварительными расчетами, выполненными по методу Шмидта [3, 4].

В результате расчета были получены поля скоростей, давлений, температур во внутреннем контуре ДВПТ, данные об их изменениях в течение полного цикла работы двигателя.

Полученные расчетные характеристики работы ДВПТ несколько расходятся с данными аналитических расчетов [3, 4], и результатами численного моделирования, выполненного с использованием иных методик и расчетной сетки меньшего размера [6], что может быть связано с более высокой точностью описания процессов при использовании усовершенствованной методики. При этом характер полученных полей термодинамических параметров имеет удовлетворительную сходимость с данными численных расчетов [6], что позволяет сделать вывод о корректном описании процессов во внутреннем контуре ДВПТ при помощи примененной методики.

На рис. 3 представлен один из результатов расчета — график зависимости теплового потока сообщаемого рабочему телу ДВПТ регенератором в функции времени.

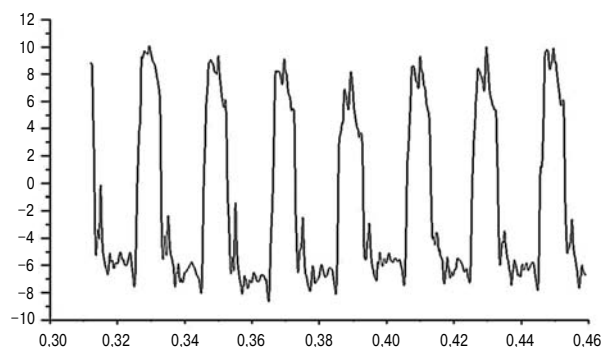


Рис. 3. Зависимость теплового потока на поверхности генератора от времени

Результаты расчетов позволяют сделать выводы о характере течения рабочего тела во внутреннем контуре ДВПТ и влиянии конструкции и частоты рабочих циклов двигателя на процессы теплообмена в контуре. Важнейшим результатом является возможность оценки влияния работы регенератора на характеристики течения рабочего тела в контуре.

Следующим направлением улучшения характеристик ДВПТ является повышение механического КПД двигателей. В ряде работ отмечается, что «наиболее перспективным является бесшатунный механизм» (БСМ) [например, 2]. Появились образцы ДС с БСМ С.С. Баландина [7].

Предложена схема БСМ (рис. 4. Патент РФ № 2117791).

В кривошипных 1 концевыми шейками установлен коленчатый вал 2. Нижняя часть штоков 3, жестко связанных с «горячими» поршнями 4, выполняет функцию ползуна и движется вертикально по направляющим 5. Балансир 6 также выполняет функцию ползуна и движется горизонтально по направляющим 7, обеспечивая передвижение «холодного» поршня 11. Синхронизация и силовое замыкание кривошипов обеспечивается соединительным валом 10 и шестернями 8, 9. При действии инерционных и газовых сил боковые усилия в БСМ с поршней перенесены на ползуны и воздействуют на направляющие 5 и 7.

Проведенные испытания механизма в составе двухтактного ДВС 2Д-200 [8] мощностью 16,5 кВт подтвердили не только работоспособность механизма в целом, но и существенное снижение мощности механических потерь (притом, что, в отличие от двигателя С.С. Баландина, в парах ползун–направляющая не были использованы специальные антифрикционные материалы). Кроме того, силы и моменты поступательно и вращательно движущихся масс разработанного механизма полностью уравновешены.

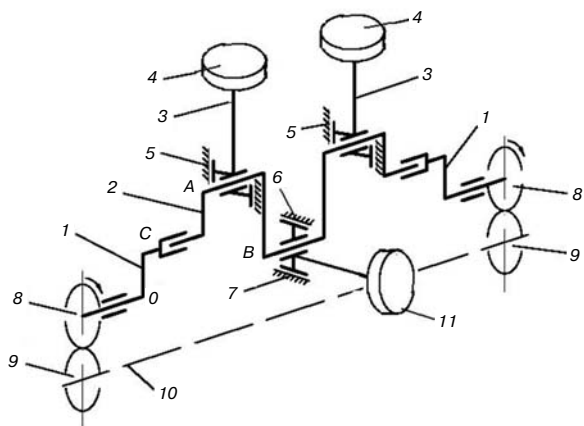


Рис. 4. Схема предлагаемого БСМ для ДВПТ

Следующим возможным направлением совершенствования ДС является переход к новым РТ цикла, например к диссоциирующим газам.

При выборе диссоциирующего газового РТ желательно так подобрать конструктивные элементы двигателя и рабочие параметры, чтобы газ воздействовал на рабочий поршень полностью диссоциированным, а выходил из холодильника рекомбинированным.

При диссоциации происходит понижение средней молекулярной массы газа и увеличивается его газовая постоянная, что может привести к увеличению полезной работы рабочего поршня.

Рекомбинированный газ имеет большую молекулярную массу и меньшую газовую постоянную. Соответственно, потребуется затратить на сжатие РТ меньшую работу.

По сравнению с гелием, применение в качестве РТ диссоциирующего газа может привести к снижению поверхности радиатора в несколько раз. Так, например, применение диссоциирующих газов в качестве РТ космических турбинных энергоустановок позволяет снизить площадь холодильника-излучателя в 4–6 раз [9].

Дальнейшее улучшение характеристик ДВПТ может быть также связано с применением различных физических эффектов.

С целью уменьшения общих габаритов ДС при одновременном улучшении энергетических характеристик, предлагается, например, применить во внутреннем контуре холодильную вихревую трубку, в которой используется эффект Ранка–Хилша [10]. Поток тангенциально подаваемого в трубку рабочего тела (РТ) ДС разделяется на два — горячий и холодный. Известные и доступные серийные образцы [11] таких трубок позволяют получать перепад температур между разделенными потоками порядка 150 °С (к примеру, на входе поток имеет температуру +20 °С, тогда на выходе с горячей стороны будет иметь +110 °С, а с холодной –40 °С).

По предварительным оценкам понижение температуры РТ в холодной полости ДС вызывает более значительное повышение мощности, нежели повышение температуры РТ в горячей.

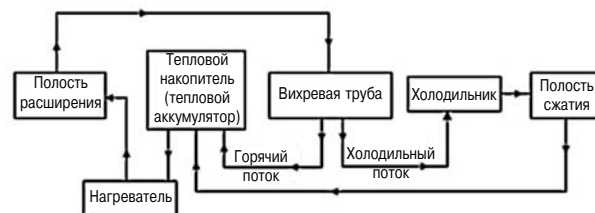


Рис. 5. Принципиальная схема ДС с применением вихревой трубки

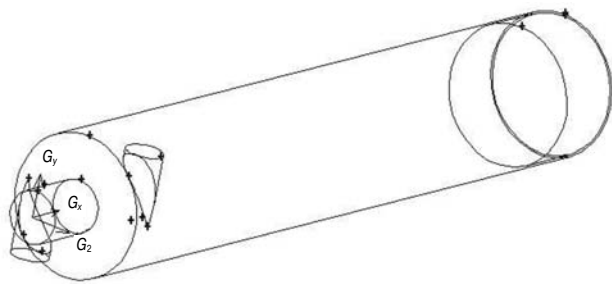


Рис. 6. Геометрия расчетной области для численного исследования процессов в вихревой трубке

Проведенные оценочные расчеты показывают, что при повышении температуры РТ в горячей полости на 40 °С повышение мощности ДС составляет около 3 %, в то время как понижение температуры РТ в холодной полости на те же 40 °С дает прирост мощности порядка 18 % [12].

Одна из возможных принципиальных схем ДС с вихревой трубкой представлена на рис. 5 [13]. Проводятся численные исследования процессов в объеме камеры энергоразделения вихревой трубы при ее работе в составе ДС. Геометрия рас-

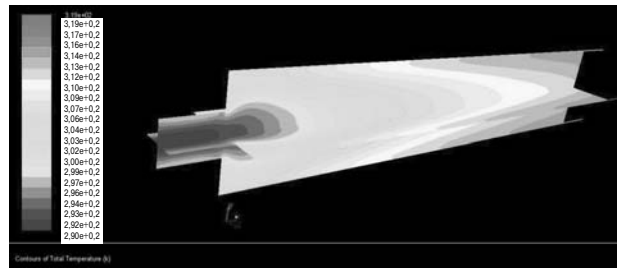


Рис. 7. Распределение температуры торможения в вихревой трубке

четной области представлена на рис. 6. Проведен ряд предварительных расчетов, некоторые результаты которых представлены на рис. 7.

Таким образом, перспективы улучшения рабочих параметров ДС связаны с совершенствованием аналитических расчетных методик, применением для исследований современных программ численного моделирования, применением бесшатунного силового механизма, более совершенных рабочих тел внутреннего контура и полезных физических эффектов, направленных на улучшение энергетических характеристик.

Литература

1. Гусейнов В. Новое освоение Арктики // Российская газета. — № 4848 от 12 февраля 2009.
2. Дядик А.Н., Замуков В.В., Дядик В.А. Корабельные воздухозависимые энергетические установки. — СПб. : Судостроение, 2006. — 424 с.
3. Уокер Г. Двигатели Стирлинга. — М. : Машиностроение, 1985. — 407 с.
4. Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга. — М. : Мир, 1986. — 464 с.
5. Ноздрин Г.А., Абакишин А.Ю., Вильдяева С.Н. Разработка расчетной модели ДВПТ // Материалы IX молодежной науч.-тех. конф. «Взгляд в будущее — 2011». — СПб. : ОАО «ЦКБ МТ «Рубин». — 2011. — С. 377–382.
6. Dyson R., Wilson S., Tew R., Demko R. Fast Whole-Engine Stirling Analysis // Third International Energy Conversion Engineering Conference. — 2005 — 35 с.
7. Кукис В.С., Рыбалко А.И., Берестнев Г.А. Особенности двигателей Стирлинга, предназначенных для утилизации термической эксергии продуктов сгорания теплоэнергетических и теплогенерирующих установок // Труды XII Международной науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей». — Владимир : ВлГУ, 2010. — С. 188–194.
8. Костин А.И., Куколев М.И. Опытные образцы бесшатунных двигателей // Труды XII Международной науч.-практ. конф. «Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей». — Владимир : ВлГУ, 2010. — С. 194–199.
9. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов / Л. А. Квасников, Л.А. Латышев, Д.Д. Севрук, В.Б. Тихонов. — М. : Машиностроение, 1984. — 332 с.
10. Физические эффекты в машиностроении: Справочник / В.А. Лукьянец, З.И. Алмазова, Н.П. Бурмистрова и др. — М. : Машиностроение, 1993. — 224 с.
11. Суслов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В. Вихревые аппараты. — М. : Машиностроение, 1985. — 256 с.
12. Дворцов В.С., Кукис В.С., Куколев М.И. Улучшение характеристик ДВПТ путем применения эффекта Ранка–Хилша // Актуальные проблемы развития поршневых ДВС: Материалы межотраслевой научно-технической конференции. — СПб. : Изд-во СПбГМУ, 2012. — 99 с.
13. Кукис В.С., Романов В.А., Куколев М.И., Дворцов В.С. Использование вихревой трубки Ранка в двигателях Стирлинга // Materialy VIII Mezinarodni vedecko-prakticka conference «Veda a technologie: Krok do budoucnosti — 2012». — Technicke vedy, Dil. 35. — Praha : Publishing House «Education and Science» s.r.o. — 2012. — P. 82–86.