

УДК 629.735.33

И.С. АВИЛОВ¹, М.В. АМБРОЖЕВИЧ², В.А. СЕРЕДА²¹ ООО «Научно-промышленные системы», КБ «Взлет», Украина² Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

КОМПЛЕКСНО-СОПРЯЖЕННАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИОННОГО СТАРТОВОГО УСТРОЙСТВА ЛЕГКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Разработана технология опережающих исследований рабочего процесса наземных пусковых устройств (НПУ) инерционного типа, включающая в себя физико-математическую модель, метод численного решения системы уравнений модели и средства программной реализации. Приведены результаты численных исследований в следующей форме: индикаторные диаграммы, цветовые карты. Состояние моделируемого объекта, как механической системы, отображается актуальным состоянием упрощенного его твердотельного образа. Материалы статьи демонстрируют содержательные возможности предложенного метода прогнозирования, применяемого на начальных стадиях НИОКР.

беспилотные авиационные комплексы, беспилотные летательные аппараты, наземные пусковые устройства инерционного типа, комплексно-сопряженные газодинамические и динамические рабочего процесса, уравнения Лагранжа II рода, численные методы, маховики, трансмиссии, кривошипно-шатунные механизмы

Введение

Характерной чертой прогресса в сфере критических технологий является их комплексный характер в условиях неравноценного развития компонентов. В полной мере это относится и к области беспилотных авиационных комплексов (БАК), где главный вектор эволюции, как и в прочих отраслях, в одностороннем порядке выражен достижениями информационных технологий на фоне общего депрессивного состояния транспортной составляющей. В то время как устойчивая тенденция к миниатюризации информационной компоненты бортового комплекса при условии сохранения функциональных возможностей позволила снизить необходимую полетную массу БЛА на порядки, положение собственно транспортной системы (ТС) в составе БАК не только не претерпело прогрессивных изменений, но во многом деградировало. Общая с полноразмерными аэродинамическими ТС ресурсоемкость ранних стадий проектирования, основывающихся на традиционных подходах, в условиях миниатюризации оказалась экономически неприемлемой. В результа-

те процесс разработки легких ТС был «вынесен за скобки» научно-технического прогресса, а соответствующие разработки приобрели характерный авиамодельный облик. Тем не менее, «неприоритетный» статус ТС не мог не сказаться принципиальным образом на способности БАК выполнять стоящие перед ними задачи в реальной помеховой обстановке.

Так, для гарантированного преодоления ветрового сноса и возможного противодействия ПВО БЛА должен обладать крейсерской скоростью не ниже 100 м/с, а следовательно — относительно высокой нагрузкой на крыло. Для ввода в полет подобного аппарата необходимы соответствующие средства запуска. В данном классе БАК вариант аэродромного базирования, равно как и старт с ускорителем, не имеют под собой целесообразного обоснования. В связи с этим запуск с наземной пусковой установки (НПУ) катапультного типа выглядит безальтернативно.

Анализ ситуации в области разработки НПУ для легких БЛА [1, 2] свидетельствует об отсутствии каких либо системных представлений и традиций про-

ектирования в данной сфере. Задача создания БАК сбалансированного поэлементного совершенства требует для своего решения привлечения новых методов проектирования, в т.ч. и применительно к разработке НПУ.

В настоящей статье представлен пример технологии проектирования НПУ инерционного типа, основывающейся на комплексно-сопряженной термодинамической и динамической модели рабочего процесса. Данная технология позволяет обеспечить необходимое качество проектирования, снижение технического риска и приемлемую ресурсоемкость НИОКР.

Модель и метод исследования

Рабочий процесс НПУ отображается комплексной моделью на основе подмодели (ПМ) привода – двухтактного поршневого двигателя (ПД) [2, 3] и ПМ внешней механической системы в форме замыкающей динамической связи. Для описания свойств механической части НПУ использовались уравнения Лагранжа II рода как наиболее общего и универсального инструмента исследований. В случае механической системы с одной степенью свободы, уравнение Лагранжа II рода имеет следующий вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \phi} + \frac{\partial P}{\partial \phi} = Q_{\phi}, \quad (1)$$

где ϕ – обобщенная координата; $\dot{\phi}$ – обобщенная скорость; T – кинетическая энергия системы; P – потенциальная энергия системы; Q_{ϕ} – обобщенная сила по перемещению ϕ .

Условием сопряжения газодинамической и динамической моделей служит уравнение моментов, действующих на коленчатый вал.

Комплексно-сопряженная модель в совокупности с графической оболочкой, отображающей в масштабе реального времени фазы рабочего процесса в виде мгновенных состояний физических полей

и положений подвижных частей НПУ, позволяет получить ее виртуальный образ.

Постановка и результаты численного эксперимента

В качестве объекта моделирования выступает инерционная НПУ, передовой уровень которого среди механических аналогов был обоснован в [2, 4]. Основными конструктивными элементами НПУ являются ПД, инерционный привод и трансмиссия (полиспастный механизм).

Для синхронной визуализации результатов разработана специальная анимационная оболочка на базе стандартного набора графических средств Visual Fortran [5, 6]. В верхней части левого поля (рис. 1, 2) в виде цветowych карт представлены графики распределения параметров в газоздушном тракте ПД. Внизу располагается изменяющаяся схема включения муфт сцепления маховичного привода НПУ. В центре расположены термодинамическая и расходная диаграммы ПД, а также основные механические характеристики узлов ПУ по фазам ее работы. В правом поле отображается состояние механизмов НПУ.

Класс инерционных НПУ отличается рядом имманентно присущих ему свойств.

1. Момент присоединения массы ассоциирован с максимальной перегрузкой, которую следует ограничивать демпфирующими устройствами.
2. Скорость страгивания БЛА главным образом определяется угловой скоростью маховика, а на характер набора линейной скорости – габаритом.
3. Потеря энергии маховика более чем на 40% приводит к невозможности обеспечения необходимых стартовых характеристик.
4. Параметры схода с направляющей различных запускаемых аппаратов можно варьировать в широком диапазоне, изменяя первоначальную степень разгона маховика.

Для оценки достоверности результатов численного эксперимента использовалось сопоставление с

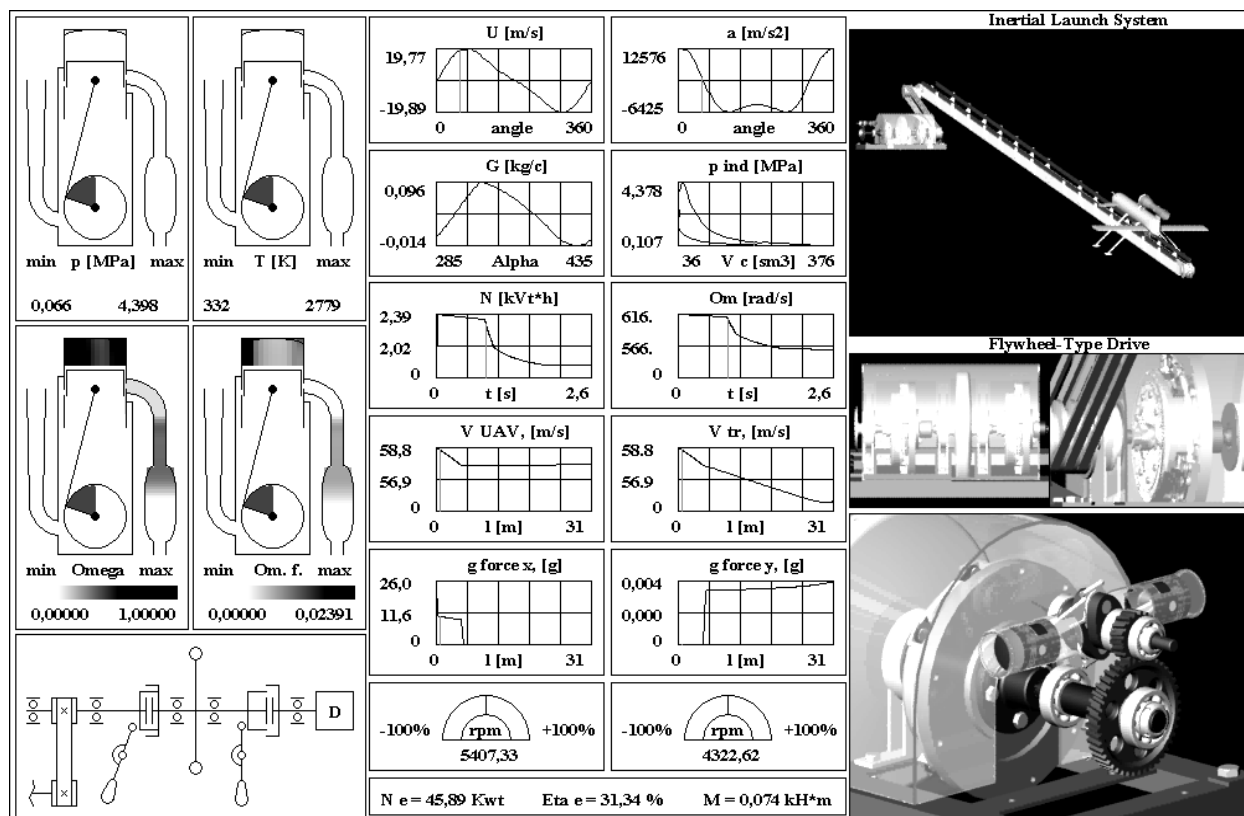


Рис. 1. Параметры инерционной НПУ в момент страгивания БЛА

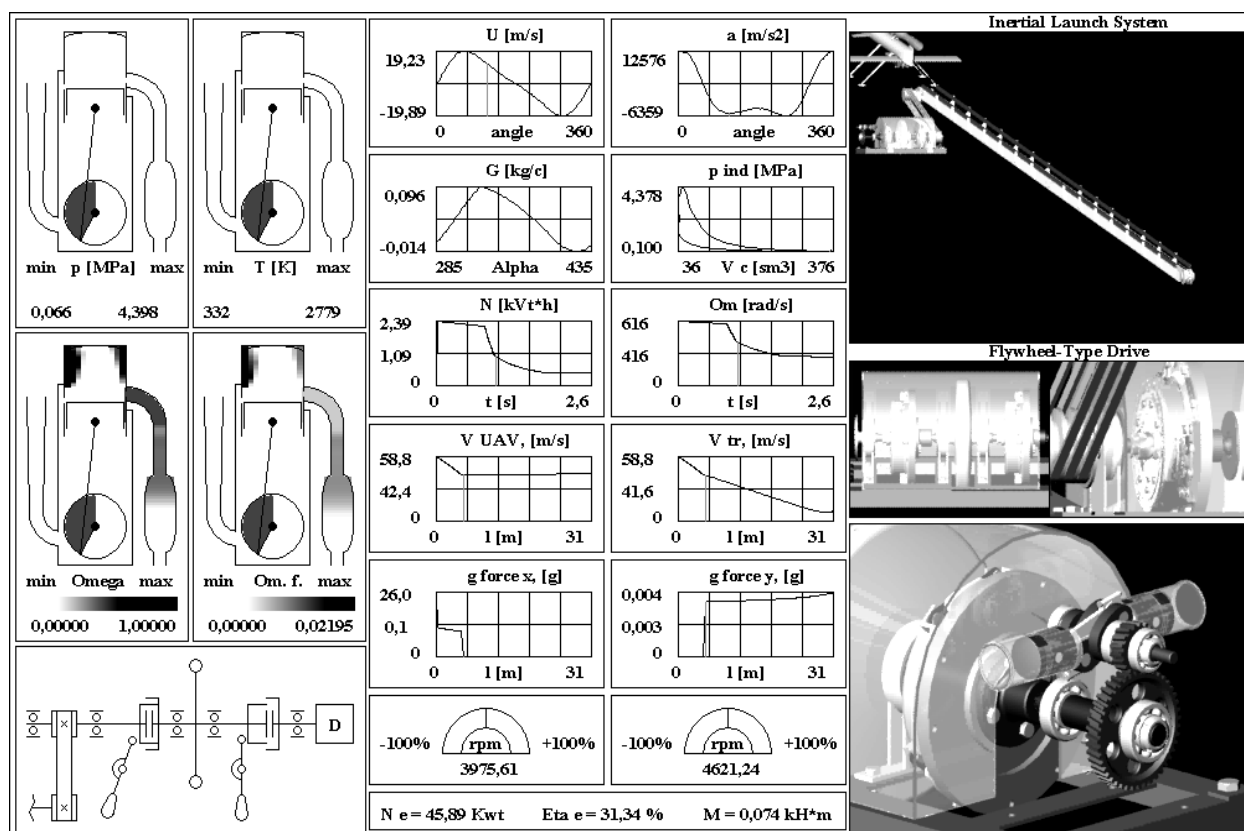


Рис. 2. Параметры инерционной НПУ в момент схода БЛА с направляющей

натурными измерениями, полученными на НПУ, разработанной в КБ «Взлет».

Практический интерес для определения времени повторного запуска представляет циклограмма работы установки (табл. 1).

Хотя для повторного запуска не обязательно дожидаться полной остановки маховика, достаточно разгонным двигателем восстановить энергию маховика, снова намотать трос на барабан и установить новый запускаемый БЛА.

Таблица 1

Циклограмма работы инерционного НПУ

Циклы работы ПУ	Состояние муфт сцепления		t	n , об/мин	V , м/с	n , g
	1 муфта	2 муфта				
1. Раскрутка маховика	Вкл.	Выкл.	5–6 мин	0 – 5900	0	0
2. Холостой ход маховика	Выкл.	Выкл.	5–10 с	5900 – 5610	0	0
3. Передача энергии маховика тележке с БЛА	Выкл.	Вкл.	0,5 с	5610 – 3950	61	11,3
4. Движение каната	Выкл.	Вкл.	5 с	3950 – 2780	53	10,2
5. Торможение маховика	Выкл.	Выкл.	7 с	2780 – 0	–	–

Выводы

1. Опережающие численные исследования на основе предложенной модели и метода, позволяют сформировать облик НПУ на начальных этапах проектирования.

2. Предложенная модель может быть распространена на класс рычажно-инерционных и леерно-инерционных НПУ.

3. Частичная или полная замена натурной доводки численным экспериментом позволяет снизить стоимость и повысить качество НИОКР.

Литература

1. Авилов И.С., Амброжевич А.В., Середа В.А. Критериальные оценки энергетического совершенства пусковых устройств легких беспилотных летательных аппаратов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – №2 (38). – С. 15-19.

2. Амброжевич М.В. Комплексно-сопряженная

модель рабочего процесса в авиационном двухтактном поршневом двигателе // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. пр.* – Х.: ХАІ, 2002. – Вип.30. Двигуни та енергоустановки. – С. 37-42.

3. Амброжевич М.В. Интегрированная технология опережающих исследований рабочего процесса в авиационном двухтактном поршневом двигателе // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2003. – Вип. 42/7. – С. 78-82.

4. Гулиа Н.В. Маховичные двигатели. – М.: Машиностроение, 1976. – 172 с.

5. Бартенев О.В. Современный Фортран. – М.: Диалог–МИФИ, 2000. – 448 с.

6. Бартенев О.В. Visual Fortran: Новые возможности. – М.: Диалог–МИФИ, 1999. – 304 с.

Поступила в редакцию 29.02.2008

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

УДК 629.7.054

В.В. КАРАЧУН

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Украина

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ В АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Приводятся результаты натурных и полунатурных исследований некоторых классов приборов инерциальной навигации. Показано, что навигационно-пилотажное оборудование может иметь дополнительные погрешности, обусловленные воздействием проникающего акустического излучения на подвес гироскопа. Анализируются погрешности гироскопического датчика угловых скоростей в поплавковом исполнении при одновременном воздействии на прибор качки фюзеляжа и звуковых полей. Устанавливается степень их проявления и взаимного влияния. В предположении гармонического характера углового движения носителя, в первом приближении аналитически описывается погрешность измерений в случае синхронной качки. Очерчен вклад составляющих суммарной и разностной частот внешних возмущающих факторов.

поплавковый гироскоп, акустическое излучение, головной аэродинамический обтекатель, вибрация поверхности поплавка, синхронная качка, гармонические колебания фюзеляжа, вынужденные колебания подвижной части прибора

Введение

Постановка проблемы и ее связь с научно-техническими задачами. В системах управления ракетами-носителями (РН) широкое применение нашли так называемые поплавковые гироскопы, конструктивно лишенные основных недостатков «сухих» приборов – значительных по величине (и, главное, непостоянных) моментов сил сухого трения на выходной оси, а также недопустимо высокой чувствительности к ударным и вибрационным воздействиям, особенно нежелательных для интегрирующих гироскопов. Создание плавающих приборов явилось началом нового этапа развития не только гироскопической техники как таковой, но и развития навигационно-пилотажного оборудования летательных аппаратов в целом.

Идея плавающего двухстепенного гироскопа была впервые предложена в 1945 году Л.И. Ткачевым, а в 1946 году – Draper C.S. (USA), под руководством которого в Массачусетском технологическом институте были созданы опытные образцы таких приборов. С 1948 года в США фирмой “Minneapolis

Honeywell Reg. Co” положено начало разработке серийных вариантов плавающих гироскопов.

Одним из основных источников погрешностей обычных двухстепенных гироскопов являются моменты дебаланса, обусловленные смещением центра масс подвижной части относительно выходной оси [1]. При этом основную роль здесь играют температурные факторы, вызывающие неодинаковый нагрев элементов подвеса.

Вторым источником значительных погрешностей в обычных гироскопах является момент сил сухого трения в осях подвеса.

Причиной возникновения моментов-помех могут быть и токоподводы. Поэтому необходимо, чтобы материал, из которого они изготавливаются, не имел бы гистерезиса, а его удельный вес – был бы близок к удельному весу жидкости.

В плавающих гироскопах источником значительных вредных моментов могут быть пузырьки газа в жидкости. Для их предупреждения осуществляется ряд технологических мероприятий перед заполнением прибора, в том числе и по контролю герметичности.

Обзор публикаций и выделение нерешенных задач. Наиболее полное отражение в научной литературе нашли вопросы анализа влияния поступательной и угловой вибрации на динамику гиросприборов в нерезонансных случаях – при линейном характере упругих характеристик элементов подвеса, в резонансных случаях – при рассмотрении гироскопа в виде совокупности абсолютно твердых тел, а также учета нелинейности упругой характеристики шарикоподшипников главной оси и влияния вибрации на моменты сил трения в опорах [2].

Магистральными направлениями борьбы с силовым воздействием на прибор поступательной и угловой вибрации основания с учетом нежесткого подвеса следует признать обеспечение равновесности, амортизацию прибора, использование динамического поглотителя колебаний, а также автокомпенсационные методы уменьшения влияния вибропомех – двухканальная схема и принудительное вращение карданового подвеса.

Исследования показали, что при качке основания двухстепенной гироскоп также имеет погрешности, обусловленные инерционными моментами [3]. Творческие изыскания ученых и инженеров позволили предложить целый ряд эффективных средств борьбы с этим явлением. К наиболее перспективным из них следует отнести методы автокомпенсации влияния углового движения основания на погрешность измерений – метод принудительного вращения опор карданового подвеса вокруг оси, параллельной вектору кинетического момента [4], метод реверсирования вектора кинетического момента [5] и метод двухканальности [6].

Обобщая вышесказанное, можно отметить, что основными причинами погрешностей плавающего гироскопа являются маятниковый эффект поплавка, обусловленный смещением центра масс относительно выходной оси, момент выталкивающей силы, если центр масс смещен относительно оси поплавка, момент сил гидростатического давления, вызванный

изменением удельного веса жидкости, момент, создаваемый конвекционными потоками жидкости при неравномерном температурном поле в зазоре между поплавком и корпусом, если имеют место внешние температурные градиенты, гидродинамический момент при движении поплавка, если он носит несимметричный характер, момент взаимодействия между магнитными массами поплавкового гиросузда и внешним магнитным полем, реактивный момент датчика угла, момент тяжения датчика момента (даже при отсутствии управляющего сигнала) и другие, менее существенные.

Аналитическое описание динамики гироскопа и анализ его погрешностей достаточно полно обеспечивается представлением его расчетной модели в виде системы с сосредоточенными параметрами.

В то же время, прикладные исследования последних лет дают основание считать такой подход исчерпавшим себя и малоэффективным. Более перспективным для решения некоторых задач представляется рассмотрение гироскопических устройств как систем с распределенными параметрами [7].

Речь идет о влиянии внешнего акустического излучения на механические системы подвеса гироскопа, трансляция которого внутрь прибора осуществляется не только через опоры, подобно звуковому мостику, но и через окружающую среду. Таким образом, под действием прошедшей звуковой волны поплавки будут перемещаться как абсолютно твердое тело в сторону распространяющегося возмущения, с одной стороны, а с другой – элементы его упругой поверхности своим движением окажут воздействие на гироскоп. Первый фактор послужит причиной увеличения давления на выходную ось и, следовательно, увеличения момента сил сухого трения, что, по сути дела, нивелирует саму идею взвешивания подвижной части прибора. Второй приведет к возникновению моментов сил инерции Кориолиса и, как следствие, к дополнительным погрешностям измерений.

Постановка задачи данного исследования.

Полномасштабное освоение космического пространства предусматривает решение трех основных задач:

- осуществление межорбитальных околоземных перелетов, включая довыведение КА с опорной на более высокие орбиты, вплоть до геостационарных;
- коррекция орбиты и энергоснабжение больших орбитальных станций типа Международной космической станции (МКС);
- выведение КА на отлетные траектории, а также на орбиты для полета к планетам Солнечной системы.

Отечественная космонавтика предусматривает использование для решения этих задач ракеты-носители класса «Днепр» и «Зенит-2».

В плане решаемой проблемы, самым уязвимым элементом конструкции РН к постоянно изменяющимся требованиям пусковых услуг является головной аэродинамический обтекатель (ГАО), в подобтекательном пространстве (ПП) которого размещается космический аппарат (КА). Происходящие динамические изменения в спектре КА, планируемых для выведения, приводят к тому, что, с одной стороны, увеличиваются абсолютные значения массы КА, вплотную приближаясь к нижней границе возможностей РН тяжелого класса, а с другой – повышается удельный вес задач по доставке КА на высокие орбиты.

Рассмотрим общий случай качки фюзеляжа, когда ω_x, ω_y и ω_z не равны нулю, причем углы ψ и θ малы вместе со своими производными.

Таким образом, пренебрегая слагаемыми выше второго порядка малости, получаем:

$$\begin{aligned}\omega_x &= \dot{\theta} - \dot{\psi} \sin \psi \approx \dot{\theta} - \omega_0 \psi - \omega_z \psi; \\ \omega_y &= \dot{\psi} \sin \theta \cos \psi + \dot{\psi} \cos \theta \approx \omega_0 \theta + \dot{\psi} + \omega_z \theta; \\ \omega_z &= \dot{\psi} \cos \theta \cos \psi - \dot{\psi} \sin \theta \approx \omega_0 + \omega_z + \\ &+ \frac{1}{2} \omega_0 (\theta^2 + \psi^2) - \dot{\psi} \theta.\end{aligned}\quad (1)$$

Уравнение первого приближения двухстепенного гироскопа имеет вид:

$$\begin{aligned}B\ddot{\beta}_1 + (b - \omega_0 Q \sin \beta_0) \dot{\beta}_1 + \\ + (c + \omega_0 r_1 - i\omega_a \omega_0 Q \sin \beta_0) \beta_1 = \\ = r_1 \omega_{1x} - (q_1 - i\omega_a Q \cos \beta_0) \omega_{1z} - B\dot{\omega}_{1y} + \\ + q_1 Q_1 \cos \beta_0 \omega_{1y} + Q \cos \beta_0 \dot{\omega}_{1z}.\end{aligned}\quad (2)$$

Задавая ψ, θ и ω_z как функции времени, можно из соотношений (1) найти $\omega_{1x}, \omega_{1y}, \omega_{1z}, \dot{\omega}_{1y}$ и $\dot{\omega}_{1z}$, а подставив в уравнение (2) – вычислить β_1 .

Уравнение второго приближения можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}B\ddot{\beta}_2 + (b - \omega_0 Q \sin \beta_0) \dot{\beta}_2 + \\ + (c + \omega_0 r_1 - i\omega_a \omega_0 Q \sin \beta_0) \beta_2 = \\ = r_1 \omega_{2x} + (2R\omega_0 + H \cos \beta_0) Q_1 \cos \beta_0 \omega_{2y} - \\ - (q_1 + q'_1 + 2i\omega_a Q \cos \beta_0) \omega_{2z} + r_1 \beta_1 \omega_{1x} + \\ + [R\omega_0 \cos 2\beta_0 \cos \beta_0 (2 - tq_2 \beta_0 tq\beta_0) - H \sin 2\beta_0] \times \\ \times Q_1 \beta_1 \omega_{1y} - q'_1 \beta_1 \omega_{1z} + \\ + Q \cos \beta_0 \omega_0 \beta_1 \dot{\beta}_1 - 2Q \sin \beta_0 \dot{\beta}_1 \omega_{1z} - \\ - \frac{1}{2} \omega_0 (q''_1 + i\omega_a Q \cos \beta_0) \beta_1^2 + \\ + \frac{1}{2} R \left[(\omega_{1x}^2 - \omega_{1z}^2) \sin 2\beta_0 + 2\omega_{1y}^2 Q_1^2 \cos^2 \beta_0 + \right. \\ \left. - 2\omega_{1x} \omega_{1z} \cos 2\beta_0 + 2\omega_{1x} \omega_{1y} Q_1 \cos \beta_0 - \right. \\ \left. - 2\omega_{1y} \omega_{1z} tg 2\beta_0 \cos \beta_0 \right] - B\dot{\omega}_{2y} +, \\ + \dot{\omega}_{2z} Q \cos \beta_0,\end{aligned}\quad (3)$$

где $q'_1 = 2R\omega_0 \cos 2\beta_0 - H \sin \beta_0$;

ω_0 – измеряемая угловая скорость;

$q''_1 = -2R\omega_0 \sin 2\beta_0 + H \cos \beta_0$;

ω_a – круговая частота акустического воздействия.

Общее решение уравнения первого приближения (1) можно представить суммой общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения, т.е.

$$\beta_1 = C \times \exp \left[- (h - h^a) \sin \left(\sqrt{n^2 (h - h^a)^2} t + \varepsilon \right) + \tilde{\beta}_1 \right]. \quad (4)$$

Очевидно, что с течением времени первое слабое здесь убывает и при $t \rightarrow \infty$ стремится к нулю. Поэтому установившееся значение будет определяться частным решением $\tilde{\beta}_1$.

Проанализируем реакцию поплавкового гироскопа на гармонические колебания основания. Предположим вначале, что правая часть уравнения (2) представляет собой гармоническую функцию, например, вида

$$f(t) = \rho \sin(vt + \delta),$$

то есть

$$\ddot{\beta}_1 + 2(h - h^a)\dot{\beta}_1 + n^2\beta_1 = \rho \sin(vt + \delta). \quad (5)$$

Установившееся движение в этом случае также будет периодическим. Оно определяется из решения уравнения (5):

$$\beta_1 = \left\{ \left[n^2 - v^2 \right]^2 + 4(h - h^a)^2 v^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \rho \sin(vt + \delta - \varepsilon), \quad (6)$$

где $\varepsilon = \arctg \frac{2(h - h^a)}{n^2 - v^2}$, если $n > v$;

$$\varepsilon = \pi + \arctg \frac{2(h - h^a)v}{n^2 - v^2}, \text{ если } n < v. \quad (7)$$

Отметим, что если в правой части периодическая функция есть косинус, тогда

$$\beta_1 = \left\{ \left[n^2 - v^2 \right]^2 - 4(h - h^a)^2 v^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \times \rho \cos(vt + \delta - \varepsilon).$$

Пусть угловые колебания корпуса РН происходят по гармоническому закону, т.е.

$$\theta = \rho_\theta \sin(vt + \delta_\theta); \quad \psi = \rho_\psi \sin(vt + \delta_\psi);$$

$$\omega_{1z} = v\rho_\phi \sin(vt + \delta_\phi), \quad (8)$$

а акустическая вибрация поверхности поплавок также происходит по гармоническому закону:

$$V(t) = \rho_\tau \cos(\omega_a t + \delta_V); \quad W(t) = \rho_r \cos(\omega_a t + \delta_W);$$

$$W_T(t) = \rho_T \cos(\omega_a t + \delta_{W_T}). \quad (9)$$

В акустике часто используется только косинусная составляющая и при этом опускается мнимая – синусная составляющая.

Правая часть уравнения (2) в этом случае примет вид:

$$\begin{aligned} r\omega_{1x} - (q - q^a)\omega_{1z} + q\lambda\omega_{1y} + m\dot{\omega}_{1z} - \dot{\omega}_{1y} = \\ = (r - \omega_0)v\rho_\theta \cos(vt + \delta_\theta) - \\ - (r\omega_0 - v^2)\rho_\psi \sin(vt + \delta_\psi) - qv\rho_\phi \cos(vt + \delta_\phi) - \end{aligned}$$

$$- \frac{2P_0}{BHR} \omega_a^2 \cos \beta_0 \times$$

$$\times [I_{II}(\rho_\tau \cos(\omega_a t + \delta_V)) + \pi\rho_r \cos(\omega_a t + \delta_W) + \\ + m_T R_T L \rho_T \cos(\omega_a t + \delta_{W_T}) \times$$

$$\times v\rho_\phi \cos(vt + \delta_\phi) + \frac{4P_0}{HBR} (R\omega_0 \sin 2\beta_0 +$$

$$+ H \cos \beta_0) i\omega_a \cos^2 \beta_0 I_{II} \rho_r \cos(\omega_a t + \delta_W) \times \\ \times [v\rho_\psi \cos(vt + \delta_\psi) + \omega_0 \rho_\theta \sin(vt + \delta_\theta)] +$$

$$+ \frac{2P_0 i\omega_a \cos \beta_0}{HBR} [I_{II}(\rho_\tau \cos(\omega_a t + \delta_V) +$$

$$+ \rho_r \pi \cos(\omega_a t + \delta_W) + \times v^2 \rho_\phi \sin(vt + \delta_\phi) +$$

$$+ \rho_T m_T R_T L \cos(\omega_a t + \delta_{W_T})] \times$$

$$+ v^2 \rho_\psi \sin(vt + \delta_\psi) - v\omega_0 \rho_\theta \cos(vt + \delta_\theta) =$$

$$= (r - \omega_0)v\rho_\theta \cos(vt + \delta_\theta) - (r\omega_0 - v^2)\rho_\psi \times \\ \times \sin(vt + \delta_\psi) - qv\rho_\phi \cos(vt + \delta_\phi) -$$

$$- \frac{P_0 \omega_a^2 \cos \beta_0}{BHR} \{ I_{II} v\rho_\tau \rho_\phi \cos[(\omega_a - v)t + \delta_V - \delta_\phi] +$$

$$+ I_{II} v\rho_\tau \rho_\phi \cos[(\omega_a + v)t + \delta_V + \delta_\phi] +$$

$$+ I_{II} \pi v\rho_r \rho_\phi \cos[(\omega_a - v)t + \delta_W - \delta_\phi] +$$

$$+ I_{II} \pi v\rho_r \rho_\phi \cos[(\omega_a + v)t + \delta_W + \delta_\phi] +$$

$$+ m_T R_T L v\rho_T \rho_\phi \cos[(\omega_a - v)t + \delta_{W_T} - \delta_\phi] +$$

$$+ m_T R_T L v\rho_T \rho_\phi \cos[(\omega_a + v)t + \delta_{W_T} + \delta_\phi] \} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2P_0 i \omega_a \cos^2 \beta_0 I_{II} (R \omega_0 \sin 2\beta_0 + H \cos \beta_0)}{HBR} \times \\
 & \times \left\{ \nu \rho_r \rho_\psi \cos[(\omega_a - \nu)t + \delta_W - \delta_\psi] + \right. \\
 & + \nu \rho_r \rho_\psi \cos[(\omega_a + \nu)t + \delta_W + \delta_\psi] + \\
 & + \omega_0 \rho_r \rho_\theta \sin[(\omega_a - \nu)t + \delta_W - \delta_\theta] + \\
 & + \omega_0 \rho_r \rho_\theta \sin[(\omega_a + \nu)t + \delta_W + \delta_\theta] \left. \right\} + \\
 & + \frac{P_0 i \omega_a \cos \beta_0}{HBR} \left\{ I_{II} \nu^2 \rho_\tau \rho_\phi \sin[(\omega_a - \nu)t + \right. \\
 & + \delta_V - \delta_\phi] + \\
 & + I_{II} \nu^2 \rho_\tau \rho_\phi \sin[(\omega_a + \nu)t + \delta_V + \delta_\phi] + \\
 & + \nu^2 m_T R_T L \rho_T \rho_\phi \sin[(\omega_a - \nu)t + \delta_{W_T} - \delta_\phi] + \\
 & + \nu^2 m_T R_T L \rho_T \rho_\phi \sin[(\omega_a + \nu)t + \delta_{W_T} + \delta_\phi] \left. \right\} + \\
 & + \nu^2 \rho_\psi \sin(\nu t + \delta_\psi) - \\
 & - \nu \omega_0 \rho_\theta \cos(\nu t + \delta_\theta). \quad (10)
 \end{aligned}$$

Теперь можно воспользоваться решением (6) и определить β_1 для случая, когда правая часть уравнения (5) представлена в виде (10).

Как следует из выражения (10), правая часть уравнения первого приближения будет содержать слагаемые, представляющие собой периодические функции времени. Причем одни слагаемые зависят только от частоты ν углового движения корпуса ракеты-носителя, другие – от суммы (или разности) частоты акустического излучения ω_a и кинематического возмущения ν . Первые, понятно, приведут к вынужденным колебаниям подвижной части прибора относительно равновесного положения $\beta = \beta_0$ с частотой ν . Вторые слагаемые, суммарной частоты $(\omega_a + \nu)$, также послужат причиной появления колебаний поплавка относительно выходной оси, но уже вследствие совместного действия двух возмущающих факторов – проникающего акустического излучения и углового движения корпуса РН. Как следует из выражения (10), при $\omega_a = 0$, т.е. при отсутствии звукового воздействия, вынужденные ко-

лебания подвижной части будут происходить только из-за влияния углового движения ракеты.

Особо следует остановиться на анализе составляющих разностной частоты $(\omega_a - \nu)$:

$$\begin{aligned}
 & - \frac{P_0 \omega_a^2 \cos \beta_0}{HBR} \left\{ I_{II} \nu \rho_\tau \delta_\phi \cos[(\omega_a - \nu)t + \delta_V - \delta_\phi] + \right. \\
 & + \pi \nu \rho_r \rho_\phi \cos[(\omega_a - \nu)t + \delta_W - \delta_\phi] + \\
 & + \nu m_T R_T L \rho_T \rho_\phi \cos[(\omega_a - \nu)t + \delta_{W_T} - \delta_\phi] \left. \right\} + \\
 & + \frac{2P_0 i \omega_a \cos^2 \beta_0 I_{II} (R \omega_0 \sin 2\beta_0 + H \cos \beta_0)}{HBR} \times \\
 & \times \left\{ \nu \rho_r \rho_\psi \cos[(\omega_a - \nu)t + \delta_W - \delta_\psi] + \right. \\
 & + \omega_0 \rho_r \rho_\psi \sin[(\omega_a - \nu)t + \delta_W - \delta_\psi] \left. \right\} + \\
 & + \frac{P_0 i \omega_a \cos \beta_0}{HBR} \left\{ \nu^2 I_{II} \rho_\tau \rho_\phi \sin[(\omega_a - \nu)t + \delta_V - \delta_\phi] + \right. \\
 & + \nu^2 m_T R_T L \rho_T \rho_\phi \sin[(\omega_a - \nu)t + \\
 & + \delta_{W_T} - \delta_\phi] \left. \right\}. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Интересным для практики является случай совпадения частот: $\omega_a = \nu$. Как следует из (11), слагаемые, содержащие $\sin(\omega_a - \nu)t$, исчезают, а слагаемые, содержащие $\cos(\omega_a - \nu)t$, обращаются в единицу и выражение (11) примет вид:

$$\begin{aligned}
 & - \frac{P_0 \omega_a^2 \cos \beta_0}{HBR} \nu \left\{ I_{II} \rho_\tau \delta_\phi \cos(\delta_V - \delta_\phi) + \right. \\
 & + \pi \rho_r \rho_\phi \cos(\delta_W - \delta_\phi) + \\
 & + m_T R_T L \rho_T \rho_\phi \cos(\delta_{W_T} - \delta_\phi) \left. \right\} + \\
 & + \frac{2P_0 i \omega_a \cos^2 \beta_0 I_{II} (R \omega_0 \sin 2\beta_0 + H \cos \beta_0)}{HBR} \times \\
 & \times \left\{ \nu \rho_r \rho_\psi \cos(\delta_W - \delta_\psi) + \right. \\
 & + \omega_0 \rho_r \rho_\psi \sin(\delta_W - \delta_\psi) \left. \right\} + \\
 & + \frac{P_0 i \omega_a \cos \beta_0}{HBR} \nu^2 \left\{ I_{II} \rho_\tau \rho_\phi \sin(\delta_V - \delta_\phi) + \right. \\
 & + m_T R_T L \rho_T \rho_\phi \sin(\delta_{W_T} - \delta_\phi) \left. \right\} =
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -\frac{P_0 \omega_a^2 \cos \beta_0}{HBR} v \rho_\phi \times \\
&\times [I_{II} \rho_\tau \cos(\delta_V - \delta_\phi) + \pi \rho_r \cos(\delta_W - \delta_\phi) + \\
&+ m_T R_T L \rho_T \cos(\delta_{W_T} - \delta_\phi)] + \\
&+ \frac{2P_0 i \omega_a \cos^2 \beta_0 I_{II} (R \omega_0 \sin 2\beta_0 + H \cos \beta_0)}{HBR} \times \\
&\times \rho_r \rho_\psi \left[v \cos(\delta_W - \delta_\psi) + \right. \\
&+ \omega_0 \cos(\delta_W - \delta_\psi) \left. \right] + \frac{P_0 i \omega_a \cos \beta_0}{HBR} \times \\
&\times v^2 \rho_\phi \left[I_{II} \rho_\tau \sin(\delta_V - \delta_\phi) + \right. \\
&+ m_T R_T L \rho_T \sin(\delta_{W_T} - \delta_\phi) \left. \right]. \quad (12)
\end{aligned}$$

Как видно, акустическое излучение будет своего рода фильтром, подчеркивая полосу частот кинематического возмущения. Наличие постоянных величин в правой части уравнения приведут к выявлению уже в первом приближении систематических составляющих в выходном сигнале прибора.

Теперь можно воспользоваться решением (6) и определить β_1 для случая, когда правая часть уравнения (5) представлена в виде (10):

$$\begin{aligned}
\beta_1 = & \left[(n^2 - v^2)^2 + 4(h - h^a)^2 v^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \times \\
& \times \left\{ (r - \omega_0) v \rho_\theta \cos(vt + \delta_\theta - \varepsilon) - \right. \\
& - (r \omega_0 - v^2) \rho_\psi \sin(vt + \delta_\psi - \varepsilon) - \\
& - q v \rho_\phi \cos(vt + \delta_\phi - \varepsilon) - \frac{P_0 \omega_a^2 \cos \beta_0}{HBR} \times \\
& \times v \rho_\phi \{ I_{II} \rho_\tau \cos[(\omega_a - v)t + \delta_V - \delta_\phi - \varepsilon] + \\
& + I_{II} \rho_\tau \cos[(\omega_a + v)t + \delta_V + \delta_\phi - \varepsilon] + \\
& + \pi \rho_r I_{II} \cos[(\omega_a - v)t + \delta_W - \delta_\phi - \varepsilon] + \\
& + \pi \rho_r I_{II} \cos[(\omega_a + v)t + \delta_W + \delta_\phi - \varepsilon] + \\
& + m_T R_T L \rho_T \cos[(\omega_a - v)t + \delta_{W_T} - \delta_\phi - \varepsilon] \} + \\
& + m_T R_T L \rho_T \cos[(\omega_a + v)t + \delta_{W_T} + \delta_\phi - \varepsilon] \} +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&+ \frac{2P_0 i \omega_a \cos^2 \beta_0 I_{II} (R \omega_0 \sin 2\beta_0 + H \cos \beta_0)}{HBR} \times \\
&\times \left\{ v \rho_r \rho_\psi \cos[(\omega_a - v)t + \delta_W - \delta_\psi - \varepsilon] + \right. \\
&+ v \rho_r \rho_\psi \cos[(\omega_a + v)t + \delta_W + \delta_\psi - \varepsilon] + \\
&+ \omega_0 \rho_r \rho_\theta \sin[(\omega_a - v)t + \delta_W - \delta_\theta - \varepsilon] + \\
&+ \omega_0 \rho_r \rho_\theta \sin[(\omega_a + v)t + \delta_W + \delta_\theta - \varepsilon] \left. \right\} + \\
&+ \frac{P_0 i \omega_a \cos \beta_0}{HBR} v^2 \rho_\phi \{ I_{II} \rho_\tau \times \\
&\times \sin[(\omega_a - v)t + \delta_V - \delta_\phi - \varepsilon] + \\
&+ I_{II} \rho_\tau \sin[(\omega_a + v)t + \delta_V + \delta_\phi - \varepsilon] + \\
&+ m_T R_T L \rho_T \sin[(\omega_a - v)t + \delta_{W_T} - \delta_\phi - \varepsilon] + \\
&+ m_T R_T L \rho_T \sin[(\omega_a + v)t + \delta_{W_T} + \delta_\phi - \varepsilon] \left. \right\}. \quad (13)
\end{aligned}$$

Три первых слагаемых в правой части выражения (13) описывают влияние только углового движения корпуса ракеты на выходной сигнал, остальные – совместное влияние акустического и кинематического возмущений.

Изложение основного материала с обоснованием полученных результатов

Как оказалось, многие из новинок научно-технической мысли, позволявшие успешно решать задачи оптимизации функционирования аппаратуры в акустических полях низкого и среднего уровней (до 130 децибел), утратили свои приоритеты, а в некоторых случаях даже привели к ухудшению паспортных характеристик приборов, например, в акустических полях высокой интенсивности – 140-150 дБ и выше. А именно такие уровни наблюдаются в подобтекательном пространстве РН в натурных условиях.

Объяснение этому фактору лежит на поверхности. Жидкая среда, предназначенная для взвешивания подвижной части гироскопа и демпфирования колебаний, являясь лучшим проводником звука, чем газообразная фаза, позволяет беспрепятственно

проникнуть акустическому излучению внутрь прибора не столько через опоры, сколько через корпус. Таким образом, гироскоп оказывается с этой стороны полностью незащищенным. Генерируемые в подвесе волновые процессы приведут в своей сово-

купности к погрешностям измерений (рис. 1). Представляется целесообразным все дальнейшие рассуждения строить, ориентируясь на конкретную техническую реализацию серийно выпускаемого авиационной промышленностью поплавкового прибора.

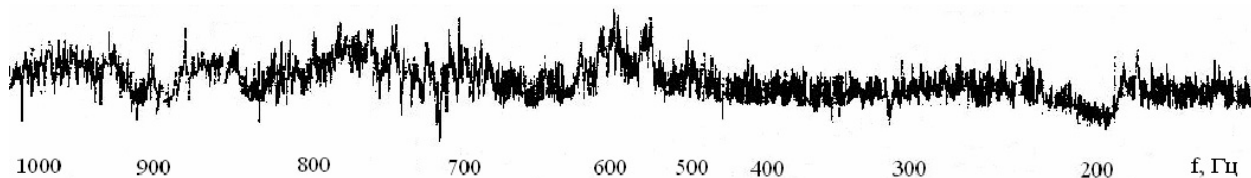


Рис. 1. Сдвиг нуля выходного сигнала гироскопического датчика угловых скоростей в поплавковом исполнении типа ДУСУ2 – 6 АС при акустическом воздействии 161 дБ

Например, на гироскопический датчик угловых скоростей, унифицированный, класса ДУСУ2-6АС, предназначенный для использования в летательных аппаратах длительного функционирования.

По принципу действия он является инерционным, т.е. не нуждается в связи с внешней средой. По динамическим свойствам – является колебательным звеном. Техническое исполнение представляет собой многофазную (полиагрегатную) структуру. По своему целевому назначению – служит измерителем угловой скорости подвижного объекта. Внешний вид ДУСУ представлен на рис. 2. Диапазон измерений угловых скоростей составляет ± 6 град с^{-1} . Порог чувствительности ДУСУ2-6АС около 0,09 град с^{-1} .

Определение степени влияния акустического излучения на показания прибора проводилось опытным путем на установке «Сирена» Института проблем прочности Национальной академии наук Украины (рис. 3).



Рис. 2. Внешний вид серийного гироскопического датчика угловых скоростей класса ДУСУ2-6АС

Датчик угловых скоростей помещался в реверберационной камере на расстоянии 0,25 мм от устья согласующегося рупора динамической роторной

сирены. Влияние стен и пола звуковой камеры устранялось путем установки ДУСУ на четырех амортизаторах-растяжках из упругого материала с высоким коэффициентом демпфирования.

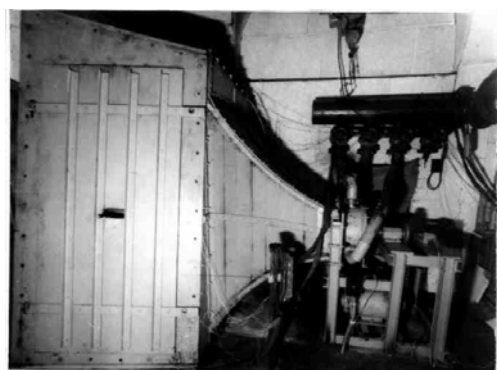


Рис. 3. Установка «Сирена» ИПП НАНУ

Исследования показали, что при неработающем гиromоторе возникающие в механической системе прибора волновые процессы в своей совокупности приводят к сдвигу нуля в сигнальной цепи ДУСУ (рис. 4). На частотах 210 Гц, 520...540 Гц, 800...810 Гц, 880...890 Гц регистрируется систематический сигнал в выходной цепи, который соответствует «ложной» угловой скорости величиной 0,25...0,30 град с^{-1} . Причиной этого факта могут быть и явления резонансного типа.

При работающем гиromоторе сдвиг нуля ДУСУ имеет целый спектр систематических составляющих (рис. 5). При этом их максимальные значения достигают 0,6 град с^{-1} и наблюдаются на частоте 800 Гц. Кроме того, зафиксированы две полосы частот –

500...570 Гц и 680...840 Гц, где сдвиг нуля прибора практически постоянен по величине.

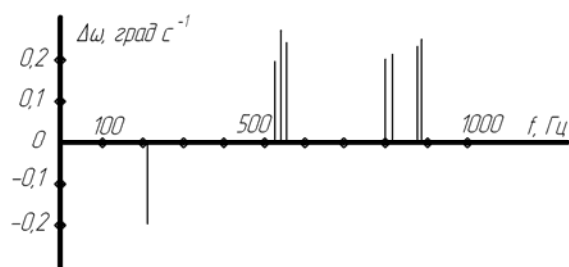


Рис. 4. Сдвиг нуля ДУСУ при неработающем гиromоторе. Акустическое излучение 161 дБ

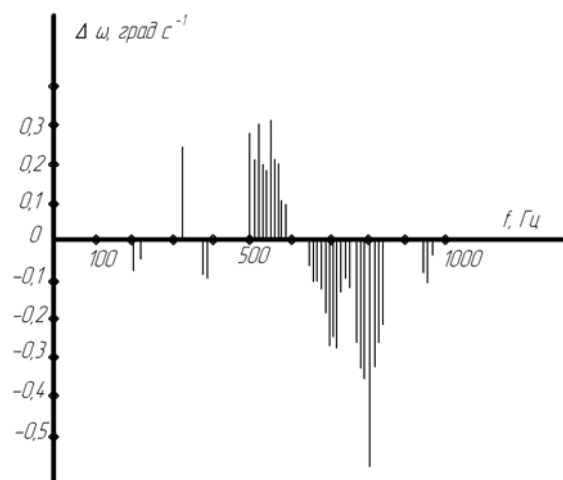


Рис. 5. Сдвиг нуля выходного сигнала ДУСУ при акустическом излучении 161 дБ

Вращающийся ротор, с одной стороны, устраняет погрешность на частотах 210 Гц, 880...890 Гц и практически сохраняет тот же ее уровень и знак на частотах 520...549 Гц.

С другой стороны, на некоторых частотах появляется дополнительная погрешность и довольно значительная. Кроме того, образуются целые полосы – 500...590 Гц и 650...830 Гц, где имеет место систематический сдвиг нуля.

Как видно, в диапазоне частот 500...590 Гц существенно расширилась полоса сдвига нуля. А вот в диапазоне 650...830 Гц она наблюдается только при работающем гиromоторе. Причем, на частоте 810 Гц составляет (как и при выключенном моторе) 0,3 град с^{-1} , но с другим знаком, а на частоте 800 Гц увеличивается вдвое и составляет 0,6 град с^{-1} , одновременно изменяя знак.

Эти особенности имеют следующее толкование. При работающем гиromоторе, в условиях углового движения основания, акустическая вибрация элементов подвеса приводит к возникновению моментов сил инерции Кориолиса, которые существенно меняют спектр и структуру девиации главной оси. На частоте 800 Гц, как следует из графиков, размах погрешности составил 0,85...0,90 град с^{-1} . На частотах 880...890 Гц он исчезает, а на частотах 940...960 Гц – имеет величину около 0,15 град с^{-1} .

Таким образом, оставляя неизменной саму идею взвешивания гиromузла, актуальной представляется проблема создания теории поплавковых гироскопов, которая позволила бы не только объяснить и описать аналитически уже известное, но и очертить круг прикладных задач анализа и синтеза поплавковых приборов с оптимальными функциональными свойствами и минимальными погрешностями измерений механических величин в натурных условиях эксплуатации РН современного типа, а именно, совместного действия кинематического возмущения со стороны корпуса ракеты-носителя и прошедшего в подобтекательное пространство акустического излучения. Для этого, прежде всего, необходимо аналитически обосновать выбираемую геометрию, массо-габаритные и динамические свойства основного элемента подвеса – поплавок.

При решении задач выведения нескольких космических аппаратов на различные орбиты одним носителем, в процессе последовательного отделения КА разгонный блок (третья ступень РН) становится существенно несимметричным, что приводит к соизмеримости величин осевых и центробежных моментов инерции, нарушению равенства значений осевых моментов инерции и смещению центра масс ракеты относительно ее продольной оси. Появляющаяся несимметрия разгонного блока определяется произведением силы тяги двигателя на величину поперечного смещения центра масс РН и приводит к возникновению углового движения фюзеляжа.

Акустическим воздействием будем считать аэродинамический шум маршевых двигателей РН. Это возмущение, в отличие от кинематического, проходит внутрь не только через опоры подвеса, но и через корпус прибора и окружающую среду.

Техническим решением проблемы уменьшения погрешностей поплавковых гироскопов в натурных условиях предлагается реализация поплавок в виде вогнутых (либо выпуклых) оболочек вращения.

Само собой разумеется, что параллельно решаются задачи звукоизоляции собственно приборов, что обеспечивается снижением уровня звукового давления до паспортного, когда акустические поля не в состоянии «раскачать» механические системы подвеса гироскопа.

Выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении

Таким образом, натурные и полунатурные испытания приборов и систем инерциальной навигации убедительно доказывают влияние акустических полей на рост погрешностей измерений, с одной стороны, заставляют пересмотреть существующие расчетные модели – с другой [9, 10].

Перспективными направлениями изучения данной проблемы следует считать разработку методов и средств звукоизоляции. В каждом конкретном случае отправной точкой для принятия решений служат массо-габаритные требования к РН и точностные характеристики изделий в целом.

Литература

1. Павловский М.А., Петренко В.Е. Об автокомпенсации погрешностей гиротаксметров при угловой вибрации основания // Доклады АН УССР, Серия А. – 1977. – № 8. – С. 147-151.
2. Лунц Я.Л. О систематических уходах платформы трехосного гиросtabilизатора при колебаниях основания // Изв. ВУЗ СССР. Приборостроение. – 1967. – Т. 7, № 4. – С. 47-51.

3. Климов Д.М., Рогачева А.Н., Филиппов В.А. Резонансные режимы гироскопа в кардановом подвесе // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1972. – № 4. – С. 37-44.

4. Ильчанинов В.П. Влияние принудительного вращения карданова подвеса на движение астатического гироскопа // Изв. ВУЗ СССР. Приборостроение. – 1970. – Т. 3, № 12. – С. 66-70.

5. Каргу Л.И. Гироскопическая система с реверсируемым кинетическим моментом // Изв. ВУЗ СССР. Приборостроение. – 1964. – Т. 7. – С. 65-70.

6. Одинцов А.А. Об уменьшении погрешностей интегрирующего гироскопа, вызванных угловыми колебаниями основания // Изв. ВУЗ СССР. Приборостроение. – 1971. – № 2. – С. 24-30.

7. Карачун В.В., Гнатейко Н.В. Волновые процессы в механических системах космического аппарата под влиянием акустического излучения // Космічна наука і технологія. – 1996. – Т. 2, № 3 – 4. – С. 55-57.

8. Валеев К.Г., Квитка В.Е. Определение напряженного состояния плоской панели в акустическом поле выхлопной струи // Прикладная механика. – 1970. – VI, № 4. – С. 39-43.

9. Potapova E.R., Karachun V.V., Melnik V.N. Problems of Acoustic Elasticity of Carriers' Board Eduiptent // The Fifth SINO-RUSSIAN-UKRAIN Symposium on Spase Science and Technology Held Jointly With the First International Forum on Astronatics and Aeronautics. 6 th – 9 th June, 2000. Harbin Institute os Technology, Harbin, P.R. China: – P. 350-355.

10. Karachun V.V., Yankovoy V.V., Potapova E.R. Resilient interaction of external acoustical emission with mechanical systems of management devices // Ankara International Aerospace conference. 19-21 september, 1996. – P. 217-220.

Поступила в редакцию 24.01.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.М. Рыжков, Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев.

УДК 532.526

Ю.А. КРАШАНИЦА, ШАЛЯЛЬ ФАЯД АЛУАН*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»***О ВОССТАНОВЛЕНИИ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ПО КИНЕМАТИЧЕСКИМ
И ДИНАМИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ В ЗАДАЧЕ ОЗЕЕНА**

Представлена идеология получения решений линейной нестационарной задачи Озеена в сплошной вязкой среде методом граничных интегральных уравнений. На базе развитого и апробированного оригинального аппарата векторно-тензорного анализа показаны интегральные представления динамических и кинематических параметров, а также восстановление поля скоростей по динамическим и кинематическим параметрам течения вокруг телесного профиля, движущегося вблизи поверхности раздела.

законы сохранения, система уравнений Озеена, телесный профиль, начально-краевая задача, фундаментальные решения, интегральные представления решений, системы интегральных уравнений, завихренность, давление, поле скоростей

Введение

Изучение физико-технических процессов в механике сплошных сред начинается с построения математической модели. Полное описание процесса часто делает невозможным нахождение точного решения задачи. Поэтому при получении практически важных результатов, исследования которых сопровождаются требованиями математической строгости, зачастую необходимо пренебрегать второстепенными на данном этапе исследований факторами и пользоваться результатами физического эксперимента.

В силу многопараметричности и нелинейности основных задач механики сплошных сред, существенное развитие, наряду с физическим опытом, получил вычислительный эксперимент. Значительные достижения получены в численном анализе и, особенно, в численной реализации конкретных математических моделей механики: в газовой динамике существенное развитие получила вычислительная газовая динамика с учетом физико-химических процессов; в динамике вязкой несжимаемой жидкости основное внимание уделяется новым качественным методам исследования начально-краевых задач, которые в свою очередь накапливают математические

проблемы и намечают некоторые пути их разрешения, приводят к возникновению новых математических моделей постановок и решений задач движения вязкой жидкости также при малых и средних числах Рейнольдса, имеющих первостепенное значение в вопросах жизнеобеспечения и экологии, технологических процессах.

Метод граничных интегральных уравнений, позволяющий сводить краевые задачи для уравнений в частных производных на многообразия меньшей размерности, есть одним из классических методов исследования и решения краевых задач математической физики, теории поля и векторного анализа. Он находит широкое применение при построении математических моделей явлений, при доказательстве разрешимости задач, а также является теоретической основой разработки алгоритмов их численного исследования. Наиболее эффективным методом оказался в случаях внешних задач для неограниченных областей с компактными внутренними границами.

Одной из классических и практически востребованных задач механики жидкости является задача Озеена – корректная математическая модель нестационарного движения тела в потоке вязкой несжимаемой жидкости при малых числах Рейнольдса [1 – 2].

Эта задача особенно актуальна при исследовании аэродинамических характеристик летательных аппаратов на режимах взлета-посадки, когда формируются интенсивные вихревые структуры в спутных потоках, препятствующие устойчивому и управляемому полету.

Результаты исследований

В задаче Озеена линейризованный закон сохранения импульса в потоке вязкой жидкости имеет вид

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \left(\frac{p}{\rho} \right) - \nu \Delta \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

при выполнении естественных граничных

$$\mathbf{V}|_S = \mathbf{U}_S(\mathbf{r}, t) \quad (2)$$

и начальных условий

$$\mathbf{V}|_{t=0} = \mathbf{U}_0(\mathbf{r}). \quad (3)$$

Причем на границе раздела и неподвижном профиле скорость течения равна нулю, на границах же движущегося профиля и контрольного объема скорость – это заданный вектор координат и времени. Кроме этого, в некоторый начальный момент времени движение отсутствует.

Применяя операцию ротации к уравнению (1), имеем

$$\frac{\partial \mathbf{\Omega}}{\partial t} + \nu [\nabla, [\nabla, \mathbf{\Omega}]] = 0, \quad (4)$$

а в силу опять же консервативности вектора $\mathbf{\Omega}$ по определению, отсюда получаем

$$\frac{\partial \mathbf{\Omega}}{\partial t} - \nu \Delta \mathbf{\Omega} = 0. \quad (5)$$

Причем, можно считать, что на входных границах контрольного объема известны как давление p , так и завихренность $\mathbf{\Omega}$.

Для несжимаемой среды, если $(\nabla, \mathbf{V}) = 0$, к системе уравнений (1, 5) необходимо добавить уравнение Лапласа для давления и решения искать в классах вектор-функций вида

$$\begin{aligned} \mathbf{V}(r, t) &= e^{\nu t} \bar{\mathbf{V}}(r), \quad \frac{p}{\rho}(r, t) = \\ &= e^{\nu t} \frac{\bar{p}}{\rho}(r), \quad \mathbf{\Omega}(r, t) = e^{\nu t} \bar{\mathbf{\Omega}}(r). \end{aligned} \quad (6)$$

Тогда для преобразованных векторов скорости $\mathbf{V}$, завихренности $\mathbf{\Omega} = \mathbf{k}\mathbf{\Omega}$ (при плоских течениях

$\mathbf{\Omega} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$) и давления p имеем систему:

$$\Delta \mathbf{V} - \mathbf{V} = \nabla \left(\frac{p}{\mu} \right); \quad (7)$$

$$\Delta \mathbf{\Omega} - \mathbf{\Omega} = 0; \quad (8)$$

$$\Delta p = 0. \quad (9)$$

Здесь следует отметить, что если для уравнения Лапласа (9) элементарное (фундаментальное) решение для пространств любой размерности широко известно и хорошо изучено, к уравнению Клейна-Гордона (7, 8) это относится в меньшей степени.

Можно показать [4], что скалярное фундаментальное решение для оператора в левых частях уравнения (7, 8) имеет вид

$$\phi(r) = \frac{1}{2\pi} \int_1^\infty \frac{e^{-r\xi} d\xi}{\sqrt{\xi^2 - 1}}, \quad (10)$$

где $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$, а в окрестности особой точки имеет логарифмическую особенность. Укажем еще поведение функции $\phi(r)$ при $r \rightarrow \infty$.

Полагая в равенстве (10) $r(\xi - 1) = \eta^2$, $\xi = 1 + \frac{\eta^2}{r}$, получаем

$$\begin{aligned} \phi(r) &= \int_0^\infty \frac{e^{-\eta^2 - r}}{\sqrt{\left(1 + \frac{\eta^2}{r}\right) - 1}} \frac{2\eta d\eta}{r} = \\ &= e^{-r} \sqrt{\frac{2}{r}} \int_0^\infty \frac{e^{-\eta^2}}{\sqrt{1 + \frac{\eta^2}{2r}}} d\eta = e^{-r} \sqrt{\frac{2}{r}} \left[\int_0^\infty e^{-\eta^2} d\eta + \varepsilon \frac{\sqrt{\pi}}{2} \right] \end{aligned}$$

и, следовательно, при $r \rightarrow \infty$

$$\phi(r) = e^{-r} \sqrt{\frac{\pi}{2r}} (1 + \varepsilon),$$

где ε — величина, стремящаяся к нулю при $r \rightarrow \infty$.

Таким образом, показано, что функция $\phi(r)$ (10) в применении к уравнениям (7, 8) играет точно такую же роль, как и функция единичного источника $\phi(x, x_0, y, y_0) = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{1}{r}$ в применении к двумерному уравнению Лапласа (9). Поэтому функцию (10) можно назвать функцией единичного источника в точке (x_0, y_0) для уравнений (7, 8), а решения имеют интегральные представления:

$$p(\mathbf{x}) = -\frac{1}{2\pi} \oint_L (\mu \ln r V_n - \mu ([\mathbf{n}, \nabla(\ln r)], \mathbf{\Omega}) + p \frac{\partial \ln r}{\partial n}) dl; \quad (11)$$

$$\mathbf{\Omega}(\mathbf{r}) = \oint_{(L)} \left(\phi(\mathbf{r}, \mathbf{\rho}) [\mathbf{n}, \mathbf{V}] - \frac{1}{\mu} [\mathbf{n}, \nabla \phi(\mathbf{r}, \mathbf{\rho})] p - \mathbf{\Omega}(\mathbf{\rho}) \frac{\partial \phi(\mathbf{r}, \mathbf{\rho})}{\partial n} \right) d\rho l; \quad (12)$$

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}) = - \int_{(S)} \frac{1}{\mu} p \nabla \phi dS + \oint_{(L)} \left(\frac{\mathbf{n}}{\mu} p(\mathbf{\rho}) \phi(\mathbf{r}, \mathbf{\rho}) + \phi(\mathbf{r}, \mathbf{\rho}) [\mathbf{n}, \mathbf{\Omega}] + [\mathbf{n}, \nabla \phi(\mathbf{r}, \mathbf{\rho})], \mathbf{V} \right) - \mathbf{V} \frac{\partial \phi}{\partial n} d\rho l. \quad (13)$$

Причем в интегральных представлениях (11 – 13) ядра $[\mathbf{n}, \nabla \phi(\mathbf{r}, \mathbf{\rho})]$ и $[\mathbf{n}, \nabla \phi(\mathbf{r}, \mathbf{\rho})]$ не хуже сингулярных.

После предельного перехода к границам имеем систему граничных интегральных уравнений соответствующих представлениям (11 – 13).

Поставим задачу определения поля скоростей (13) по известным граничным значениям как давления p , так и завихренности $\mathbf{\Omega}$. Особая трудность связана здесь с наличием в (13) интеграла по области (S) .

Таким образом, доказано, что интегральные представления (11, 12) являются общими решениями модифицированной задачи Озеена (7 – 9), а поле скоростей восстанавливается представлением (13) с помощью решения вспомогательной задачи (16) вида (19).

Однако, с другой стороны, согласно (7) поле скоростей определяется уже известными полями давлений (11) и завихренностей (12)

$$\mathbf{V} = -[\nabla, \mathbf{\Omega}] - \nabla \left(\frac{p}{\mu} \right).$$

В силу консервативности поля скоростей $(\nabla, \mathbf{V}) = 0$, существует векторный потенциал $\mathbf{\Psi}$ такой, что

$$\mathbf{V} = [\nabla, \mathbf{\Psi}], \quad (14)$$

где в плоском случае течения $\mathbf{\Psi} = \mathbf{k}\psi$, а ψ — обычная функция тока.

В классе вектор-функций (6) из уравнения (7) следует, что

$$[\nabla, \mathbf{\Psi}] + [\nabla, \mathbf{\Omega}] = -\nabla \left(\frac{p}{\mu} \right), \quad (15)$$

а, в силу (9), p — гармоническая функция. По определению вектор завихренности $\mathbf{\Omega}$ консервативный, т.е. $(\nabla, \mathbf{\Omega}) = 0$.

При известном поле скоростей $\mathbf{V}$ после тождественных преобразований

$$\begin{aligned} [\nabla \phi, \mathbf{V}] &= [\nabla \phi, [\nabla, \mathbf{\Psi}]] = \\ &= (\nabla \phi, \nabla^* \mathbf{\Psi}) - (\nabla \phi, \nabla \mathbf{\Psi}) = (\nabla \phi, [\nabla, [\hat{\mathbf{I}}, \mathbf{\Psi}]]) + \\ &+ \nabla \phi (\nabla, \mathbf{\Psi}) - (\nabla, (\nabla \phi * \mathbf{\Psi})) \end{aligned}$$

интегральное представление решения уравнения (14) имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{\Psi} &= \iint_{(S)} (\nabla \phi (\nabla, \mathbf{\Psi}) - [\nabla \phi, \mathbf{V}]) dS - \\ &- \oint_{(L)} \left\{ [[\mathbf{n}, \nabla \phi], \mathbf{\Psi}] + \mathbf{\Psi} \frac{\partial \phi}{\partial n} \right\} dl, \end{aligned}$$

откуда следует, что поле векторного потенциала в (14) также консервативно и $(\nabla, \mathbf{\Psi}) = 0$.

Поэтому

$$\Delta(\mathbf{\Psi} + \mathbf{\Omega}) = 0 \quad (16)$$

и в силу преобразований, приведенных выше, имеем последовательно

$$\mathbf{\Psi} + \mathbf{\Omega} = \oint_{(L)} \left\{ \phi \frac{\partial}{\partial n} (\mathbf{\Psi} + \mathbf{\Omega}) - (\mathbf{\Psi} + \mathbf{\Omega}) \frac{\partial \phi}{\partial n} \right\} dl,$$

$$\begin{aligned} \text{где } \frac{\partial}{\partial n}(\Psi + \Omega) &= (\mathbf{n}, \nabla(\Psi + \Omega)) - (\mathbf{n}, \nabla^*(\Psi + \Omega)) + \\ &+ (\mathbf{n}, \nabla^*(\Psi + \Omega)) - \hat{\mathbf{I}}(\nabla(\Psi + \Omega)) = \\ &= -[\mathbf{n}, [\nabla, (\Psi + \Omega)]] + (\mathbf{n}, [\nabla, [\hat{\mathbf{I}}, (\Psi + \Omega)]]) = \\ &= [\mathbf{n}, \nabla\left(\frac{p}{\mu}\right)] + (\mathbf{n}, [\nabla, [\hat{\mathbf{I}}, (\Psi + \Omega)]]) . \end{aligned}$$

Поэтому

$$\begin{aligned} \Psi + \Omega &= - \oint_{(L)} \left\{ [\mathbf{n}, \nabla \varphi] \frac{p}{\mu} + [[\mathbf{n}, \nabla \varphi], (\Psi + \Omega)] + \right. \\ &\quad \left. + (\Psi + \Omega) \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right\} dS. \end{aligned} \quad (17)$$

По известному потенциалу Ψ отсюда по (14) восстанавливается поле скоростей.

Поэтому воспользуемся развитой ранее технологией векторно-тензорного анализа [5].

Так как по определению вектор завихренности $\Omega = [\nabla, \mathbf{V}]$, то имеем последовательно

$$\begin{aligned} [[\nabla \varphi], [\nabla, \mathbf{V}]] &= (\nabla \varphi, \nabla^* \mathbf{V}) - (\nabla \varphi, \nabla \mathbf{V}) = \\ &= -(\nabla, [\nabla \varphi, [\hat{\mathbf{I}}, \mathbf{V}]]) + \nabla \varphi q - (\nabla, (\nabla \varphi * \mathbf{V})), \end{aligned}$$

где φ – фундаментальное решение уравнения Лапласа; $q = (\nabla, \mathbf{V})$ – известная плотность интенсивности возможных источников массы, распределенных в области S ; тензор $\nabla^* \mathbf{V}$ является сопряженным тензору $\nabla \mathbf{V}$, а $\hat{\mathbf{I}}$ – единичный тензор.

Тогда интегрируя по области S полученные выражения $[[\nabla \varphi], \Omega] = [[\nabla \varphi], [\nabla, \mathbf{V}]]$, и учитывая представление (12) имеем:

$$\begin{aligned} &- \oint_{(L)} \left\{ [[\mathbf{n}, \nabla \varphi], \mathbf{V}] + \mathbf{V} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right\} dl + \iint_{(S)} q \nabla \varphi dS = \\ &= \iint_{(S)} \left\{ \oint_{(L)} \left(\phi(\mathbf{r}, \rho) [\nabla \varphi, [\mathbf{n}, \mathbf{V}]] - \frac{1}{\mu} [\nabla \varphi, [\mathbf{n}, \nabla \phi(\mathbf{r}, \rho)]] \right) p - \right. \\ &\quad \left. - [\nabla \varphi, \Omega(\rho)] \frac{\partial \phi(\mathbf{r}, \rho)}{\partial n} \right\} d\rho l \Bigg\} dS. \end{aligned}$$

В силу свойств потенциала двойного слоя [3], отсюда, после перестановки интегралов, получаем интегральное представление распределения поля

скоростей в области, а так как в этом случае ядра непрерывные функции, то

$$\begin{aligned} \mathbf{V}(\mathbf{r}) &= \iint_{(S)} q \nabla \varphi dS - \oint_{(L)} \left\{ [[\mathbf{n}, \nabla \varphi], \mathbf{V}] + \mathbf{V} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right\} dl - \\ &- \oint_{(L)} \left\{ \iint_{(S)} \left(\phi(\mathbf{r}, \rho) [\nabla \varphi, [\mathbf{n}, \mathbf{V}]] - \frac{1}{\mu} [\nabla \varphi, [\mathbf{n}, \nabla \phi(\mathbf{r}, \rho)]] \right) p - \right. \\ &\quad \left. - [\nabla \varphi, \Omega(\rho)] \frac{\partial \phi(\mathbf{r}, \rho)}{\partial n} \right\} dS \Bigg\} d\rho l. \end{aligned} \quad (18)$$

В заключение необходимо отметить, что данной статьей завершается цикл работ, посвященных обобщению векторно-тензорного анализа и развитию на этой базе метода граничных интегральных уравнений в начально-краевых задачах динамики вязкой несжимаемой жидкости при малых числах Рейнольдса.

Литература

1. Хаппель Дж., Бреннер Г. Гидродинамика при малых числа Рейнольдса. – М.: Мир, 1976. – 632 с.
2. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. – М.: Мир, 1973. – 758 с.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
4. Крашаница Ю.А., Shalal F.A. Нестационарное движение телесного профиля вблизи поверхности раздела в вязкой среде // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2007. – № 3 (39). – С. 56-61.
5. Крашаница Ю.А. Основная задача векторного анализа в механике сплошных сред (сообщение 1) // Вісник Дніпропетровського університету. – 2000. – Вип. 3, т. 1. – С. 52-56.

Поступила в редакцию 12.03.2008

Рецензент: д-р. физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

УДК 535(023)

Н.Г. ТОЛМАЧЕВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БИ-ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ ЕГО КВАНТОВ

Для количественной оценки свойств вещества, с которым взаимодействует летательный аппарат, впервые получена зависимость фундаментальной энергетической характеристики вещества – постоянной тонкой структуры α , от геометрических форм квантов би-вещества, т.е. соотношение $\alpha^{-1} = 4\pi 4e$, которое является основой формирования геометрических моделей измерения и количественной оценки физических параметров вещества, а также выявления энергетических условий и циклов его преобразования. Сама константа α получила принципиально новое толкование и измерение.

би-вещество, модели измерения, постоянная тонкой структуры, мировые константы π и e

Введение

При решении задач движения летательных аппаратов важное место занимают свойства вещества, с которым он взаимодействует. Оценке параметров среды, в которой перемещаются объекты, посвящено большое количество фундаментальных исследований [1 – 2]. Однако, как показывает их анализ, они не позволяют объяснить природу и произвести количественную оценку обнаруженных в последнее время “темной” массы и “темной” энергии [3].

В работе [4] проблему этих субстанций предложено решать на основе гипотезы би-вещества. Основная её сущность заключается в том, что овеществленная часть материи во всех точках Вселенной состоит из барионного (б) и тахионного (т) квантов, находящихся в энергетическом взаимодействии (рис. 1).

Последними исследованиями [3] установлено, что “светящиеся” кванты составляют около 4%, а “темные” кванты – около 26% вещества в полном материальном балансе.

На основе схемы, представленной на рис. 1, в работе [4] получены принципиально новые энергетические модели измерения физических параметров в обоих квантах (табл. 1).

Использование таких моделей позволило впервые количественно оценить физические параметры вещества в тахионном кванте [5] (табл. 2).

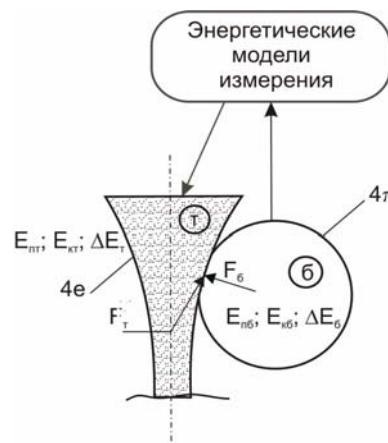


Рис. 1. Схема измерения свойств вещества в тахионном кванте с помощью энергетических моделей: E_k и E_p – кинетические и потенциальные энергии квантов; ΔE – энергии, затрачиваемые на взаимодействие; R – радиусы взаимодействий

При этом под барионным квантом подразумевается порция барионного (светящегося) вещества, которой присущи все наблюдаемые в настоящее время физические параметры, в том числе и скорости взаимодействий, равные (или меньшие) скорости света. Тахионный же квант идентифицирует собой “темное” несветящееся вещество, обладающее гравитационными свойствами со скоростями взаимодействия, большими скорости света.

Энергии рассматриваемых квантов, и найденные на их основе физические параметры, естественно, имеют размерность либо в системе СИ, либо в энергетических единицах – джоулях.

Таблица 1

Энергетические модели измерения некоторых физических параметров в квантах би-вещества

Физические параметры	Модели измерения	Физические параметры	Модели измерения
Радиусы взаимодействия квантов	$R_6 = \frac{E_{пб}^{3/4} E_{пт}^{3/4} \Delta E_6^{3/2}}{E_{кб}^{3/2} E_{кт}^{1/2} \Delta E_T^{1/2}}$ $R_T = \frac{E_{пб}^{3/4} E_{пт}^{3/4} \Delta E_6^{1/2} \Delta E_T^{1/2}}{E_{кб}^{3/2} E_{кт}^{1/2}}$	Времена передачи взаимодействий	$\tau_6 = \frac{E_{пб}^{3/8} E_{пт}^{7/8} \Delta E_6^{5/4}}{E_{кб}^{5/4} E_{кт}^{3/4} \Delta E_T^{1/4}}$ $\tau_T = \frac{E_{пб}^{7/8} E_{пт}^{3/8} \Delta E_6^{1/4} \Delta E_T^{3/4}}{E_{кб}^{5/4} E_{кт}^{3/4}}$
Массы взаимодействующих квантов	$M_6 = \frac{E_{пт}^{1/4} E_{кб}^{3/2} \Delta E_T^{1/2}}{E_{пб}^{3/4} E_{кт}^{1/2} \Delta E_6^{1/2}}$ $M_T = \frac{E_{пб}^{1/4} E_{кб}^{1/2} E_{кт}^{1/2} \Delta E_T^{1/2}}{E_{пт}^{3/4} \Delta E_6^{1/2}}$	Скорости передачи взаимодействий	$v_6 = \frac{E_{пб}^{3/8} E_{кт}^{1/4} \Delta E_6^{1/4}}{E_{пт}^{1/8} E_{кб}^{1/4} \Delta E_T^{1/4}}$ $v_T = \frac{E_{пт}^{3/8} E_{кб}^{1/4} \Delta E_{кт}^{1/4}}{E_{пб}^{1/8} E_{кт}^{1/4} \Delta E_6^{1/4}}$

Таблица 2

Численные значения физических параметров вещества в тахионном кванте, найденные с помощью энергетических моделей измерения [5]

Параметры тахиона	Единицы измерения	Численные значения
Масса	кг	$2,786345 \cdot 10^{-41}$
Плотность	кг/м ³	$3,5437745 \cdot 10^{-15}$
Давление	Па	285648,19
Температура	°К	$6,5944516 \cdot 10^{30}$
Газовая постоянная	Дж/кг·К	$1,2223218 \cdot 10^{-11}$
Количество вещества, постоянная Авогадро	моль ⁻¹	$6,022045 \cdot 10^{-23}$
Постоянная Больцмана	Дж/К	$3,406058 \cdot 10^{-52}$
Скорость распространения взаимодействия	м/с	$1,6714662 \cdot 10^{56}$

Постановка задачи. Как писал в своей автобиографии А. Эйнштейн (1949 г.), «из физики следует полностью исключить величины, выражаемые в метрах, килограммах, секундах и т.п., заменив их безразмерными величинами».

«Если представить себе это выполнимым, – пишет Эйнштейн, – то в основные уравнения физики будут входить лишь безразмерные постоянные».

Следует также иметь в виду, что гипотеза би-вещества предполагает энергетическое взаимодействие двух квантов, энергообмен между которыми должен осуществляться, естественно, при минимальных затратах энергии с обеих сторон.

Кроме того, количественная оценка энергетических затрат [5] показала, что с такой точки зрения тахионное вещество является образующим для барионных квантов.

Реализацию обоих этих факторов, т.е. минимальных затрат энергии на взаимодействие и энергетическое преимущество тахионных квантов, природа в состоянии реализовать только через геометрию энергообмена, т.е. через различные геометрические формы барионного и тахионного квантов би-вещества.

Некоторые исследователи считают [6], что всему происходящему в пространстве и времени можно дать геометрическое описание.

Истоки идеи, что любую физическую величину можно оценить с помощью геометрии объекта, а все законы физики выразить в виде геометрических соотношений между взаимодействующими объектами, восходят к исследованиям Ф. Клейна и Веблена [7]. Они открыли путь к формированию геометрических моделей измерения физических параметров с помощью фундаментальных постоянных не зависящих от систем отсчета.

Решение задачи

Анализ физических констант [7] показывает, что часть из них – это размерные величины, другие же характеризуют вещество в безразмерном виде.

Среди безразмерных констант особое место занимает постоянная тонкой структуры α , введенная Зоммерфельдом в 1916 году при создании энергетической модели атома. С развитием квантовой теории оказалось, что она представляет собой комбинацию фундаментальных физических величин:

$$\alpha = \frac{\mu_0 c e^2}{2h}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость;

c – скорость света;

e – заряд электрона;

h – постоянная Планка.

Очевидно, что постоянная тонкой структуры объединяет в себе основные константы электромагнитного взаимодействия, такие как скорость света, элементарный электрический заряд, магнитная проницаемость и переходная величина – постоянная Планка, которую можно отнести как к электромагнитному, так и к гравитационному взаимодействиям.

Интересное высказывание о числе α принадлежит Фейнману [6]: «с тех пор как оно было открыто... оно остается загадкой. Всех искушенных физиков-теоретиков это число ставило в тупик и тем самым вызывало беспокойство. Нам хотелось бы знать, откуда эта постоянная связи появилась: связана ли она с числом π или, может быть, она связана с натуральными логарифмами? Никто не знает».

Относительно значения тонкой постоянной структуры авторы Берклеевского курса физики пишут: "мы не располагаем теорией, которая предсказывала бы величину этой постоянной".

В то же время такие особенности постоянной тонкой структуры, как обобщенность в ней самой четырех фундаментальных констант (1) и инвариантность к выбору системы единиц измерения, позволяют считать её наиболее приемлемым параметром при разработке безразмерных моделей измерения параметров би-вещества в геометрическом виде.

Применительно к би-веществу, состоящему из барионного и тахионного квантов, эту константу

представим объединением постоянных структур каждого из квантов (рис. 2) в виде выражения

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\alpha_b} \cdot \frac{1}{\alpha_t}, \quad (2)$$

где α_b – постоянная тонкой структуры барионного кванта;

α_t – постоянная тонкой структуры тахионного кванта.

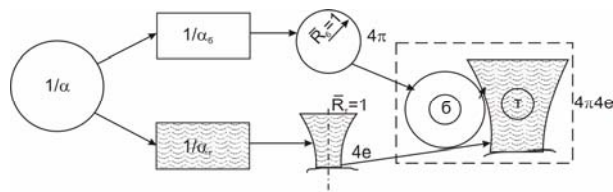


Рис. 2. Схема объединения квантов в би-веществе на основе их геометрических форм

Величину постоянной тонкой структуры α_b определим по выражениям, аналогичным (1):

– при гравитационном взаимодействии

$$\alpha_b = \frac{\mu_{0b} v_b e_b^2}{2h_b}; \quad (3)$$

– при электромагнитном взаимодействии

$$\alpha_{\text{эб}} = \frac{\mu_{\text{эб}} v_{\text{эб}} e_{\text{эб}}^2}{2h_{\text{эб}}}. \quad (4)$$

Величины констант, входящих в выражения (3) и (4), выразим через основные параметры барионного кванта.

Так, значение μ_0 определяется следующим соотношением [8]:

$$\mu_0 = \frac{R_{\text{эб}}^3 \tau_{\text{эб}}^2}{M_{\text{эб}}} = 1,256637061 \cdot 10^{-6}, \text{ Гн/м.} \quad (5)$$

В определение постоянной тонкой структуры входит и величина c , т.е. скорость света, которую также можно выразить через основные параметры барионного кванта (см. табл. 2):

$$c = v_{\text{эб}} = \frac{R_{\text{эб}}}{\tau_{\text{эб}}} = 2,99792458 \cdot 10^8, \text{ м/с.} \quad (6)$$

Элементарный электрический заряд e , входящий в выражение (1) постоянной тонкой структуры, может быть записан [9] через основные параметры барионного кванта:

$$e = \frac{M_{\alpha\beta}}{R_{\alpha\beta}\tau_{\alpha\beta}} = 1,6021192 \cdot 10^{-19}, \text{ Кл.} \quad (7)$$

Входящий в (3) момент количества движения электрона – h (при его вращении вокруг ядра – постоянная Планка) оценивается выражением

$$h = 2\pi M_e R_{oe} v_{oe} = 6,626176 \cdot 10^{-34}, \quad (8)$$

где $M_e = 109534 \cdot 10^{-31}$ кг, – масса покоя электрона;

$$R_{oen} = \frac{h_e^2 \epsilon_0 n^2}{\pi M_e e^2} = n^2 \cdot 5,29177 \cdot 10^{-11} - \text{радиус } n\text{-й}$$

орбиты электрона;

$$\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = \frac{M_{\alpha\beta}}{R_{\alpha\beta}^2} = 8,85418782 \cdot 10^{-12} - \text{электри-}$$

ческая постоянная;

$$v_{oen} \frac{e^2}{2n\epsilon_0 h_{oe}} = \frac{2,18769 \cdot 10^6}{n} - \text{скорость элек-}$$

трона на n -й стандартной орбите.

Если в выражение (3) подставить численные значения входящих в него параметров [4]:

$$\mu_{\alpha\beta} = 1,1001723 \cdot 10^{-22} \text{ Гн/м; } v_{\alpha\beta} = 5,7782332 \cdot 10^{-5} \text{ м/с; } h_{\alpha\beta} = 2\pi M_{\alpha\beta} R_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta} = 2\pi E_{\alpha\beta} \tau_{\alpha\beta}, \text{ то получим}$$

$$\alpha_{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi}. \quad (9)$$

При подстановке в выражение (4) численных значений входящих в него параметров [4]:

$$\mu_{\alpha\beta} = 1,2566345 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м; } v_{\alpha\beta} = 2,9979103 \cdot 10^8 \text{ м/с;}$$

$$e_{\alpha\beta} = 1,6021884 \cdot 10^{-19} \text{ Кл; } h_{\alpha\beta} = 2\pi E_{\alpha\beta} \tau_{\alpha\beta};$$

$$\tau_{\alpha\beta} = 6,0762978 \cdot 10^{-35} \text{ с,}$$

получим

$$\alpha_{\alpha\beta} = \frac{1}{4\pi}. \quad (10)$$

Очевидно, что имеются все основания записать

$$\frac{1}{\alpha_{\alpha\beta}} = 4\pi. \quad (11)$$

Таким образом, величина $\alpha_{\alpha\beta}^{-1}$ выражает собой телесный угол, равный 4π , т.е. барионный квант может быть представлен в виде сферы с положительной кривизной и единичным радиусом $\bar{R}_{\alpha\beta} = 1$.

Подставляя (11) в (2), получим, что для тахионного кванта характерно соотношение

$$\frac{1}{\alpha_T} = \frac{\alpha_{\alpha\beta}}{\alpha} = 10,909998. \quad (12)$$

По аналогии с (11) запишем

$$\frac{1}{\alpha_T} = 4e_T = 10,90998, \quad (13)$$

откуда следует, что безразмерный параметр, характеризующий форму тахионного кванта, равен $e_T = 2,7262$.

Полученное значение e_T лишь на 0,3% отличается от величины $e = 2,7182$, являющегося характерным признаком псевдосферы, т.е. геометрической фигуры с отрицательной кривизной при $\bar{R}_T = 1$.

Таким образом, постоянная тонкой структуры α выражает собой связь форм барионного и тахионного квантов би-вещества через безразмерные геометрические константы π и e .

С учетом этих обстоятельств постоянную тонкой структуры применительно к би-веществу можно записать в следующем виде

$$\alpha = \frac{1}{4\pi 4e}, \quad (14)$$

т.е. через фундаментальные геометрические константы π и e (рис. 2).

С точки зрения физической сущности [10] число π отображает сферическую симметрию пространства $\bar{R}_{\alpha\beta}$ и изотропность его свойств, т.е. их одинаковость по любому направлению, а с изотропностью пространства связан закон сохранения вращательного момента.

По абсолютной величине параметр e полностью соответствует основанию функции комплексного переменного, которое отражает [10] два основных закона сохранения: энергии – через однородность времени и импульса – через однородность пространства.

Таким образом, в выражении (14) отражаются все фундаментальные свойства пространства и времени – их однородность и изотропность, а тем самым три закона сохранения, что открывает возможность оценить свойства квантов, образующих би-вещество, с помощью безразмерных констант π и e .

Нетрудно заметить, что на рис. 2 представлена схема объединения образующих его квантов в геометрической форме.

Выводы

Предложены основы оценки свойств и параметров би-вещества с использованием геометрических форм его квантов с помощью впервые полученного соотношения

$$\frac{1}{\alpha} = 4\pi 4e = 137,0360,$$

где α – постоянная тонкой структуры;

4π – параметр формы барионного кванта в би-веществе;

$4e$ – параметр формы тахионного кванта в би-веществе.

Такое толкование постоянной тонкой структуры выявило весьма важные обстоятельства: форме барионного кванта присуща геометрическая форма с положительной кривизной в виде сферы (4π), а форме тахионного кванта в би-веществе соответствует псевдосфера ($4e$) с отрицательной кривизной.

Отмечено, что с точки зрения физической сущности параметр барионного кванта 4π отображает сферическую симметрию пространства $\bar{R}_6$ и изотропность свойств барионного кванта, с которой связан закон сохранения вращательного момента.

Параметр же $4e$ отображает два других закона сохранения – энергии через однородность времени и импульса через однородность пространства.

Такой подход позволил впервые представить схему формирования параметров би-вещества в безразмерной и размерной формах и подтвердить численные значения масс, радиусов и времени взаимодействия квантов би-вещества.

Литература

1. Марков В.А. О природе материи. – М.: Наука, 1979. – 216 с.
2. Головнев А. Конечная Вселенная. – К., 2003. – 348 с.
3. Ксанфомалити Л. Темная вселенная // Наука и жизнь. – 2005. – № 5. – С. 58-68.
4. Толмачев Н.Г. Би-вещество. Формирование энергетических моделей измерения физических параметров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.khal.edu/download/bi-substance.zip>.
5. Толмачев Н.Г. Метод оценки параметров физического вакуума с помощью энергетических моделей измерения // Вісті Академії інженерних наук України. – К.: АІН України, 2007. – № 3 (33). – С. 232-237.
6. Фейнман Р. Характер физических законов. – М.: Наука, 1988. – 134 с.
7. Veblen O. The Foundations of Differential Geometry. – England, 1932. – 442 с.
8. Спиридонов О.П. Фундаментальные физические постоянные. – М.: Высш. шк., 1991. – 236 с.
9. Толмачев Н.Г. Определение параметров фотона и магнитного монополя в их электромагнитном взаимодействии // Вісті Академії інженерних наук України. – К.: АІН України, 2008 – № 2 (37). – С. 163-169.
10. Горобец Б. Мировые константы π и e в основных законах физики // Наука и жизнь. – 2004. – № 2. – С. 66-72.

Поступила в редакцию 10.04.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Рябков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского „ХАИ”, Харьков.

УДК 620.174.22 : 620.22-419

Л.В. СМОВЗЮК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛАСТИН СТУПЕНЧАТО-ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ

Выполнена экспериментальная проверка аналитического метода расчета напряженно-деформированного состояния пластины ступенчато-переменной толщины, изготовленной из композиционного материала. Для исследования деформированного состояния образцов использован метод голографической интерферометрии двойной экспозиции. Физико-механические характеристики испытываемых образцов, используемые в аналитическом расчете, были определены в соответствии со стандартами ASTM. Результаты, полученные методом голографической интерферометрии, демонстрируют хорошую сходимость с аналитическим решением.

напряженно-деформированное состояние, оптические методы, голографическая интерферометрия, пластина, композиционный материал.

Введение

Широкое использование композиционных материалов в авиационных конструкциях является причиной разработки новых теоретических методик расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) и оценки несущей способности сложных и ответственных элементов летательных аппаратов.

Необходимым условием внедрения таких решений является проверка достоверности получаемых результатов. К сожалению, большое количество современных авторов ограничивается сравнением с литературными данными, полученными ранее теоретическими путем, либо результатами моделирования методом конечного элемента, который не всегда адекватно описывает реальную конструкцию, вследствие высокой чувствительности к выбору конечного элемента, граничных условий и т.д. Такая проверка является достаточной лишь для конструкций, находящихся в условиях простого напряженного состояния. Для остальных случаев лучшей проверкой остается проведение экспериментальных исследований.

В работе [1] предложен аналитический метод расчета НДС пластин ступенчато-переменной толщины, который может быть применен для решения

целого ряда перспективных прикладных задач, например, исследования конструкций, локально ослабленных вырезом или усиленных накладным элементом произвольной жесткости. Такие широкие возможности ставят целью данной работы экспериментальную проверку результатов, полученных в соответствии с предлагаемым методом.

1. Выбор экспериментального метода

В настоящее время существует большое количество экспериментальных методов анализа деформированного состояния, возникающего в конструкциях под действием внешних нагрузок [2, 3]. Основанные на различных принципах и явлениях, все они направлены на измерение деформаций или перемещений в исследуемых элементах.

Среди экспериментальных способов измерения деформаций широкое распространение имеет метод тензометрии. Однако область его применения ограничивается зонами конструкции с регулярным НДС, так как тензодатчик измеряет среднее значение деформации в пределах базы. В данном случае, вследствие неоднородности поля деформаций, вызванной ступенчатым изменением толщины, применение метода тензометрии является малоэффективным.

Оптические методы (метод муаровых полос, поляризационно-оптические и интерференционные методы) позволяют получить непрерывное поле перемещений по всей поверхности исследуемой конструкции, для предложенной задачи является оптимальным, поскольку не только обеспечивает наглядность результатов, но и представляет их в виде, наиболее удобном для сравнения с аналитическим решением. Использование различных оптических методов при исследовании конструкций из композиционных материалов подробно рассмотрено в работе [4].

Преимуществами голографической интерферометрии, выбранной для проведения исследований, перед другими оптическими методами является возможность проведения исследований на реальной конструкции независимо от материала, из которого она изготовлена, и отсутствие необходимости специальной подготовки поверхности.

В процессе исследования был применен метод голографической интерферометрии двойной экспозиции с регистрацией голограмм во встречных лучах.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

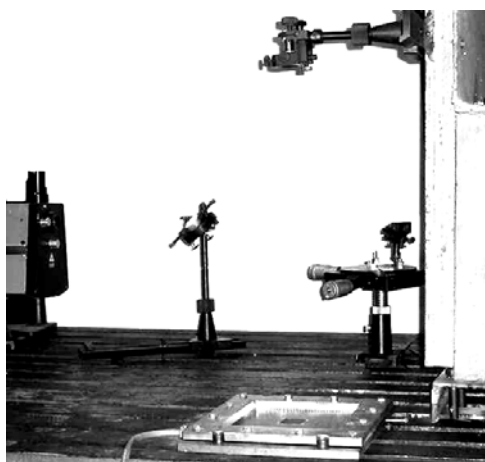


Рис. 1. Экспериментальная установка

2. Определение упругих характеристик используемых материалов

Исследования были проведены на образцах, изготовленных на основе стеклоткани AeroGlass-163 и

эпоксидного связующего горячего отверждения “Эпикур”. Для определения упругих характеристик используемого стеклопластика в соответствии со стандартами Американского общества по испытанию материалов (ASTM) D3039 и D3518, регламентирующими методы определения модулей упругости и сдвига, а также коэффициента Пуассона армированных композиционных материалов, было изготовлено и испытано три партии образцов с углами укладки армирующего материала $[0^\circ]$, $[90^\circ]$ и $[\pm 45^\circ]$.

В результате статистической обработки полученных экспериментальных данных определены среднее значение, стандартное отклонение и коэффициент вариации для каждой определяемой величины, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Упругие свойства стеклопластика

ФМХ	$\bar{x}$	S_x	$V_x, \%$
E_1 , ГПа	18,117	0,227	1,25
E_2 , ГПа	18,096	0,405	2,24
μ_{12}	0,129	0,0042	3,26
μ_{21}	0,132	0,0036	2,73
G_{12} , ГПа	9,39	0,806	8,58

Для выборок, определяющих значение модулей упругости и коэффициентов Пуассона, были выполнены проверки нормальности распределения экспериментальных данных по критерию Пирсона и равенства генеральных дисперсий для выборок ($E_1 - E_2$) и ($\mu_{12} - \mu_{21}$). Положительный результат этих вычислений дал возможность применить двойной t -критерий Стьюдента для проверки гипотезы о совпадении средних значений указанных выше совокупностей. В обоих случаях проверяемая гипотеза оказалась верной, что позволило, объединив соответствующие выборки, получить уточненное значение упругих характеристик, приведенное в табл. 2.

Доверительный интервал в табл. 2 был рассчитан с учетом статистического коэффициента Стьюдента, применяемого для оценки малых выборок, для заданной вероятности $P=95\%$.

Таблица 2

Упругие свойства, используемые при расчете

ФМХ	$\bar{\chi}$	S_x	$V_x, \%$	Интервал
$E_1 = E_2$, ГПа	18,11	0,302	1,67	$18,11 \pm 0,20$
$\mu_{12} = \mu_{21}$	0,13	0,004	3,07	$0,13 \pm 0,003$
G_{12} , ГПа	9,39	0,806	8,58	$9,39 \pm 1,0$

3. Исследование деформированного состояния образцов

Теоретическое решение, предложенное в работе [1], получено в линейной постановке теории упругости, следовательно, перемещения испытываемых образцов также не должны выходить за рамки линейной зоны деформирования, допускающей, согласно литературным источникам [5], прогибы от

1/5 до 1 толщины пластины. Такое неоднозначное определение стало причиной экспериментального определения области линейности деформаций.

Для этого на бездефектной пластине были проведены исследования, заключающиеся в следующем:

1. К исследуемой пластине прикладывалось начальное давление p_0 , приводящее к возникновению начального прогиба w_0 , равного $0,5 \cdot \delta$, δ и $1,5 \cdot \delta$ соответственно.

2. Перемещение w_z , фиксируемое на голограмме, является результатом приложения давления Δp , равного во всех трех экспериментах.

Интерферограммы, демонстрирующие полученные нормальные перемещения, представлены на рис. 2.

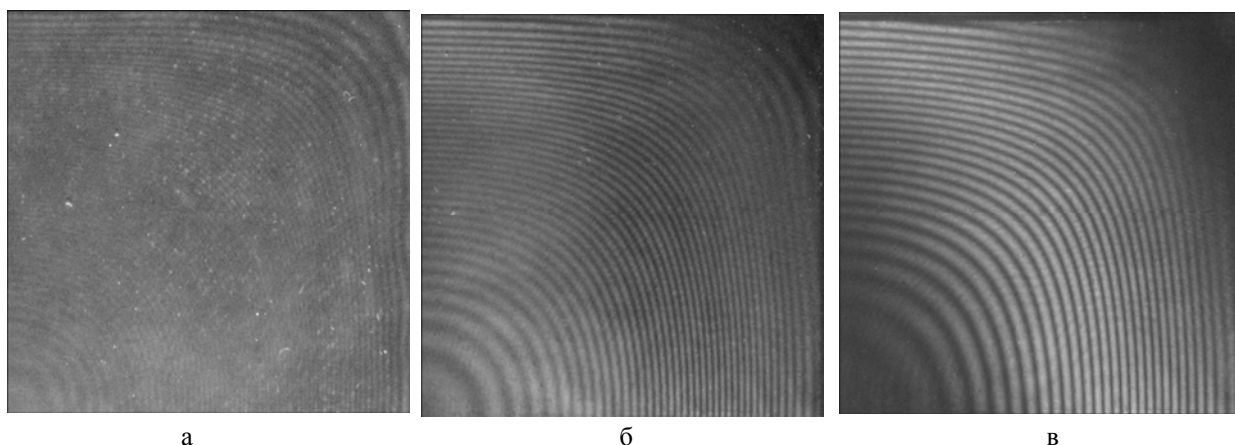


Рис. 2. Голографические интерферограммы целой пластины при постоянном давлении Δp , в зависимости от начального прогиба w_0 : а – начальный прогиб – $0,5 \cdot \delta$; б – начальный прогиб – δ ; в – начальный прогиб – $1,5 \cdot \delta$

Графики нормальных перемещений по центральному сечению пластины, полученные во всех трех экспериментах, а также ожидаемое теоретическое распределение (пунктирная линия), представлены на рис. 3.

Наиболее близким к теоретическому значению оказалось перемещение, полученное при начальном прогибе равном половине толщины пластины (погрешность составляет 2,4%). В соответствии с полученными результатами все дальнейшие исследования были выполнены при начальном прогибе пластины равном половине ее толщины.

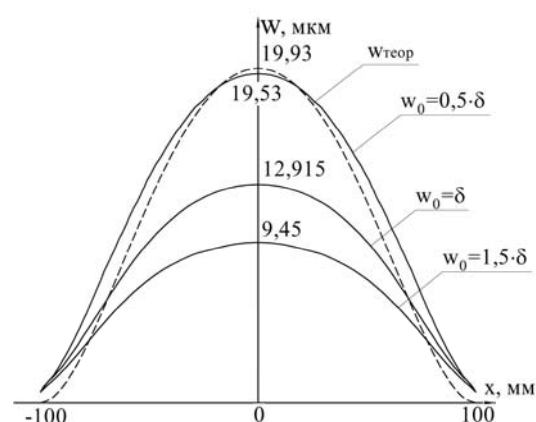


Рис. 3. Корреляция аналитического решения в линейной постановке и экспериментальных значений в зависимости от начального прогиба w_0

Сравнение теоретических результатов, полученных согласно методике [1], со значениями, полученными экспериментальным методом, выполнено для 3 типов образцов, жестко закрепленных по контуру во вспомогательной оснастке и нагруженных равномерно распределенным давлением Δp :

1. бездефектного ($\delta = 1,85$ мм);
2. образца с вырезом, расположенным в центре пластины ($\delta = 1,773$ мм);
3. образца с вырезом, смещенным относительно центра пластины ($\delta = 1,84$ мм).

Для каждого типа образцов были получены голографические интерферограммы и построены графики нормальных перемещений по центральному сечению пластины, представленные на рис. 4 – 6.

Представленные на рис. 4-6 результаты получены для образцов, отличающихся по толщине. Для удобства их сравнения, значения теоретических и экспериментальных прогибов для каждой из пластин были приведены к одному значению толщины $\delta = 1,85$ мм. Результаты представлены в виде графиков на рис. 7 и сведены в табл. 3.

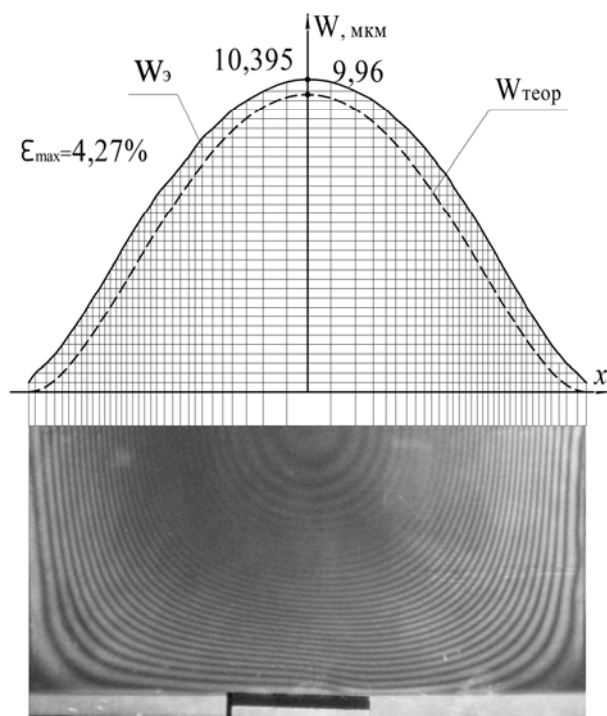


Рис. 4. Прогиб целой пластины под действием давления Δp

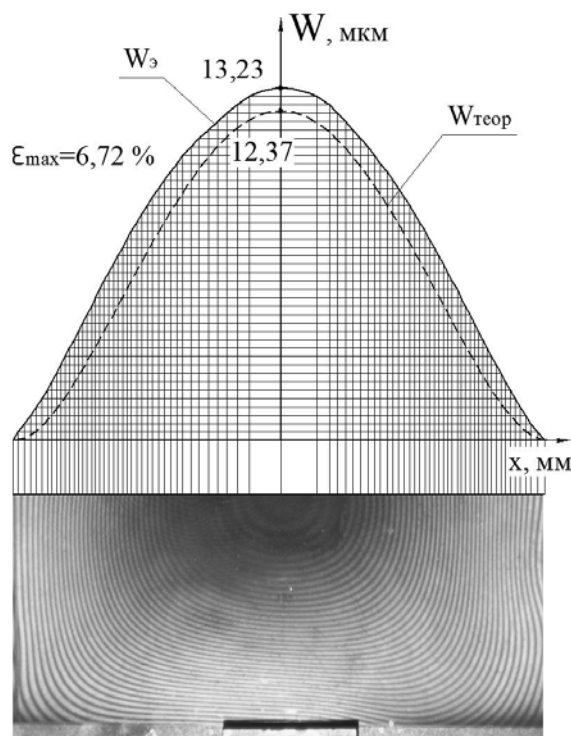


Рис. 5. Прогиб пластины с вырезом по центру под действием давления Δp

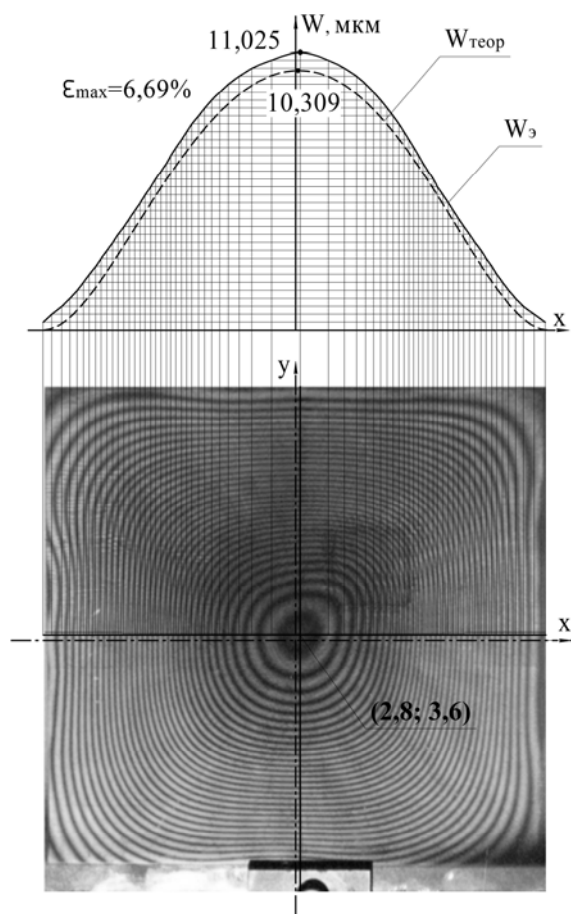


Рис. 6. Прогиб пластины с вырезом, смещенным относительно центра под действием давления Δp

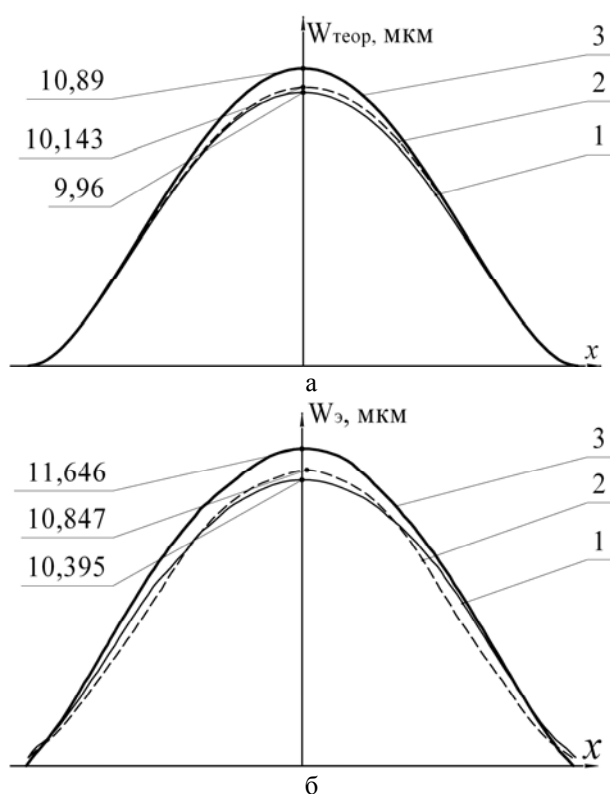


Рис. 7. Сравнение теоретически (а) и экспериментально (б) полученных результатов прогиба в пластинах с дефектами (1 – целый образец, 2 – вырез смещен, 3 – вырез в центре)

Таблица 3
Сравнение результатов

Тип образца	$W_{теор},$ мкм	$W_{э},$ мкм	$\varepsilon,$ %	$\Delta W_{теор},$ %	$\Delta W_{э},$ %
Целый	9,96	10,395	4,27	—	—
Вырез в центре	10,89	11,646	6,71	9,33	12,03
Вырез смещен	10,143	10,847	6,84	1,84	4,35

Выводы

Выбранный для исследования экспериментальный метод позволяет получить результаты в виде непрерывного поля перемещений, что дает возможность глубже понять поведение конструкции в зоне нерегулярности структуры.

Оценивая результаты выполненной работы, можно сделать следующие выводы:

- полученные экспериментально поля перемещений качественно соответствуют прогнозируемым теоретическим результатам;
- максимальная погрешность численных значений не превышает 7%, демонстрируя хорошую сходимость результатов.

Все это позволяет утверждать, что предложенная в работе [1] методика расчета напряженно-деформированного состояния пластин ступенчато-переменной толщины может успешно применяться для решения прикладных задач.

Литература

1. Шашкова Л.В., Шевцова М.А. Определение напряженно-деформированного состояния анизотропной пластины переменной толщины // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 5. – С. 21-29.
2. Кобаяси А.. Экспериментальная механика: В 2 т. – М.: Мир, 1990. – 419 с.
3. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: Справ. пособие / Под ред. Б.С. Касаткина. – К.: Наук. думка, 1981. – 314 с.
4. Benton Heslehurst R. Optical NDI methods for composite structures // SAMPE Journal. – 2007. – Vol. 43, № 5. – P. 7-14.
5. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. – 419 с.

Поступила в редакцию 15.03.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

УДК 629.735

Ю.А. ВОРОБЬЕВ, А.И. НИКОЛЕНКО, А.Ю. ВОРОБЬЕВ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СВЕРЛЕНИЮ СМЕШАННЫХ ПАКЕТОВ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

Приведен аналитический обзор экспериментальных исследований по сверлению пакетов «углепластик/титановый сплав» (КМУ/Ti) с использованием инструмента стандартной геометрии из различных режущих материалов. Использовались следующие материалы сверл: быстрорежущая сталь (HSS), быстрорежущий кобальт (HSS-Co) и карбид (твердосплавный материал). Отмечено, что на границе раздела КМУ/Ti высокие температуры вызывают повреждение композита в области отверстия. Различные механические и тепловые свойства материалов пакета влияют на стойкость инструмента и качество отверстий, независимо от материала режущего инструмента. Меньшая стойкость инструмента характерна для высоких шпиндельных скоростей и малых подач. Отмечено, что карбидные сверла имеют более высокую стойкость, минимальные поверхностные повреждения и вызывают меньшие повреждения пакета вследствие высоких температур.

углепластик, сверление, износ инструмента, повреждение от высокой температуры, шероховатость, заусенцы

Введение

К началу второго тысячелетия применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) и металлических слоистых композиционных материалов (МКМ) в различных отраслях промышленности достигло значительных масштабов. Часто композиты используются в соединении с другими материалами для формирования гибридной структуры, характеризующейся по сравнению с металлом повышенной прочностью при минимальном весе.

В аэрокосмической отрасли давно наметились тенденции к увеличению объема использования композитов и титановых сплавов ввиду их высоких механических характеристик, которые могут быть гарантированы при высоких нагрузках, имеющих место при эксплуатации военных и гражданских самолетов. В настоящее время соединение болтами и клепка остаются основными методами для сборки композитных обшивок с металлическим или композитным каркасом. При этом очень важным фактором, влияющим на ресурс соединения, является качество выполнения отверстий под крепежные элементы [1]. Чтобы минимизировать погрешности

установки, композитные панели и элементы каркаса, как правило, сверлят совместно в пакете [2]. Однако, сверление смешанных пакетов, например, КМУ/Ti – сложная задача для инженеров-технологов ввиду различных требований к качеству и режимам механической обработки для каждого из материалов. Поэтому специалистами интенсивно проводятся исследования процессов механической обработки, как композитов в отдельности, так и в соединении с металлами [1 – 6]. Касательно сверления деталей из титановых сплавов, исследовались силовая модель, износ инструмента и явление повышения температуры при сверлении [3 – 6]. При сверлении композитов большинство экспериментов были направлены на исследование влияния механики процесса на качество отверстий, и, прежде всего, расслаивание композита [1]. Из анализа последних публикаций и результатов обширных экспериментов следует, что при сверлении углепластиков требуется низкая скорость подачи и высокая скорость вращения шпинделя [4 – 8]. Напротив, для титановых сплавов требуется высокая скорость подачи и низкая скорость вращения шпинделя [9]. В статье пред-

ставлен анализ проблемы механического сверления смешанных пакетов КМУ/Ti, описаны получаемые параметры качества отверстия (чистота поверхности и повреждения).

1. Экспериментальная часть

В экспериментах использовался ПКМ висмаиленид графита, разработанный компанией Boeing, состоящий из волокон графита IM-6 и терморезистивной матрицы 3501-6 с ориентацией слоев

[45/90/-45/0/45/0/-45/90/-45/0/45/90/-45/90/90]_s.

Толщина КМУ составляла 7,62 мм (толщина монослоя 0,2 мм), листов сплава Ti₆Al₄V – 3,1 мм [11].

Базируясь на результатах поисковых экспериментов, сверление пакета КМУ/Ti осуществляли со стороны углепластика. Такое направление сверления приводит к наименьшему расслаиванию на выходе сверла из КМУ. Эксперименты по сверлению выполнялись на модифицированном вертикально-фрезерном станке с ЧПУ и редуктором с применением СОЖ. Двигатель станка обеспечивал пять значений скорости вращения шпинделя – 325, 660, 1115, 1750 и 2750 об/мин. Были использованы три типа материалов для рабочей части сверл: быстрорежущая сталь (HSS), быстрорежущий кобальт (HSS-Co) и карбид (твердосплавный материал). Выбранные типы сверл и материалы их рабочей части охватывают весь диапазон уровней используемой

геометрии и твердости.

Эксперименты были направлены на исследование влияния режущих материалов, параметров технологического процесса (подачи и скорости вращения шпинделя) на износ инструмента и качество отверстий. Износ инструмента измерялся на передней и задней поверхности сверла с помощью оптического микроскопа. Качество отверстия в Ti-сплаве и КМУ оценивалось по критериям целостности материала, шероховатости и заусенцев. Для определения качества просверленного отверстия использовались методы микроскопии: сканирующий электронный микроскоп использовался для исследования отдельных фрагментов поверхности отверстия, а также для изучения развития дефектов в каждом из слоев.

2. Анализ полученных результатов

На рис. 1 показаны образцы КМУ/Ti, просверленные со стороны углепластика с использованием HSS-Co сверла (подача 0,13 мм/об, частота вращения 660 об/мин). Следует обратить внимание, что размеры заусенца увеличиваются с каждым последующим просверленным отверстием. Влияние материала сверла на износ инструмента, повреждение КМУ, размеры заусенцев в Ti и шероховатость поверхности отверстия будут проанализированы далее.

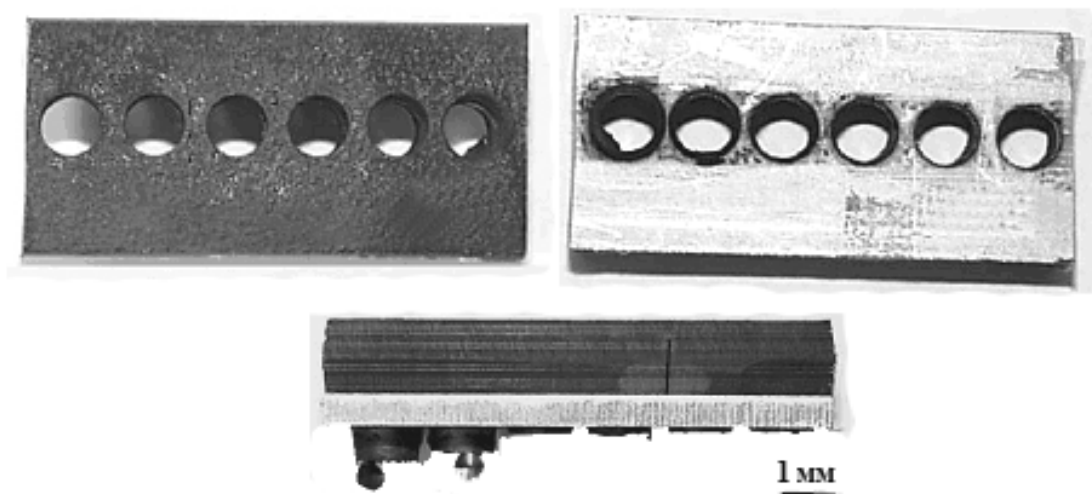


Рис. 1. Виды сверлу, снизу и сбоку на пакет КМУ/Ti

2.1. Изготовление отверстия и износ инструмента. На рис. 2 показаны микрофотографии, изображающие износ сверл. У HSS сверл (рис. 2, б) наблюдался наибольший износ после наименьшего количества просверленных отверстий. У HSS-Co и HSS сверл (соответственно рис. 2, в и б) наблюдался боковой и канавочный износ.

Незначительный боковой износ начинал формироваться на карбидном сверле (рис. 2, а). Для всех сверл наименьший износ наблюдался в угле при вершине. Также был обнаружен чрезвычайно сильный износ инструмента на винтовых режущих кромках HSS и HSS-Co сверл.

При использовании HSS и HSS-Co сверл оказа-

лись поврежденными большинство отверстий в отличие от сверления карбидными сверлами. Стойкость инструмента определялась с помощью системы ЧПУ (при достижении максимальной осевой силы ~3700 Н сверло считалось изношенным) или визуально, замечая износ лезвия и дым. Для HSS и HSS-Co сверл комбинация малой скорости и малой подачи вредна для ресурса инструмента из-за длительного времени его вхождения в пакет. Результатом этого является существенное увеличение температуры инструмента. Рост шпиндельной скорости увеличивал генерирование тепла из-за трения в режущей зоне, уменьшая при этом стойкость инструмента.

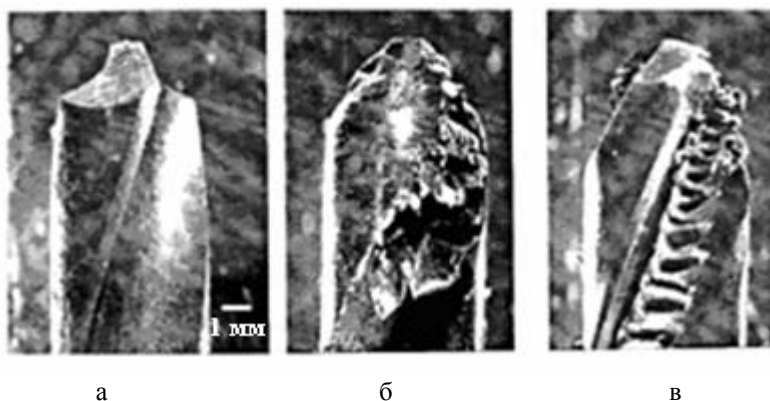


Рис. 2. Микрофотографии износа а – карбидного, б – HSS и в – HSS-Co сверл после 10, 1 и 1 отверстий соответственно, при подаче 0,08 мм/об и скорости 1750 об/мин

Титановые сплавы нагреваются во время сверления с высокой скоростью, не рассеивая при этом тепло столь же быстро из-за низкой теплопроводности. Выделение тепла было основным фактором снижения качества отверстия при сверлении пакета КМУ/Ti, так как высокая температура в области сверления отрицательно сказывается на ресурсе инструмента и способствует ускоренному разрушению матрицы композита. Как результат – получено меньше отверстий для HSS-Co и HSS сверл, когда использовались высокие шпиндельные скорости и медленная подача. Износ инструмента начинается по внешним краям лезвий, т. к. скорость резания на периферии сверла является максимальной. Это приводит к более интенсивному трению между ин-

струментом и материалом, усиленное выделение тепла, которое в свою очередь ведет к увеличению износа инструмента.

В отличие от HSS и HSS-Co сверл, карбидные сверла не приходят в негодность даже после того, как ими было выполнено более 30 отверстий. У карбидных сверл наблюдался наименьший износ, т. к. карбид имеет большую стойкость в горячем состоянии. Сверла быстро изнашиваются при подаче свыше 0,2 мм/об и скорости вращения шпинделя свыше 1750 об/мин. Боковой износ карбидного сверла увеличивается с увеличением подачи и шпиндельной скорости. Осевая сила, испытываемая карбидным сверлом, растет незначительно с увеличением количества отверстий, в отличие от HSS и

HSS-Co сверл. Следовательно, высокие скорости и высокая подача существенно не влияют на ресурс карбидных сверл, так как выделение тепла – не глав-

ный фактор, влияющий на их износ. На рис. 3 показан износ инструмента по времени для различных сверл.

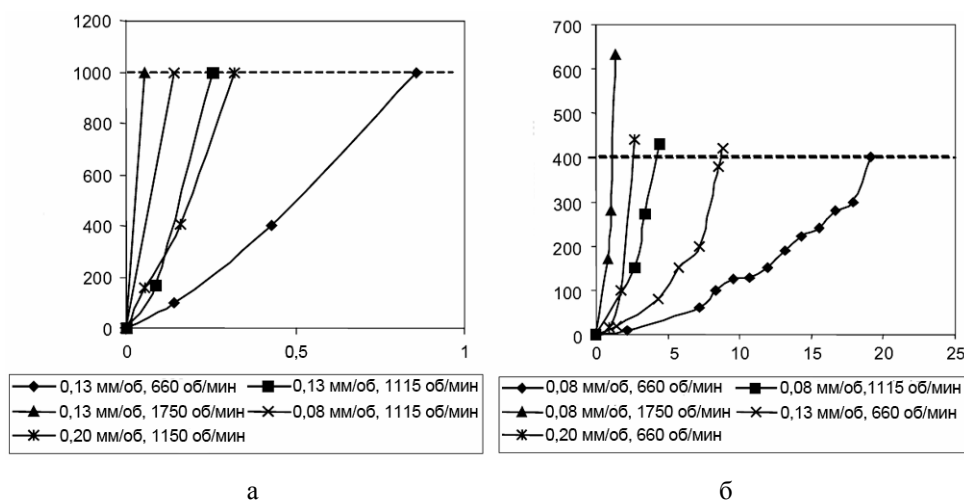


Рис. 3. Износ инструмента по времени: а – для HSS-Co сверл; б – для карбидных сверл

2.2. Повреждения в пакете. Применение HSS и HSS-Co сверл приводит к повреждению пакета: отслаиванию волокон на границе раздела КМУ/Ti и заусенцам на выходе из Ti.

Наблюдались два типа повреждения на выходе из композитной детали (рис. 4). Первый – кольцо обесцвечивания, расположенное вокруг отверстия. Второй – кольцо повреждения, которое вызвано как высокой температурой в зоне отверстия, так и повреждениями от металлической стружки. Зона обесцвечивания образовывалась за счет нагрева в процессе сверления, однако, нарушения целостности волокон и композита при этом не наблюдалось. Максимальное повреждение композита замечено при использовании HSS и HSS-Co сверл, минимальное – для карбидных сверл (по крайней мере, для выполненного количества отверстий). В процессе сверления сформировались кольцевые повреждения, расположенные в выходном слое композита на границе раздела КМУ и Ti (рис. 4). Диаметры кольца обесцвечивания и кольца повреждения увеличивались с увеличением числа просверленных отверстий. Наиболее интенсивное увеличение размеров колец характерно для HSS и HSS-Co сверл. На рис. 4, б показано разрушение композита в резуль-

тате перегрева матрицы. Рис. 4, в показывает расслаивание композита на границе контакта с Ti, вызванное высокой температурой и металлической стружкой. Минимальные повреждения наблюдались при использовании карбидных сверл, так как карбид имел более высокую стойкость в горячем состоянии по сравнению с HSS и HSS-Co сверлами, в результате чего, лезвия оставались более острыми, более эффективно резали материал и выделялось меньше тепла. В случае HSS-Co сверл диаметр повреждения увеличивается при меньших подачах и скорости менее чем 400 об/мин, в связи с тем, что при более низкой подаче увеличивается время вхождения инструмента в образец. Диаметр повреждения увеличивается для HSS-Co и HSS сверл также с увеличением скорости вращения шпинделя. Повреждения карбидными сверлами были незначительными, поэтому они не замерялись. Образование заусенцев на выходе из Ti пластины зависит от шпиндельной скорости и подачи (рис. 5). При постоянной скорости высота заусенца уменьшается с увеличением подачи. При постоянной подаче высота заусенца увеличивается при росте шпиндельной скорости. Высота заусенца увеличивается с увеличением количества просверленных отверстий. Например, вы-

сота заусенца первого просверленного HSS сверлом отверстия при подаче 0,2 мм/об и скорости 660 об/мин была 0,9 мм; на 12-м отверстии она увеличилась до 2,84 мм. Увеличение высоты заусенца с каждым последующим выполненным отверстием характерно для всех типов сверл. При этом карбидные сверла вызывают минимальную высоту заусенца. Однако, когда карбидные сверла были проверены

при постоянной скорости, входной заусенец увеличивался с увеличением подачи и увеличением количества просверленных отверстий. Высота заусенца на выходе оставалась постоянной на всех выполненных отверстиях. Это объясняется высокой осевой силой при высокой подаче. Боковой износ инструментов из карбида также увеличивается с увеличением подачи.

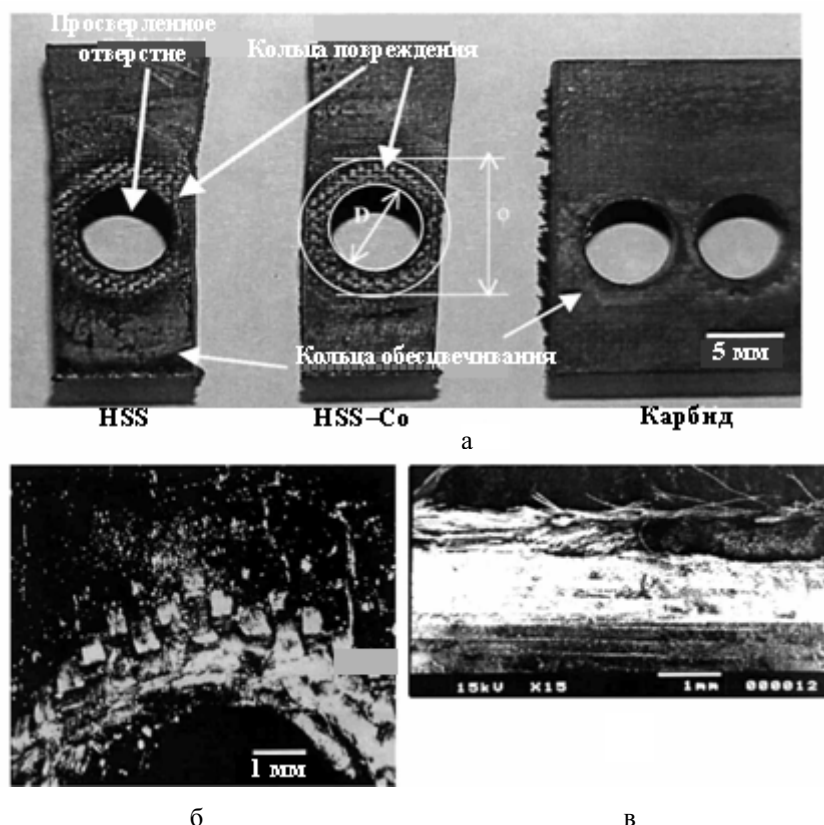


Рис. 4. Повреждения в пакете: а – на границе раздела КМУ/Ti при подаче 0,08 мм/об и скорости 1750 об/мин; б – вид сверху на поврежденную область КМУ, произведенной HSS-Co сверлом при подаче 0,08 мм/об, скорости 2720 об/мин (под микроскопом); в – вид снизу под сканирующим электронным микроскопом

Образование заусенца объясняется несколькими факторами: предельной осевой силой, существенным тепловыделением, вызванным сверлением с высокой скоростью; значительным временем контакта инструмента с пакетом; медленной подачей. При той же самой осевой силе меньшая подача способствует образованию более высокого заусенца. Также высота заусенца пропорциональна осевой силе при постоянной подаче. Когда сверло приближается к выходу из материала, в Ti пластине было

выявлено большое количество тепла в зоне резания. При проходе сверла через нижнюю поверхность Ti, последний тонкий слой сплава не становится прорезанным должным образом, так как лезвия сверла уже изношены. Нижний слой же Ti пластины становится весьма горячим, его пластичность увеличивается, позволяя материалу легче течь. Когда изношенное сверло выходит из Ti пластины, режущая кромка подталкивает Ti наружу, создавая заусенец по периметру отверстия.

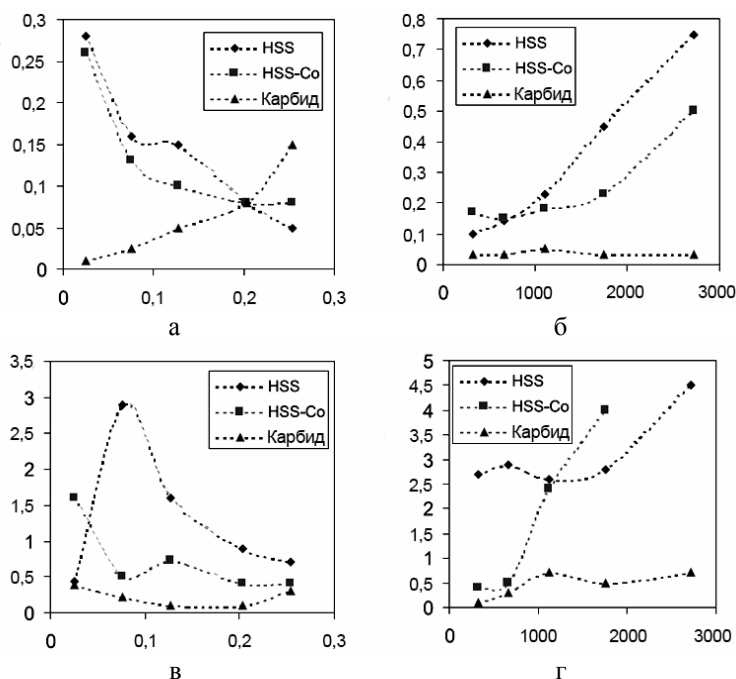


Рис. 5. Входная/выходная высота заусенца в первом отверстии Тi сплава при различных подаче и скорости:
а – постоянная скорость (660 об/мин); б – постоянная подача (0,08 мм/об);
в – постоянная скорость (660 об/мин); г – постоянная подача (0,08 мм/об)

У HSS и HSS-Co сверл наблюдается быстрый износ инструмента и наибольшие заусенцы. Для карбидных сверл наблюдается наименьший износ и наименьшие заусенцы.

2.3. Качество поверхности. Чистота поверхности в пакете КМУ/Ti зависит от шпиндельной скорости и подачи. Поверхность отверстия в пластине из Ti сплава была более гладкой по сравнению с поверхностью в композите. Установлен факт, что использование HSS и HSS-Co сверл при малых подачах приводит к более высоким значениям Ra в Ti сплаве, в то время как для карбидных сверл этого не наблюдается. Этому существует одно объяснение – при низкой подаче температура HSS и HSS-Co сверл повышается несущественно, однако при проходе через КМУ происходит сильный износ инструмента. В свою очередь изношенное сверло в Ti пластине с его высокой температурой делает шероховатость поверхности отверстия более высокой. При слишком высокой подаче увеличивается шероховатость отверстия в композите, т. к. сверло имеет тенденцию тянуть волокна вместо того, чтобы их резать (происходит разрыв волокон). При высоких шпиндель-

ных скоростях от высоких температур (приблизительно 270°C) в зоне резания происходит разрушение матрицы. Вначале разрыхляется граничный слой «матрица-волокно», что заканчивается серьезным повреждением композита. Также имеет место расплавление, которое приводит к уменьшению шероховатости. Однако, если волокна вытянуты из матрицы, то это вызывает повреждения, увеличивая тем самым шероховатость.

Заключение

Экспериментальное изучение сверления отверстий в пакетах КМУ/Ti проводилось с использованием сверл, изготовленных из различных материалов, параметры технологического процесса также варьировались. Самая существенная проблема, которая возникла при сверлении образцов – низкая теплопроводность Ti сплава, вызывающая усиленное выделение тепла в зоне сверления и увеличение температуры инструмента. Высокая температура приводит к увеличению диаметра зоны повреждения на границе пластин и ускоренному износу инструмента. Это, в свою очередь, вызывает увеличение

силы резания, высоты заусенцев, а высокая температура – расслаивание композита и увеличение шероховатости. В случае HSS и HSS-Co сверл максимальная температура зарегистрирована при высоких шпиндельных скоростях и низкой подаче.

Таким образом, увеличение скорости вращения шпинделя ведет к увеличению износа инструмента, увеличению заусенцев на входе и выходе из Ti пластины, увеличению диаметра зоны повреждений и уменьшению числа отверстий, просверленных одним сверлом. Увеличение подачи приводит к увеличению осевого давления на сверло и крутящего момента для обоих материалов, уменьшению заусенцев на входе и выходе, уменьшению зоны повреждения композита и шероховатости в Ti, увеличению шероховатости в КМУ и увеличению числа просверленных отверстий. Осовое усилие и подача скажутся на величине зоны повреждения и высоте выходного заусенца.

Из трех проверенных материалов для сверл, карбидные сверла имеют самую высокую стойкость, обеспечивают минимальные значения усилия резания, наименьшие заусенцы, зоны повреждения и максимальное качество отверстия.

При сверлении HSS и HSS-Co сверлами:

– увеличение подачи приводит к увеличению осевой силы и крутящего момента для КМУ/Ti пакета, к уменьшению входных и выходных заусенцев, увеличению шероховатости в обоих материалах и увеличению количества просверленных отверстий, образующееся при сверлении тепло вызывает повреждение в композите;

– увеличение скорости шпинделя приводит к увеличению износа инструмента, увеличению входных и выходных заусенцев, зоны повреждения композита и уменьшению количества просверленных отверстий.

Рекомендуется для сверления пакетов КМУ/Ti использовать карбидные сверла при частоте вращения 660 об/мин и подаче 0,08 мм/об.

Литература

1. Abrate S. Machining of composite materials in composites engineering handbook. – New York: Marcel Dekker, 1999. – P. 777-810.
2. Hung N.P., Loh N.L., Venkatesh V.C. Machining of metal matrix composites in machining of ceramics and composites. – New York: Marcel Dekker, 1999. – P. 295-356.
3. Galloway D.F. Some experiments on the influence of various factors on drill performance // Trans ASME. – 1997. – Vol. 79. – P. 191-231.
4. Agapiou J.S., Stephenson D.A. Analytical and experimental studies of drill temperature // Trans ASME. – 1994. – Vol. 116. – P. 54-60.
5. Ho-Cheng H., Dhran C.K. Delamination during drilling in composite laminates // Trans ASME. – 1990. – Vol. 112. – P. 236-239.
6. Jain S, Yang D.C.H. Effects of feed rate and chisel edge on delamination in composites drilling // Trans ASME. – 1993. – Vol. 115. – P. 398-405.
7. Ramulu M, Young P, Kao H. Drilling of graphite/bismaleimide composite material // J Mater Eng Performance. – 1999. – Vol. 8. – P. 330-338.
8. Colligan K, Ramulu M. Experimental investigation of pitting of hole surfaces when drilling graphite/epoxy materials // ASME Bound Volume. – 1992; MD-Vol. 35. – P. 11-25.
9. Colligan K. New tool drills both titanium and carbon composites // Machinist. – 1994. – Vol. 138 (10). – P. 56-58.
10. Masarweh W.A., Hough Jr. Performance analysis for drilling in thermoplastic composite-aluminum stacks // Compos Mater Technol. – 1992. – Vol. 45. – P. 253-259.
11. Ramulu M., Branson T., Kim D. A study on the drilling of composite and titanium stacks // Composites Structures. – 2001. – Vol. 54. – P. 67-77.

Поступила в редакцию 12.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ф.В. Новиков, Харьковский национальный экономический университет, Харьков.

УДК 621.7.044

А.П. МЕЛЬНИЧУК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ:
ОБОСНОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ
В ФОРМУЮЩЕЙ КАМЕРЕ**

Рассмотрены возможные варианты нагружающего импульса давления в формующей камере при гидродинамической штамповке, которые различаются по форме, величине максимального давления и продолжительности. Установлены основные характеристики импульса и определены аппроксимирующие зависимости распределения давления при формообразовании тонкостенных осесимметричных оболочек на различных этапах – оформление основного контура оболочек, оформление элементов взаимной фиксации и компенсаторов, калибровка оболочек. Обоснована допустимость использования функции давления в формующей камере при оформлении основного контура оболочек в виде $p = p(t)$.

гидродинамическая штамповка, импульс давления, тонкостенная осесимметричная оболочка

В работе [1], основываясь на результатах экспериментальных исследований и опыте промышленного использования методов гидродинамической штамповки (ГДШ), была обоснована необходимость разделения процесса ГДШ тонкостенных осесимметричных оболочек (деталей) на три отличительных этапа: оформление основного контура оболочек, оформление элементов взаимной фиксации и компенсаторов, калибровка оболочек (рис. 1).

Для оформления основного контура оболочки необходим “мягкий” нагружающий импульс давления. Этого можно достичь увеличением массы сна-

ряда и снижением его скорости, вследствие чего возрастает длительность нагружения и деформирования заготовки. При этом скорость ее перемещения уменьшается, что приводит к снижению влияния инерционных сил, уменьшается разнотолщинность оболочки, снижается вероятность потери устойчивости. Уменьшается влияние волновых явлений в передающей среде на характер деформирования заготовки, повышается КПД процесса штамповки. Снижается скорость соударения заготовки с поверхностью матрицы, не искажается геометрия оболочки, имеющей малую жесткость. Уменьшается на-

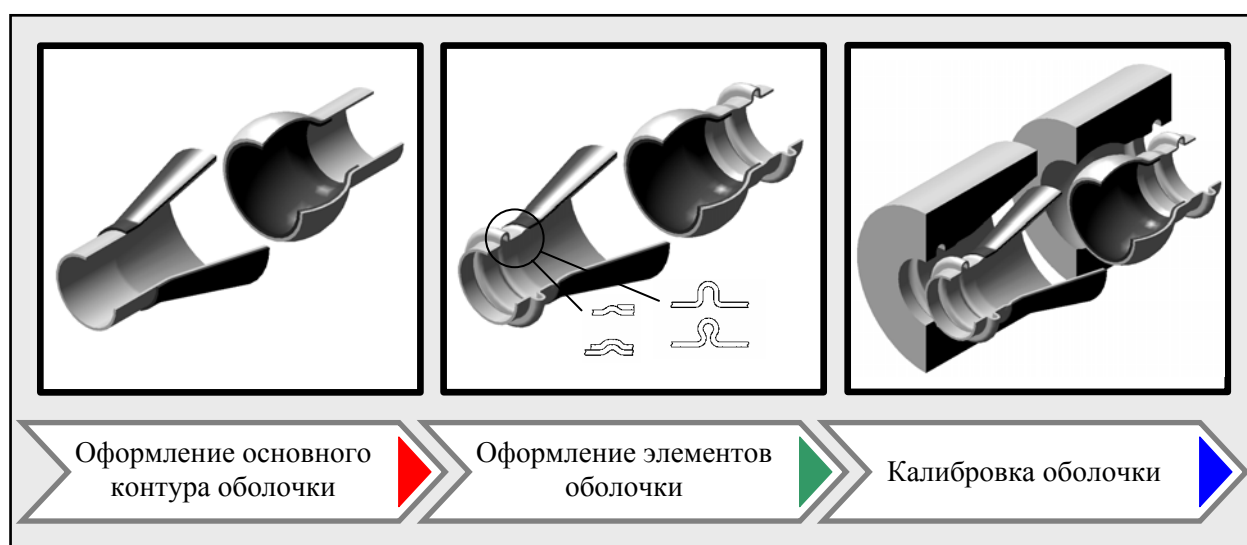


Рис. 1. Этапы формообразования тонкостенных осесимметричных оболочек при ГДШ

грузка на оборудование, повышается стойкость оснастки.

Для реализации процесса формообразования компенсаторов и элементов взаимной фиксации (рифты, пуклевки и т.п.), как элементов оболочки, обладающих большей жесткостью, требуется импульс давления более высокой интенсивности.

Для калибровки, где перемещения оболочки ничтожно малы, необходим жесткий остродинимичный импульс, обеспечивающий калибровочное усилие, что достигается снижением массы снаряда и увеличением его скорости. В этом случае для уменьшения величины пружинения оболочка должна соударяться с поверхностью матрицы с предельной скоростью.

Как показывают результаты экспериментальных исследований и опыт промышленного использования методов гидродинамической штамповки [2, 3], во всех случаях вид функции $p = p(z, t)$ (например, в цилиндрической системе координат) можно разде-

лить (весьма условно) на четыре варианта аппроксимации.

Опыты, проведенные Ю.Г. Мацукиным [2] по растяжке трубчатых заготовок, дают результаты, изображенные на рис. 2, на котором видно, что имеет место выравнивание распределения давления по высоте камеры и поэтому функцию $p = p(z, t)$ допустимо использовать в форме $p = p(t)$.

Функцию $p = p(t)$ при оформлении основного контура оболочки можно представить (рис. 3, а) в виде прямопропорциональной зависимости (до начала падения давления) или в виде синусоидального закона (рис. 3, б):

$$p = p_{\max} \frac{t}{n t_{\max}}; \quad (1)$$

$$p = p_{\max} \cdot \sin \left(\frac{\pi t}{t_{\max}} \right); \quad (2)$$

$$n = \frac{t_p}{t_{\max}}; \quad 0 < n \leq 1, \quad (3)$$

где $p_{\max}$ – максимальное давление;

$t_{\max}$ – продолжительность импульса давления;

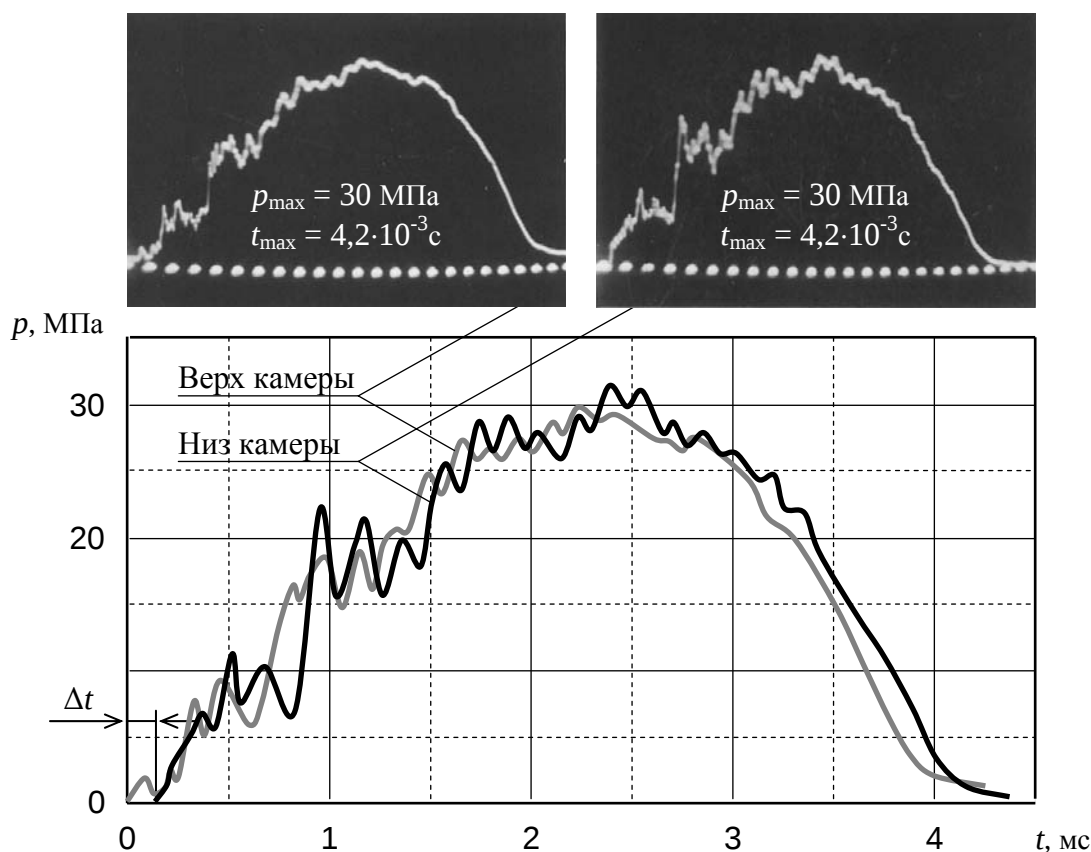


Рис. 2. Импульс давления в формующей камере, реализуемый при оформлении основного контура при ГДШ тонкостенных оболочек: $p_{\max} = 30$ МПа; $t_{\max} = 4,2 \cdot 10^{-3}$ с; $\Delta t = 0,067 \cdot 10^{-3}$ с

p, t – текущие значения давления и времени импульса;

t_p – продолжительность рабочей (реализуемой) области импульса давления;

n – коэффициент, определяющий рабочую об-

ласть импульса.

На рис. 3, а представлен вариант импульса давления жидкости, действующего на заготовку, при котором нагружение неинтенсивное (мягкое), что приближает процесс деформирования к статическому.

Такие режимы нагружения для процессов ГДШ не являются рациональными, поскольку имеют место большие потери энергии через зазоры, теряется сама сущность процесса гидродинамической штамповки – самопроизвольное запирание зазоров в формующей камере. Реализация более жесткого импульса, т.е. менее продолжительного, но более интенсивного (рис. 3, б) является более приемлемой при оформлении основного контура оболочек методом ГДШ [2, 3].

Однако, при деформировании оболочек, обладающих малой жесткостью, для которых энергетика синусоидального импульса (рис. 3, б) является избыточной, допустимо применение импульса, представленного на рис. 3, а.

Из соотношений (1) и (2) следует, что давление равномерно распределено по высоте камеры. Так, например, при $L = 0,1$ м (длина камеры), $v_e = 1500$ м/с (скорость распространения ударной волны в воде) фазовый сдвиг составляет $\Delta t = 0,067 \cdot 10^{-3}$ с (рис. 2). Поскольку $\Delta t \ll t_{\max}$, то соотношение (2) справедливо, его можно считать рациональным и

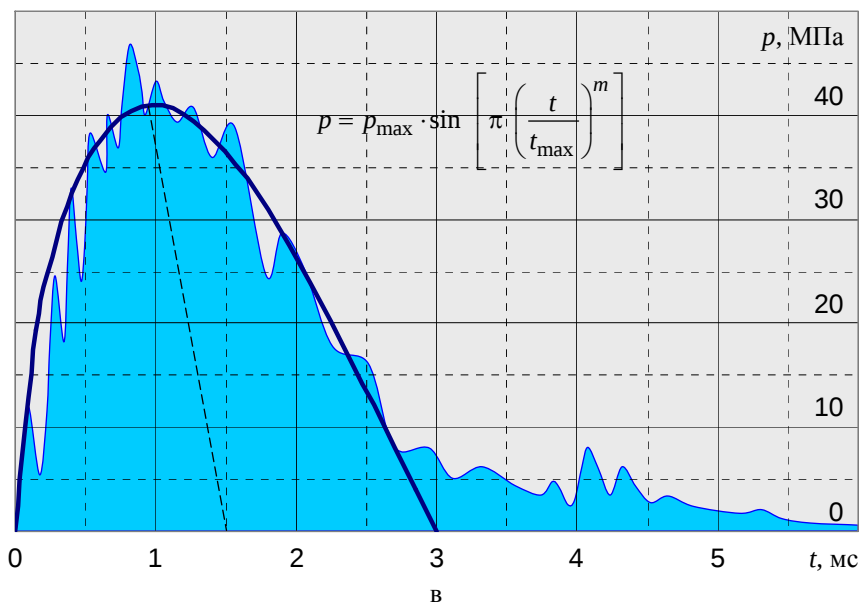
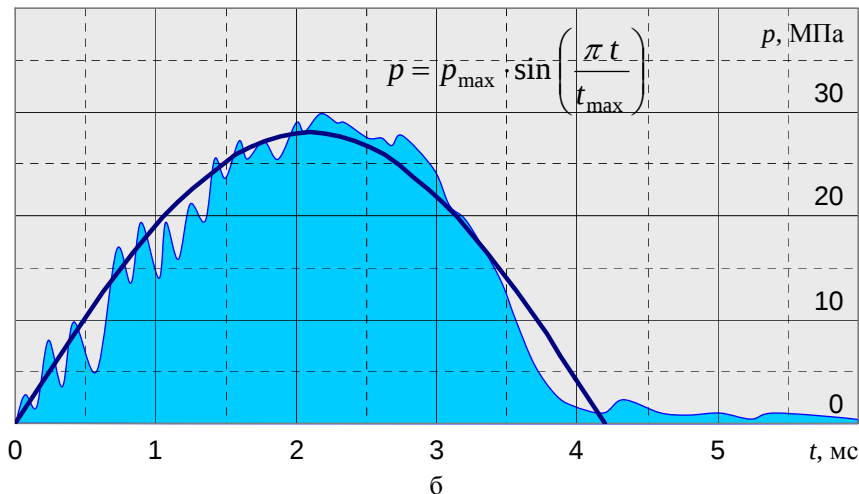
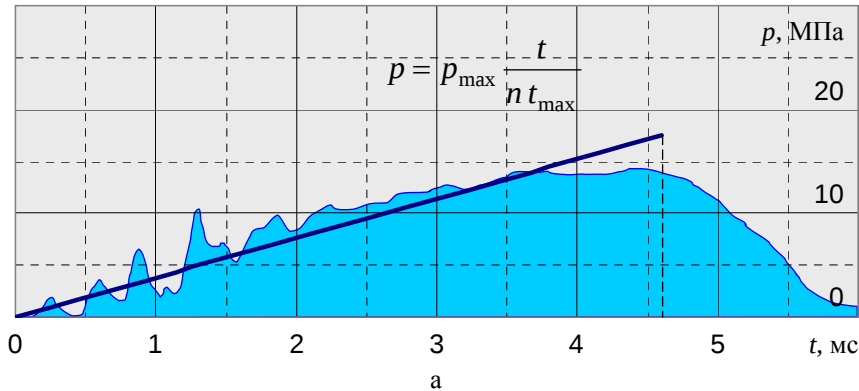


Рис. 3. Варианты аппроксимации функции $p = p(t)$ при ГДШ

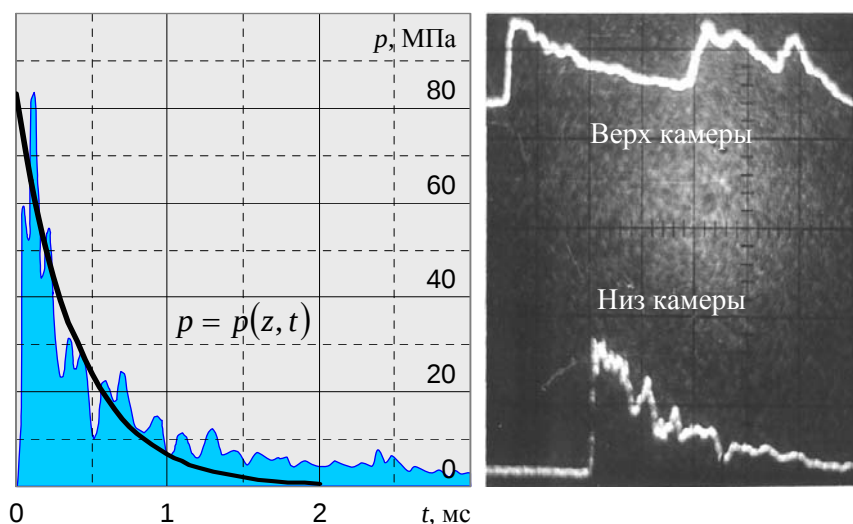


Рис. 4. Калибровочный импульс давления в формующей камере (отчетливо видно изменение величины давления по высоте камеры)

использовать как функцию нагружения импульсом давления оболочки при оформлении основного контура.

Для реализации формообразования компенсаторов и гофров, где жесткость заготовки значительно выше, чем при оформлении основного контура оболочки, согласно результатам экспериментальных исследований [3], закон изменения импульса давления по времени с некоторыми допущениями может быть представлен функцией $p = p(t)$ в форме искаженной (наклоненной) синусоиды (рис. 3, в), которая аппроксимирована зависимостью вида

$$p = p_{\max} \cdot \sin \left[\pi \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^m \right]; \quad (4)$$

$$0 < m \leq 1, \quad (5)$$

где m – коэффициент, определяющий угол наклона синусоиды.

При оформлении элементов взаимной фиксации и компенсаторов, где толщина заготовки соизмерима с радиусом ее изгиба, требуется более энергоемкий и жесткий импульс, характеризующийся более интенсивным нарастанием величины давления по времени (рис. 3, в), чем при штамповке маложестких оболочек. Продолжительность импульса давления меньше, чем в случаях, соответствующих рис. 3, а и рис. 3, б, влияние волновых процессов на деформи-

рование заготовки, может быть более существенным и при некоторых параметрах нагружения допущение, что $p = p(t)$, уже нельзя считать приемлемым. Соотношение (4) целесообразно использовать применительно к процессам формообразования компенсаторов.

Калибровка и формовка рифтов, пуклевков и т.п. производится при весьма незначительном приращении объема внутренней полости детали и в условиях необходимости соз-

дания в рабочих камерах высоких давлений.

При решении задачи калибровки и оформления элементов рельефа, требующих импульса высокой интенсивности, функцию давления жидкости в формующей камере необходимо определять с учетом волновых процессов, протекающих в камере.

Экспериментальные исследования [4] показывают, что функцию изменения давления во времени можно аппроксимировать экспонентой и изменение давления по высоте камеры при этом весьма значительно (рис. 4). Поэтому функцию $p = p(z, t)$ следует определять с учетом взаимодействия снаряда с жидкостью. Решение этой задачи несколько упрощается с учетом относительной малости перемещений заготовки в процессе калибровки.

Результаты исследований наглядно представлены на рис. 5, на котором отображены возможные формы импульса давления в гидравлической камере при ГДШ, их силовые и временные параметры и соответствующие этим импульсам рациональные технологические процесс ГДШ тонкостенных осесимметричных оболочек.

В случае некорректного определения параметров нагружающего импульса, не соответствующего требуемой операции, как показывают эксперименты [5], в итоге не получится качественного изделия, что

объясняется чувствительностью тонкостенных оболочек к отклонениям энергетических параметров процесса от оптимальных.

На рис. 6 отражена динамика изменения по времени t окружных деформаций ε_θ тонкостенной цилиндрической заготовки при нерациональных параметрах нагружения. Здесь отчетливо видно, что значительные деформации ($\varepsilon_{\theta\max} = 0,15$), характерные для операции оформления основного контура оболочки, достигаются нагружением жестким импуль-

сом ($t_{\max} = 2,2$ мс), свойственным калибровке (рис. 4). В результате ярко выраженных волновых процессов давление в жидкости распределено неравномерно по высоте заготовки, что приводит к ее неравномерному деформированию. Оболочка при перемещении подвергается ненужным и губительным для материала изгибам (перегибам), что влияет на ресурсные характеристики готового изделия и требует больших энергозатрат на деформирование. Вследствие резкого нарастания давления на одном

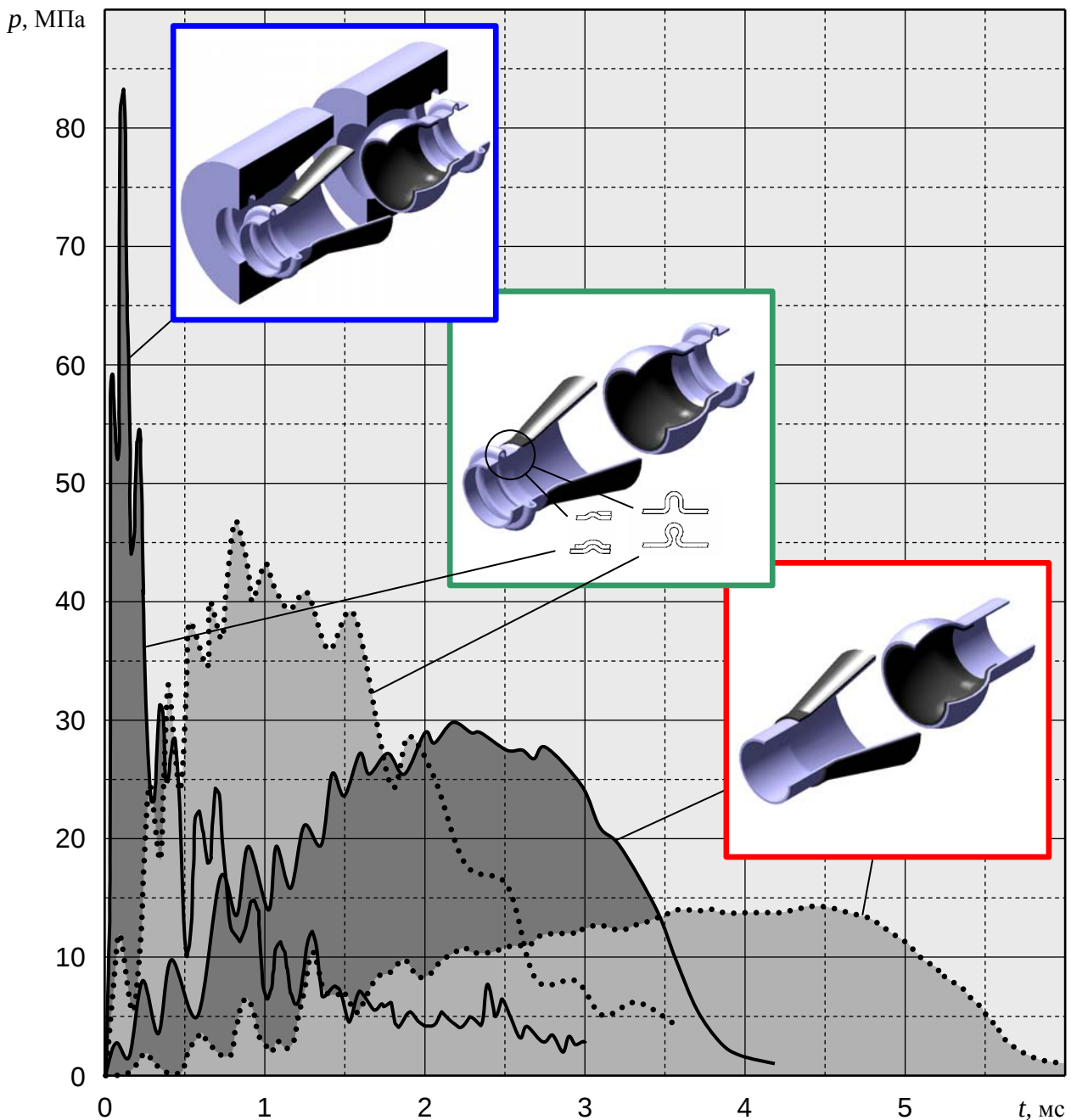


Рис. 5. Возможные варианты импульсов давления жидкости в формующей камере и область их практического использования при ГДШ тонкостенных осесимметричных оболочек

из торцов существенна разнотолщинность оболочки по ее высоте.

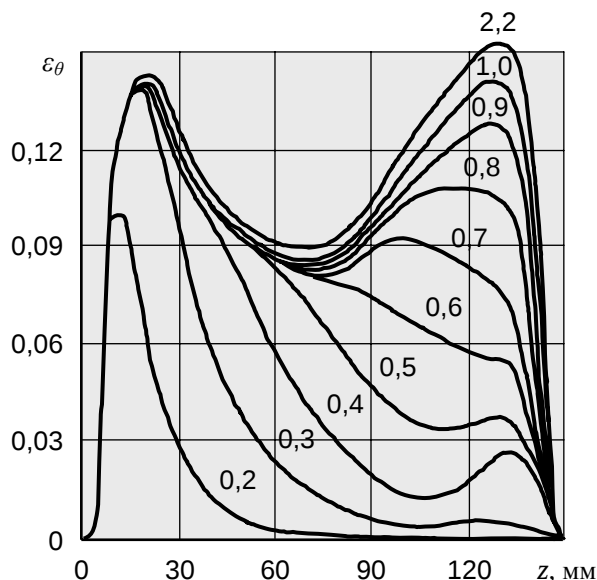


Рис. 6. Положение срединной поверхности цилиндрической заготовки в различные моменты времени ($t, 10^{-3}$ с) при неверно выбранных параметрах нагружения импульсом давления

Следует также отметить, что в относительно глубоких гидравлических камерах имеет место потеря величины давления по высоте камеры. В этом слу-

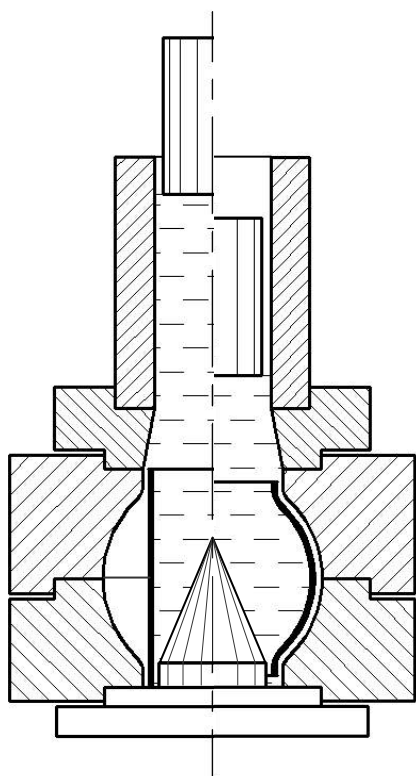


Рис. 7. Схема ГДШ с использованием центральных тел

чае для сохранения равномерного поля давления по высоте камеры в процессах ГДШ широко используют различного типа технологические вставки (центральные тела), которые размещают в рабочей камере и этим обеспечивают перераспределение гидродинамических потоков, а, следовательно и поля давления, что способствует выравниванию величины давления по высоте камеры. Для обеспечения условия $p = p(t)$ чаще всего используют конические и коноидальные осесимметричные вставки (рис. 7) [4].

Литература

1. Мельничук А.П. Исследование процессов гидродинамической штамповки: обоснование принципиального подхода к решению задач деформирования тонкостенных осесимметричных оболочек // Авиационно-космическая техника и технология – 2008. – № 1 (47). – С. 36-39.
2. Мацукин Ю.Г. Исследование гидродинамической штамповки на пресс-пушке: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 – Х.: ХАИ, 1966. – 223 с.
3. Касьян В.Г. Исследование энергетических и технологических параметров типовых процессов гидродинамической штамповки на пресс-пушках: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 – Х.: ХАИ, 1972. – 181 с.
4. Муравьев С.Д. Разработка, исследование и внедрение технологических процессов калибровки и рельефной формовки на гидродинамических пресс-пушках с интенсификацией внешней нагрузки в формующих камерах: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 – Х.: ХАИ, 1985. – 184 с.
5. Родько С.Я. Исследование, разработка и внедрение процессов гидродинамического формообразования тонколистовых деталей летательных аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 – Х.: ХАИ, 1985. – 238 с.

Поступила в редакцию 3.03.2008

Рецензент: канд. техн. наук, проф. Ю.А. Боборыкин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

УДК 621.7.044.7

Ю.В. БАТЫГИН¹, А.Ю. БОНДАРЕНКО¹, Г.С. СЕРИКОВ²¹Национальный технический университет «ХПИ», Украина²Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИНДУКЦИОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ

Для технологической операции магнитно-импульсного притяжения листовой металлической заготовки к индуктору проведен анализ электродинамических процессов в симметричной индукционной индукторной системе с прямоугольной формой рабочей зоны. Определено распределение плотности тока в заготовке, сил притяжения и отталкивания, действующих на неё, при частоте разрядного тока магнитно-импульсной установки ~ 2 кГц. Показаны преимущества исследуемой системы по сравнению с цилиндрической индукционной индукторной системой.

магнитно-импульсное притяжение, листовая металлическая заготовка, электродинамические процессы, индукционная индукторная система, прямоугольная форма рабочей зоны, разрядный ток

Исследования индукционных индукторных систем с одновитковым цилиндрическим индуктором и вспомогательным экраном показали их достаточно высокую эффективность. Но дальнейшее её повышение возможно только за счёт увеличения энергии, запасаемой емкостным накопителем магнитно-импульсной установки [1].

Переход от цилиндрической геометрии к прямоугольной позволяет открыть новые пути увеличения амплитуд силового воздействия на обрабатываемые объекты при неизменном уровне энергии источника.

Речь идёт об определённых конструктивных решениях по форме индуктора – генератора магнитного поля.

В монографии [2] был предложен так называемый индуктор со спаренными токопроводами. Применение этой идеи позволяет предложить индуктор в виде двух компланарных витков прямоугольной формы, соединённых последовательно (рис. 1, а). Их взаимная ориентация обеспечивает протекание равных и одинаково направленных токов в двух параллельных смежных проводниках, между которыми располагается рабочая зона инструмента. В отличие от одного цилиндрического витка здесь имеет место

возбуждение полей и электродинамических сил двойным током при неизменной величине энергии емкостного накопителя.

Цель работы – теоретическое описание электродинамических процессов в индукционной индукторной системе, в которой экран и обрабатываемая листовая заготовка абсолютно идентичны (металл, толщина) и находятся на одинаковом расстоянии от плоского индуктора, выполненного, как указано выше, и имеющего прямоугольную форму рабочей зоны.

Для анализа электромагнитных процессов прием расчётную модель (рис. 1), соответствующую поперечным сечениям системы в ортогональных направлениях.

Также как и в случае цилиндрической индукционной индукторной системы, интерес представляют поля и токи в низкочастотном режиме, являющемся физической идеализацией их максимально возможной «прозрачности» для действующих полей.

При решении поставленной задачи будем считать, что листовая заготовка тонкостенная [3], т.е.

$$\omega \cdot \tau \ll 1, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота действующего поля;

$\tau = \mu_0 \gamma d^2$ – характерное время диффузии в проводящий слой с удельной электропроводностью γ и толщиной d .

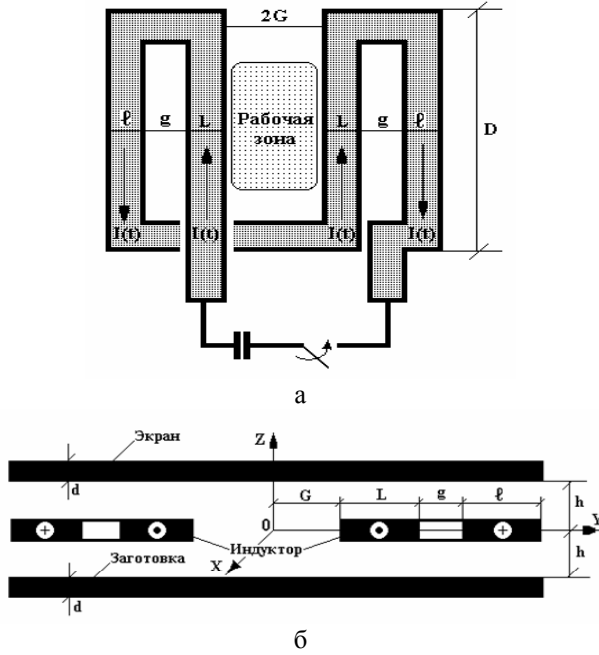


Рис. 1. Расчётная модель индукционной индукторной системы:
а – собственно индуктор;
б – индукторная система в поперечном сечении

Опуская математические аспекты решения поставленной задачи, изложенные достаточно полно в работах [2 – 4], запишем конечные результаты, т.е. математические выражения для возбуждаемых полей и токов в рассматриваемой системе в декартовых координатах с учетом её симметрии.

Напряжённость электрического поля в металле экрана и листовой заготовки в терминах продольной пространственной переменной, связанной с собственной системой отсчёта, имеет вид:

$$E_x(t, y, \zeta) = -\frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \times \int_0^\infty \frac{f(\lambda)}{\lambda} \cdot e^{-\lambda(h+\zeta)} \cdot \cos(\lambda y) d\lambda, \quad (2)$$

где $j(t)$ – плотность стороннего тока в индукторе;

λ – параметр преобразования Фурье – Бесселя;

$f(\lambda)$ – Фурье-образ функции, поперечного распределения плотности тока в индукторе;

$J_1(\lambda r)$ – функция Бесселя первого порядка;

h – расстояние между индуктором и заготовкой (между индуктором и экраном);

$\zeta \in [0, d]$ – пространственная переменная, определяющая зависимость напряжённости электрического поля по толщине листовой заготовки.

Касательная y – компонента напряжённости возбуждаемого магнитного поля определяется зависимостью

$$H_y(t, y, \zeta) = -\frac{j(t)}{2} \cdot \int_0^\infty f(\lambda) \cdot e^{-\lambda(h+\zeta)} \cdot \cos(\lambda y) d\lambda. \quad (3)$$

Выражение (2) умножим на удельную электропроводность металла экрана и заготовки. Результат проинтегрируем по переменной $\zeta \in [0, d]$.

Получим, что линейная плотность индуцированного тока будет равна

$$J_x(\varphi, y) = -\frac{(\omega \cdot \tau)}{2d^2} \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \times \int_0^\infty \frac{f(\lambda)}{\lambda^2} \cdot e^{-\lambda h} \cdot (1 - e^{-\lambda d}) \cdot \cos(\lambda y) d\lambda, \quad (4)$$

где $\varphi = \omega t$ – фаза действующего поля.

Для проведения численных оценок преобразуем формулу (4).

Положим, что токи в ветвях индуктора распределены равномерно, а их направления соответствуют рис. 1. Тогда функцию поперечного распределения плотности тока можно описать безразмерной зависимостью вида:

$$f(y) = [\eta(|G|) - \eta(|G+L|)] - \frac{L}{\ell} \times [\eta(|G+L+g|) - \eta(|G+L+g+\ell|)], \quad (5)$$

где G, L, g, ℓ – геометрические размеры рассматриваемой индукторной системы (рис. 1);

$\eta(x)$ – ступенчатая функция Хевисайда.

Фурье-образ функции поперечного распределения плотности тока в индукторе находится как удвоенный интеграл по $y \in [0, \infty]$:

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi \lambda} \left[\left(\sin(\lambda(G+L)) - \sin(\lambda G) \right) - \frac{L}{\ell} \left(\sin(\lambda(G+L+g+\ell)) - \sin(\lambda(G+L+g)) \right) \right]. \quad (6)$$

Выражение (6) подставим в формулу (4).

После введения безразмерной переменной интегрирования ($x = \lambda \cdot d$) и выполнения необходимых преобразований, получим, что

$$J_x(\varphi, y) = -\frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{2(j_m \omega \tau)}{\pi} \times \int_0^\infty \frac{f(x)}{x^3} e^{-x \frac{h}{d}} (1 - e^{-x}) \cos\left(x \frac{y}{d}\right) dx, \quad (7)$$

где $j_m = \frac{I_m}{L}$ – амплитуда плотности тока в ближнем к рабочей зоне токопроводе индуктора;

$j(\varphi)$ – функция, характеризующая зависимость плотности тока только от фазы;

$$f(x) = \left[\left(\sin\left(x \frac{0,5L}{d}\right) \cdot \cos\left(x \frac{G+0,5L}{d}\right) \right) - \frac{L}{\ell} \left(\sin\left(x \frac{0,5\ell}{d}\right) \cdot \cos\left(x \frac{(G+L+g)+0,5\ell}{d}\right) \right) \right] -$$

функция $f(\lambda)$ в терминах переменной x .

Теперь вычислим возбуждаемые электродинамические силы.

Нормальная распределённая сила притяжения (давление) проводников, размещённых на расстоянии (2h) друг от друга, с индуцированными токами (7) определяется с помощью закона Ампера.

После тождественных преобразований и введения обозначений, удобных для проведения численных оценок, получаем, что

$$P_{attr}(\varphi, y) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{J_x^2(\varphi, y) \cdot D}{(2h)} = \frac{\mu_0 D}{\pi h} \left(\frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \right)^2 \left(\frac{j_m \omega \tau}{\pi} \right)^2 \times \left(\int_0^\infty \frac{f(x)}{x^3} e^{-x \frac{h}{d}} (1 - e^{-x}) \cos\left(x \frac{y}{d}\right) dx \right)^2, \quad (8)$$

где D – длина витка индуктора в направлении оси ОХ.

Сила отталкивания, возникающая при взаимодействии тока индуктора с индуцированными токами, находится как интеграл по толщине заготовки

(экрана) от произведения магнитной проницаемости вакуума, плотности вихревого тока и касательной компоненты напряжённости магнитного поля.

Плотность вихревого тока определяется зависимостью (2), умноженной на удельную электропроводность металла экранов – γ . Напряжённость определяется формулой (3).

После выполнения всех требуемых математических операций и тождественных преобразований находим силу магнитного давления, отталкивающую заготовку (экран) от индуктора.

$$P_{rep}(\varphi, y) = \mu_0 j_m^2 \cdot j(\varphi) \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot \left(\frac{4\omega\tau}{\pi^2} \right) \times \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{f(x_1)}{x_1} \cdot e^{-x_1 \frac{h}{d}} \cos\left(x_1 \frac{y}{d}\right) \cdot \frac{f(x_2)}{x_2^2} \cdot e^{-x_2 \frac{h}{d}} \times \times \cos\left(x_2 \frac{y}{d}\right) \cdot \frac{(1 - e^{-(x_1+x_2)})}{(x_1 + x_2)} dx_1 dx_2, \quad (9)$$

где $x_{1,2}$ – переменные интегрирования, введенные в выражения для напряжённости магнитного поля и плотности индуцированного тока, соответственно.

Проанализируем полученные результаты. Из выражений (8) и (9) следует:

- временная зависимость силы притяжения определяется квадратом производной тока индуктора, а её постоянство знака во времени означает постоянство направленности по отношению к обрабатываемому объекту;

- вычисление импульса силы притяжения показывает, что

$$S_{attr} \sim \int_0^\infty P_{attr}(\varphi, y) d\varphi \sim \int_0^\infty \left(\frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \right)^2 d\varphi > 0,$$

что в свою очередь означает кумулятивный характер деформаций в период действия импульса;

- в рассмотренном низкочастотном режиме действующих полей амплитуда силы притяжения прямо пропорциональна квадрату рабочей частоты и удельной электропроводности экрана и листовой заготовки;

- в системе должны возбуждаться силы оттал-

кивания, что объясняется взаимодействием тока в индукторе и индуцированных токов противоположной направленности;

– в рассматриваемом низкочастотном режиме действующих полей временная зависимость силы магнитного давления, т.е. отталкивания заготовки (экрана) от индуктора, определяется произведением временной функции тока индуктора и её первой производной;

– сила отталкивания есть осциллирующая функция времени, что означает переменную направленность этой силы в течение периода действия;

– импульс силы

$$S_{rep} \sim \int_0^{\infty} P_{rep}(\varphi, y) d\varphi \sim \int_0^{\infty} \left(j(\varphi) \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \right) d\varphi =$$

$$= \frac{j^2(\varphi)}{2} \Big|_0^{\infty} = \frac{j(\infty) - j(0)}{2} = 0,$$

что в конечном итоге означает отсутствие отталкивания вообще либо достаточно малую амплитуду действующих сил.

Полученные аналитические результаты проиллюстрируем численными оценками. Примем, что индукционная индукторная система (рис. 1) задана геометрией: $G = 0,025$ м, $L = 0,01$ м, $g = 0,025$ м, $\ell = 0,01$ м, $D = 0,1$ м.

Металлические листы расположены симметрично относительно плоскости витка индуктора на расстоянии $2h = 0,002$ м друг от друга.

Источник мощности — магнитно-импульсная установка МИУ-15: рабочая частота $f = 2$ кГц, относительный декремент затухания $\delta_0 = 0,3$, рабочее напряжение $U = 5$ кВ. Амплитуда тока в индукторе $\sim 39,2$ кА (соответствующая линейная плотность $\sim 3,92 \cdot 10^6$ А/м), при запасаемой энергии ёмкостного накопителя $W = 12,5$ кДж.

Экран и заготовка — плоские металлические листы толщиной $d = 0,001$ м из электротехнической стали с удельной электропроводностью

$$\gamma = 0,2 \cdot 10^7 \frac{1}{\hat{\mathbf{i}} \mathbf{i} \times \mathbf{i}}.$$

На рис. 2 – 6 приведены результаты расчетов электродинамических процессов в исследуемой индукторной системе.

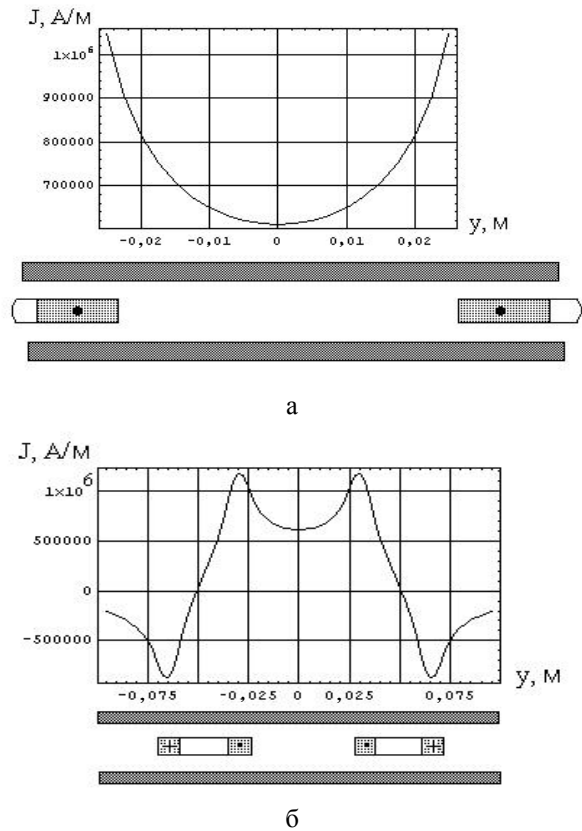


Рис. 2. Поперечное распределение линейной плотности тока, индуцированного в металле заготовки (экрана):
а – общая картина распределения;
б – распределение в рабочей зоне индукторной системы

Как следует из приведенных зависимостей, построенных по результатам численного расчета, выполненного по формуле (7), предложенная конструкция токопроводов индуктора позволяет существенно сконцентрировать и увеличить вихревые токи в рабочей зоне. В отличие от цилиндрической индукционной индукторной системы, амплитуда индуцированного тока не падает в геометрическом центре до нуля, а составляет $\sim 50\%$ от максимума. Причём величина этого «провала» может регулироваться выбором поперечного размера рабочей зоны.

Рис. 3, а соответствует ситуации, когда собственно индуктор «прозрачен» для действующих магнитных полей, рис. 3, б – индуктор является экраном.

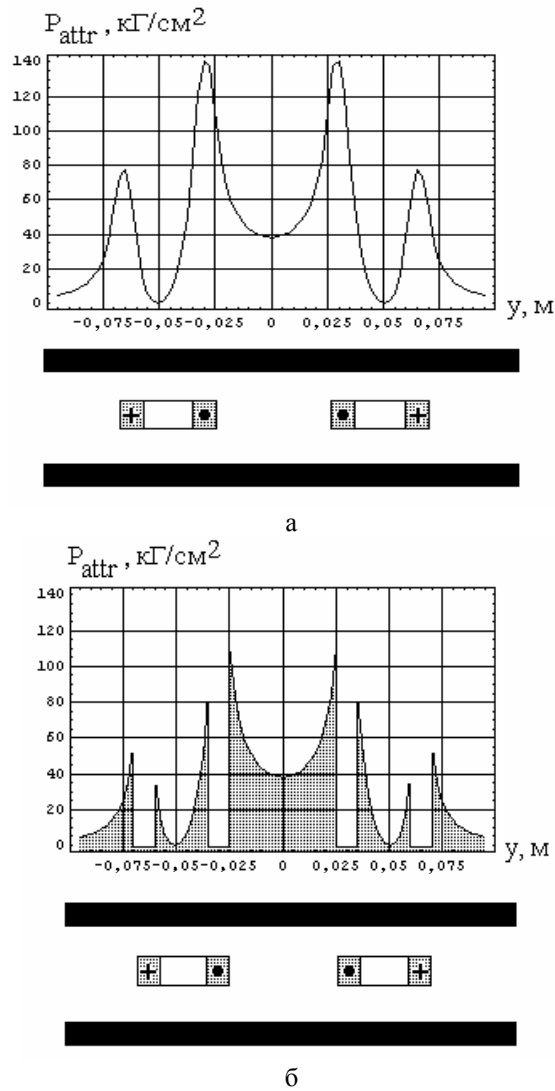


Рис. 3. Поперечное распределение сил притяжения (давления) в симметричной индукционной индукторной системе с прямоугольной формой рабочей зоны при частоте разрядного тока ~ 2 кГц:
 а – без учёта экранирования магнитного поля витками индуктора,
 б – с учётом экранирования магнитного поля витками индуктора

Оценки показывают, что при частоте $\sim 1 \div 2$ кГц эффективная глубина проникновения поля в медь составляет $\sim 2,0 \div 1,5$ мм, в алюминий $\sim 2,6 \div 1,8$ мм. Если толщина токопроводов может быть меньше соответствующей глубины проникновения поля (позволяют условия технологического процесса), то индуктор можно считать «прозрачным».

В противном случае он будет экранировать поля вихревых токов. Однако, в любом случае амплитуды возбуждаемых электродинамических сил притяжения достаточно велики и в рабочей зоне рассматри-

ваемой конструкции индукционной системы превышают ~ 40 атм. Величина интегральной силы в рабочей зоне составляет ~ 1170 кГ.

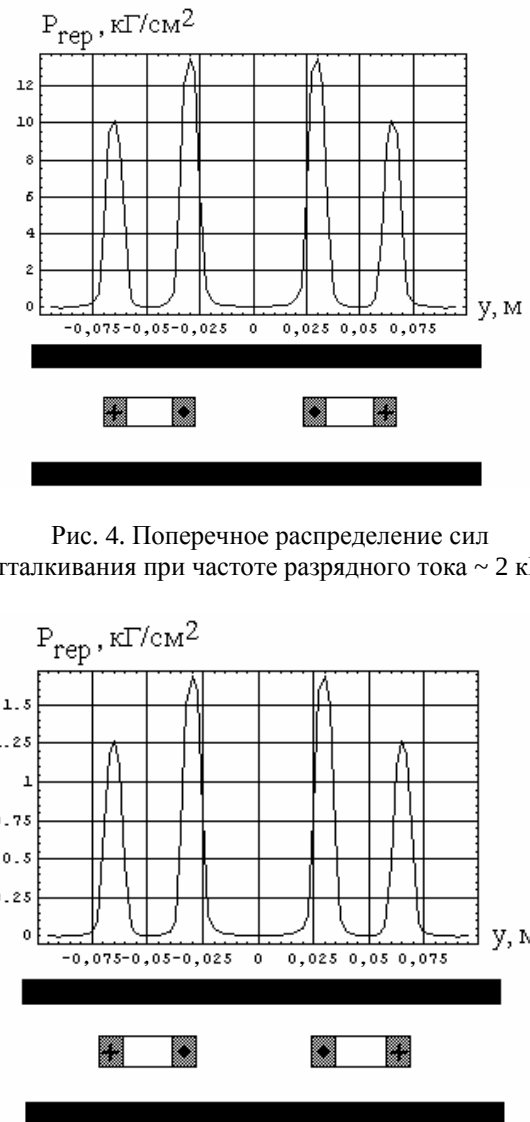


Рис. 4. Поперечное распределение сил отталкивания при частоте разрядного тока ~ 2 кГц

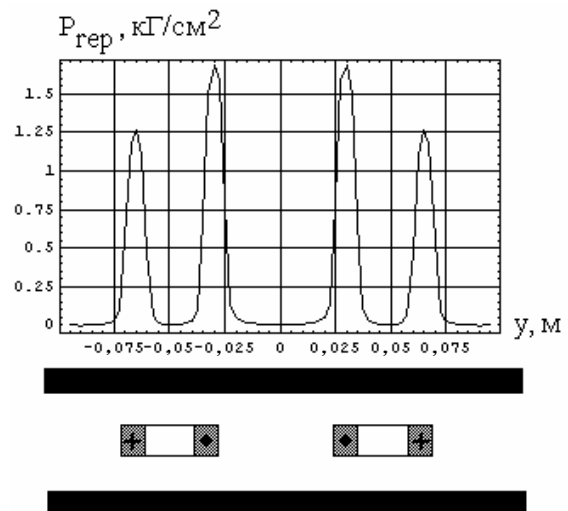


Рис. 5. Поперечное распределение сил отталкивания при рабочей частоте разрядного тока $\sim 1,5$ кГц

На рис. 4 представлены результаты вычислений сил отталкивания, выполненных по формуле (8). Как и следовало ожидать, эти силы сосредоточены непосредственно в зоне токопроводов, но их амплитуды на порядок ниже сил притяжения (~ 14 атм).

Если действие сил отталкивания приводит к нежелательному конечному результату, то их величина может быть существенно уменьшена за счёт незначительного снижения рабочей частоты магнитно-импульсной установки.

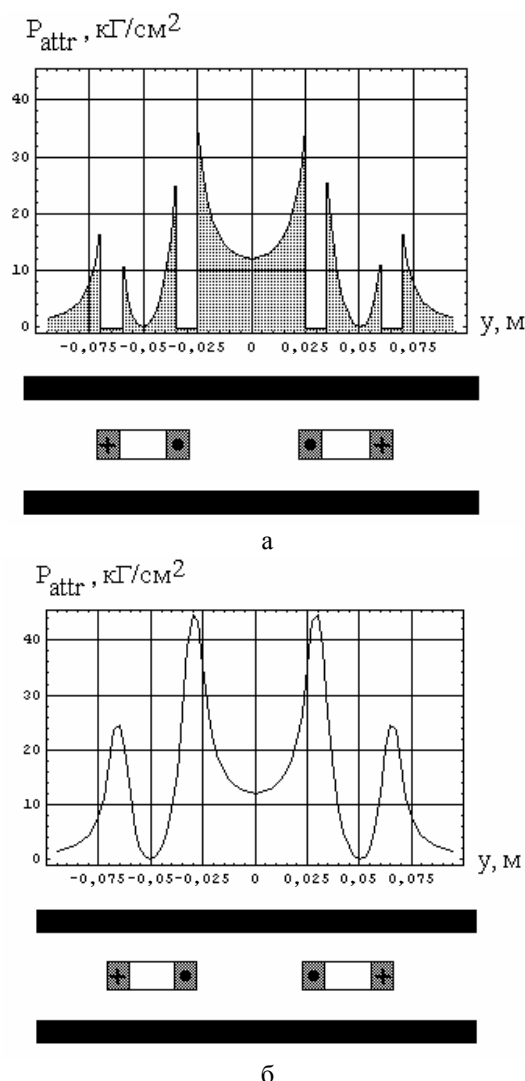


Рис. 6. Поперечное распределение сил притяжения при частоте $\sim 1,5$ кГц:
 а – без учёта экранирования магнитного поля витками индуктора;
 б – с учётом экранирования магнитного поля витками индуктора

Данная рекомендация подтверждается результатами расчёта силовых характеристик при частоте разрядного тока $\sim 1,5$ кГц, представленными на рис. 5, 6.

Как следует из приведенных зависимостей, амплитуды сил отталкивания резко снижаются и их абсолютная величина ($\sim 1,7$ атм) не может оказывать практически никакого влияния на процесс притяжения, а следовательно, и деформирования заготовки. В то же время силы притяжения остаются достаточно большими.

Амплитуды распределённых сил составляют $\sim 17 - 46$ атм. Величина интегральной силы притяжения в рабочей зоне рассматриваемой индукционной индукторной системы может достигать ~ 370 кГ.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что предложенная симметричная индукционная индукторная система с прямоугольной формой рабочей зоны и двумя одинаковыми металлическими листами (один из которых является вспомогательным экраном, а второй – заготовкой), расположенными на одинаковом расстоянии от индуктора является весьма эффективным и перспективным вариантом конструкции инструмента для практической реализации производственных операций по устранению вмятин в листовых металлах..

Литература

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2004. – № 2. – С. 80-84.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2002. – 288 с.
3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. 2-е изд., перераб. и доп. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
4. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю. Распределение напряженности магнитного поля в плоской индукторной системе с экраном // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Техніка і електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 17. – С. 55-64.

Поступила в редакцию 12.03.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Ф. Болух, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

УДК 678.5.067.5.057

А.В. ЧЕСНОКОВ, Е.Е. БАКСТ*Восточноевропейский национальный университет им. В. Даля, Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТРАНСВЕРСАЛЬНОГО АРМИРОВАНИЯ
НА ПРОЧНОСТЬ ПЛЕТЕНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Обоснована необходимость введения трансверсального армирования в плетеные армирующие каркасы. Приведены результаты исследований трансверсального армирования прошивкой плетеных слоев углепластиковыми стержнями. Определена причина увода иглы при армировании и способ ее устранения. Определено влияние схемы расположения стержней, шага и угла их наклона на прочность при поперечном отрыве. Приведено описание спроектированных лабораторных приспособлений для введения полой иглы и измерения усилия при ее вводе в плетеный слой. Определены силовые параметры армирования и спроектировано устройство для трансверсального армирования, работающее в автоматическом режиме.

углерод-углерод, композиционные материалы, трансверсальное армирование, плетение, прочность, прошивка

Первоначально создание углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) основывались на двухнаправленном армировании. Они обладали лучшей прочностью в плоскости армирования по сравнению с монокристаллическим графитом, но уступали по прочности в направлении нормальном к плоскости армирования. Введение трансверсальной арматуры существенно повышает прочность при межслойном сдвиге и поперечном отрыве [1].

Трехмерно-армированные материалы могут быть созданы прошивкой нитями или стержнями пакета однонаправленных или тканых слоев. Армирование толстостенных изделий в трансверсальном направлении эффективно выполнять стержнями. Для этого применяют различные устройства трансверсального армирования (ТВА), позволяющие механизировать процесс прошивки [2]. В зависимости от жесткости и прочности применяемых для ТВА стержней, прошивка выполняется либо непосредственно стержнем, либо при помощи полой иглы. В случае применения стержней с низкими физико-механическими показателями применяют устройства с полой иглой. При такой схеме прошивка производится полой иглой с заведенным в нее стержнем; после внедрения

иглы со стержнем в пакет стержень притормаживается, игла извлекается; далее следует обрезка и переход к следующей позиции.

Для повышения эксплуатационных свойств УУКМ на основе плетеных армирующих каркасов предлагается использовать ТВА. В соответствии с условиями насыщения и эксплуатации деталей из УУКМ, в качестве ТВА применяют стержни из углеродного волокна (УВ) на поливиниловом спирте (ПВС). После выжигания связующего такие стержни имеют открытую пористость, что обеспечивает возможность качественного насыщения материала углеродом, образующим матрицу композита. Для изучения влияния параметров процесса ТВА на межслойную прочность необходимо проведение экспериментальных исследований. Результаты этих экспериментов послужат основанием для разработки автоматизированного устройства ТВА, необходимого при изготовлении пространственно-армированных оболочек из УУКМ.

Целью настоящей работы является оценка влияния структурных параметров ТВА на прочность КМ с плетеной структурой армирующего каркаса, при поперечном отрыве и по результатам исследований проектирование устройства ТВА.

Исследования проводились на толстостенном пакете плетеных слоев ($b = 30$ мм), схемы ТВА реализовывались с помощью специального кондукторного приспособления, позволяющего вводить вручную полую иглу со стержнем в пакет. В приспособлении предусмотрены сменные кондукторные планки, позволяющие изменять шаг расстановки стержней, а также вводить иглу под разными углами.

Предварительные технологические эксперименты показали, что при введении иглы происходит ее увод в направлении острия. Это связано с воздействием материала пакета на клиновую заточку иглы. Для проведения последующих экспериментов использовали вращение иглы вокруг ее оси при введении в пакет, совершая один оборот на каждые 8...10 мм глубины внедрения.

На основании анализа известных методов испытаний на прочность при поперечном отрыве была принята методика испытаний, предложенная в работе [3]. Согласно этой методике при нагружении разрезного кольца (рис. 1, а) моментами по схеме, изображенной на рис. 1, б, в части кольца, противоположной разрезу, возникает напряженное состояние, близкое к чистому поперечному отрыву. При этом величину радиальных напряжений, действующих в трансверсальном направлении, с учетом обозначений рис. 1 можно определить по формуле:

$$\sigma_r^{\max} = \frac{3Pl}{b(R^2 - r^2)}. \quad (1)$$

Ширина рабочего участка образца меньше ширины образца в зонах закрепления консолей. В общем случае, при нагружении моментами разрезного кольца, расслоение – это результат совместного дей-

ствия напряжений σ_r и $\tau_{r\Theta}$. Чем меньше длина рабочего участка, тем меньше величина $\tau_{r\Theta}^{\max}$ на границе $\phi = \pm\phi_0$. Соотношение между касательными и нормальными напряжениями определится по формуле:

$$\tau_{r\Theta}^{\max} = \frac{\sin \phi}{\cos \phi + 2l/(R+r)} \sigma_r^{\max}. \quad (2)$$

Разрушение образца может быть вызвано окружающими нормальными напряжениями σ_Θ . Для их оценки при $R/r > 0,8$ и $E_\Theta/E_r < 50$ можно пользоваться обычными формулами сопротивления материалов. Для того чтобы разрушение происходило путем межслоевого отрыва, необходимо, чтобы размеры образца удовлетворяли неравенству:

$$\frac{2h}{R+r} > \frac{4\sigma_r^e}{\sigma_\Theta^e}, \quad (3)$$

где σ_r^e и σ_Θ^e – предельные нормальные радиальные и окружные напряжения, соответственно.

Исходя из рекомендаций, изложенных выше, были определены геометрические размеры образца ($R = 38$ мм, $r = 30$ мм, $b = 25$ мм, $l = 300$ мм), спроектировано и изготовлено приспособление для испытаний. В качестве ТВА использовались углепластиковые стержни $\varnothing 1,18 \pm 0,04$ мм, полученные методом пултрузии на основе УВ УКН-5000 и водного раствора ПВС в качестве связующего.

Образцы для испытаний изготавливались путем нанесения требуемого количества плетеных слоев на оправку и последующей прошивкой стержнями при помощи полой иглы. После насыщения углеродом матрицы образцы испытывались на машине Р-0,5.

На первой стадии исследований оценивалось

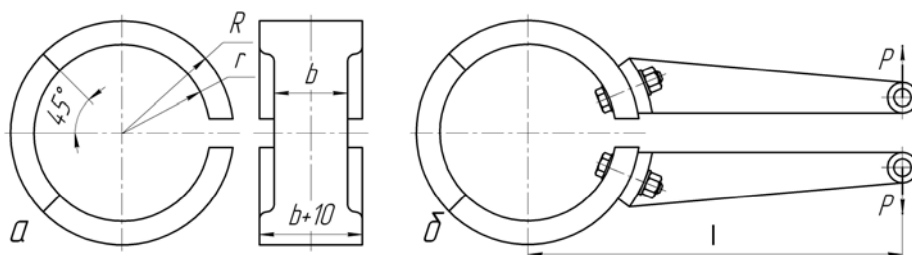


Рис. 1. Образец и схема испытаний на поперечный отрыв

влияние схемы расстановки стержней на межслоевую прочность. С этой целью экспериментально сравнивались две схемы расстановки трансверсальных стержней, при одинаковом количестве их на единицу площади поверхности – шахматная и прямоугольная, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние схемы расстановки ТВА на прочность

Схема расстановки стержней	Прочность σ_r , МПа
Шахматная	25
Прямоугольная	31,5

Анализ полученных результатов показывает, что предпочтительной является прямоугольная схема расположения стержней. Для объяснения приведенных выше результатов можно предположить, что определяющим прочностным параметром является максимальное расстояние между трансверсальными стержнями по одной из осей ортотропии плетеного слоя. Все последующие эксперименты проводились для прямоугольной схемы расстановки стержней при разном шаге расстановки; для сравнительной оценки эффективности ТВА была выбрана величина изменения трансверсальной прочности в сравнении с неармированным образцом. Результаты этих экспериментов иллюстрирует график (рис. 2). На этом графике по оси абсцисс – относительное повышение трансверсальной прочности, по оси ординат количество стержней на единицу площади поверхности.

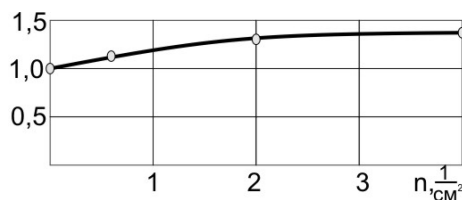


Рис. 2. Влияние шага расстановки ТВА на изменение прочности при поперечном отрыве

Анализ этого этапа исследований показывает, что с уменьшением шага расстановки стержней повышается трансверсальная прочность, однако уменьшение

шага целесообразно лишь до некоторого предела (примерно 5 мм). Дальнейшее увеличение количества стержней на единицу поверхности образца не приводит к росту межслоевой прочности. Это объясняется эффектом ослабления структуры при близком расположении стержней, связанным с концентрацией напряжений вблизи стержня.

Для определения влияния угла наклона трансверсальных стержней на межслоевую прочность были изготовлены партии образцов с одинаковым шагом расстановки стержней (15 мм) и различными углами наклона стержней к оси образца. Исследовались образцы с углами 15° и 30°. Результаты испытаний сопоставлялись с данными, полученными на образцах, армированных стержнями без наклона (0°). Результаты этих экспериментов отображены на рис. 3, здесь на графике по оси ординат – угол наклона трансверсальной арматуры к оси образца, по оси абсцисс – относительное изменение межслоевой прочности в сравнении с контрольным образцом. Анализ этого этапа исследований показывает, что отклонение ТВА от нормали к слою резко снижает межслоевую прочность при поперечном отрыве. Сопоставление полученных результатов с данными по влиянию шага расстановки стержней на прочность позволяет сделать вывод, что снижение прочности вследствие отклонения стержней от нормали может быть столь значительным, что его невозможно компенсировать уменьшением шага расстановки стержней.

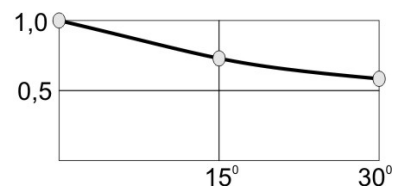


Рис. 3. Влияние угла наклона стержней на прочность при поперечном отрыве

Для разработки конструкции автоматизированного устройства ТВА необходимо иметь данные по усилию, необходимому для введения иглы в пакет. Соответствующая схема измерения усилия изображена на рис. 4. Результаты эксперимента иллюстрируются графиком на рис. 5. Анализ этих экспери-

ментов позволяет предположить, что применение типовых малоразмерных пневмоцилиндров (диаметр поршня около 50 мм) в качестве привода автоматизированного устройства ТВА обеспечит его нормальное функционирование.

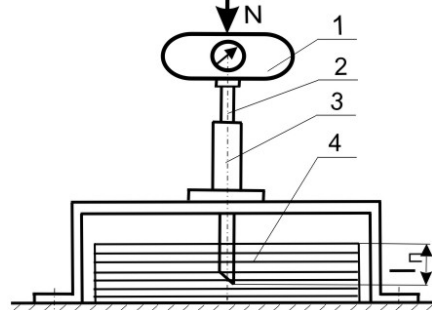


Рис. 4. Схема измерения усилия при введении иглы в пакет:

1 – динамометр; 2 – игла;
3 – кондукторная втулка; 4 – плетеный пакет

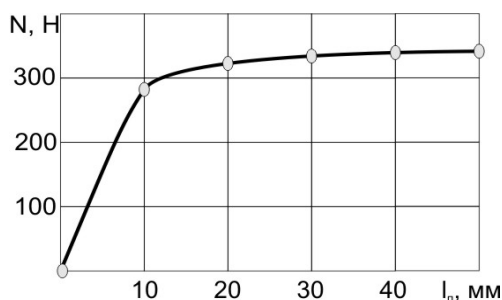


Рис. 5. Зависимость усилия сопротивления внедрению иглы от глубины проникновения

Для оценки влияния ТВА на основные физико-механические характеристики материала воспользуемся данными работы [4]. В ней показано, что для случаев, когда площадь сечения ТВА составляет не более 5% от площади армируемой поверхности, это влияние крайне незначительно. Как было показано выше, оптимальной может быть принята схема, когда на площадь в 1 см приходится 2...4 стержня, расположенных в углах квадрата. В этом случае показатели соотношения площади стержней к общей площади – 2...4%. Следовательно, влияние ТВА на физико-механические показатели материала в плоскости плетеного слоя будет незначительно и его можно не учитывать.

На основании приведенных данных было спроектировано и изготовлено (рис. 6) устройство для ТВА с вращением и пневмоприводом перемещения иглы,

работающее в автоматическом режиме и позволяющее обеспечить необходимые схемы армирования.

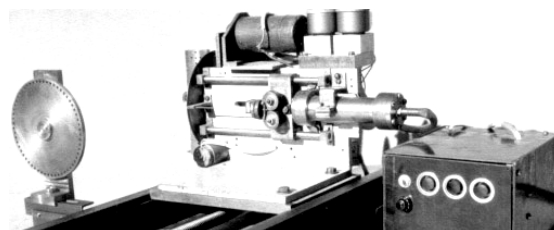


Рис. 6. Устройство для ТВА

Выводы

Результаты исследований влияния схемы и шага расположения стержней, а так же угла их наклона на прочность при поперечном отрыве позволили выработать рекомендации по расположению стержней при ТВА. Полученные данные по предотвращению увода иглы и силовым параметрам процесса ТВА в комплексе с требованиями к проведению процесса позволили спроектировать автоматическое устройство для ТВА.

Литература

1. Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник / Ю.М. Тарнопольский, И.Г. Жигун, В.А. Поляков. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
2. Краснов В.И., Кузнецов В.А., Максиков А.Ю. Автоматизированный способ трансверсального армирования композитов коротковолнистой арматурой // Механика композитных материалов. – 1987. – № 3. – С. 205-210.
3. Mortensen A. Concise Encyclopedia of Composite Materials / Elsevier. – 2007. – 1050 p.
4. Локтионов В.Д. Влияние введения трансверсального армирования на физико-механические характеристики композита // Тезисы VI Всесоюзной конференции по механике композиционных материалов. – Рига, 1990. – С. 32-33.

Поступила в редакцию 13.03.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Витренко, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Луганск.

УДК 629.735.33

А.В. АМБРОЖЕВИЧ, И.П. БОЙЧУК, В.Ю. СИЛЕВИЧ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ВОЗДУШНО-РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Предложен универсальный метод исследования амплитудно-фазо-частотных характеристик, использующий метод дистанционной регистрации первичного сигнала. Метод позволяет непосредственно преобразовывать полученные звуковые осциллограммы в формат массивов данных для последующей математической обработки. Универсальность заключается в применении его для определения частоты любого колебательного процесса, в диапазоне звуковой частоты 20 – 20000 Гц. Рассмотрен анализ полученных во время испытаний осциллограмм при помощи вейвлет-преобразования. Представлены результаты исследований рабочего процесса в пульсирующем воздушно-реактивном двигателе.

метод измерений, пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, амплитудно-фазо-частотные характеристики, вейвлет-анализ, осциллограмма колебаний

Введение

Возникновение необходимости получения амплитудно-фазо-частотных характеристик (АФЧХ) типично в процессе разработки различных объектов техники. Причем, во многих случаях проблематичной является размещение первичных датчиков непосредственно на объекте разработки (исследований) в силу неблагоприятных условий для надежной работы высокоточных средств регистрации ввиду наличия физических полей высокой интенсивности. Таким образом, возникает предпосылка к созданию средств измерения АФЧХ, использующих принцип дистанционной регистрации первичного сигнала, например, акустического. Другой предпосылкой является общая тенденция к унификации средств измерений на основе достижений в области информационных технологий. Такого рода метод и реализующий его программно-аппаратный комплекс предложен в данной статье.

1. Метод измерения АФЧХ элементов конструкции ПуВРД

Ранее использовавшиеся методы аналогичного назначения требовали применения специального

оборудования наподобие резонансного частотомера или шлейфового осциллографа с пьезокварцевым датчиком [1].

Метод измерения АФЧХ, описанный ниже, не требует каких-либо специальных устройств. Для проведения исследований нужно иметь ЭВМ с универсальным программным продуктом и компьютерный микрофон. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1.

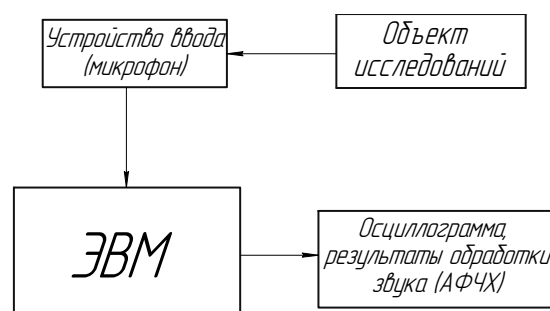


Рис. 1. Схема проведения эксперимента для определения АФЧХ

Звук, исходящий от объекта исследований, воспринимается микрофоном (следует заметить, что компьютерный микрофон воспринимает звуковые волны в диапазоне частот 20 – 20000 Гц и интенсивностью от 3 dB). Далее, полученный аналоговый сигнал обрабатывается звуковой картой ЭВМ, кото-

рая в данном случае работает как АЦП. Преобразованный сигнал записывается в виде осциллограммы, готовой к обработке.

Программный продукт позволяет анализировать звук, получая сводку по частотам, осциллограмму, интенсивность и т.д.

Для математических расчётов автором была разработана специальная программа, позволяющая получить координаты пиков колебательной кривой. Программа записывает в текстовом файле столбцы с числами – координатами пиков, которые потом могут обрабатываться универсальными программными продуктами наподобие «Excel», «Mathcad».

2. Исследование колебаний при помощи вейвлет-преобразования

В разных областях науки возникают задачи, связанные с анализом пространственных полей сложной многомасштабной структуры либо временных сигналов с меняющимся во времени спектральным составом. В качестве отклика возник метод построения специальных функциональных разложений, центральной идеей которых было использование базиса, каждая функция которого характеризует как определённую пространственную (временную) частоту, так и место её локализации в физическом пространстве (во времени). Выросший из данной схемы метод обычно называют непрерывным вейвлет-анализом [2]. Типовыми приложениями вейвлет-анализа являются локализация и классификация особых точек сигнала, вычисление различных его фрактальных характеристик, частотно-временной анализ нестационарных сигналов и др. [3 – 6]. Известны примеры использования вейвлет-анализа [4] в задачах диагностики режимов работы двигателей в целом и отдельных узлов: турбин, компрессоров и т.п. Основное назначение вейвлет – анализ временных сигналов и исследование структуры пространственных полей. Вейвлет-преобразование отображает пространство функций одной переменной (время)

в пространство функций двух переменных (время и частота). Вейвлет-анализ позволяет восстановить полную эволюцию спектрального состава сигнала во времени. Общее представление о спектрально-временной структуре сигнала можно получить по распределению модуля вейвлет-преобразования, фаза вейвлет-преобразования даёт наиболее точную информацию об особенностях в сигнале.

В настоящей работе был проведен вейвлет-анализ осциллограммы колебаний лепестка клапана и осцилляций давления в камере сгорания ПуВРД.

При помощи преобразования Хаара произведен анализ затухающих колебаний лепестка клапана (рис. 2, а) в приложении «MATLAB» [7], результат которого вместе с преобразованием Фурье представлен на рис. 2, б.

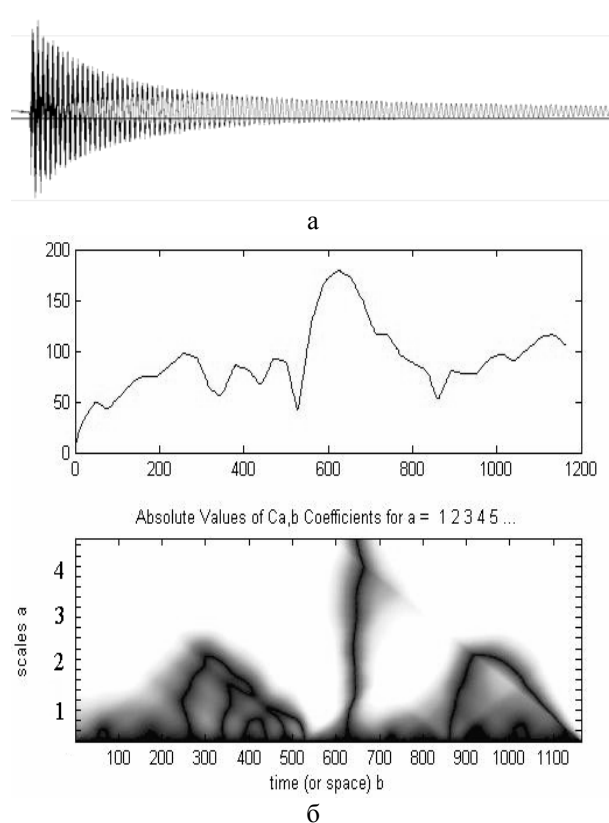


Рис. 2. Результат анализа Фурье и вейвлет-преобразования Хаара для колебаний лепестка клапана

Этот же результат можно представить в виде трёхмерного графика, где в горизонтальной плоскости две оси – это время осцилляций и период, а вер-

тикальная ось – масштабный коэффициент, умноженный на амплитуду колебаний (рис. 3).

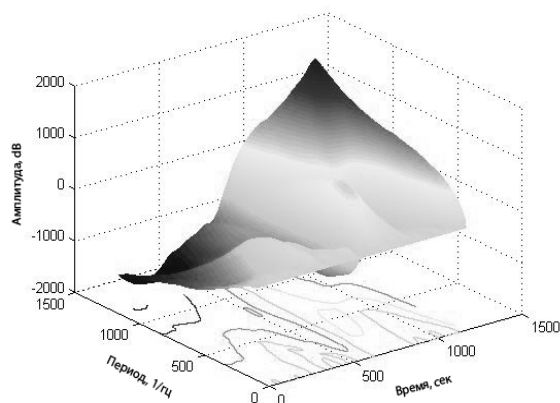
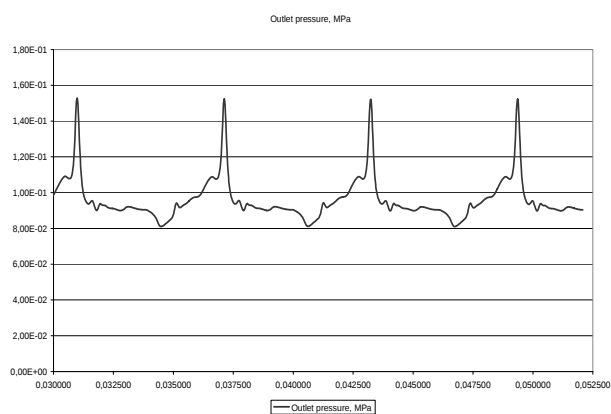
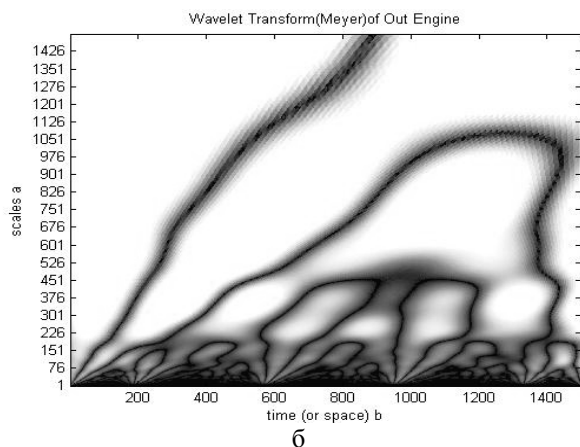


Рис. 3. Преобразование Хаара в трехмерном виде

Для обработки осциллограммы давлений в камере работающего ПуВРД (рис. 4, а) было применено преобразование Мейера. Анализ осцилляций давления, полученных при проведении огневых испытаний опытного образца ПуВРД, представлен на рис. 4, б.



а



б

Рис. 4. Вейвлет-преобразование Мейера пульсаций давления в ПуВРД

Подобно предыдущему случаю полученный результат представлен в трехмерном виде (рис. 5).

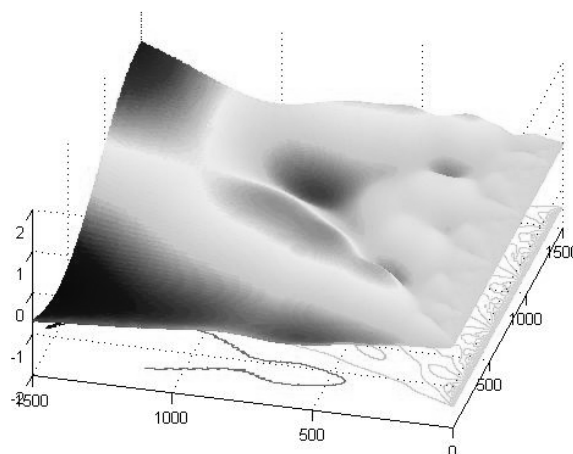


Рис. 5. Преобразование Мейера в трёхмерном виде

3. Применение инструментария численных опережающих исследований к задачам разработки ДУ с ПуВРД

Как показала практика опытной доводки, в процессе работ по созданию нового образца ПуВРД в значительной мере проявляются проблемы, связанные с согласованием собственных частотных характеристик процесса в целом, камеры и автоматического клапана. Тем самым обусловлена необходимость использования специальных методов расчета, основанных на детерминированной модели процесса, в основе которой лежат представления, адекватные физике образующих колебательных явлений.

Процесс отработки запуска и самоподдерживающихся режимов работы пульсирующих ВРД с автоматическим впускным клапаном требует проведения частотных исследований.

В результате анализа физики рабочего процесса выделены два основных фактора, влияющих на частоту работы двигателя:

1. периодичность газообмена;
2. автоколебания элементов конструкции.

Факторная схема колебательного процесса в камере ПуВРД имеет следующий вид:

А. Элементы камеры (массивной конструкции)

совершают колебания с собственными низкими частотами и малой амплитудой.

Б. Клапан совершает сложное колебательное движение, состоящее из движения упругих элементов с большой амплитудой с наложением колебательного процесса меньшей амплитудой, но с большей частотой.

Результирующий колебательный процесс возникает в результате интерференции факторов по п.п. А-Б.

Частная задача исследований заключалась в определении параметров, влияющих на колебательные свойства клапана.

Эксперимент, имеющий своей целью получение АФЧХ, проводился с использованием программного обеспечения авторской разработки для преобразования звука в осциллограмму. Первичным датчиком-преобразователем являлся компьютерный микрофон. Отдельный лепесток клапана защемлялся на расстоянии 22 мм от центра, имитируя прижим ограничительной шайбой в двигателе (рис. 6).

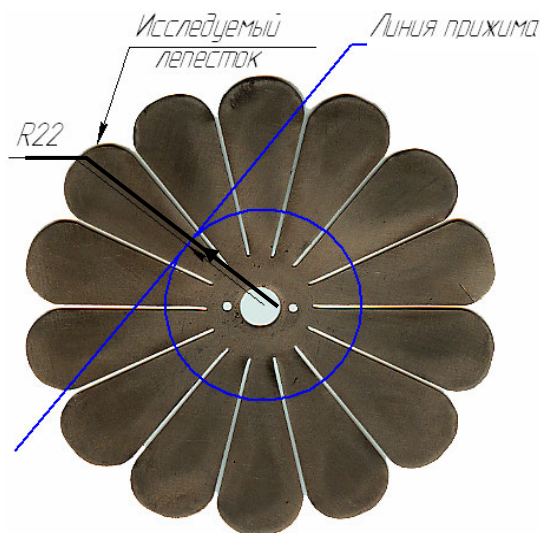


Рис. 6. Схема фиксации лепестка клапана

Лепесток отводился на 6-10 мм от положения равновесия и освобождался. Звук, исходящий от колеблющейся пластины, воспринимался микрофо-

ном, а далее с помощью АЦП и последующего программного преобразования отображался на экране монитора. Для уменьшения влияния колебаний остальных лепестков на микрофон, использовался специальный демпфер. Результат программной обработки представляет собой осциллограмму, показанную на рис. 7.

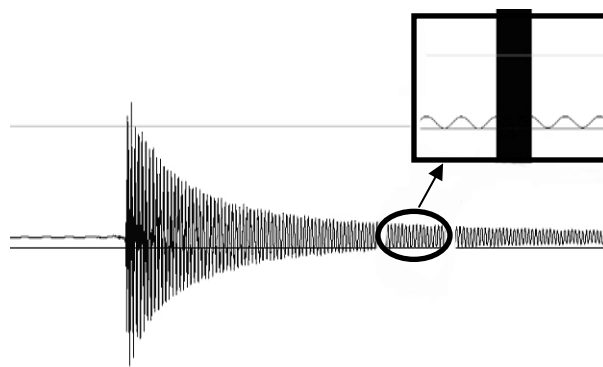


Рис. 7. Общий вид осциллограммы

При увеличении полученной кривой проявляется ее синусоидальный вид. Черным прямоугольником выделен период колебаний.

В результате преобразования исходного звукового сигнала была получена затухающая кривая колебаний. В соответствии с классическими представлениями механики [8] линия, проведенная через пики затухающей кривой, должна иметь вид $Y = A \cdot e^{-\beta x}$. Коэффициент A , зависящий от первичного отклонения лепестка и равный приблизительно величине первого пика кривой колебаний. На декремент затухания β влияют свойства материала и толщина пластины.

В результате серии опытов с различными образцами клапанов были найдены координаты пиков осциллограммы (рис. 8). Декременты затухания определялись с использованием метода наименьших квадратов. Так называемая «линия Тренда» [9, 10] представляет собой результат обработки массивов экспериментальных данных специальным математическим «фильтром».

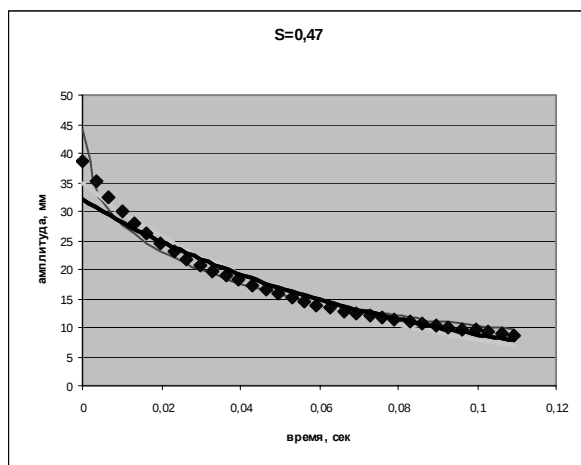


Рис. 8. Результат математической обработки массива экспериментальных данных образца клапана

Наилучший результат аппроксимации экспериментальных точечных массивов обеспечивается функцией вида $Y = A \cdot e^{-\beta \sqrt{x}}$.

Заключение

1. Разработанный метод является универсальным, поскольку может применяться для определения частоты любого колебательного процесса, в диапазоне звуковой частоты 20 – 20000 Гц.

2. Метод не требует использования специального оборудования и реализуется на основе ординарных мультимедийных программно-аппаратных средств.

3. Метод не требует специальной подготовки операторов измерительного комплекса.

4. Метод позволяет непосредственно преобразовывать полученные звуковые осциллограммы в формат массивов данных для последующей математической обработки.

5. Метод включает в себя средства для проведения частотных исследований рабочих процессов с применением вейвлет-преобразований.

Литература

1. Бородин В. Пульсирующие воздушно-реактивные двигатели летающих моделей самолетов. – Х.: ДОСААФ, 1974. – 104 с.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145-1170.
3. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций / П.Г. Фрик. – Ч. II. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. – 136 с.
4. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171, № 5. – С. 465-501.
5. Левкович-Маслюк Л. Дайджест вейвлет-анализа, в двух формулах и 22 рисунках // Компьютерра. – 1998. – № 8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://offline.computerra.ru/1998/236/1123/> (25.02.2008).
6. Короновский А.А., Храмов А.Е. Об эффективном анализе перехода к хаосу через перемежаемость с помощью вейвлетного преобразования // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, В.1. – С. 3-8.
7. Michel Misiti, Yves Misiti. Wavelet Toolbox For Use with MATLAB. Users Guide. – © COPYRIGHT by The MathWorks, Inc. – 1996. – 626 p.
8. Савельев И.В. Курс физики (том 2). – М.: Наука, 1989. – 462 с.
9. Блаттнер П. Использование Microsoft Excel 2002. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2002. – 864 с.
10. Лавренов С.М. Excel: Сборник примеров и задач. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 336 с.

Поступила в редакцию 6.03.2008

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

УДК 539.1.074

Г.В. БОКУЧАВА¹, Г.С. КАРУМИДЗЕ², А.Ф. КОРЖ³, Б.М. ШИРОКОВ³¹*Сухумский физико-технический институт им. И. Векуа, Грузия*²*Национальный центр высоких технологий Грузии, Грузия*³*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Украина*

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБИДА БОРА, ПОЛУЧЕННОГО РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

В работе представлены результаты измерений температурных зависимостей электропроводности, теплопроводности и термо-ЭДС карбида бора различного стехиометрического состава: B_4C и $B_{6,5}C$, полученного плазмохимическим, газофазным методами и методом горячего прессования. Результаты оформлены в виде серии графиков. Показано, что оптимальными характеристиками для использования в качестве р-ветви высокотемпературного термопреобразователя является $B_{6,5}C$, полученный плазмохимическим методом. Исследованы также зависимости тепло и электрофизических характеристик горячепрессованного карбида бора от изотопного состава. Показано, что увеличение концентрации ^{11}B приводит к улучшению электрофизических свойств материала. Полученный плазмохимическим методом карбид бора состава $B_{6,5}C$ может быть использован в качестве р-ветви при разработке термоэлектрических генераторов для космических аппаратов.

термоэлектрический генератор, автономные источники питания, карбид бора, космические аппараты

Введение

Получение электрической энергии прямым преобразованием из тепла является одной из приоритетных задач современной энергетики. Главной причиной повышенного интереса к методам прямого преобразования тепла в электричество является необходимость создания автономного энергоснабжения искусственных спутников и лабораторий в космосе, обеспечивающих непрерывное функционирование межконтинентальной теле-, радио- и телефонной связи. Такие источники электрической энергии, как правило, радиационностойкие, необходимы также при проведении работ в труднодоступных для подведения стационарных линий электропередач районах.

Наиболее отработанным на практике является метод термоэлектрического преобразования и создание на его базе термоэлектрических преобразователей (ТЭП), изготовленных из полупроводниковых

материалов, в т.ч. сплавов, состоящих из ветвей с дырочной (р-типа) и электронной (п-типа) проводимостью. В группе неметаллических твёрдых материалов карбид бора занимает особое место.

Это связано с его особыми свойствами: высокими значениями температуры плавления, твёрдости, механических характеристик по отношению к растяжению и изгибу, нейтральностью по отношению к химическим реакциям с другими веществами, малым удельным весом.

Особым требованием к материалам ТЭП является их радиационная стойкость, поскольку часто на практике часто возникает необходимость сопряжения ТЭП со стенкой ядерного реактора. Карбид бора может выполнять также функцию отражателя нейтронов.

Результаты исследований, опубликованных в [1, 2], показали, что соединение карбида бора с естественной (природной) стехиометрией B_4C является перспективным материалом для создания высоко-

температурного ТЭП в составе р-ветви, поскольку имеет структуру с недостатком электронов и является полупроводником с дырочной проводимостью и шириной запрещенной зоны 1,2 эВ. Носители зарядов B_4C биполярны, и их концентрации достигают значений порядка 10^{21} см^{-3} . График удельной электропроводности B_4C имеет экстремум; электропроводность при этом растет до определенных значений с увеличением температуры. Теплоперенос осуществляется за счет миграции фононов, а теплопроводность существенно зависит от пропорции заполнения объема соединения атомами бора и углерода (т.е. от стехиометрии структуры). Чтобы улучшить термоэлектрические характеристики материала, необходимо уменьшить его теплопроводность χ .

Эксперимент

Изучение теплофизических и термоэлектрических характеристик изделий из карбида бора, полученных различными методами, проводилось в температурном диапазоне 300 – 2000°K. Исследовались коэффициент Зеебека S , теплопроводность χ и удельная проводимость σ образцов. Комбинация этих трёх параметров определяет термоэлектрическую эффективность Z материала, поскольку

$$Z = \frac{\sigma \cdot S^2}{\chi}.$$

На рис. 1 приведены полученные экспериментально температурные зависимости электропроводности, теплопроводности и термо-ЭДС для B_4C , полученного газозфазным и плазмохимическим методами.

На рис. 2 приведены экспериментальные температурные зависимости электропроводности, теплопроводности и термо-ЭДС для B_4C , полученного методом горячего прессования для материала с различным изотопным составом бора.

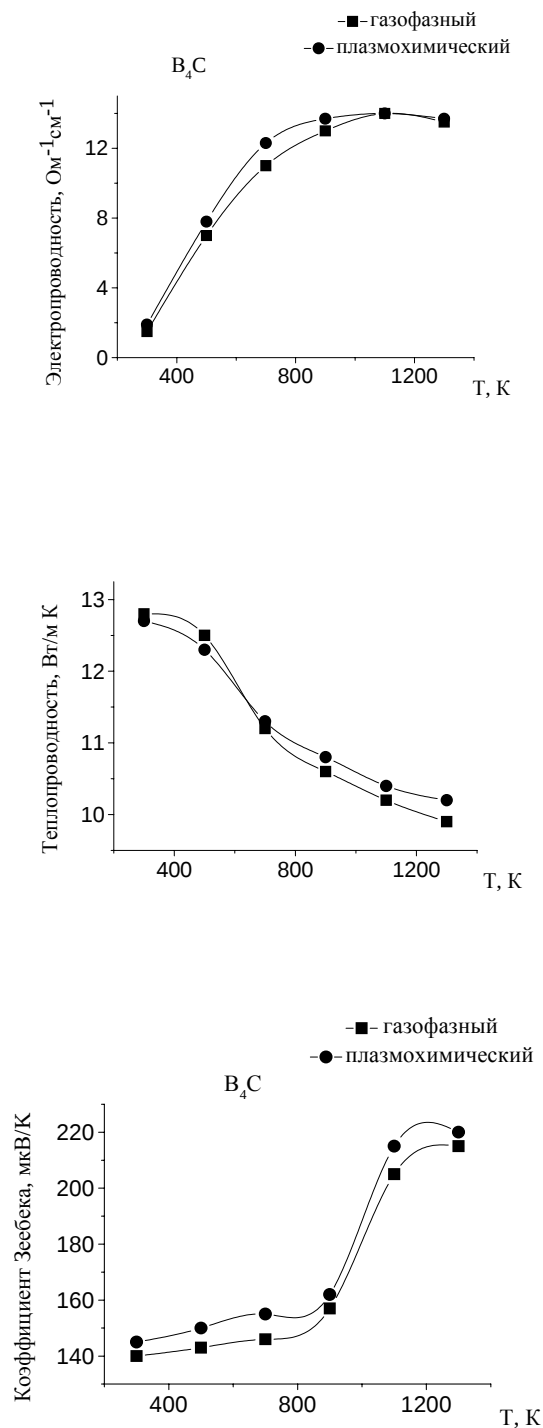


Рис. 1. Температурные зависимости электропроводности, теплопроводности и термо-ЭДС для B_4C , полученного газозфазным и плазмохимическим методами

В работе [1] показано, что материал со стехиометрией $B_{6.5}C$ имеет величину χ , значительно меньшую, чем соединение B_4C , а коэффициент Зеебека

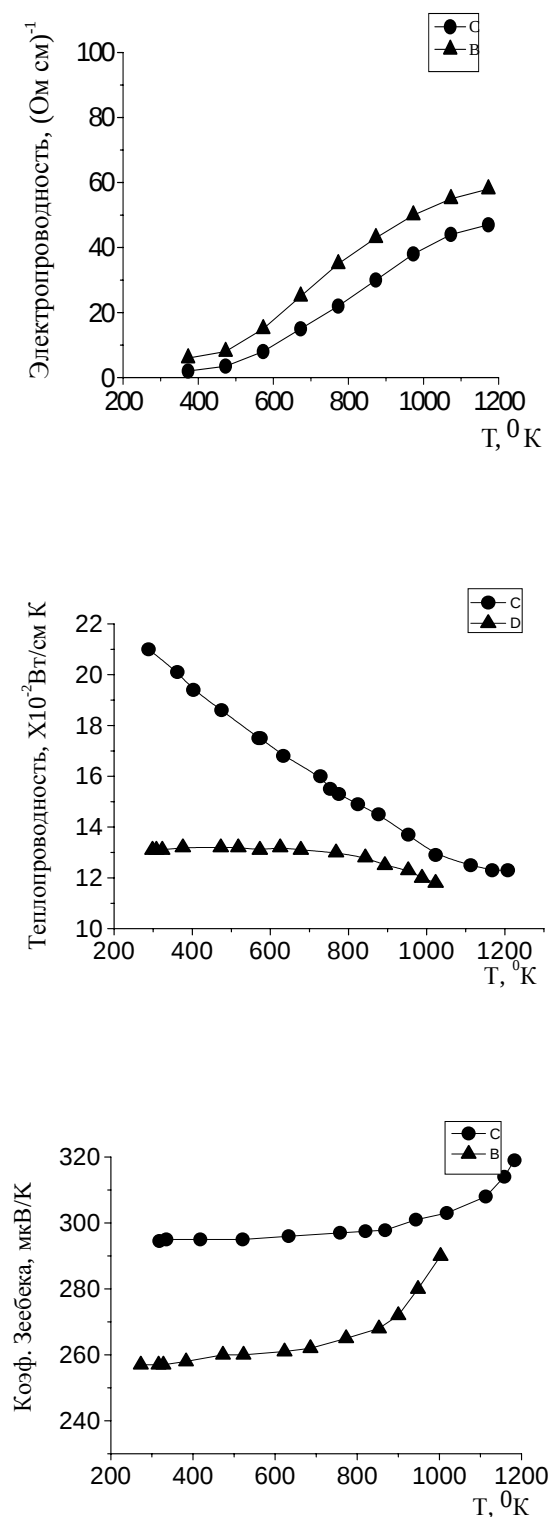


Рис. 2. Температурные зависимости электропроводности, теплопроводности и термо-ЭДС для горячепрессованного B_4C различной плотности и различного изотопного состава по бору:

- – B_4C , $\gamma=2190 \text{ кг/м}^3$, (^{10}B 86 %, ^{11}B 14 %);
- – B_4C , $\gamma=2160 \text{ кг/м}^3$, (^{10}B 98 %, ^{11}B 2 %)

(характеризует величину термо-ЭДС материала в составе ветви ТЭП) для $\text{B}_{6.5}\text{C}$ имеет значение порядка 180 мкВ/К при температуре 300°K; электропроводность же σ увеличивается с повышением температуры. Все эти тенденции положительно влияют на электрофизические характеристики термопреобразователей.

В настоящей работе приведены также результаты экспериментов по получению образцов из карбида бора $\text{B}_{6.5}\text{C}$ газофазным и плазмохимическим методами, исследованию их тепловых и электрических характеристик, проведено сравнение с аналогичными характеристиками материала такого же состава, полученного горячим прессованием в вакууме.

В экспериментах [3] при изготовлении образцов карбида бора газофазным методом температура подложки для разных серий изделий изменялась в интервале 1273-1623°K. Реагенты подавались в рабочую камеру в различных соотношениях. Так отношения парциальных давлений газообразных компонентов проточной смеси H_2/BCl_3 , составляли 6,3/1; 10/1, 20/1, а $\text{BCl}_3/\text{C}_7\text{H}_8$ -10/1; 5/1; 4/1; 3/1. При осаждении плазмохимическим методом рабочие температуры были на 150 градусов ниже; величины же давлений газов в смеси соотносились, как: $\text{H}_2/\text{BCl}_3 \approx 20/1$, и $\text{BCl}_3/\text{C}_7\text{H}_8 \approx 10/1$. Карбид бора осаждали на графитовую подложку, после чего подложка удалялась механическим методом. В результате экспериментов в диапазоне указанных выше значений параметров были получены образцы состава $\text{B}_{6.5}\text{C}$.

На рис. 3 приведены температурные экспериментально измеренные зависимости электропроводности, теплопроводности и термо-ЭДС для образцов карбида бора $\text{B}_{6.5}\text{C}$, полученных газофазным и плазмохимическим методами.

В экспериментах по горячему прессованию в вакууме образцы формировались из мелкодисперсного порошка $^{11}\text{B}_{6.5}\text{C}$, приготовленного методом прямого синтеза из компонентов. Шихта, состоящая из порошка изотопа ^{11}B и углерода (сажа), перемешивалась в турбулентном миксере в течение 4 часов, после

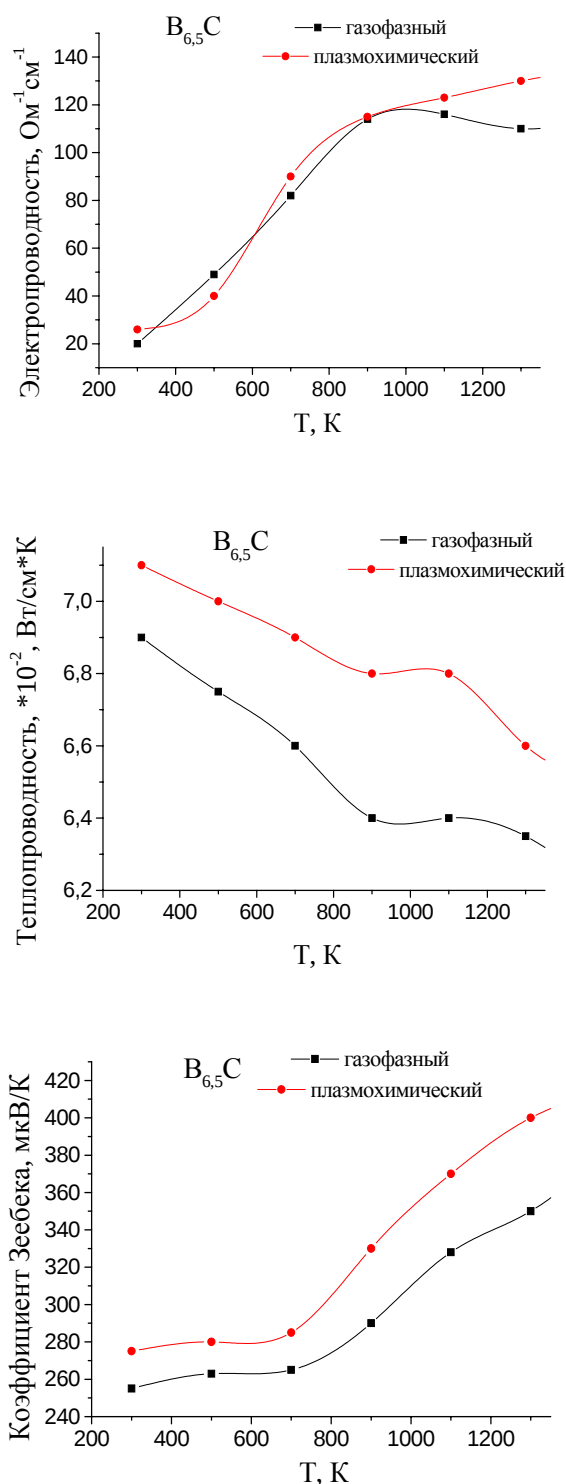


Рис. 3. Температурная зависимость электропроводности, теплопроводности и термо-ЭДС карбида бора состава $B_{6,5}C$, полученного газофазным и плазмохимическим методами

чего брикетировалась методом холодного прессования в таблетки диаметром 40 мм и толщиной 20 мм. Таблетки укладывались в тигли из карбида бора и

помещались в высокотемпературную вакуумную печь. Процесс синтеза проводился при температуре 2073К в среде аргона и последующим охлаждением со скоростью 100 град/час до температуры 1273°К. Затем таблетки измельчались в шаровой мельнице. После чего порошок подвергался химической обработке 20% соляной кислотой. Затем мелкодисперсный порошок $^{11}B_{6,5}C$ прессовался горячим методом в графитовых пресс-формах. Прессование производилось при температуре порошка 2173-2273°К и различных значениях давления контактного устройства пресса на дисперсное рабочее вещество (см. таблицу).

Таблица

Давление и время прессования образцов

Давление прессования, МПа	Время прессования, мин.
15	7
20	3
27-30	6
35-40	10

После механической обработки для снятия напряжений проводился отжиг образцов в высокотемпературной вакуумной печи в течение 2 часов при температуре 2273К и давлении 0,133 Па.

На рис. 4 приведены температурные зависимости электропроводности, теплопроводности и термо-ЭДС образцов из карбида бора $B_{6,5}C$, полученных горячим прессованием в вакууме.

Выводы

Из графиков на рис. 3 и 4 следует, что измеренные на образцах $B_{6,5}C$ при температуре 750 °К значения коэффициента Зеебека находятся в пределах от 250 мкВ/К для горячепрессованных образцов (изотопного состава ^{10}B -2% , ^{11}B - 98%) до 305 мкВ/К. Для образцов, полученных плазмохимическим методом электропроводность меняется от 95 до 105 (Ом см) $^{-1}$, теплопроводность – от 8,0 до 6,5 Вт/м К.

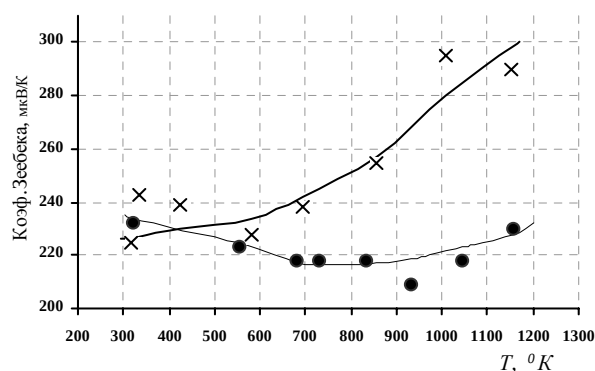
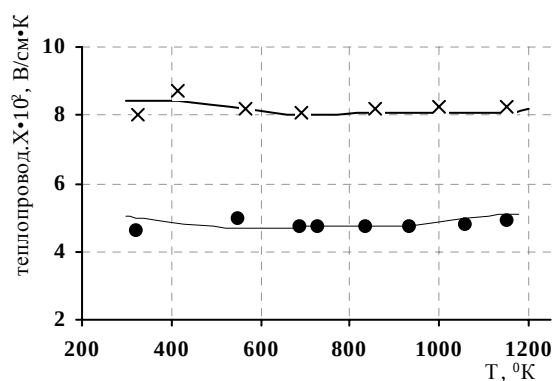
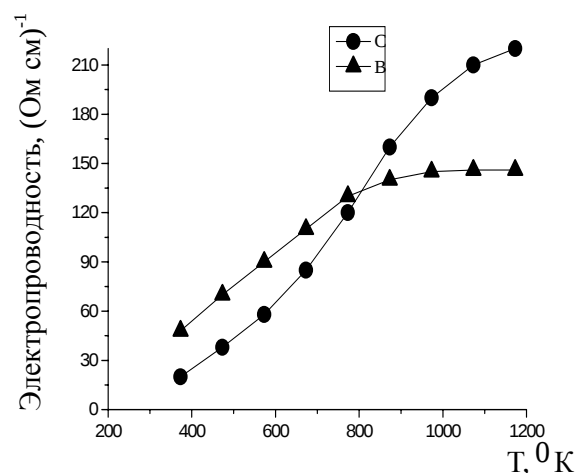


Рис. 4. Температурная зависимость электропроводности, теплопроводности и термо-ЭДС горячепрессованного карбида бора $B_{6.5}C$:

● – $B_{6.5}C$, $\gamma=2,03 \text{ г/см}^3$, (^{10}B 2 %, ^{11}B 98 %);
 × – $B_{6.5}C$, $\gamma=2,49 \text{ г/см}^3$, (^{10}B 2 %, ^{11}B 98 %)

Теплопроводность образцов состава $B_{6.5}C$ слабо снижается с температурой (от 7 до 6,2 Вт/м К) и практически не зависит от метода их получения (газофазного или плазмохимического). С повышением содержания бора коэффициент Зеебека α и электро-

проводность σ возрастают, при этом больший рост наблюдается для газофазных образцов. По абсолютной величине коэффициент Зеебека α плазмохимических образцов выше, чем, газофазных и горячепрессованных. Наибольшее значение $\alpha = 390 \text{ мкВ/К}$ зафиксировано на плазмохимических образцах $B_{6.5}C$ при $T = 1200 \text{ °K}$. Электропроводность как газофазных, так и горячепрессованных образцов с повышенным содержанием бора более чувствительна к повышению температуры, чем электропроводность B_4C . Максимальное значение электропроводности $\sigma = 135 \text{ (ом см)}^{-1}$ достигается при температуре 1200 °K для образцов $B_{6.5}C$ и мало зависит от метода их получения.

Таким образом, как следует из экспериментов, представленных на рис. 1 – 4, наиболее подходящими теплоэлектрическими характеристиками, для р-ветви термопреобразователя является карбид бора состава $B_{6.5}C$, полученный плазмохимическим методом.

Литература

1. Wood Ch. Borides and Related Compounds // Proceedings of the International Symposium on Boron. Duisburg. – 1987. – Vol. 3. – P. 236-248.
2. Karumidze G, Kekelidze L, Shengelia L. Azlactones derived from substituted // American Institute of Physics. – 1996. – Vol. B124. – P.1063-7826.
3. Корж А.Ф., Лонин Ю.Ф., Пилипец Ю.О., Хованский Н.А., Шермет В.И., Широков Б.М. Установка для осаждения материалов из газовой фазы // Физическая инженерия поверхности. – 2006. – Т. 5, № 1-2. – С.98-100.

Поступила в редакцию 26.03.2008

Рецензент: д-р физ.-мат. наук В.М. Хороших, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков.

УДК 621.436

Р.А. ВАРБАНЕЦ¹, А.И. МОРОЗОВ², Д.Ю. МИХАЙЛОВ³¹ *Одесский национальный морской университет, Украина*² *Одесская национальная академия связи, Украина*³ *Multimedia Marine Group corp., Украина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗЫ НАЧАЛА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ЗАДАЧАХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Рассмотрен вопрос корректной синхронизации данных, как один из наиболее важных этапов задачи математического моделирования рабочего процесса ДВС. Исследованы факторы, влияющие на точность синхронизации рабочего процесса. Произведена оценка влияния погрешности определения фазы начала сгорания на точность синхронизации. Алгоритмическая синхронизация данных мониторинга рабочего процесса основана на решении уравнения $dp/d\phi = 0$. Для решения этого уравнения предложен метод определения фазы начала сгорания в цилиндре. Показана допустимость при практическом индизировании использования 2-й производной диаграммы $p(\phi)$ для определения фазы начала сгорания топлива в цилиндре.

рабочий процесс, мониторинг, синхронизация данных, фаза начала сгорания, параметры рабочего процесса, индикаторная мощность, верхняя мертвая точка, диагностирование

Введение

Математическое моделирование рабочего процесса является одной из главных составляющих общей задачи мониторинга и технической диагностики двигателей внутреннего сгорания в процессе эксплуатации. В задаче математического моделирования рабочего процесса одним из наиболее важных этапов является корректная синхронизация данных. Под процедурой синхронизации данных рабочего процесса подразумевается перевод данных, записанных в виде равномерного временного ряда, в зависимости от угла поворота коленчатого вала:

$$P(t) \rightarrow P(\phi); \quad T(t) \rightarrow T(\phi).$$

Основным и первым шагом синхронизации является решение задачи как можно более точного определения положения верхней мертвой точки (ВМТ) поршня. Анализ погрешности расчета основных параметров рабочего процесса, в зависимости от точности оценки ВМТ, дан в работах многих отечественных и зарубежных авторов.

Так, например, в работе [1], посвященной экспе-

риментальной проверке точности алгоритмического метода расчета ВМТ, показано, что на среднеоборотных (СОД) и высокооборотных (ВОД) дизелях погрешность определения ВМТ в 1° поворота коленчатого вала (ПКВ) приводит к 10% погрешности определения среднего индикаторного давления и 25% погрешности расчетной оценки тепловыделения на такте расширения.

В статье [2] приведена зависимость погрешности среднего эффективного давления в процентах от погрешности определения ВМТ в градусах ПКВ. Автор утверждает, что каждый градус погрешности определения ВМТ приводит к 9% погрешности в расчете среднего эффективного давления и мощности цилиндра:

$$\frac{\Delta \text{ИМЕР}[\%]}{\Delta \text{ВМТ}[\text{°ПКВ}]} \cong 9.$$

В работах [1 – 4], посвященных методам оценки ВМТ, указывается на существенное влияние точности оценки ВМТ на расчет основных параметров рабочего процесса и, в первую очередь, мощности цилиндра.

В статье [5] предложен алгоритмический метод

синхронизации (рис. 1), основанный на решении уравнения поворота КВ;

$$\frac{dP}{d\phi_{\text{ВМТ}}} \cong 0, \quad (1)$$

где P – давление газов в цилиндре в случае отключения подачи топлива; $\phi_{\text{ВМТ}}$ – искомый угол верхней мертвой точки цилиндра.

Общая формула уравнения (1) получена на основании зависимости:

$$P = P_a \varepsilon^{n_1} = P_a \left(\frac{V_a}{V_\phi} \right)^{n_1},$$

где P_a – давление в цилиндре в начале сжатия;

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_\phi} - \text{расчетная степень сжатия на } \phi \text{ угле}$$

V_a – объем цилиндра в начале сжатия;

$V_\phi = V(\phi)$ – текущий объем цилиндра на ϕ -м угле поворота КВ;

n_1 – показатель политропы сжатия в цилиндре.

Расчетная формула уравнения (1) имеет вид:

$$\frac{dP_{\text{comp}}}{d\phi} = -P_a V_a^{n_1} n_1 \frac{1}{V_\phi^{n_1+1}} \times 0,5 V_S \times \left(\sin \phi + \frac{\lambda_{\text{III}} \sin \phi \cos \phi}{\sqrt{1 - \lambda_{\text{III}}^2 \sin^2 \phi}} \right), \quad (2)$$

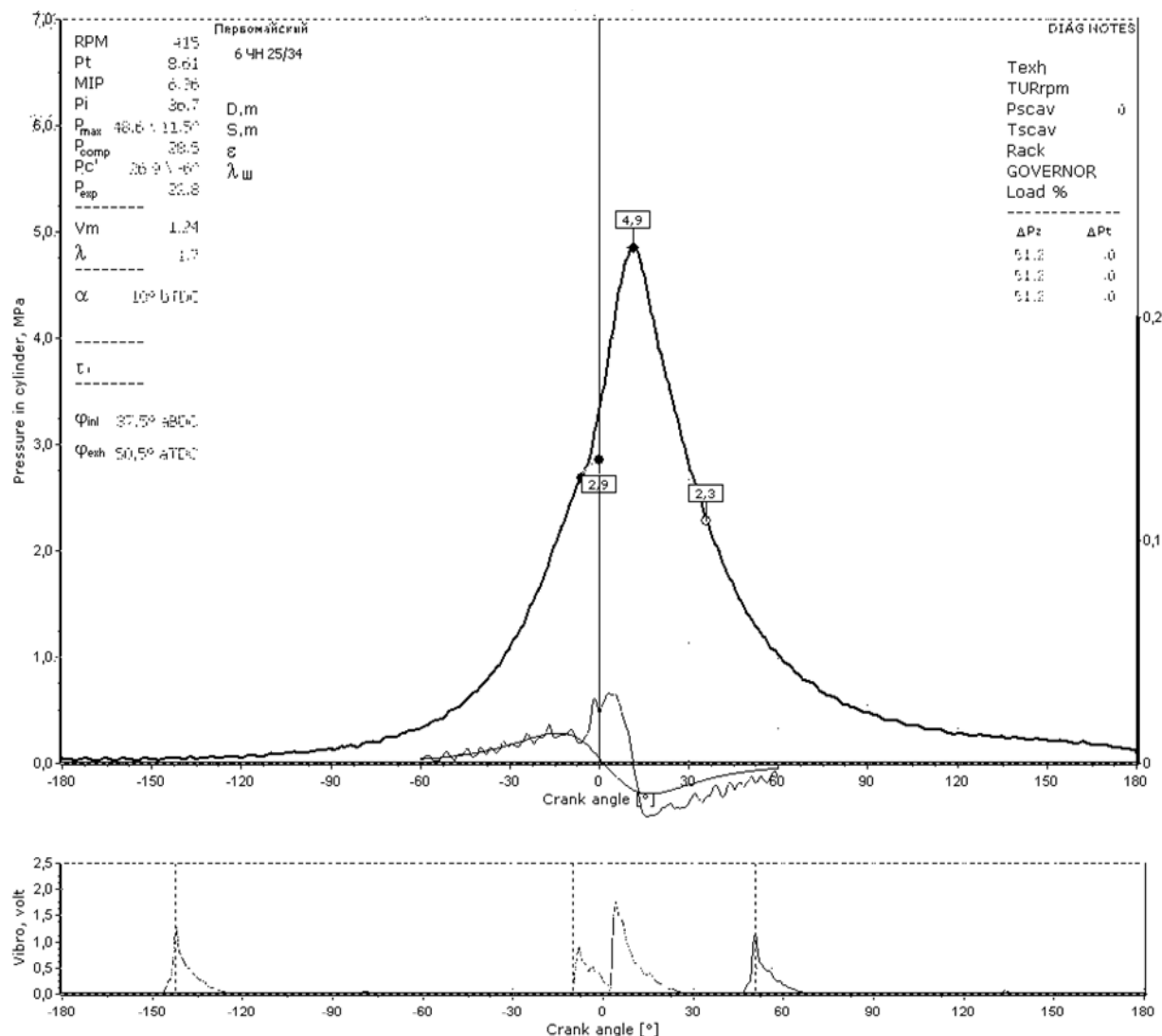


Рис. 1. Диаграмма $P(\phi)$, $dP/d\phi$ и вибродиаграммы топливной аппаратуры и механизма газораспределения (пунктиром показаны фазы закрытия клапанов и подъема иглы форсунки)

где $\lambda_{III} = R_{KP} / L_{III}$ – отношение шатуна, равное частному радиуса кривошипа и длины шатуна.

Проблема, решению которой посвящена данная статья, состоит в том, что уравнение (2) решается не на всей области значений $P(\phi)$, а только на той, где еще отсутствует воспламенение топлива. На рис. 1 эта область показана участком модели $dP/d\phi$, совпадающим с участком численного дифференциро-

вания $\Delta P/\Delta\phi$ (от -60° до -6° ПКВ).

В том случае, если в цилиндре отсутствует подача топлива и происходит чистое сжатие-расширение воздушного заряда, оценка положения ВМТ может быть произведена с инженерной точностью по выражению $\phi_{ВМТ} = \phi P_{max}$, либо рассчитана с помощью (2) на всей области значений.

Такая задача решается относительно легко и

Таблица 1

Влияние фазовой погрешности определения $\phi P_c'$ на расчет основных параметров рабочего процесса

RPM 415 P_t 8.61 MIP 6.36 P_i 36.7 P_{max} 48.6 \ 11.5° P_{comp} 38.5 P_c' 26.9 \ -6° P_{exp} 22.8 V_m 1.24 λ 1.7 α 10° bTDC τ_i ϕ_{int} 37.5° aBDC ϕ_{exh} 50.5° aTDC	RPM 415 P_t 8.62 MIP 4.37 P_i 25.2 P_{max} 48.6 \ 6.5° P_{comp} 33.7 P_c' 31.4 \ -6.5° P_{exp} 19.2 V_m 1.32 λ 1.44 α 15.5° bTDC τ_i ϕ_{int} 32.5° aBDC ϕ_{exh} 45.5° aTDC	RPM 415 P_t 8.62 MIP 3.86 P_i 19.4 P_{max} 48.6 \ 4° P_{comp} 36.8 P_c' 34.2 \ -7° P_{exp} 17.5 V_m 1.3 λ 1.32 α 18° bTDC τ_i ϕ_{int} 30° aBDC ϕ_{exh} 43° aTDC	RPM 415 P_t 8.63 MIP 1.82 P_i 10.5 P_{max} 48.6 \ 0° P_{comp} 42.2 P_c' 38.9 \ -8° P_{exp} 15.3 V_m 1.21 λ 1.15 α 21.5° bTDC τ_i ϕ_{int} 26.5° aBDC ϕ_{exh} 39° aTDC
a $\Delta\phi P_c' = 0^\circ \text{ deg}$	b $\Delta\phi P_c' = 0.5^\circ \text{ deg}$	c $\Delta\phi P_c' = 1.0^\circ \text{ deg}$	d $\Delta\phi P_c' = 2.0^\circ \text{ deg}$

применяется для корректировки аппаратных методов определения ВМТ в некоторых системах мониторинга рабочего процесса ДВС [6, 7]. Проблема состоит в том, что задача корректного определения ВМТ и последующей синхронизации актуальна именно на рабочем цилиндре, когда происходит впрыск топлива и его воспламенение на определенной фазе поворота КВ. В этом случае уравнение (2) решается на малом сегменте значений $P(\phi)$: от начала сжатия до момента начала воспламенения топлива.

Фазу начала сжатия можно определить с помощью методов, указанных в [8]. Принимаем ее равной углу закрытия впускного клапана после нижней мертвой точки (НМТ). Момент начала воспламенения топлива необходимо оценить с максимальной возможной точностью по временной диаграмме $P(t)$. Поскольку задача корректного определения фазы начала сгорания, является составной частью общей задачи синхронизации и актуальна для метода базирующегося на уравнении (1), ее решению не уделялось должного внимания в известной научной литературе.

Целью данной статьи является анализ метода определения фазы начала сгорания топлива в цилиндре ДВС с помощью производных (до 4-го порядка) исходной выборки $P(t)$.

Статья подготовлена в процессе выполнения научно-исследовательской работы на тему: «Разработка теоретической базы системы мониторинга рабочего процесса судовых дизелей» (номер государственной регистрации №0106U001268).

На рис. 1 показаны индикаторная диаграмма и вибродиаграммы топливной аппаратуры (ТА) и механизма газораспределения (МГР) дизеля 6ЧН25/34. В данном случае абсолютная фазовая погрешность синхронизации не превышает $0,25^\circ$ ПКВ. Характерными признаками столь малой погрешности синхронизации по методу [5] является то, что модель $dP/d\phi$ не «захватывает» точки участка кривой $P(\phi)$,

на которых происходит сгорание топлива. На верхней части графика видно, что модель $dP/d\phi$ и реальная кривая $\Delta P/\Delta \phi$ расходятся после начала сгорания.

Анализ ситуаций, при которых происходит неточное определение фазы начала сгорания, представлен в табл. 1. При увеличении ошибки определения фазы начала сгорания видно, что построение модели $dP/d\phi$ начинает базироваться на «лишних» точках и в конечном итоге происходит ее искажение, как показано для случая $\Delta \phi_{Pc'} = 2,0^\circ$ ПКВ.

Погрешность в определении фазы начала сгорания приводит к ошибке синхронизации (рис. 2), причем на малых углах отклонения $\phi_{Pc'}$ ошибка синхронизации на порядок больше.

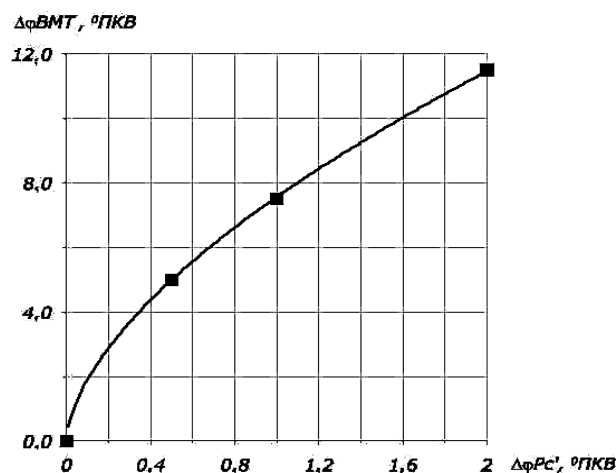


Рис. 2. Влияние фазовой погрешности определения $\phi_{Pc'}$ на ошибку синхронизации

Показанная на рис. 2 зависимость описывается степенной функцией:

$$\Delta \phi_{ВМТ} = A \times \Delta \phi_{Pc'}^B,$$

где значения коэффициентов A и B для исходных данных, записанных на разных дизелях СОД равны:

$$A = 7 \div 10; \quad B = 0,6 \div 1.$$

Указанные значения коэффициентов степенной модели характеризуют почти десятикратную зависимость погрешности расчетной синхронизации от ошибки фазы начала сгорания.

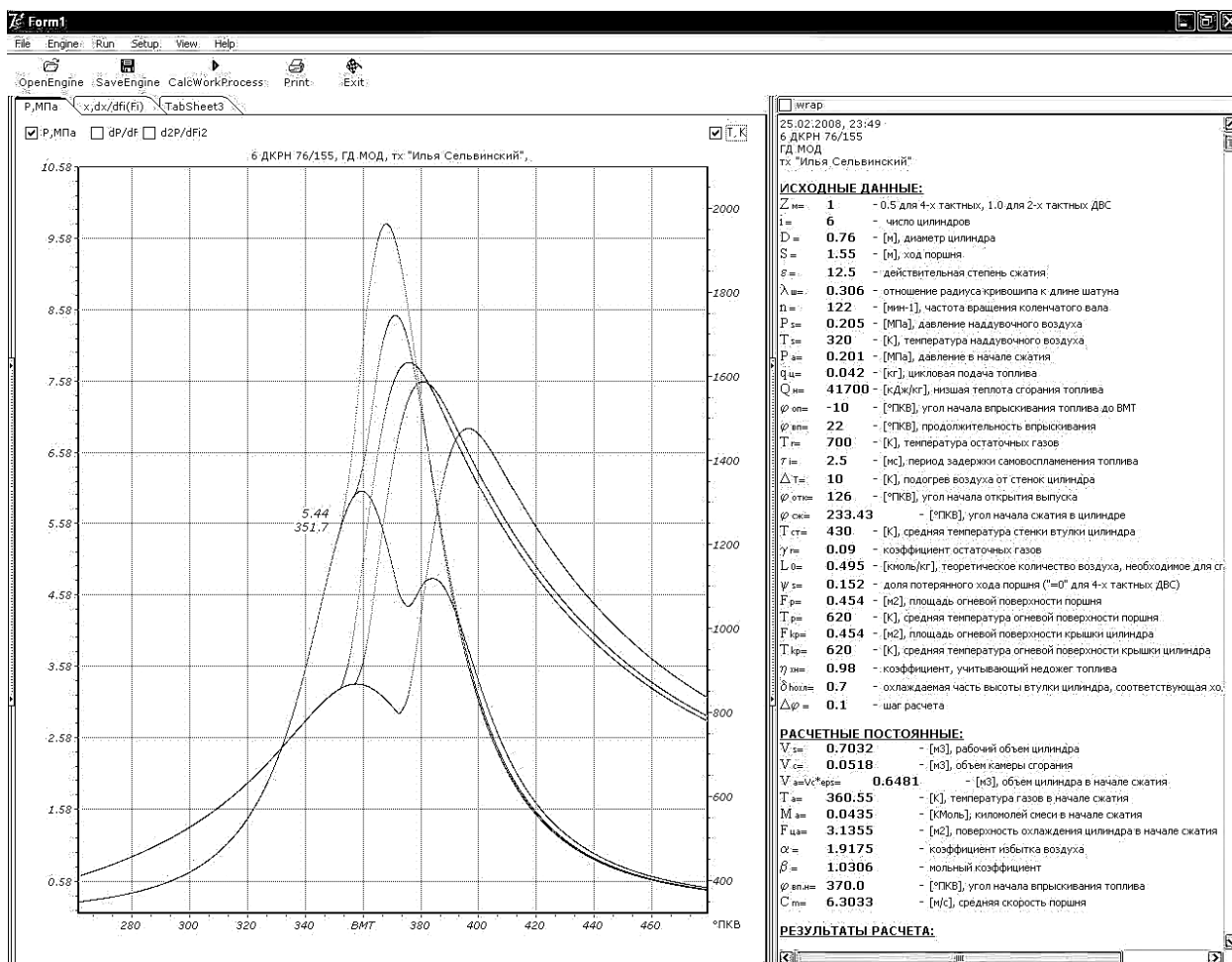


Рис. 3. Интерфейс программы расчета рабочего процесса с учетом динамики тепловыделения по методу В.С. Семенова и В.И. Квятковского

Вследствие ошибки синхронизации происходит существенное искажение результатов расчета параметров рабочего процесса (рис. 4). Так, например, расчетное среднее индикаторное давление и индикаторная мощность цилиндра практически линейно изменяются (повышаются в данном случае). Расчетное значение давления в конце сжатия увеличивается (рис. 4, с). Контрольная точка давления на линии расширения (36° ПКВ за ВМТ) – уменьшается так же по линейному закону (рис. 4, с). Расчетное значение степени повышения давления λ линейно уменьшается, а значение скорости повышения давления V_m на малых углах $\Delta\phi_{Pc'}$ увеличивается, а затем уменьшается (рис. 4, б). Расчетное значение угла опережения впрыска топлива α увеличивается линейно в соответствии с ошибкой синхронизации (рис. 4, а).

В связи с показанным выше существенным влиянием ошибки в определении фазы начала сгорания топлива $\phi_{Pc'}$ на точность синхронизации и, в конечном итоге, на расчетные параметры рабочего процесса, необходимо найти метод определения $\phi_{Pc'}$ с минимально возможной погрешностью.

Для анализа метода определения фазы начала сгорания использовались данные, полученные путем математического моделирования зависимости давления $P(\phi)$ в цилиндре ДВС (рис. 3). Использовалась разработанная на кафедре «Судовые энергетические установки» ОНМУ модель рабочего процесса в цилиндре СДВС, базирующаяся на 1-м законе термодинамики и использующая трехфазную модель тепловыделения В.С. Семенова – В.И. Квятковского для расчета процесса сгорания. На рис. 3

показано окно программы с выводом расчетных диаграмм $p(\phi)$, $t(\phi)$ рабочего процесса дизеля МОД, для углов опережения впрыска топлива $\alpha = +10^\circ$, $+5^\circ$ и -10° ПКВ. В правом окне рис. 3 приведены исходные данные для расчета рабочего процесса при $\alpha = -10^\circ$ ПКВ. Результаты расчета в виде зависимости $P(\phi)$ с шагом $0,5^\circ$ ПКВ были экспортированы во внешний файл для дальнейшей обработки.

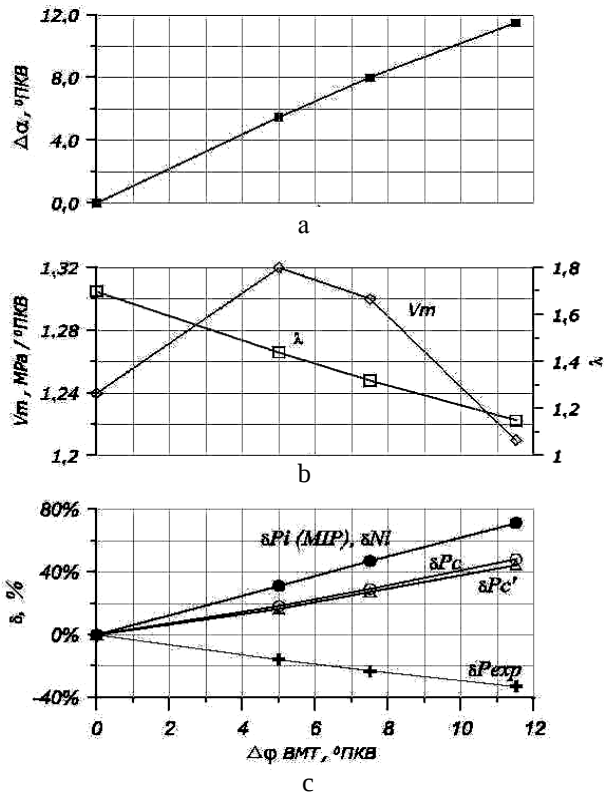


Рис. 4. Влияние фазовой погрешности $\phi_{Pc'}$ на ошибку синхронизации и определения основных параметров рабочего процесса

Исходя из того, что на исходных диаграммах $P(\phi)$ момент начала самовоспламенения слабо выражен для большинства СДВС с ранними углами опережения подачи топлива до ВМТ, анализировать исходную выборку не представляется возможным.

Суть анализируемого метода заключается в том, что каждый раз отыскивается угол, соответствующий максимуму m -й производной, который с ростом порядка дифференцирования приближается к искомому $\phi_{Pc'}$, точно известному для модели рассматриваемого процесса.

Производные $P(\phi)$ – дискретной функции с одинаковыми интервалами между отсчетами h определялись методом численного дифференцирования соответствующего интерполяционного полинома Ньютона [9]. Каждое значение производной для любого аргумента $P(\phi)$ вычислялось в 4-х равноотстоящих точках (две справа и две слева от искомой точки) по формулам:

$$y'_0 = \frac{1}{12h}(y_{-2} - 8y_{-1} + 8y_1 + y_2);$$

$$y''_0 = \frac{1}{12h^2}(-y_{-2} + 16y_{-1} - 30y_0 + 16y_1 - y_2);$$

$$y'''_0 = \frac{1}{2h^3}(-y_{-2} + 2y_{-1} - 2y_1 + y_2);$$

$$y^4_0 = [y'''_0]'$$

На рис. 5, 6 показаны исходные диаграммы $P(\phi)$ и диаграммы их производных 1-го, 2-го, 3-го и 4-го порядков, для углов опережения подачи топлива 10° до ВМТ (рис. 5) и 10° за ВМТ (рис. 6).

Фазы начала сгорания топлива определялись как координаты максимумов производных (во всех случаях кроме первой производной):

$$\phi_{Pc'} = \phi_{\max} \frac{d^m P}{d\phi^m}, \text{ где } m=2;3;4.$$

Координата максимума первой производной $dP/d\phi$ может находиться на участке сжатия (рис. 6) или на участке начала сгорания (рис. 5) в зависимости от того, где скорость изменения давления больше. Разумеется, оценку положения фазы начала сгорания, как точки «перегиба» или границы между процессами сжатия и сгорания с помощью $dP/d\phi$ определить невозможно.

Важный для практической эксплуатации параметр $V_m = \max(dP/d\phi)$ определяется при каждом индицировании двигателя и характеризует механическую нагрузку цилиндра.

На рис. 7 показана относительная ошибка определения угла $\phi_{Pc'}$ в зависимости от порядка производной m , вычисленная по формуле:

$$\delta = \left| \frac{\phi_{PC'} - \phi_{\max} \frac{d^m P}{d\phi^m}}{\phi_{PC'}} \right|.$$

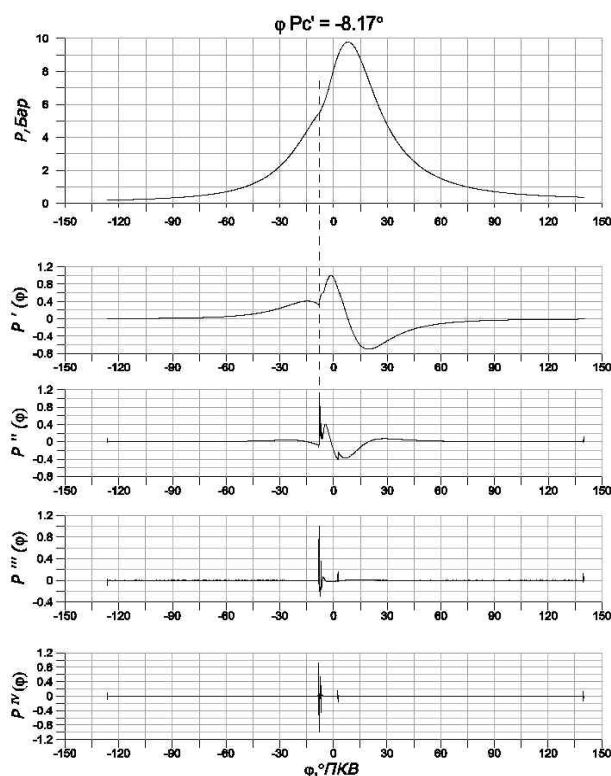


Рис. 5. Определение фазы начала сгорания топлива (угол опережения впрыска до ВМТ)

В случае с поздним (за ВМТ) углом опережения подачи топлива (рис. 7, b) относительная погрешность меньше, чем в случае с ранним углом (рис. 7, a).

Анализ относительной погрешности $\phi_{PC'}$ показывает, что с увеличением порядка производной относительная погрешность уменьшается. Для производных 3-го и 4-го порядков абсолютная погрешность определения $\phi_{PC'}$ уже в большинстве случаев совпадает с шагом дискретизации данных.

Выводы и перспективы исследований

1. При использовании расчетных методов синхронизации данных первичной задачей является разделение процессов сжатия воздушного заряда в цилиндре и сгорания топлива.

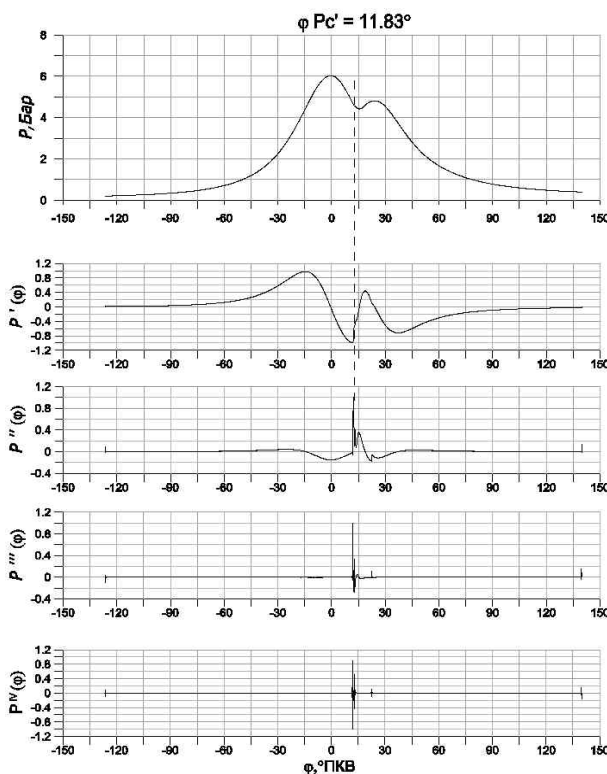


Рис. 6. Определение фазы начала сгорания топлива (впрыск топлива после ВМТ)

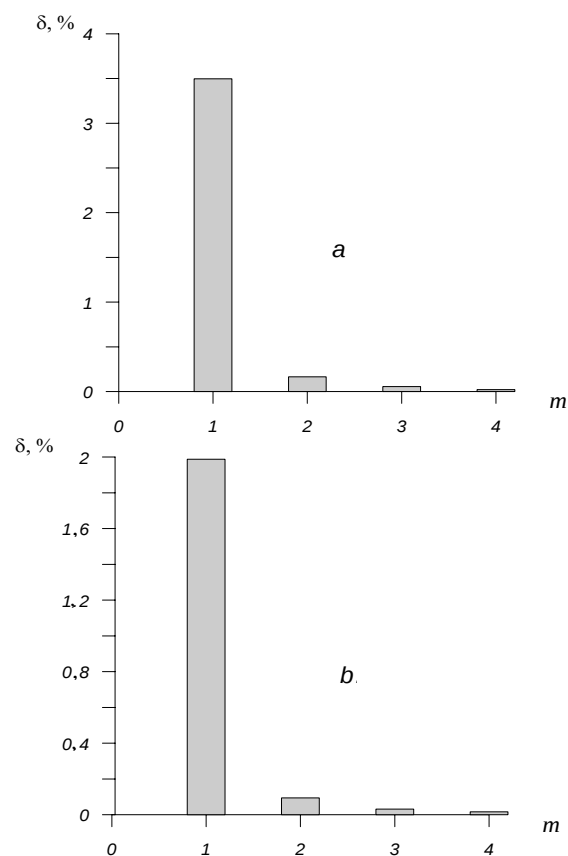


Рис. 7. Относительная ошибка определения угла $\phi_{PC'}$ в зависимости от степени производной m функции $P(\phi)$

2. Ошибка в определении фазы начал сгорания существенным образом влияет на погрешность синхронизации. Отношение погрешностей

$$\Delta \varphi_{\text{PC}}' / \Delta \text{ВМТ} = 6 \div 10.$$

3. Погрешность синхронизации, выраженная в погрешности определения координаты ВМТ, приводит к существенной ошибке в расчете среднего индикаторного давления и мощности цилиндра (до 10% на один градус).

4. Определение фазы начала сгорания в рабочем цилиндре возможно с помощью расчета координат максимумов производных, начиная с производной 2-го порядка.

5. Для «гладких» без шумов исходных данных с увеличением порядка производной точность определения фазы начала сгорания увеличивается.

6. Во время мониторинга реального рабочего процесса, с учетом шумов преобразования и дискретизации, применение производной выше 2-го порядка нецелесообразно, поскольку с увеличением m уменьшение относительной погрешности незначительно (рис. 7). Кроме того, при численном дифференцировании для производных старших порядков существенно возрастает влияние шумов.

7. Дальнейшие исследования необходимо провести на реальных данных мониторинга рабочего процесса в цилиндрах ДВС СОД и МОД. Для минимизации шумов в исходных данных целесообразно воспользоваться методами цифровой фильтрации на базе преобразования Фурье либо альтернативными.

Заключение

Повышение точности алгоритмических методов синхронизации данных позволит улучшить качество мониторинга рабочего процесса ДВС во время эксплуатации и повысить достоверность получаемой таким образом диагностической информации.

Литература

1. Emiliano Pipitone. The Experimental Validation of a New Thermodynamic Method for TDC Determination // SAE 2008 World Congress 2008, Detroit, Michigan. – Document Number: 2007-24-0052. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sae.org/technical/papers/2007-24-0052> (22.01.2008).
2. Tazerout M., O. Le Corre, Stouffs P. Compression Ratio and Tdc Calibrations Using Temperature-Entropy Diagram // SAE 1999. – Document Number: 1999-01-3509 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.emn.fr/x-ener/lecorre/1999-01-1489.pdf> (25.03.2008).
3. Stas M.J. Thermodynamic Determination of T.D.C. in Piston Combustion Engines // SAE 2005 Paper No. 960610. – P. 759-768.
4. Brown W.L. Methods for Evaluating Requirements and Errors in Cylinder Pressure Measurement // SAE 1967 Paper No. 670008. – P. 50-77.
5. Варбанец Р.А. Синхронизация данных при индицировании СДВС // Збірник наукових праць. – Севастополь: Севастопольський ВМІ ім. П.С. Нахімова, 2005. – Вип. 2 (8). – С. 255-258.
6. Варбанец Р.А. Системы компьютерной диагностики судовых дизелей // Судостроительство. – 2004. – № 6. – С. 24-27.
7. TDC Sensor System for dynamic determination of the top dead centre position Type 2629B [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.kistler.com (22.01.2008).
8. Варбанец Р.А. Параметрическая диагностика дизелей SBV6M540 и Pegaso 9156 // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 8 (34). – С. 144-148.
9. Волков Е.А. Численные методы: Учебное пособие для вузов. – М.: Наука, гл.ред. физ.-мат. лит., 1987. – 248 с.

Поступила в редакцию 12.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Ханмамедов, Одесская национальная морская академия, Одесса.

УДК 621.372

А.С. САМЕДОВ, Т.Б. УСУБАЛИЕВ

*Национальная академия авиации, Азербайджан***КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ВЫБОРА СОСТАВА ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
ДЛЯ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН**

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований по разработке математических моделей прогнозирования состава и получения новых композиций защитных покрытий лопаток газовых турбин на основе корреляционно-регрессионного анализа, анализа количественных соотношений и физико-химических характеристик с учетом атомного радиуса и типа кристаллической решетки элементов. Использован метод планирования эксперимента, на основе чего уточнено процентное содержание каждого выбранного элемента, выявлены диапазоны температур, время и количество опытов. Рентгенофазовым и термическим анализами исследованы фазовые превращения сплава нового состава, результаты которых подтвердили достоверность предлагаемого подхода.

газовые турбины, защитные покрытия, корреляционно-регрессионный анализ

Безопасность и эффективность эксплуатации самолетов гражданской авиации во многом определяются достижениями в области разработки высокоэкономичных двигателей с большими ресурсами и высокой надежностью. Новое поколение авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) отличается от существующих прототипов наиболее высокими значениями температуры газа (T_G^*) перед турбиной. Так, если T_G^* у двигателей IV поколения в среднем составляет 1600-1650K, то по прогнозам у АГТД V и VI поколений она возрастет до 1800 – 2000K и более [1, 2]. Однако это ведет к дальнейшему усложнению конструкции, увеличению термомеханической напряженности лопаток газовых турбин, надежность которых оказывает непосредственное влияние на надежность и ресурс АГТД в целом и безопасность полетов самолетов. В этой связи, разработка и внедрение высокоэффективных систем охлаждения, методов увеличения прочностных свойств, коррозионной стойкости сплавов, защитных покрытий и изделий являются важнейшими в решении проблемы долговечности газовых турбин.

Требования к материалам лопаток турбин характеризуются непрерывным повышением жаропрочности, сопротивлением термической и малоцикловой усталости, стойкости к воздействию газовой среды в условиях эксплуатации. На сегодняшний

день наиболее надежными и освоенными в мировой практике изготовления лопаток турбин являются сложные, многофазные жаропрочные сплавы на никелевой или кобальтовой основе типа ЖС, ВЖЛ, IN, TAZ, MAR, TRW, CMSX и др. [2]. Получение монокристаллической структуры с эффективной (заданной) кристаллографической ориентацией путем высокоградиентного литья лопаток с направленной кристаллизацией, применение дисперсных упрочняющих оксидов при выплавке металла, совершенствование технологии многокомпонентного легирования ведут к существенному повышению рабочей температуры и механических свойств сплавов.

Однако лопатки современных газовых турбин, работая при температурах порядка 1500°С, не могут эксплуатироваться в течение заданного ресурса без надежных высокотемпературных покрытий. Применяемые для лопаток АГТД жаропрочные никелевые сплавы в связи с их невысокой коррозионной стойкостью к продуктам сгорания не обеспечивают требования, предъявляемые к ресурсу лопаток. Поэтому улучшение эксплуатационных характеристик АГТД достигается за счет эффективных защитных покрытий. Защитные покрытия позволяют повысить качественные характеристики двигателей, уменьшить расход воздуха на охлаждение, сэкономить топливо, увеличить температуру газового потока на 100...150K. Именно покрытия дают возмож-

ность значительно увеличить срок использования лопаток и во многих случаях служат именно тем слоем, который принимает на себя разрушающее воздействие высоких температур и других факторов и в случае разрушения может быть нанесено заново. Долговечность покрытий зависит от их структуры, толщины, метода осаждения и качества нанесения.

Для обеспечения высокой надежности, защитные покрытия лопаток турбин должны удовлетворять требованиям, вытекающим из условий их эксплуатации: достаточная прочность и жаропрочность; высокая стойкость к газовой и сульфидной коррозии, термическая стабильность состава и структуры, высокая сопротивляемость термомеханическим циклическим нагрузкам, эрозионная стойкость, достаточная пластичность и вязкость разрушения, минимальная теплопроводность керамики, ремонтно-пригодность лопаток с керамическими покрытиями.

В табл. 1 приведены данные по химическому составу некоторых защитных покрытий [2, 3].

Достижение требуемого уровня работоспособности лопаточного аппарата ГТД связано с созданием работоспособной композиции «жаропрочный сплав - коррозионностойкое покрытие». Теоретическое обобщение и развитие представлений о введении легирующих элементов в сплавы покрытий, о влия-

нии новых элементов на характеристики структурной и фазовой стабильности, жаростойкости, термостойкости, на механические свойства жаропрочных сплавов имеет важное значение для проблемы увеличения долговечности турбинных лопаток современных ГТД. Поэтому исследования по установлению взаимосвязи химического состава и структуры сплавов с указанными свойствами является актуальной задачей, особенно для вновь разрабатываемых сплавов с учетом специфики их применения.

Экспериментальные методы синтеза состава новых сплавов отличаются трудоемкостью и требуют больших затрат времени и ресурсов. Достоверные значения коэффициентов диффузии для многокомпонентных многофазных сплавов, а также для новых систем «покрытие – основной сплав» как правило, не известны, что ограничивает применение расчетных методов.

Задача прогнозирования свойств и синтеза сплава особенно сложная и в настоящее время сформулированы лишь пути, на которых ожидается получение необходимой информации. Отсутствие надежного и экономичного метода прогнозирования состава и ресурса покрытий затрудняет определение допустимых сроков эксплуатации двигателя и снижает надежность лопаточного аппарата.

Таблица 1

Химический состав некоторых защитных покрытий лопаток современных газовых турбин

№	Наименование покрытия	Состав, %				
1	PWA 73	44,5 Ni	48,2 Al	6,5 Co	0,8 Cr	–
2	RT 22	35,0 Ni	42,8 Al	15,7 Pt	4,8 Co	1,8 Cr
3	SS82A	23,4 Ni	55,0 Al	13,3 Pt	3,7 Co	4,7 Cr
4	MDC 150L	48,8 Ni	40,1 Al	3,7 Pt	5,1 Co	2,2 Cr
5	СДП 3А	Co	22-24 Cr	11-13 Al	0,2-0,5 Y	–
6	СДП 6	Co	6-10 Ni	22-24 Cr	11-13 Al	0,3-0,5 Y
7	СДП 8	Co	0-2 Ni	25-28 Cr	9-11 Al	0,2-0,5 Y
8	СДП 11	Co	0-2 Ni	28-32 Cr	5-7 Al	0,3-0,5 Y
9	СДП 11А	Co	0-2 Ni	24-26 Cr	3,5-5,0 Al	0,3-0,6 Y
10	СДП 2	Ni	20,0 Cr	11,0 Al	Y	–
11	СДП 12	Co	20-25 Ni	22-24 Cr	9-11 Al	0,3-0,5 Y
12	СДП 13	18-20 Co	Ni	35-38 Cr	4-5 Al	0,2-0,5 Y
13	СДП 1	Ni	20 Co	20,0 Cr	11,0 Al	Y
14	СДП 3	Co	20,0 Cr	11,0 Al	Y	–
15	СДП 4	Ni	10 Co	20,0 Cr	11,0 Al	Y
16	ВСДП-11	Al	5,0 Si	1,5 Y	–	–
17	АТД-2	65Co	24Cr	13Al	0,35Y	–
18	АТД-4	67Co	21Cr	12Al	0,35Y	–
19	АТД-5	70Co	18Cr	11Al	0,4Y	–
20	АТД-6	72Co	18Cr	9Al	0,5Y	–
21	АТД-12	61Co	27Cr	11Al	0,3Y	–
22	АТД-14	65Co	30Cr	5Al	0,4Y	–

Таким образом, возникает необходимость в эффективных методах прогноза состава сплавов с необходимым комплексом свойств, который рационально сузит область поиска. Поиски новых высокотемпературных покрытий связаны, прежде всего, с оптимизацией химического состава новых композиций, с использованием принципиально новых физических эффектов, а также с разработкой и освоением новых технологических процессов и вновь создаваемых покрытий. В этой связи использован новый подход к проблеме прогнозирования свойств покрытий, опирающийся на возможности современных компьютерных технологий и применение различных методов идентификации. Для исследования структуры и физико-химических свойств сплавов, а также анализа возможности получения некоторых твердых растворов была собрана информация о различных микроскопических характеристиках элементов входящих в состав покрытий. Многие объемные свойства атомов элементов связаны с такими характеристиками, как радиус атомов, типы кристаллической решетки элементов, электронная конфигурация и расположение энергетических уровней атома, ионный радиус и электроотрицательность по Полингу, энергия ионизации атома и др. В среде пакета прикладных программ «STATISTICA» был собран банк данных, содержащий физико-химические характеристики более чем о 508 сплавах покрытий глубокой поиска более 50 лет, по состоянию на 2007 год [3]. На первом этапе проведен анализ состава сплава самого защитного покрытия и материала лопатки с точки зрения размерного фактора и типа кристаллической решетки. Выявлен металл, составлявший основу сплава (в %), его атомный радиус и тип кристаллической решетки. Определен размерной фактор, т.е. отличие радиусов атомов, входящих в сплав других элементов от основного элемента [4]:

$$R_{\max/\min} = R_{\text{осн.мет}} \pm 0,15R_{\text{осн.мет}}.$$

Элементы, атомные радиусы которых лежат в интервале $R = R_{\min} \div R_{\max}$, будут составлять твердый раствор.

Из проведенного анализа химических составов сплавов и защитных покрытий лопаток газовых тур-

бин выявлены компоненты, которые при удовлетворении поставленных критериев могут входить в виде твердого раствора замещения в кристаллическую решетку сплава покрытия и самой лопатки, т.е. иметь улучшенную адгезию. При неудовлетворении требуемых критериев, элементы сплава будут образовывать сложную структуру, как твердый раствор внедрения или, чаще всего, чисто механическую смесь, что не будет способствовать термической и структурной стойкости покрытия.

Следовательно, для повышения эксплуатационной надежности покрытий следует добиваться двухсторонней диффузии, которая может быть достигнута при соблюдении размерного фактора, когда атомные радиусы элементов покрытия отличаются не более чем на 15% от радиусов атомов элементов покрываемого сплава, и если элементы покрытия и покрываемого сплава имеют одинаковый тип кристаллической решетки [4].

Таким образом, при математическом моделировании состава жаропрочного покрытия на первом этапе решалась проблема выбора факторов, определяющих растворимость друг в друге элементов и наиболее перспективных компонентов сплава для включения в математическую модель. С этой целью в базе данных «STATISTICA» был создан банк данных, содержащий физические характеристики атомов 23 элементов системы Менделеева, которые использованы в качестве параметров модели, разрабатываемый на следующем этапе. Предварительно были проанализированы фазы твердого раствора, сделаны прогноз и оценка качества эмпирических параметров.

При математическом моделировании влияния химического состава на жаропрочность была использована объемная модель, т.е. 23 – мерное пространство признаков. Отличительным признаком каждого сплава послужил его химический состав, т.е. процентное содержание каждого легирующего элемента, входящего в состав покрытия. Набор химических элементов принят за вектор признаков. Это позволило каждый сплав представить в пространстве признаков отдельной точкой [5].

Таблица 2

Корреляции между элементами, входящими в состав сплавов покрытий

[illegible]

Для решения поставленной задачи использован корреляционный анализ следующих элементов, входящих в состав сплавов: $x_1=\text{Co}$; $x_2=\text{Cr}$; $x_3=\text{Ni}$; $x_4=\text{Al}$; $x_5=\text{Y}$; $x_6=\text{Ta}$; $x_7=\text{W}$; $x_8=\text{Si}$; $x_9=\text{Hf}$; $x_{10}=\text{Mn}$; $x_{11}=\text{Mo}$; $x_{12}=\text{Ti}$; $x_{13}=\text{Zr}$; $x_{14}=\text{Pt}$; $x_{15}=\text{C}$; $x_{16}=\text{La}$; $x_{17}=\text{Re}$; $x_{18}=\text{Nb}$; $x_{19}=\text{Fe}$; $x_{20}=\text{V}$; $x_{21}=\text{Sn}$; $x_{22}=\text{Ru}$; $x_{23}=\text{Ir}$.

В результате корреляционного анализа были получены коэффициенты при парных взаимодействиях рассматриваемых элементов, которые приведены в табл. 2. Выводы о существенности линейных зависимостей между элементами покрытия были сделаны по оценкам значений коэффициентов корреляции. Анализ корреляционной таблицы показывает, что наиболее значимые связи существуют между x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_6 , x_7 , x_{12} , x_{14} , x_{22} . Следовательно, для состава модели сплава покрытия должны быть рассмотрены вышеперечисленные переменные. При этом ошибка, нормированная по теоретической оценке, составляла 0,015597. На основе регрессионного анализа построена многомерная линейная модель, в которой в качестве выходного параметра был принят x_1 ($x_1=y$):

$$y = 0,898582 - 0,518x_2 - 0,816x_3 - 0,815x_4 - 0,669x_6 - 0,193x_7 - 0,885x_{12} - 0,899x_{14} - 0,672x_{22}.$$

Проверка адекватности перечисленных моделей осуществлялась по коэффициентам детерминации и множественной корреляции, а также по критерию Фишера. Коэффициент детерминации для рассматриваемой модели составил $R=0,956$, коэффициент множественной корреляции $R=0,918$, значимый по критерию Фишера.

Такой подход позволил эффективно использовать корреляционно-регрессионный анализ по формированию состава и количественных соотношений элементов защитного покрытия в первом приближении, что было очень важно для планирования эксперимента до получения требуемого качества. На основе выбора элементов, имеющих наибольшие корреляционные связи с определением диапазонов их процентного содержания, анализа физико-химических характеристик с учетом атомного радиуса и типа кристаллической решетки получено новое высокотемпературное защитное покрытие для лопаток

газовых турбин авиационных двигателей следующего химического состава: Cr-Al-Pt-Me .

Достоверность полученных результатов была подтверждена экспериментальными исследованиями. Для проведения исследований использован метод планирования эксперимента, на основе чего были уточнены диапазоны процентного содержания каждого выбранного элемента, выявлены диапазоны температур, время и количество проводимых опытов. Применение метода планирования эксперимента при исследовании синтеза сплавов защитных покрытий позволил сократить время и материальные затраты.

Рентгенофазовым и термическим анализами исследованы фазовые превращения полученного сплава, результаты которых подтвердили корректность разработанного подхода с использованием корреляционно-регрессионного анализа.

Литература

1. Елисеев Ю.С. Перспективные технологии производства лопаток газотурбинных двигателей // Двигатель. – 2001. – №5 (17). – С. 4-8.
2. Елисеев Ю.С., Абраимов Н.В., Крымов В.В. Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиационном двигателестроении. – М.: Высш. шк., 1999. – 291 с.
3. Самедов А.С., Усубалиев Т.Б. Тепловая защита авиационных газотурбинных двигателей. Научные основы выбора состава покрытий // Химические проблемы. – Баку: Институт химических проблем НАН Азербайджана, 2007. – № 3. – С. 436-443.
4. Пашаев А.М., Самедов А.С., Усубалиев Т.Б., Рзаев Т.Б., Ганбаров Д.М. Способ получения защитных покрытий на лопатках газовых турбин. / Патент АР № а 20070173, 2007.
5. Дерффель К. Статистика в аналитической химии – М.: Мир, 1994. – С. 159-183.

Поступила в редакцию 26.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф., академик А.М. Алиев, Институт химических проблем НАН Азербайджана, Баку.

УДК 537.58 : 533.9.07

С.И. ПЛАНКОВСКИЙ, Е.К. ОСТРОВСКИЙ, Е.В. ЦЕГЕЛЬНИК*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина***ИМПРЕГНИРОВАННЫЙ КАТОД НА ОСНОВЕ СКАНДАТА БАРИЯ**

Проблемы совершенствования электрофизических установок, использующих электронные пучки большой интенсивности, требуют разработки и исследования нового класса высокотемпературных термоэмиссионных материалов с малой работой выхода электрона. В работе представлены результаты исследования термоэмиссионных свойств катодов, полученных пропиткой вольфрамовой губки сложным оксидом $Ba_3Sc_4O_9$. Исследование отравляемости нагретого катода атмосферным воздухом и многократные контакты холодного катода с атмосферой позволяют рекомендовать такой катод для разборных электрофизических установок: ускорителей заряженных частиц, плазменных атмосферных генераторов (плазмотронов) и электрореактивных двигателей космических летательных аппаратов.

катод, вольфрам, пористая вольфрамовая губка, скандат бария, работа выхода электрона, термоэмиссия

Введение

Постановка проблемы и ее связь с научно-техническими задачами. Совершенствование электрофизических установок (ускорителей плазмы, ускорителей заряженных частиц, плазмотронов и др.), использующих в основе своей работы термоэлектронные катоды, связано с успехами в разработке новых термоэмиссионных материалов.

Одной из важнейших проблем в настоящее время является задача вывода в атмосферу плазмы, которая формируется в термоэмиссионном полумесяце катода плазмотрона.

При работе термоэмиссионных катодов в плазмотронах важнейшей проблемой становится устойчивость к отравлению материала катода при контакте с атмосферным воздухом, как в процессе работы плазмотрона, так и в период его отключения. Известно, что в состав сухого атмосферного воздуха входят O_2 (23,1 масс. %), N_2 (75,5 масс. %), CO_2 (0,046 масс. %). В воздухе находятся также пары H_2O (до 1,3 масс. %).

В условиях такого агрессивного воздействия разработка новых катодных материалов и совершенствование технологии их изготовления являются весьма актуальными.

Анализ последних исследований и публикаций. Возможность использования термоэмиссионных катодов в сильноточных дуговых плазмотронах определяется, прежде всего, максимально допустимым уровнем температуры катода до 1560 К при сохранении низкой работы выхода электрона $\phi_0 = 2,1...2,5$ эВ, малой скоростью испарения и устойчивостью к отравлению атмосферным воздухом.

В настоящее время в качестве эмиссионно-активных материалов с низкой работой выхода в электронной технике широко применяются смешанные оксиды на основе щелочноземельных металлов ($BaO + SrO + CaO$). Максимальная рабочая температура таких катодов 1300 К. Работа выхода электрона такого оксидного катода минимальна среди всех типов эффективных термокатодов и может быть рассчитана по формуле [1]

$$\phi_T = 1,1 + 4 \cdot 10^{-4} T.$$

Оксидным катодам свойственно искрение при отборе токов плотностью ≈ 1 А/см². Это связано с перегревом поверхностного слоя полупроводникового оксидного катода отбираемым электронным током. Искрение, если его ничем не ограничить, может привести к быстрому полному разрушению катода.

Верхний предел рабочей температуры оксидного катода может быть повышен до ~ 1400 К переходом к технологии импрегнированных (пропитанных) катодов. По этой технологии пористая вольфрамовая (W) губка пропитывается расплавом тройного оксида ЩЗМ ($BaO + SrO + CaO$) [2]. Технология изготовления таких катодов сложнее, чем обычных оксидных катодов, но при непрерывном токоотборе от $0,5 \text{ А/см}^2$ и выше их срок службы превосходит срок службы оксидных катодов.

Общий вывод, который следует из проведенных расчётов и экспериментальных данных, состоит в том, что необходимый уровень плотности тока эмиссии электронов $j = 9 \dots 10 \text{ А/см}^2$ в течении ресурса $1000 \dots 2000$ ч не может быть получен на импрегнированных катодах, пропитанных эмиссионно активными составами, разработанными для вакуумных электронных приборов. Причина в том, что рабочая температура катода плазмотрона 1550 К приближается к температурам плавления составов пропитки [2]. Так температуры плавления для составов:

- алюмината бария $3BaO \cdot 0,5CaO \cdot Al_2O_3$ – 1750 К;
- алюмосиликата бария $3BaO \cdot CaO \cdot 0,25SiO \cdot Al_2O_3$ – 1820 К;
- вольфрамата бария $BaWO_6$ () – 1920 К.

Высокая рабочая температура катода плазмотрона вызывает интенсивное испарение BaO с поверхности катода, а взаимодействие W с атомарным кислородом увеличивает разрушение вольфрамовой губки. Оба этих процесса значительно сокращают срок службы таких катодов в плазмотроне до сотен часов.

Результаты исследований и их обсуждение

В работе проведен поиск и исследование материала катода для плазмотрона с повышенной температурой плавления (выше 2000 К) в группе соединений оксидов ЩЗМ с оксидами редкоземельных металлов (РЗМ).

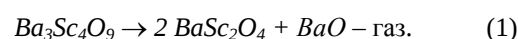
Оксид бария (BaO) образует с оксидами ланто-

ноидов (от La – лантана до Lu – лютеция) и оксидом скандия (Sc_2O_3) соединения с большим содержанием оксида бария. Большое содержание BaO делает перспективным именно соединение $Ba_3Sc_4O_9$ в качестве термоэмиссионного материала для катодов плазмотронов.

Важным фактором, определяющим срок службы катодов атмосферных плазмотронов, является устойчивость их при контакте с воздухом и особенно с влагой, содержащейся в атмосфере, которая может достигать $2 \text{ мас. \%}$. В это смысле, как показывают эксперименты, соединение $Ba_3Sc_4O_9$ единственное в системе сложных оксидов РЗМ, которое не гидролизуется даже парами воды при 25°C и относительной влажности 100% .

По данным работы [3] катоды на основе $Ba_3Sc_4O_9$ и молибденового порошка при 1100°C имеют работу выхода электронов $\phi_T = 2$ эВ. Вторая возможная фаза в таком соединении с недостатком Ba – это $BaSc_2O_4$. Катоды структуры $BaSc_2O_4$ и молибденового порошка отличаются высокой работой выхода электронов $\phi_T = 3$ эВ и не могут представлять практического интереса как эффективные термоэммиттеры.

Термическую устойчивость структуры $Ba_3Sc_4O_9$ можно характеризовать величиной давления паров BaO над поверхностью катода при реакции



Давление паров оксида бария (BaO) газа, образующегося над поверхностью $Ba_3Sc_4O_9$ по реакции (1), даётся формулой

$$\lg P_{BaO} = -24980/T + 10,5 \text{ мм. рт.ст.} \quad (2)$$

и представлено графиком на рис.1.

Рассчитанные значения давления паров (BaO) над скандатом бария на 1 порядок ниже, чем над алюминатным катодом (BaO) $0,5 CaO Al_2O_3$, что делает перспективным использование соединения $Ba_3Sc_4O_9$ в плазмотронах.

По оценкам рабочая температура скандат бариевого катода в режиме низковольтной диффузной

дуги не превышает 1250°C (1523 К). При такой температуре давление (BaO) под поверхностью катода $P = 1 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст.

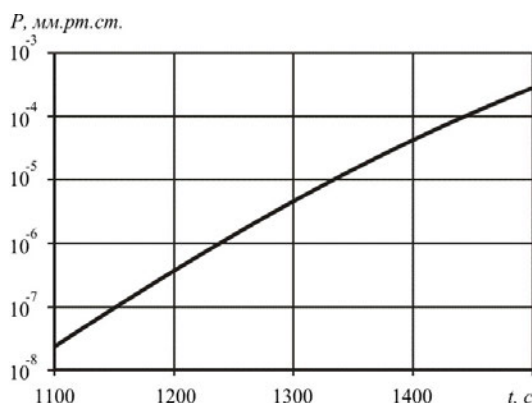


Рис. 1. Давление паров оксида бария (BaO)_г над твердой поверхностью скандата бария $Ba_3Sc_4O_9$

Несмотря на неравновесный характер процесса испарения (BaO) с открытой поверхности, для определения скорости испарения можно использовать формулу Ленгмюра [4]

$$G = \frac{P}{\sqrt{2\pi\mu RT}}, \text{ [моль/((м}^2\cdot\text{с))]}, \quad (3)$$

где P – равновесное давление пара (BaO); $R = 8.31$ Дж/(моль·К); μ – молярный вес газовой молекулы (для BaO составляет 0,153 кг/моль).

Расчёт скорости испарения BaO со скандатного катода при рабочей температуре 1523 К по (3) даёт значение $G = 9 \cdot 10^{-7}$ кг/(м²·с).

Экспериментально скорость испарения катода проверялась весовым способом. Для этого катоды предварительно взвешивались на аналитических весах с точностью 10^{-4} г. Повторное взвешивание через 105 ч работы катода при температуре $T = 1523$ К показало значение скорости испарения $G = 5 \cdot 10^{-8}$ кг/(м²·с). Такое расхождение расчёта и эксперимента [5] требует, более длительных во времени дополнительных экспериментальных исследований.

В работах [6 – 8] изучались катоды, приготовленные в виде покрытий эмиссионно-активного состава на вольфрамовой ленте с малым запасом эмиссионно-активного состава. Такая технология

изготовления катодов может быть использована для проведения экспресс измерений эмиссионных свойств материала катода в вакууме.

Полученные результаты стимулируют разработчиков катодов на совершенствование, как состава высокотемпературных сложных оксидов, так и самое главное, технологии изготовления импрегнированных катодов.

Технология изготовления катода $Ba_3Sc_4O_9 + W$

У таких катодов на основе оксидов ЦЗМ заранее изготовленная губка из W , $W - Re$ или $W - Mo$ пропитывается эмиссионно-активным составом.

Для получения катодов на основе скандата бария и вольфрама была использована следующая технология. На первом этапе карбонат $BaCO_3$ и оксид скандия Sc_2O_3 марки «г», смешивали в соотношении, соответствующем стехиометрическому составу соединения $Ba_3Sc_4O_9$. Затем состав прессовали в образцы диаметром 60 мм и высотой 5 мм. Синтез проводили нагревом на воздухе при 1400°C в течение 2 ч. После измельчения образцов проводилось повторное прессование и спекание при 1400°C в течение 4 ч для улучшения гомогенности состава. Рентгенофазовым анализом установлено, что полученный материал однофазный (все линии соответствуют соединению $Ba_3Sc_4O_9$). В дальнейшем синтезированный материал измельчали до размеров частиц 40...60 мкм.

По данным исследований показано, что изменение пористости губки в пределах 20...50% не существенно влияет на ток эмиссии электронов. Существенным недостатком всех пропитанных катодов является сложность выполнения условий пропитки. Важнейшее из них – это длительное, медленное разложение карбонатов с одновременным обезгаживанием нагреваемого катода. Этот процесс весьма критичен к температуре, ускорение нагрева без хорошего обезгаживания $P = 5 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. приводит к нежелательному глубокому окислению вольфрамовой губки.

В нашем случае пропитка вольфрамовой губки пористостью 30% проводилась в расплаве $Ba_3Sc_4O_9$ в условиях вакуума $2 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст. при нагреве электрической дугой в режиме тлеющего разряда в среде аргона.

Экспериментальный стенд измерения термоэмиссии катодов

Экспериментальный стенд подробно описан в работе [5] и содержит:

- вакуумную камеру с расположенным внутри экспериментальным диодом (катодом и анодом);
- электромагнитный высоковакуумный насос НОРД-100 с уровнем рабочего вакуума $10^{-8} \dots 10^{-4}$ мм.рт.ст.;
- блок накала катодов;
- генератор высоковольтных прямоугольных импульсов $U = 0,25 \dots 8$ кВ, регулируемой длительности $\tau = 5 \dots 2500$ мкс и частотой посылок импульсов $\nu = 1 \dots 400$ Гц.

Соотношение действительной и яркостной температур для катода $Ba_3Sc_4O_9 + W$

Симметричная конструкция нагревателя обеспечивала равномерный подвод тепла к боковой поверхности цилиндрического катода. Система тепловых экранов позволяла получить одинаковую температуру на эмиссионном торце цилиндрического катода и со стороны измерения температуры. Температура на поверхности катода измерялась оптическим пирометром ЛОП-72. Нижний предел температуры измерений 760°C . Соотношение между яркостной и действительной температурами для исследуемого катодного материала установлено с помощью модели абсолютно черного тела в материале катода. Поправка к яркостной температуре для катода $Ba_3Sc_4O_9 + W$ приведена на рис. 2.

Активирование катода

Активирование термоэмиссионных катодов в высоком вакууме при его подогреве до рабочих температур не только уменьшает работу выхода электрона с катода, но и улучшает равномерность

эмиссии электронов по поверхности катода. Процесс активирования при повышении температуры на катоде способствует освобождению кристаллов $Ba_3Sc_4O_9$ от избыточного O_2 и CO_2 и приводит к появлению избытку Ba в объеме кристаллов и на поверхности катодов. Это приводит к концентрации электронов на донорных уровнях эмиссионно-активных кристаллов $Ba_3Sc_4O_9$ как внутри, так и на поверхности кристаллов.

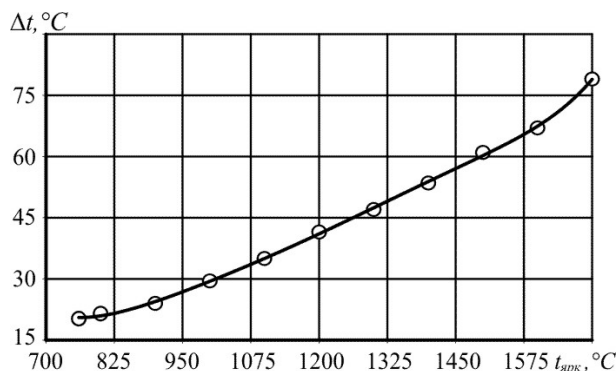


Рис. 2. Поправка к яркостной температуре для $Ba_3Sc_4O_9 + W$ катода

В процессе активирования не допускалось понижение вакуума хуже $P = 5 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. Окончание процесса активирования устанавливалось проверкой стабильности тока эмиссии электронов в течении последних часов работы. Как правило, окончательная температура активирования не превышает 1550 K . В процессе активирования при отборе тока эмиссии наблюдаются всплески микропробоев на столе импульса тока. Это указывает на неравномерность процесса активирования по всей поверхности катода. После окончания активирования нестабильности на столе импульса исчезали, что характерно для всех $W - Ba$ катодов.

Процессы, происходящие на поверхности вольфрамовой губки

Вопрос о механизме работы катодов, пропитанных смешанными оксидами (BaO , SrO , CaO), а также сложных оксидов типа скандатов и гафнатов бария, на сегодняшний день можно считать в основном решенным. Доказано, что эмиттирующая поверхность вольфрамовой губки катода покрыта слоем полупроводниковых кристаллитов в виде твер-

дых растворов $(BaSrCa)O$ с размерами кристаллитов $\sim 0,5$ мкм, либо кристаллитов $(BaSc)O$. Кристаллиты покрывают и металлическую часть поверхности катода, при этом образуя не двумерные, а трёхмерные соединения, толщиной до сотни ангстрем. Пропитанный оксидами W - Ba катод при низких температурах следует рассматривать как донорный полупроводник с поверхностными донорными уровнями, связанными с избытком Ba и кислорода на эмитирующей поверхности.

На рис. 3 представлены эмиссионные изображения активированных пропитанных катодов при температуре $T = 1200$ К, которые показывают, что 50% поверхности занято пятнами с работой выхода $\phi_1 = 2,3$ эВ на которых заметны более мелкие пятна с особо большой активностью $\phi_2 = 1,9$ эВ. Пятна с малой работой выхода в основном располагаются вокруг пор по границам кристаллитов полупроводников [1].

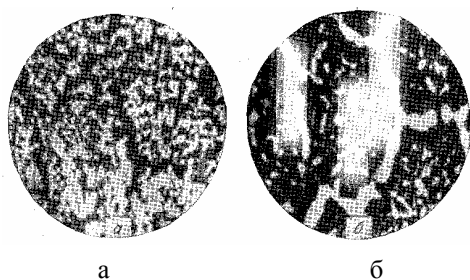


Рис. 3. Эмиссионное изображение импрегнированного катода а – до активирования; б – после активирования

Термоэлектронная эмиссия $Ba_3Sc_4O_9 + W$ в вакууме. Обработка результатов измерений

Экспериментально эмиссия электронов изучалась в экспериментальном диоде плоской конструкции, позволяющей контролировать температуру на эмитирующей поверхности катода в условиях высокого вакуума. Измеряемая зависимость плотности тока эмиссии j (A/cm^2) от напряжения U (В) в импульсе при постоянной истинной температуре эмитирующей поверхности катода ($T_{ист}$) носит название вольтамперной характеристики диода (ВАХ). На ВАХ (рис. 4) отмечаются две области: I – область

отрицательного объемного заряда электронов вблизи катода (нелинейный участок вольт-амперной характеристики) и область токов насыщения – II. В области I линии напряженности электрического поля, начинающиеся на аноде, не доходят до катода и заканчиваются на отрицательных объемных зарядах электронов вблизи катода. При отборе больших токов эмиссии величина объемного заряда у катода оказывается достаточно большой, а напряженность поля у поверхности катода имеет отрицательный знак и препятствует прохождению электронов на анод (рис. 4).

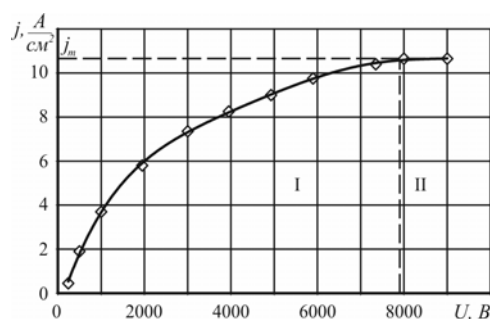


Рис. 4. Вольтамперная характеристика катода после $Ba_3Sc_4O_9 + W$ губка активирования.

$T_{ист} = 1567$ К, $j_m = 10,65$ А/см²:

I – область токов, ограниченных объемным зарядом электронов;
II – область токов насыщения

Распределение напряжения в плоском диоде с учётом объёмного заряда электронов, представленное на рис. 5, позволяет сформулировать подход к определению напряжённости поля E у поверхности катода и величины, приведенной к нулевому полю плотности тока j_0 .

Для вольтамперной характеристики максимальное значение напряжения высоковольтных импульсов не превышает $U = 9 \cdot 10^3$ В. Такое напряжение соответствует токоотбору с максимальной плотностью тока эмиссии j_m (рис. 4).

Распределение напряжения U в диоде, соответствующее границе областей I и II, описывается кривой 4 на рис. 5. Только в этом случае напряжённость поля катода $\vec{E} = -gradU$ равна нулю у поверхности катода.

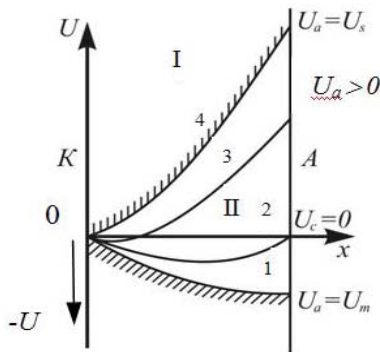


Рис. 5. Распределение потенциала в зазоре катод-анод плоского диода в режиме объемного заряда электронов:

A – анод; K – катод;

I – область токов насыщения;

II – область токов, ограниченных пространственным зарядом;

4 – напряжение на границе двух областей (I, II)

Из экспериментальной ВАХ следует, что с ростом напряжения выше 8000 В плотность тока насыщения j_m непрерывно возрастает при увеличении электрического поля E у поверхности катода. Это явление получило название нормального эффекта Шоттки.

Наиболее существенное влияние эффекта Шоттки на величину плотности тока эмиссии катода сказывается в дуговом разряде.

Для дугового разряда характерным является наличие узкой зоны прикатодного падения потенциала U_k , протяженностью $d = 10^{-6}$ м.

В случае использования вольфрам-бариевого (W-Ba) катода с работой выхода электрона $\phi = 2,3$ эВ и плазмообразующего газа Ag с потенциалом ионизации $U_i = 15,7$ эВ, прикатодное падение потенциала $U_k = 10$ В. Следовательно, напряженность электрического поля в прикатодной зоне составляет $E_k = U_k/d = 1 \cdot 10^7$ В/м.

Такой напряженности поля явно недостаточно для автоэлектронной эмиссии, которая требует напряженности электрического поля $E \geq 10^8$ В/м.

Уравнение термоэлектронной эмиссии Ричардсона-Дэшмана с поправкой на нормальный эффект Шоттки для полупроводниковых катодов имеет вид

$$j = 120,4T^2 \exp \left[-e\tilde{\phi}_T - e \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{\epsilon-1}{\epsilon+1} \right)} / (kT) \right], \quad (3)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ (Кл) – заряд электрона; $\epsilon = 5$ – диэлектрическая проницаемость оксидов ШЗМ; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ (Ф/м); $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ (Дж/К); $\tilde{\phi}_T$ – эффективная работа выхода электрона в (эВ) при температуре T ; E – напряженность электрического поля у поверхности катода (В/м); j – плотность тока насыщения электронов при наличии электрического поля у поверхности катода (А/см²) [5].

Вклад отдельно нормального эффекта Шоттки выделим, преобразовав уравнение (3) к виду

$$j = 120,4T^2 \exp \left(-\frac{e\phi_T}{kT} \right) \exp \left[-\sqrt{\frac{e^3 \left(\frac{\epsilon-1}{\epsilon+1} \right) \sqrt{E}}{4\pi\epsilon_0 k^2} \frac{\sqrt{E}}{T}} \right], \quad (4)$$

где $j_0 = 120,4T^2 \exp \left(-\frac{e\phi_T}{kT} \right).$ (5)

Выражение (5) представляет собой уравнение Ричардсона-Дэшмана без учета поправки на эффект Шоттки и определяет плотность тока эмиссии электронов j_0 (А/см²) в области токов насыщения при $E = 0$ у поверхности катода. Подстановка констант в уравнение (4) упрощает запись уравнения Ричардсона-Дэшмана с поправкой Шоттки для полупроводниковых катодов

$$j = j_0 \exp \left(\frac{0,35916\sqrt{E}}{T} \right). \quad (6)$$

Для рабочей температуры скандатного катода $T = 1553$ К; $j_0 = 10,65$ А/см² и напряженность поля у катода $E = 10^7$ В/м расчёт плотности тока эмиссии по уравнению (6), учитывающем поправку на нормальный эффект Шоттки даёт значение $j = 22,2$ А/см². Как видно, наличие большой напряженности электрического поля вблизи катода увеличивает плотность тока в 2 раза.

Наиболее важной характеристикой катодов плазмотронов является устойчивость электронной эмиссии к отравлению атмосферным воздухом в процессе

работы плазмотрона в горячем состоянии. Такие измерения для скандатного катода представлены на рис. 6 в виде относительного изменения плотности тока эмиссии электронов j/j_0 в зависимости от давления атмосферного воздуха в области катода при рабочей температуре катода $T = 1572 \text{ К}$ ($j_0 = 9 \text{ А/см}^2$).

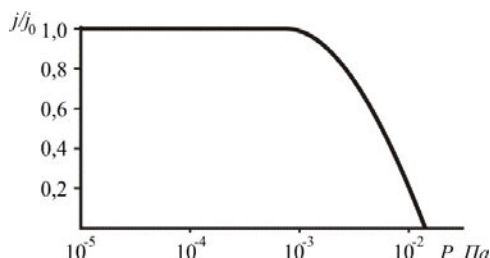


Рис. 6. Изменение эмиссии пропитанного катода ($Ba_3Sc_4O_9 + W$) при напуске атмосферы

Зависимость $j/j_0 = f(P)$ позволяет установить допустимое парциальное давление атмосферного воздуха в области катода плазмотрона, не вызывающего глубокого отравления катода – это $P = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

Выводы

1. Разработан синтез соединения $Ba_3Sc_4O_9$ и технология пропитки W губки этим соединением в расплаве.
2. Экспериментально установлено соотношение яркостной и действительной температур для катода в рабочем диапазоне температур $760 \dots 1500^\circ\text{С}$.
3. Исследованы термоэмиссионные свойства импрегнированных катодов из $Ba_3Sc_4O_9 + W$ в режиме отбора больших токов эмиссии электронов при высоких температурах катода.
4. Установлено влияние нормального эффекта Шоттки на величину плотности тока эмиссии электронов с катода в плазме дугового разряда.
5. Экспериментально изучена степень отравления импрегнированного катода $Ba_3Sc_4O_9 + W$ атмосферным воздухом. Определён предел парциального давления атмосферного воздуха в области катода $P = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, выше которого катод испытывает глубокое отравление.

Работа выполнена при поддержке ДФФД в рамках проекта Ф25.4/112.

Литература

1. Мойжес Б.Я. Физические процессы в оксидном катоде. – М.: Наука, 1968. – 479 с.
2. Киселев А.Б. Металлооксидные катоды электронных приборов. – М.: МФТИ, 2001. – 240 с.
3. Синтез и исследование термической устойчивости и эмиссионной способности скандатов бария / И.В. Юдинская, М.В. Паромова, Л.Н. Лыкова, В.А. Левицкий // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. – 1975. – Т. 11, № 10. – С. 1805-1808.
4. Авербэ Р.Г., Никольский С.С. О сохранении постоянства состава двойных сплавов при их исполнении с открытой поверхности в вакуум // Теплофизика высоких температур. – 1963. – Т. 1, № 1. – С. 39-44.
5. Разработка методов проектирования и технологических процессов изготовления высокоресурсных плазменных генераторов: Отчет о НИР (заключит.) // Х.: НАКУ «ХАИ». – № ГР 0104U003145. – 2005. – 254 с.
6. Прямокальные катоды на основе сложных соединений бария / Е.Т. Кучеренко, З.П. Королева, С.Н. Персиянова и др. // Электронная техника. Сер. 3. Газоразряд. приборы. – 1970. – № 4. – С. 86-90.
7. Кучеренко Е.Т., Макосеевская Л.Н. Исследование эмиссионных характеристик и теплоты выпаривания прямокальных катодов с новым эмиссионным покрытием // Вестник Киевского университета. Серия физика. – 1972. – № 13. – С. 104-108.
8. Исследование работы прямокальных катодов на основании сложных соединений бария в среде водорода и инертных газов / Е.Т. Кучеренко, З.П. Королева, С.Н. Персиянова и др. // Вестник Киевского университета. Серия физика. – 1973. – № 14. – С. 105-108.

Поступила в редакцию 25.12.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

УДК 621.438:504.3.064

В.П. ГЕРАСИМЕНКО, В.В. ОСИПОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ЗАГРЯЗНЕНИЕ АТМОСФЕРЫ ВЫХЛОПНЫМИ ГАЗАМИ
ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Описаны основные мероприятия по улучшению экологических характеристик газотурбинных двигателей и установок. Предложена методика расчета вредных веществ в выхлопных газах ГТД и установок при сгорании различных углеводородных топлив по измерениям их концентраций газоанализаторами в сухих продуктах сгорания. На основе модели "суммарной реакции" в цепном механизме Зельдовича получены уравнения Аррениуса скорости образования окислов азота в камере сгорания ГТД. В полученных уравнениях скорости образования окислов азота учтен также механизм образования быстрых окислов азота.

газотурбинный двигатель, вредные выбросы, загрязнение атмосферы, газоанализатор**Введение**

Озабоченность международной общественности экологическими катастрофами, начиная от кислотных дождей до аварий на атомных электростанциях и глобального потепления климата на Земле, – характерная проблема, связанная с обеспечением комфорта человека. Ужесточение международных норм, государственных и отраслевых стандартов по допустимым уровням выбросов в атмосферу требует комплексного подхода в решении данной проблемы. Снижение вредных выбросов в выхлопных газах энергетических и транспортных установок – одно из направлений ее решения в газотурбостроении. Оптимизация режимов работы, надлежащий контроль и техническое обслуживание установок в эксплуатации, подготовка топлив и рациональное регулирование систем топливопитания в значительной мере влияют на их экологические характеристики.

Формулирование проблемы. Мероприятия по снижению выбросов в выхлопных газах газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) определяются областью их использования: Создание малоэмиссионных многозонных камер сгорания [1] с пневмофорсунками и специальной стабилизацией пламени в авиационных ГТД [2, 3]. Впрыск воды-пара (STIG, "Водолей") в зону горения в ГТУ [4], использование каталитических камер сгорания [2]

или когерентных систем дожигания [5] и др.

Выбросы NO_x и CO прямопротивоположно зависят от большинства параметров в зоне горения (температуры, времени пребывания, объема зоны горения, расхода воздуха и др.), поэтому необходим поиск компромиссных решений при их минимизации. Примером являются зависимости массовых выбросов NO_x и CO от коэффициента избытка воздуха (рис. 1) [5] при использовании горелочных устройств с диффузионным смесеобразованием в дожигательных камерах. При $\alpha = 1,7 \dots 2,0$ выбросы NO_x и CO минимальны. Подобные зависимости можно ожидать и для основных камер сгорания ГТД.

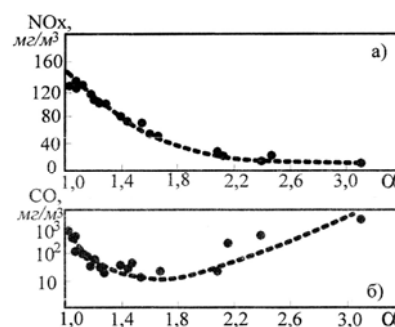


Рис. 1 Влияние α на образование NO_x и CO при горении природного газа

Цель статьи – описание путей учета и снижения загрязнения атмосферы выхлопными газами ГТД.

Области применения ГТД накладывают отпечаток на нормирование выбросов. Так, в авиации, согласно ICAO – Международной организации граждан

данской авиации, нормирование осуществляют в районе аэропортов в виде массы вредного вещества в выхлопных газах за взлетно-посадочный цикл, отнесенной к взлетной тяге. При этом пока не нормируется наносимый вред в крейсерском полете самолетов разрушением окислами азота защитного озонного слоя атмосферы от солнечного ультрафиолета, снижением прозрачности атмосферы за счет дымления двигателей и "парниковым эффектом".

Наземные ГТУ электростанций, газоперекачивающих агрегатов (ГПА), транспортных средств ввиду больших мощностей, продолжительностей работы, общего количества агрегатов, а следовательно, и объемов сжигаемого часто низкосортного топлива находятся под более пристальным вниманием по экологическим характеристикам. Специфика областей применения ГТД, видов производств, сортов топлив определяет и разнообразие этих характеристик. Принятая в авиации характеристика EI – индекс эмиссии, называемый как "удельный выброс", представляет собой количество вредного вещества, образованного при сгорании одного килограмма топлива (г/кг). Под "удельным выбросом" в газовой отрасли понимают количество вредного вещества, отнесенное к единице располагаемого тепла сжигаемого топлива (г/МДж), а массовую концентрацию вредного вещества принято оценивать в единицах измерения мг/м^3 или $\text{мг/н}\cdot\text{м}^3$ – количество вещества, содержащееся в одном кубическом метре выхлопных газов или "нормальном" кубическом метре при температуре 0°C и давлении 101,3 кПа. Применяют также единицы измерения вредных выбросов: объемные концентрации в % или ppm, мощность выбросов в г/с, валовый выброс и др. [2, 3, 6].

Методика учета загрязнения атмосферы

Существующие методики по учету вредных выбросов двигателей и энергетических установок отличаются в зависимости от видов топлив, принципов нормирования, единиц измерения и др., несмот-

ря на использование одних и тех же газоанализаторов. Поэтому целесообразно описать основные положения таких методик [6]. Объемные концентрации $[\text{CO}]$, $[\text{NO}]$, $[\text{NO}_2]$, $[\text{SO}_2]$ и др. измеряют газоанализатором в единицах ppm (10^{-6}). Эти концентрации пересчитывают в массовые ($\text{мг/н}\cdot\text{м}^3$) умножением на соответствующие плотности веществ при нормальных условиях ($t = 0^\circ\text{C}$; $p = 101,3 \text{ кПа}$):

$$C_{\text{CO}} = 1,25[\text{CO}]; \quad C_{\text{NO}_x} = 1,34[\text{NO}] + 2,05[\text{NO}_2]; \quad (1)$$

Концентрация NO_x в пересчете на диоксид азота:

$$C_{\text{NO}_x}^{\text{NO}_2} = C_{\text{NO}_2} + 1,53C_{\text{NO}}. \quad (2)$$

Одновременно с указанными концентрациями измеряют содержание кислорода $[\text{O}_2]$ и $[\text{CO}_2]$, позволяющих определять коэффициент избытка воздуха в сухих продуктах сгорания $\alpha_{\text{сн}}$.

Измеряемые на выходе ГТД концентрации веществ получают в сухих продуктах сгорания, поскольку непосредственно в приборе предусмотрено осушивание от влаги проб выхлопных газов для защиты от быстрого изнашивания электрохимических датчиков (сенсоров). Действительный коэффициент избытка воздуха α связан с коэффициентом избытка воздуха в сухих продуктах сгорания $\alpha_{\text{сн}}$ ("коэффициентом разбавления сухих продуктов"). Эта связь может быть получена анализом процесса горения топливо-воздушной смеси со структурной формулой углеводородного топлива C_nH_m по модели "суммарной реакции" [7] при полном сгорании топлива ($\eta_c \approx 1,0$), когда концентрации вредных веществ в продуктах сгорания составляют малые величины в сравнении с основными продуктами:

$$C_nH_m + \alpha \left(n + \frac{m}{4} \right) \left[\text{O}_2 + \left(\frac{1}{K_0} - 1 \right) N_2 \right] = n\text{CO}_2 + \frac{m}{2} H_2O + \left(n + \frac{m}{4} \right) \left[(\alpha - 1) \text{O}_2 + \left(\frac{1}{K_0} - 1 \right) \alpha N_2 \right], \quad (3)$$

где K_0 и $(1 - K_0)$ – объемные доли O_2 и N_2 в воздухе; $\frac{1}{K_0} \left(n + \frac{m}{4} \right) = L_0$ – объемный стехиометрический коэффициент. Формула (3) записана для горе-

ния одной молекулы углеводородного топлива C_nH_m в воздухе. Отсюда объемные концентрации кислорода во влажных и сухих продуктах сгорания:

$$[O_2] = \frac{(n+m/4)(\alpha-1)}{\alpha L_0 + m/4}; [O_2]_{cn} = \frac{(n+m/4)(\alpha-1)}{\alpha L_0 - m/4}. \quad (4)$$

Отношение этих концентраций называют "коэффициентом соотношения объемных расходов влажных и сухих продуктов сгорания"

$$K_{cv} = [O_2]/[O_2]_{cn} = (\alpha L_0 - m/4)/(\alpha L_0 + m/4). \quad (5)$$

Коэффициент избытка воздуха в сухих продуктах сгорания α_{cn} , как отношение объемной концентрации кислорода в исходном воздухе к величине, на которую уменьшилась эта концентрация в результате окисления топлива, определяют по формуле

$$\alpha_{cn} = K_0 / (K_0 - [O_2]_{cn}). \quad (6)$$

Подставив в эту формулу выражение (4) для $[O_2]_{cn}$ получим связь коэффициентов избытка воздуха в сухих и влажных продуктах сгорания:

$$\alpha = \alpha_{cn} - K_0 (\alpha_{cn} - 1) / (1 + 4n/m). \quad (7)$$

При сопоставлении экологических характеристик ГТД, кроме учета влажности выхлопных газов, принято "приводить" концентрации выбросов к стандартизованным продуктам сгорания с 15-ти процентной концентрацией кислорода. Такая концентрация кислорода, принятая за условную в продуктах сгорания по сравнению с 21-но процентной объемной концентрацией кислорода в стандартном атмосферном воздухе, предусматривает расходование 6-ти % кислорода воздуха на окисление углеводородов в камере сгорания. Эти 6% условно приняты за потребное стехиометрическое количество кислорода, а следовательно и относительное количество воздуха, которое определяет условный коэффициент избытка воздуха $\alpha_y = 21/6 = 3,5$. Массовые концентрации CO и NO_x , приведенные к условной 15-ти процентной концентрации кислорода в сухих продуктах сгорания, определяют по формулам:

$$C_{CO}^{15} = C_{CO} \cdot \alpha_{cn} / \alpha_y; C_{NO_x}^{15} = C_{NO_x} \cdot \alpha_{cn} / \alpha_y, \quad (8)$$

где массовые концентрации C_{CO} и C_{NO_x} (1) рассчитаны по результатам измерений газоанализатором.

Описанная методика принята при определении экологических характеристик ГТД по результатам измерений газоанализаторами. Для пересчета концентраций вредных веществ, измеренных газоанализатором в сухих продуктах сгорания, к их действительным концентрациям во влажных выхлопных газах используют коэффициент K_{cv} (5). При измерении расхода топлива в ГТД Q_m , $nm^3/час$, определяют объемный и массовый расход воздуха в нормальных условиях по коэффициенту избытка воздуха α (7) и стехиометрическому коэффициенту L_0 :

$$Q_g = \alpha L_0 Q_m / 3600, nm^3/c; G_g = \rho_0 Q_g = 1,293 Q_g, кг/с.$$

Расход выхлопных газов при этом составляет:

$$Q_2 = Q_g + Q_m / 3600 = (1 + \alpha L_0) Q_m / 3600, nm^3/c;$$

$$G_2 = (1 + 1/\alpha L'_0) G_g, кг/с,$$

где L'_0 – массовый стехиометрический коэффициент, $кг/кг$.

По расходу выхлопных газов Q_2 и измеренным газоанализатором концентрациям в сухих продуктах сгорания вредных веществ C_i (1) рассчитывают мощности выбросов по каждому веществу:

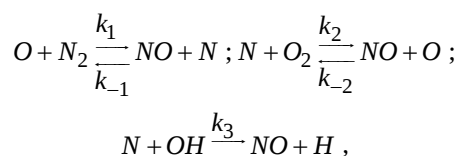
$$M_i = Q_2 C_i K_{cv} \cdot 10^{-3}, г/с.$$

Как отмечалось выше, в авиационных ГТД удельный выброс в виде индекса эмиссии EI отличается от удельного выброса m_i ГПА – количества вредного вещества, отнесенного к единице располагаемого тепла расходуемого топлива за 1 секунду

$$m_i = 3600 \frac{M_i}{Q_m \cdot H_u}, г/МДж,$$

где H_u – теплота сгорания топлива, $МДж/м^3$.

Наряду с экспериментальным определением загрязняющих атмосферу веществ не менее важным является разработка расчетных методов оценки образования этих выбросов. Оба направления рассматриваем как взаимно дополняющие друг друга. Среди быстрых (сверхравновесных), воздушных (термических) и топливных окислов азота, которые образуются в камерах ГТД при сгорании керосина, около 75% составляют термические NO [2, 4]. Согласно цепному механизму образования термических NO :



скорость этого процесса может быть представлена, ограничиваясь ее первым порядком, формулой:

$$\begin{aligned} d[NO]/dt = & k_1 [O][N_2] - k_{-1} [NO][N] + \\ & + k_2 [N][O_2] - k_{-2} [NO][O] + k_3 [N][OH], \end{aligned} \quad (9)$$

где коэффициенты Аррениуса $k_i = z \exp(-E/RT)$ прямых и обратных реакций определяются уровнем температуры в зоне горения и энергиями активации E этих реакций, среди которых в первом коэффициенте k_1 она наибольшая, что делает эту реакцию лимитирующей. При достатке кислорода O_2 в зоне горения ($\alpha_{32} \geq 1,0$) и с учетом того, что энергия активации в коэффициенте k_1 белее чем на порядок выше в сравнении с другими коэффициентами, уравнению (9) можно придать подобный вид [4, 8]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \lambda k_1 [O][N_2] \frac{1 - k_{-1}k_{-2} [NO]^2 / k_1 [N_2] k_2 [O_2]}{1 + k_{-1} [NO] / (k_2 [O_2] + k_3 [OH])}.$$

Здесь коэффициент $\lambda = f(n, m)$ учитывает долю образования быстрых NO и зависит от соотношения n и m в топливе $C_n H_m$ ввиду того, что быстрые NO образуются посредством HCN .

Необходимо отметить, что цепочка образования NO при горении керосинов состоит из порядка 196 прямых и обратных реакций [8], поэтому представленное описание может быть отнесено к модели "суммарной реакции" [2]. Это подтверждается формой записи уравнения (9), в котором за текущие концентрации веществ приняты начальные концентрации прямой и обратной реакций. Такое представление скоростей реакций позволяет упрощать интегрирование по времени пребывания для определения концентрации NO в выхлопных газах ГТД.

Заключение

Изложенные методики опытного и расчетного определения вредных выбросов в выхлопных газах

ГТД, несмотря на большое количество публикаций по данной проблеме и программных средств (ASTRA), дополняют практические рекомендации специалистам, занимающимся разработкой и эксплуатацией ГТД с различными топливами.

Литература

1. Романовский Г.Ф. Технология малоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей / Г.Ф. Романовский, С.И. Сербин, В.Г. Ванцовский, В.В. Вилкул // Вестник Национального технического ун-та "ХПИ". – Х.: НТУ «ХПИ», 2005. – № 6. – С. 154-160.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
3. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Конструкция, моделирование процессов и расчет. – Казань: КГТУ, 2004. – 220 с.
4. Туф. Модель расчета выбросов воздушных, быстрых и топливных окислов азота из газотурбинных установок // Тр. амер. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки. – 1986. – №2. – С. 91–101.
5. Любчик Г.М. Розвиток систем допалювання на вихлопі утилізаційних ГТУ / Г.М. Любчик, Г.Б. Варламов, Г.О. Мікулін, Р.М. Говдяк, Л.Б. Чабанович, Б.І. Шелковський // Вестник Национального технического ун-та "ХПИ". – 2005. – № 6. – С. 145-153.
6. Герасименко В.П., Ефремов М.С. Учет загрязнения окружающей среды выхлопными газами газоперекачивающих агрегатов // Вестник Национального технического ун-та "ХПИ". – Х.: НТУ "ХПИ", 2008. – № 6. – С. 162–165.
7. Герасименко В.П. Проблемы неустойчивости горения в малоэмиссионных камерах сгорания ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 2 (38). – С. 68-70.
8. Химия горения: Пер. с англ. / Под ред. У. Гардинера. – М.: Мир, 1988. – 464 с.

Поступила в редакцию 3.04.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.П. Мельник, УкрНИИгаз, Харьков.

УДК 551.465

В.А. СЛОБОДЯН

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ТЕСТОВЫХ ФИГУР С ПРИМЕНЕНИЕМ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА

Рассмотрены все виды загрязнений, характерных для Черного и Азовского морей с целью создания автоматизированной системы идентификации типов загрязнений морских акваторий. Предложена математическая модель выделенного контура, что позволяет применять к оцифрованным данным математические функции. Предложен набор тестовых фигур с целью применения метода выделения признаков по взаимной корреляции между контурами исследуемого пятна и тестовых фигур. Проведены эксперименты для исследования коррелированности предложенных тестовых фигур по каждому типу загрязнения. Полученные результаты дают возможность проведения дальнейших исследований с целью автоматизации процесса распознавания типов загрязнений.

тестовые фигуры, взаимная корреляционная функция, генератор случайных чисел, преобразование Фурье, автоматизация распознавания

Введение

В связи с постоянным повышением антропогенной нагрузки на морские акватории становится актуальной проблема быстрого и эффективного определения типа загрязнений, а также его источников. Размещение на побережье морей промышленных предприятий, внесение в морскую среду загрязняющих веществ различного происхождения, использование акватории для судоходства и добычи ресурсов – все это антропогенные факторы загрязнения Азово-Черноморского бассейна. Для Черного и Азовского морей характерны следующие типы загрязнений: речной сток, береговой сток, абразия берега, «цветение» фитопланктона и нефтяные загрязнения [1 – 3].

Формулирование проблемы

При обработке космических снимков оптического диапазона для задач мониторинга оказывается недостаточным применение только естественных дешифровочных признаков, к которым принадлежат спектрально-яркостные характеристики, форма выделенного пятна, его текстура и динамика изменения контуров пятна по времени [2, 4]. Все эти при-

знаки систематизированы и описаны словесно [1], и поэтому заключение о природе аномального пятна на морской поверхности в большей степени зависит от опыта оператора, который проводит обработку космических снимков.

В связи с этим, для более эффективного определения типа загрязнения по материалам космических съемок необходима разработка искусственных дешифровочных признаков, сформированных в процессе обработки снимков.

Выделение контура интересующего участка.

Для выделения искусственных дешифровочных признаков используется естественный дешифровочный признак – форма пятна выделенного на морской поверхности аномального явления. В работах [1, 2, 5] показано, что для каждого типа загрязнения характерна определенная форма пятна. В данной работе предполагается, что использование этого признака позволит повысить вероятность определения типа загрязнения.

Исследование формы пятна предполагает выделение контура интересующего участка. Алгоритм выделения показан на рис. 1. В рассмотренном случае автоматическое выделение на космических

снимках участков водной поверхности достигается применением линейной разделительной функции $d(x)$ [2]:

$$X(I) \in \begin{cases} w_1, \text{если } d(I) < 0 \\ w_2, \text{если } d(I) \geq 0 \end{cases},$$

где $d(x) = W_0 + W_2 I_2 + W_3 I_3$, I_2 и I_3 – зональные яркости изображения соответственно в каналах съемки K2 и K3; W_0 , W_2 , W_3 – постоянные коэффициенты (компоненты весового вектора $\vec{W}$), значения которых приблизительно оценивают по двумерной гистограмме яркости.

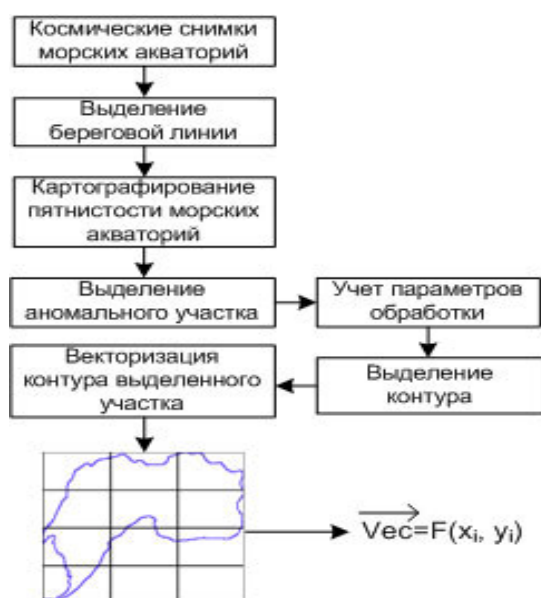


Рис. 1. Алгоритм выделения контура интересующего участка

Решение проблемы. Корреляционный анализ контуров исследуемого пятна и тестовых фигур

Для распознавания типов загрязнений морских акваторий был предложен метод выделения признаков по взаимной корреляции исследуемого контура и набора тестовых фигур (рис. 2). Такой подход использовался, например, в распознавании рукописного текста [6, 7].

Для проведения дальнейшей работы был предложен алгоритм преобразования выделенного контура в развертку вида

$$\text{Vec}(\theta) = \sum_{i=1}^N \text{vec}_i \cdot \theta^i,$$

где vec – значение вектора от начала координат до каждой точки контура, θ – приращение угла между соседними векторами (рис. 3).

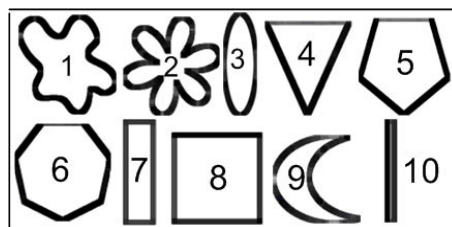


Рис. 2. Набор тестовых фигур

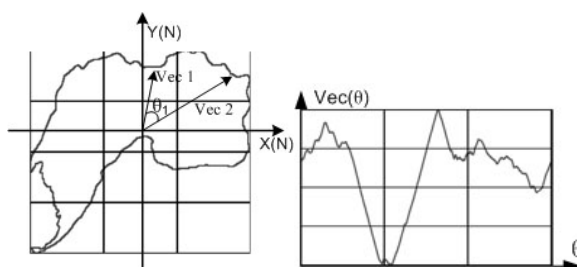


Рис. 3. Математическая модель контура

За неимением достаточного количества контуров для статистического анализа применялся генератор случайных чисел (рис. 4) [8, 9]. Использование такого подхода дает возможность сгенерировать необходимое количество контуров, сохраняя общую форму исследуемого вида загрязнения.

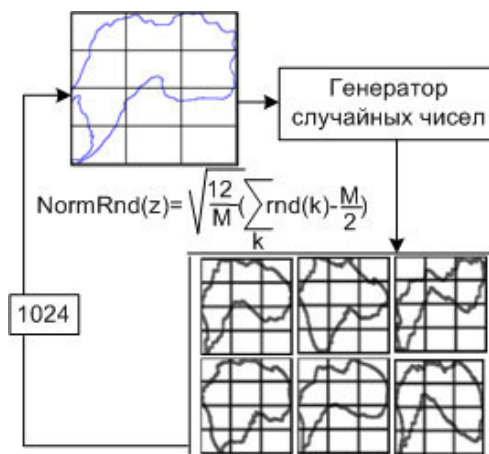


Рис. 4. Использование генератора случайных чисел

Алгоритм корреляционного анализа. Корреляционный анализ контуров исследуемой и тестовой фигуры включает в себя следующие этапы:

- 1) выделение контура интересующего участка;
- 2) применение генератора случайных чисел к выделенному контуру;
- 3) преобразование исследуемых контуров в развертку вида, представленного на рис. 2;
- 4) нормирование полученных данных [8];
- 5) применение преобразования Фурье к отнормированным разверткам [8];
- 6) определение взаимной корреляционной функции (VKF) между контурами исследуемой и тестовой фигуры;
- 7) формирование выборки данных по максимальному значению взаимной корреляционной функции. Максимальное значение VKF является соответствующим отсчетом формируемой выборки данных;
- 8) расчет коэффициентов корреляции тестовых фигур для каждого типа загрязнения;
- 9) формирование таблиц коэффициентов корреляции для всех типов загрязнений по каждой тестовой фигуре;
- 10) анализ полученных результатов.

Нормирование развертки контура позволяет не учитывать зависимость данных от размера выделенного пятна. Площадь всех исследуемых фигур равна единице.

Взаимная корреляционная функция определяется по формуле [10]:

$$VKF = \frac{IFFT(S_1(w) \cdot S_2(w))}{\sqrt{\sigma_1 \cdot \sigma_2}},$$

где $S_1(w)$ и $S_2(w)$ – прямое преобразование Фурье от разверток исследуемого контура и тестовой фигуры соответственно;

σ_1, σ_2 – дисперсии исследуемых разверток;

$IFFT$ – обратное преобразование Фурье.

Алгоритм формирования выборки данных показан на рис. 5.



Рис. 5. Алгоритм формирования выборки данных по взаимной корреляционной функции

Анализ полученных результатов. Исследования проводились с тестовыми фигурами, представленными на рис. 2.

Используя алгоритм, представленный на рис. 5, по каждой тестовой фигуре были сформированы выборки данных, которые представляют собой 1024 максимальных коэффициента, определенных по взаимной корреляционной функции. Построенные по полученным выборкам гистограммы оценивались визуально. Анализ полученных результатов показал, что законы распределения данных можно считать нормальными. Определяя математическое ожидание (M) и дисперсию (σ), по каждому виду загрязнения рассчитывались коэффициенты корреляции по следующей формуле [8]:

$$C_{jtk} = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{ji} - M_j) \cdot (y_{ti} - M_t)}{(N-1) \cdot \sigma_j \cdot \sigma_t},$$

где $N=1024$, y – выборки данных, сформированная по j -й и t -й тестовой фигуре, C – коэффициент корреляции.

Такой подход дает возможность исследовать коррелированность тестовых фигур между собой, что исключит из дальнейшего рассмотрения наименее информативные.

Используя полученные данные, были сформированы таблицы коэффициентов корреляции для всех видов загрязнений по каждой тестовой фигуре.

Анализ полученных результатов показал, что из 10 тестовых фигур для дальнейшего рассмотрения целесообразно не использовать первую и седьмую фигуру. Это связано с тем, что по всем

результатам они оказались коррелированными со всеми остальными. Коэффициент корреляции при этом варьирует от 0,6 до 0,9.

На рис. 6 представлена таблица усредненных коэффициентов корреляции для всех видов загрязнений.

1.0	0.42433	0.57133	0.60689	0.63922	0.75678	0.63139	0.74911	0.67989	0.60680	
	1.0	0.37612	0.36410	0.38914	0.36450	0.37394	0.50778	0.42673	0.37705	
		1.0	0.82189	0.84278	0.69711	0.92289	0.49785	0.41156	0.93822	
			1.0	0.88467	0.77744	0.77122	0.54856	0.54546	0.84933	
				1.0	0.88944	0.80656	0.52388	0.55711	0.89767	
					1.0	0.67344	0.59922	0.67433	0.83100	
						1.0	0.55935	0.49180	0.87956	
							1.0	0.77200	0.51286	
								1.0	0.48633	
									1.0	

Рис. 6. Таблица усредненных коэффициентов корреляции для всех видов загрязнений

Заключение

Полученные в результате корреляционного анализа данные показали, что применение предложенного метода выделения признаков по взаимной корреляции контуров исследуемого пятна и тестовых фигур позволяет определить наиболее информативные тестовые фигуры.

Представленные результаты используются для дальнейшей разработки алгоритма автоматизированной идентификации типов загрязнений, что даст возможность повысить эффективность космического мониторинга морских акваторий Черного и Азовского морей.

Литература

1. Красовский Г.Я. Аэрокосмический мониторинг поверхностных вод. – Л.:ВНИИКАМ, 1992. – 231 с.
2. Красовский Г.Я., Петросов В.А. Інформаційні технології космічного моніторингу водних екосистем і прогнозу водоспоживання міст. – К.: Наук. думка, 2003. – 224 с.
3. Стан довкілля Чорного моря: Національна доповідь України. 1996 – 2000 рр. – С764 Одеса: Астропринт, 2002. – 80 с.

4. Брук В.В. Исследование загрязнения водных объектов взвешенными веществами по материалам космических съемок: Дис. ... канд. техн. наук. – Х., 1991. – 181 с.

5. Мацокин Л.В. Метод районирования вод Черного моря по комплексу параметров. Проблемы Черного моря. – Севастополь. МГИ Академии Наук Украины, 1992. – С.69-70.

6. Гонсалес Р., Дж. Ту. Принципы распознавания образов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 416 с.

7. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.

8. Математические модели электронных аппаратов и систем / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов, М.И. Луханин: Учебн. пособие. – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьк. авиа. ин-т», 2003. – 109 с.

9. Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. – М.: Сов. радио, 1979. – 312 с.

10. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

Поступила в редакцию 18.12.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.Я. Красовский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

УДК 681.322

Н.В. ЗАМИРЕЦ, В.А. ЩЕГОЛЬ

*Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, Украина***ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАТРАТ НА СОЗДАНИЕ КОМПОНЕНТОЙ АРХИТЕКТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ**

Осуществлена постановка задачи оптимизации затрат, связанных с созданием компонентной архитектуры сложной космической техники. Выделены типы компонент (новые, повторного использования, смешанные и др.). В зависимости от состава компонент в компонентной архитектуре определяются затраты на проект создания нового космического изделия (КИ). Предложены критерии оптимизации затрат (создание КИ, модификация и адаптация компонент, приобретение компонент и др.). В качестве ограничений выступают: сроки реализации проекта, количество инновационных компонент и др. Построена оптимизационная модель, в которой используются предложенные критерии и ограничения, в виде модели цело численного линейного программирования с использованием булевых переменных.

компонентная архитектура, проект создания новой космической техники, компоненты повторного использования

Введение

Использование компонентного подхода [1] позволяет оптимизировать затраты, связанные с созданием сложных космических изделий (КИ). Необходимо отметить, что новые компоненты (НК) обеспечивают инновационность проекта, его конкурентоспособность, но требуют ощутимых финансовых затрат и времени на создание НК с учетом длительного жизненного цикла (ЖЦ), что может повлиять на итоговые оценки проекта и его реализуемость.

В работе рассматривается решение актуальной задачи оптимизации затрат при создании компонентной архитектуры КИ.

Постановка задачи исследования. Применение компонент повторного использования (КПИ) снижает риск проекта, финансовые и временные затраты, но требует дополнительных затрат, связанных с модификацией и адаптацией КПИ к условиям нового проекта. Кроме того, исполнитель проекта зачастую приобретает «внешние» КПИ (ВКПИ), которые используют в проекте создания КИ, что требует выделения соответствующих финансовых ресурсов [2].

Возможен дополнительный доход от реализации сторонним организатором лицензий и документации по КПИ и НК, которые будут использованы и созда-

ны в процессе выполнения проекта. Поэтому исполнитель должен учитывать как затраты, так и возможный дополнительный доход от реализации лицензий по созданным КПИ и НК. Все это привело к необходимости создания оптимизационной модели, в которой затраты и доходы в одних постановках будут выступать в качестве целевых функций, а в других – в качестве ограничений.

Решение задачи исследования

Сформируем критериальные представления затрат и доходов, связанных с созданием КИ:

1. L – количество компонент, которые должны быть использованы при создании КИ:

$$L = L_1 + L_2 + L_3,$$

где L_1 – количество КПИ; L_2 – количество НК; L_3 – количество ВКПИ.

2. Затраты, связанные с адаптацией и модификацией КПИ, созданием НК и приобретением ВКПИ:

$$B = B_1 + B_2 + B_3,$$

где B_1 – затраты на адаптацию и модификацию КПИ; B_2 – затраты на создание НК; B_3 – затраты на приобретение ВКПИ.

3. Временные затраты, связанные с модификацией КПИ и созданием НК:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2,$$

где ΔT_1 – время на модификацию и адаптацию КПИ; ΔT_2 – время на создание НК.

4. Доход от продаж лицензий и документации по созданным компонентам проекта:

$$R = R_1 + R_2,$$

где R_1 – доход от продаж лицензий по КПИ; R_2 – доход от продаж лицензий по НК.

С учетом перечисленных критериев затрат и дохода, введем булевые переменные для задачи оптимизации затрат при создании КИ:

x_{i_k} – булева переменная, связанная с использованием i -й КПИ в k -й подсистеме КИ:

$$x_{i_k} = \begin{cases} 0; \\ 1, \end{cases}$$

x_{e_k} – булева переменная, связанная с созданием e -й НК в k -й подсистеме КИ:

$$x_{e_k} = \begin{cases} 0; \\ 1, \end{cases}$$

x_{j_k} – булева переменная, связанная с приобретением j -й ВКПИ для k -й подсистемы КИ:

$$x_{j_k} = \begin{cases} 0; \\ 1. \end{cases}$$

Представим целевые функции для оптимизации затрат, связанных с использованием различных компонент в проекте создания КИ:

1. Целевая функция, которая характеризует разнообразие компонентного состава создаваемого КИ:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{l_k} x_{j_k}.$$

2. Целевая функция финансовых затрат на модификацию КПИ, создание новых компонент (НК) и приобретение ВКПИ:

$$B = B_1 + B_2 + B_3 = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} \cdot b_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} \cdot b_{e_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{l_k} x_{j_k} \cdot b_{j_k}.$$

где b_{i_k} – затраты на адаптацию (модификацию) i -й

КПИ в k -й подсистеме КИ; b_{e_k} – затраты на создание e -й НК для k -й подсистемы КИ; b_{j_k} – затраты на приобретение j -й ВКПИ для k -й подсистемы КИ.

3. Целевая функция временных затрат, связанных с модификацией КПИ и созданием НК для проекта КИ:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} \Delta t_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} \Delta t_{e_k},$$

где Δt_{i_k} – затраты времени на модификацию i -й КПИ для k -й подсистемы КИ; Δt_{e_k} – затраты времени на создание e -й НК в составе k -й подсистемы КИ.

4. Целевая функция дохода от продажи лицензий и документации по КПИ и созданным НК:

$$R = R_1 + R_2 = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} r_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} r_{e_k},$$

где r_{i_k} – доход от продажи лицензий и документации по i -й КПИ, которая была использована в k -й подсистеме КИ; r_{e_k} – доход от продажи лицензий и документации по e -й НК, которая была создана для k -й подсистемы КИ.

Возможные ограничения в задачах оптимизации затрат на создание КИ представим в виде:

L^* – потребное количество компонент в проекте создания КИ:

$$L^* = \sum_{k=1}^N L_k^*,$$

где L_k^* – потребное количество компонент для k -й подсистемы КИ; B^* – максимально допустимые расходы, связанные с модификацией КПИ, созданием НК и приобретением ВКПИ; ΔT^* – максимально допустимое время, связанное с удлинением времени проекта из-за модификаций (адаптации) КПИ и созданием НК для проекта КИ.

Сформулируем следующие возможные постановки задачи оптимизации затрат, связанных с созданием компонентной архитектуры космического изделия.

1. Минимизировать расходы, связанные с созданием компонентной архитектуры КИ:

$\min B$;

$$B = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} \cdot b_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} \cdot b_{e_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{l_k} x_{j_k} \cdot b_{j_k},$$

с учетом ограничений по количеству компонент и затрат времени, связанных с модификацией КПИ и созданием НК:

$$L_k = \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} + \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} + \sum_{j=1}^{l_k} x_{j_k};$$

$$L_k = L_k^*; \quad \sum_{k=1}^N L_k^* = L^*; \quad \Delta T \leq \Delta T^*;$$

$$\Delta T = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} \Delta t_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} \Delta t_{e_k}.$$

2. Минимизировать расходы, связанные с созданием НК в составе архитектуры КИ:

$\min B_2$;

$$B_2 = \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} \cdot b_{e_k},$$

с учетом ограничений по требуемому количеству компонент L^* :

$$L_k = \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} + \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} + \sum_{j=1}^{l_k} x_{j_k};$$

$$L_k = L_k^*; \quad \sum_{k=1}^N L_k^* = L^*,$$

и времени $\Delta T \leq \Delta T^*$;

$$\Delta T = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} \Delta t_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} \Delta t_{e_k}.$$

3. Минимизировать расходы, связанные с покупкой ВКПИ для проекта КИ:

$\min B_3$;

$$B_3 = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{l_k} x_{j_k} \cdot b_{j_k},$$

с учетом ограничений по требуемому количеству компонент:

$$L_k = \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} + \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} + \sum_{j=1}^{l_k} x_{j_k};$$

$$L_k = L_k^*; \quad \sum_{k=1}^N L_k^* = L^*$$

и времени $\Delta T \leq \Delta T^*$;

$$\Delta T = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} \Delta t_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} \Delta t_{e_k}.$$

4. Максимизировать доход, связанный с продажей лицензий и документации по КПИ и НК:

$\max R$;

$$R = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} r_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} r_{e_k},$$

с учетом ограничений по затратам:

$B \leq B^*$;

$$B = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} \cdot b_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} \cdot b_{e_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{l_k} x_{j_k} \cdot b_{j_k}$$

и времени на создание компонентной архитектуры КИ:

$\Delta T \leq \Delta T^*$;

$$\Delta T = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{n_k} x_{i_k} \Delta t_{i_k} + \sum_{k=1}^N \sum_{e=1}^{q_k} x_{e_k} \Delta t_{e_k}.$$

Заключение

Предложенный метод оптимизации затрат позволяет на начальных этапах формирования компонентной архитектуры определить необходимое количество КПИ, НК и ВКПИ в составе выполняемого проекта создания космического изделия.

Литература

1. Brown A. Large Scale Component-Based Development // Prentice Hall. – 2000. – 285 p.
2. Федорович О.Е., Некрасов А.Б., Плохов С.С. Применение компонент многократного использования в управлении проектами новой техники // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – 2005. – № 2 (10). – С. 104-107.

Поступила в редакцию 12.03.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

АННОТАЦИИ

УДК 629.735.33

Авілов І.С., Амброжевич М.В., Середя В.О. Комплексно-спряжена модель інерційного стартового пристрою легкого безпілотного літального апарату // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 5-8.

Розроблена технологія випереджальних досліджень робочого процесу наземних пускових пристроїв (НПП) інерційного типу, яка містить у собі фізико-математичну модель, метод чисельного рішення системи рівнянь моделі й засоби програмної реалізації. Наведені результати чисельних досліджень у наступній формі: індикаторні діаграми, кольорові карти. Стан об'єкту, який моделюється як механічна система, відображається актуальним станом спрощеної його твердотільної подоби. Матеріали статті демонструють змістовні можливості запропонованого метода прогнозування, застосованого на початкових стадіях НДДКР.

Ключові слова: безпілотні авіаційні комплекси, безпілотні літальні апарати, наземні пускові пристрої інерційного типу, комплексно-спряжені газодинамічні й динамічні моделі робочого процесу, рівняння Лагранжу II роду, чисельні методи, крутні, трансмісії, корбово-шатунні механізми.

Табл. 1. Іл. 2. Бібліогр.: 6 назв.

УДК 629.7.054

Карачун В.В. Особливості функціонування приладів і систем інерціальної навігації в акустичних полях // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 9-17.

Наводяться результати натурних та напівнатурних досліджень деяких класів приладів інерціальної навігації. Показано, що навігаційно-пілотажне обладнання може мати додаткові похибки, що зумовлені дією проникаючого акустичного випромінювання на підвіс гіроскопа. Аналізуються похибки гіроскопічного датчика кутових швидкостей в поплашковому виконанні за одночасної дії на прилад хитавиці фюзеляжу та звукових полів. Встановлюється ступінь їх прояву та взаємного впливу. За припущення гармонічного характеру кутового руху носія, у першому наближенні аналітично описується похибка вимірів при синхронній хитавиці. Окреслений внесок складових сумарної і різницевої частот зовнішніх збурюючих чинників.

Ключові слова: поплашковий гіроскоп, акустичне випромінювання, головний аеродинамічний обтікач, вібрація поверхні поплавця, синхронна хитавиця, гармонічні коливання фюзеляжу, вимушені коливання рухомої частини приладу.

Іл. 5. Бібліогр.: 10 назв.

УДК 532.526

Крашаниця Ю.О., Шаляль Ф.А. Про відбудовування поля швидкостей по кінематичних та динамічних характеристиках в задачі Озеена // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 18-21.

UDC 629.735.33

Avilov I., Ambrozhevitch M., Sereda V. Complex conjugate model of the inertial launch device of light unmanned aerial vehicle // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 5-8.

The technology of outstripping researches of working process of ground launches devices (GLD) of the inertial type, including physical and mathematical model, a method of the numerical decision of system of the equations of model and means of program realization is developed. Results of numerical researches in the following form are resulted: display diagrams, color cards. A condition of modelled object as mechanical system, it is displayed by an actual condition of his simplified solid-state image. Materials of article show substantial opportunities of the offered method of the forecasting used at initial stages of research and development.

Key words: unmanned aerial complexes, unmanned aerial vehicle, ground launches devices of inertial type, in a complex-connected gas-dynamic and dynamic models working process, equations Lagrange of II sort, numerical methods, flywheels, transmissions, connecting rod gear.

Tabl. 1. Fig. 2. Ref.: 6 items.

UDC 629.7.054

Karachun V. Features of operation of devices and systems of an inertial navigation in acoustic fields // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 9-17.

The outcomes of full-scale and seminatural researches of some classes of devices of an inertial navigation are resulted. Is rotined, that piloting-navigatoin the equipment can have variation of the mean errors conditioned by effect of inpouring acoustic radiation on suspend of the gyro. The errors of gyroscopic sensor of anglulators are analysed in float execution at the simultaneous affecting device of tossing of fuselage and voice fields. The degree of their display and cross-coupling is set. In supposition of harmonicity of angular motion of transmitter, in the first approaching the error of measurings is analytically described in the case of the synchronous tossing. The deposit of making total and разностной frequencies of external revolting factors is outlined.

Key words: float gyroscope, acoustic radiation, head aerodynamic cowl, vibration of surface of float, synchronous tossing, harmonic vibrations of fuselage, forced vibrations of mobile part of device.

Fig. 5. Ref.: 10 items.

UDC 532.526

Krashanytsya Yu., Shalal F. About renewal of velocity field by kinematics and dynamics in the Ozeen task // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 18-21.

Представлено ідеологію одержання розв'язань лінійного нестационарного проблеми Озеена в суцільному густому середовищі методом граничних інтегральних рівнянь. На базі розвинутого й апробованого оригінального апарату векторно-тензорного аналізу показані інтегральні подання динамічних і кінематичних параметрів, а також відновлення поля швидкостей по динамічних і кінематичних параметрах плинку навколо тілесного профілю, що рухається поблизу поверхні розподілу.

Ключові слова: закони збереження, система рівнянь Озеена, тілесний профіль, початково-крайова задача, фундаментальні розв'язки, векторно-тензорний аналіз, інтегральні подання розв'язків, системи інтегральних рівнянь, завихорність, тиск, поле швидкостей.

Бібліогр.: 5 назв.

УДК 535(023)

Толмачов М.Г. **Моделі вимірювання параметрів бі-речовини на основі геометричних форм її квантів** // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 22-26.

Для кількісної оцінки властивостей речовини, з якою взаємодіє літальний апарат, вперше отримано залежність фундаментальної енергетичної характеристики речовини – постійної тонкої структури α від геометричних форм квантів бі-речовини, тобто. співвідношення $\alpha^{-1} = 4\pi 4e$, яке є основою формування геометричних моделей вимірювання й кількісної оцінки фізичних параметрів речовини, а також виявлення енергетичних умов і циклів її перетворення. І константа α одержала принципово нове тлумачення й вимірювання.

Ключові слова: бі-речовина, моделі вимірювання, постійна тонкої структури, світові константи π і e .

Табл. 2. Іл. 2. Бібліогр.: 10 назв.

УДК 620.174.22 : 620.22-419

Смозвук Л.В. **Експериментальне дослідження деформованого стану пластин ступінчато-змінної товщини** // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 27-31.

Виконана експериментальна перевірка аналітичного методу розрахунку напружено-деформованого стану пластини ступінчато-змінної товщини, виготовленої із композиційного матеріалу. Для дослідження деформованого стану зразків використано метод голографічної інтерферометрії подвійної експозиції. Фізико-механічні характеристики, використані в аналітичному розрахунку, були визначені згідно зі стандартами ASTM. Результати, отримані методом голографічної інтерферометрії, демонструють гарну збіжність з аналітичним рішенням.

Ключові слова: напружено-деформований стан, оптичні методи, голографічна інтерферометрія, пластина, композиційний матеріал.

Табл. 3. Іл. 7. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 629.735

Воробйов Ю.А., Ніколенко О.І., Воробйов О.Ю. **Аналіз досліджень по свердлінню змішаних па-**

Ideology of receipt of decisions of the linear unstationary task Ozeen in a continuous viscid environment is represented by the method of maximum integral equalizations. On the base of the developed and approved original vehicle of vector-tensor analysis the shown integral presentations of dynamics and kinematics parameters, and also renewal of the field of speeds on the dynamics and kinematics parameters of flow round a corporal type which moves near the surface of section.

Key words: low of storage, Ozeen system equations, corporal form profile, initial-value problem, vector-tensor analysis, integral presentations of solution, systems of the integral equations, foundation solution, rotor, pressure, field of speeds.

Ref.: 5 items.

UDC 535(023)

Tolmachov N. **Models of change of parameters of b-substance on the basis of geometrical forms of its quanta** // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 22-26.

For a quantitative estimation of properties of substance with which an aircraft interacts, relation of the fundamental power characteristic of substance – fine structure constant α , on geometrical forms of quanta of b-substance, i.e. relation $\alpha^{-1} = 4\pi 4e$, which is a basis of formation of geometrical models of measurement and quantitative estimation of physical parameters of substance as well as revealing of energy conditions and cycles of its transformation is obtained for the first time. And the constant α is got essentially new interpretation and measurement.

Key words: B-substance, models of measurement, fine structure constant, cosmological constants π and e .

Tabl. 2. Fig. 2. Ref.: 10 items.

UDC 620.174.22 : 620.22-419

Smovzuk L. **Experimental investigation of the variable thickness plate's strain state** // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 27-31.

Experimental investigation of the analytical method for analysis of stress-strain state of plate with stepwise change thickness was made. Double exposure holographic interferometry was used for investigation of the specimens' strain state. Physical-mechanical properties, which used in analytical calculation, were defined according to ASTM standards. Results, which were received by holographic interferometry, demonstrate good convergence with analytical decision.

Key words: stress-strain state, optical method, holographic interferometry, plate, composite material.

Tabl. 3. Fig. 7. Ref.: 5 items.

UDC 629.735

Vorobyov J., Nikolenko A., Vorobyov A. **Analysis of researches on drilling the mixed stacks from com-**

кетів з композиційних матеріалів і титанових сплавів // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 32-38.

Наведено аналітичний огляд експериментальних досліджень по свердлінню пакетів «вуглепластик/титановий сплав» (КМВ/Ті) з використанням інструмента стандартної геометрії з різних ріжучих матеріалів. Використовувалися наступні матеріали свердел: швидкорізальна сталь (HSS), швидкорізальний кобальт (HSS-Co) і карбід (твердосплавний матеріал). Відзначено, що на межі розділу КМВ/Ті високі температури викликають пошкодження композита в області отвору. Різні механічні й теплові властивості матеріалів пакета впливають на стійкість інструмента і якість отворів, незалежно від матеріалу різального інструменту. Менша стійкість інструмента характерна для високих шпиндельних швидкостей і малих подач. Відзначено, що карбідні свердла мають більш високу стійкість, мінімальні поверхневі пошкодження й викликають менші пошкодження пакета внаслідок високих температур.

Ключові слова: вуглепластик, свердління, зношення інструменти, пошкодження від високої температури, шорсткість, заусениця.

Іл. 5. Бібліогр.: 11 назв.

УДК 621.7.044

Мельничук О.П. **Дослідження процесів гідродинамічного штампування: визначення параметрів імпульсу тиску у формуючій камері** // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 39-44.

Розглянуті можливі варіанти навантажуючого імпульсу тиску у формуючій камері при гідродинамічному штампуванні, які розрізняються за формою, величиною максимального тиску та тривалістю. Встановлені основні характеристики імпульсу та визначені апроксимуючі залежності розподілу тиску при формоутворенні тонкостінних вісесиметричних оболонок на різних етапах – оформлення основного контуру оболонок, оформлення елементів взаємної фіксації і компенсаторів, калібрування оболонок. Обґрунтована допустимість використання функції тиску у формуючій камері при оформленні основного контуру оболонок у вигляді $p = p(t)$.

Ключові слова: гідродинамічне штампування, імпульс тиску, тонкостінна вісесиметрична оболонка.

Іл. 7. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 621.7.044.7

Батигін Ю.В., Бондаренко О.Ю., Серіков Г.С. **Електродинамічні процеси в індукційній індукторній системі з прямокутною формою робочої зони** // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 45-50.

Для технологічної операції магнітно-імпульсного притягнення листової металевої заготовки до індуктору проведено аналіз електродинамічних процесів в симетричній індукційній індукторній системі з прямокутною формою робочої зони. Визначено розподіл густини струму в заготовці, сил притяган-

posite and titanium alloys // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 32-38.

The state-of-the-art review of experimental researches on drilling graphite/bismaleimide (Gr/Bi) titanium (Ti) stacks with use of the tool of standard geometry from various cutting materials is resulted. Were used following materials of drills: high-speed steel (HSS), high-speed cobalt (HSS-Co) and carbide. It is marked, that at the interface Gr/Bi-Ti high temperatures cause damage of a composite in the field of an the hole region. Dissimilar mechanical and thermal properties of materials of stacks affected on the tool life and quality of hole, independence from material of the cutting tool. Smaller tool life is characteristic for high spindle speeds and small feed. It is marked, that carbide drills have higher tool life, the minimal surface damages and cause smaller damages of a stacks over high temperatures.

Key words: carbon, drilling, tool wear, high temperature damage, roughness, burr.

Fig. 5. Ref.: 11 items.

UDC 621.7.044

Melnichuk A. **Processes of hydrodynamic stamping: determination of pressure impulse parameters in forming chamber** // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 39-44.

The article examines possible variants of pressure pulse parameters in a forming chamber during the hydrodynamic stamping which can be divided by form, maximum pressure and impulse duration. General characteristics of the impulse were defined. Approximating pressure curves for thin-walled axisymmetric shells during the stages of stamping (shaping of general contours of shells, elements of the mutual fixing and compensators, calibration of shells) were defined. Allowability of use of pressure function $p = p(t)$ during the shaping of general contours of shells was grounded.

Key words: hydrodynamic stamping, pressure impulse, thin-walled axisymmetric shell.

Fig. 7. Ref.: 5 items.

UDC 621.7.044.7

Batygin Yu., Bondarenko A., Serikov G. **Electrodynamics processes in the induction inductor system with the right-angled geometry of working area** // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 45-50.

The electrical dynamic analysis in the symmetrical induction inductor system with the rectangular shape of the working zone for the sheet metal work-piece attracting by magnetic pulse action was conducted. The density current distribution in the work-piece, the attracting and repelling forces by the magnetic pulse in-

ня та відштовхування, діючих на заготовку, при частоті розрядного струму магнітно-імпульсної установки ~ 2 кГц. Показані переваги досліджуваної системи в порівнянні з циліндричною індукційною індукторною системою.

Ключові слова: магнітно-імпульсне притягнення, листова металева заготовка, електродинамічні процеси, прямокутна форма робочої зони, розрядний струм. Лл. 6. Бібліогр.: 4 назви.

УДК 678.5.067.5.057

Чесноков О.В., Бакст Є.Є. Дослідження впливу трансверсального армування на міцність плетеного композиційного матеріалу // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 51-54.

Обґрунтовано необхідність введення трансверсального армування в плетені армуючі каркаси. Приведені результати досліджень трансверсального армування прошивкою плетених шарів вуглепластиковими стержнями. Визначена причина відведення голки при армуванні і спосіб її усунення. Визначений вплив схеми розташування стержнів, кроку і кута їх нахилу на міцність при поперечному відриві. Приведений опис спроектованих лабораторних пристосувань для введення порожнистої голки і вимірювання зусилля при її введенні в плетений шар. Визначені силові параметри армування і спроектовано пристрій для трансверсального армування, працююче в автоматичному режимі.

Ключові слова: вуглець-вуглець, композиційні матеріали, трансверсальне армування, плетіння, міцність, прошивка.

Табл. 1. Лл. 6. Бібліогр.: 4 назви.

УДК 629.735.33

Амброжевич О.В., Бойчук І.П., Сілевич В.Ю. Апаратно-програмний інструментарій дослідження робочих процесів пульсуючих повітряно-реактивних двигунів // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 55-59.

Запропонований універсальний метод дослідження амплитудо-фазо-частотних характеристик який використовує метод дистанційної реєстрації первинного сигналу. Метод дозволяє безпосередньо перетворювати отримані звукові осцилограми у формат масивів даних для подальшої математичної обробки. Універсальність полягає в застосуванні його для визначення частоти будь-якого коливального процесу, в діапазоні звукової частоти 20 – 20000 Гц. Розглянутий аналіз отриманих під час випробувань осцилограм за допомогою вейвлет-перетворення. Наведені результати досліджень робочого процесу в пульсуючому повітряно-реактивному двигуні.

Ключові слова: метод замірювань, пульсуючий повітряно-реактивний двигун, амплитудо-фазо-частотні характеристики, вейвлет-аналіз, осцилограма коливань.

Лл. 8. Бібліогр.: 10 назв.

УДК 539.1. 074

Бокучава Г.В., Карумідзе Г.С., Корж О.Ф., Широков Б.М. Термоелектричні властивості карбиду

stallation discharging current frequency ~ 2 kHz were calculated. The described inductor system advantages are shown in comparison with the cylinder induction inductor system.

Key words: attracting by magnetic pulse, sheet metal work-piece, electrodynamics process, induction inductor system, rectangular shape of the working zone, discharge current.

Fig. 6. Ref.: 4 items.

UDC 678.5.067.5.057

Chesnokov A., Bakst E. Research of influencing of transverse reinforcement on durability of wattled composition material // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 51-54.

The necessity of introduction of transverse reinforcement is grounded for wattled reinforcing frameworks. The results of researches of transverse reinforcement by sewing of wattled layers by carbon composite bars are resulted. The reason of withdrawal of needle is certain at the reinforcement and method of its removal. Influence of layout chart of bars, step and angle of their slope on durability at the transversal tearing off is certain. Description of the projected laboratory adaptations for introduction of hollow needle and measuring of effort at its input in a wattled layer is resulted. The power parameters of reinforcement are certain and the device is projected for the transverse reinforcement, working in the automatic mode.

Key words: carbon-carbon, composition materials, transverse reinforcement, wickerwork, durability, sewing.

Tabl. 1. Fig. 6. Ref.: 4 items.

UDC 629.735.33

Ambrozhevitch A., Boychuk I., Silevich V. Hardware-software toolkit of research working processes in pulsing air-jet engines // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 55-59.

The universal method of research the amplitude-phase-frequency characteristics with using method of remote registration of a primary signal is offered. method allows directly to transform got oscillogram of sounds in the format of arrays of data for subsequent mathematical treatment. Universality consists in application of him for determination of frequency of any swaying process, in the range of audio frequency 20 – 20000 Hertz. The analysis of oscillogram got during tests is considered through wavelet-transformation. The results of researches of working process in the pulsing air-jet engine are submitted.

Key words: the research toolkit, pulsing-jet engine, amplitude-phase-frequency characteristics, wavelet-analyzes, oscillogram of vibration.

Fig. 8. Ref.: 10 items.

UDC 539.1. 074

Bokuchava G., Karumydzhe G., Korzh A., Shirokov B. Thermo-electric properties of BC produced by dif-

бору, отриманого різними методами // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 60-64.

У роботі представлені результати вимірювань температурної залежності електропровідності, теплопровідності і коефіцієнту Зеебека на зразках карбіду бору різного стехіометричного складу: B_4C і $B_{6,5}C$, отриманого плазмохімічним, газофазним методами і методом гарячого пресування. Результати оформлені у вигляді серії графіків. Показано, що оптимальні характеристики для використання в якості р-гілки високотемпературного термоперетворювача має матеріал $B_{6,5}C$, одержаний плазмохімічним методом. Досліджені також залежності тепло- і електрофізичних характеристик гарячепресованого карбіду бору від ізотопного складу. Показано, що збільшення концентрації ^{11}B приводить до покращення електрофізичних властивостей матеріалу. Одержаний плазмохімічним методом карбід бору зі складом $B_{6,5}C$ може бути використаний як р-гілка при розробці термоелектричних генераторів для космічних апаратів.

Ключові слова: термоелектричний генератор, автономні джерела живлення, карбід бору, космічні апарати.

Табл. 1. Іл. 4. Бібліогр.: 3 назви.

УДК 621.436

Варбанець Р.А., Морозов О.И., Михайлов Д.Ю. Визначення фази початку згоряння палива в з математичного моделювання робочого процесу двигунів внутрішнього згоряння // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 65-72.

Розглянуте питання коректної синхронізації даних, як одного з найбільш важливих етапів математичного моделювання робочого процесу ДВЗ. Досліджені чинники, що впливають на точність синхронізації робочого процесу. Проведена оцінка впливу погрешності визначення фази початку згоряння на точність синхронізації. Алгоритмічна синхронізація даних моніторингу робочого процесу заснована на рішенні рівняння $dp/d\phi = 0$. Для вирішення цього рівняння запропонований метод визначення фази початку згоряння в циліндрі. Показана допустимість при практичному моніторингу робочого процесу використання 2-й похідної діаграми $p(\phi)$ для визначення фази початку згоряння палива в циліндрі.

Ключові слова: робочий процес, моніторинг, синхронізація даних, фаза початку згоряння, параметри робочого процесу, індикаторна потужність, верхня мертва крапка, діагностування.

Табл. 1. Іл. 7. Бібліогр.: 9 назв.

УДК 621.372

Самедов А.С., Усубалиєв Т.Б. Комплексна методика вибору складу захисних покриттів для лопаток газових турбін // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 73-77.

Наведено результати розрахунково-експериментальних досліджень з розробки математичних мо-

ferent methods // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 60-64.

Electrical conductivity, heat conductivity and Seebeck coefficient for samples of boron carbide with different stoichiometrical composition (B_4C and $B_{6,5}C$) depending on temperature were measured. The boron carbide samples were produced via CVD, PCVD techniques and hot pressing. The results are presented as a series of the graphs. It is shown, that $B_{6,5}C$ received by PCVD-method has the best characteristics for use as a p-branch of a high-temperature thermoelectric element. The dependencies of the thermal and electrophysical performances of hot-pressed boron carbide on isotopic composition are explored also. Is shown, that the magnification of concentration ^{11}B results in improving physical properties of a material. Boron carbide of composition $B_{6,5}C$ obtained by a PCVD-method can be used as a p-branch for autonomous sources of power supplies on space vehicles.

Key words: thermoelectric generator, autonomous power supplies, boron carbide, space vehicles.

Tabl. 1. Fig. 4. Ref.: 3 items.

UDC 621.436

Varbanets R., Morozov A., Mihaylov D. Determination of an ignition phase in task of internal combustion engines working process monitoring // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 65-72.

Precise data synchronization as the one of most essential phase of task of mathematical modelling of engine internal combustion working process. The factors affect on synchronization accuracy of ICE working process. Influence of error in determination accuracy of combustion beginning phase on synchronization precise. Synchronization method is based on the solution of equation $dp/d\phi = 0$, so the method of definition of combustion beginning reference time, offered accordingly. Admissibility of analysis of 2-nd derivation of diagram $p(\phi)$, for the practical use.

Key words: working process, monitoring, synchronization of the data, combustion beginning phase, parameters of working process, indicated power, the top dead point, diagnosing.

Tabl. 1. Fig. 7. Ref.: 9 items.

UDC 621.372

Samadov A., Usubaliyev T. Complex method source structure of protective coating for gas turbine blades // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 73-77.

Results experimental-calculated researches on development of mathematical models of forecasting of struc-

делей прогнозування складу та отримання нових композицій захисних покриттів лопаток газових турбін на основі кореляційно-регресійного аналізу, аналізу кількісних співвідношень і фізико-хімічних характеристик з урахуванням атомного радіусу і типу кристалічної решітки елементів. Використано метод планування експерименту, на основі чого уточнено відсотковий вміст кожного вибраного елементу, виявлено діапазон температур, час та кількість дослідів. Рентгенофазним та термічним аналізами досліджено фазові перетворення сплавів нового складу, результати яких підтвердили вірогідність запропонованого підходу.

Ключові слова: газові турбіни; захисні покриття; кореляційно-регресійний аналіз.

Табл. 2. Бібліогр.: 5 назв.

УДК 537.58 : 533.9.07

Планковський С.І., Островський Є.К., Цегельник Є.В. **Імпрегнований катод на основі скандату барію** // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 78-84.

Проблеми вдосконалення електрофізичних установок, які використовують електронні пучки великої інтенсивності, потребують розробки та дослідження нового класу високотемпературних термоemisійних матеріалів з малою роботою виходу електрона. У роботі представлені результати дослідження термоemisійних властивостей катодів, отриманих просоченням вольфрамової губки складним оксидом $Ba_3Sc_4O_9$. Дослідження отруєності нагрітого катоду атмосферним повітрям і багатократні контакти холодного катоду з атмосферою дозволяють рекомендувати такий катод для розбірних електрофізичних установок: прискорювачів заряджених частинок, плазмових атмосферних генераторів (плазмотронів) і електрореактивних двигунів космічних літальних апаратів.

Ключові слова: катод, вольфрам, пориста вольфрамова губка, скандат барію, робота виходу електрона, термоemisія.

Іл. 6. Бібліогр.: 8 назв.

УДК 621.438:504.3.064

Герасименко В.П., Осипов В.В. **Забруднення атмосфери вихлопними газами газотурбінних двигунів** // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 85-88.

Наведені основні заходи щодо поліпшення екологічних характеристик газотурбінних двигунів та установок. Запропонована методика розрахунку шкідливих речовин у вихлопних газах ГТД і установок зі згорянням різних вуглеводневих палив за вимірами їхніх концентрацій газоаналізаторами у сухих продуктах згоряння. На основі моделі "сумарної реакції" у ланцюговому механізмі Зельдовича отримані рівняння Ареніуса швидкості утворення окислів азоту в камері згоряння ГТД. В отриманих рівняннях швидкості утворення окислів азоту врахований також механізм утворення швидких окислів азоту.

ture and receiving new composition of protective coating gas turbine blades on the basis of correlation-regression analysis, analysis of quantitative ratio and physical-chemical characteristics in view of nuclear radius and type of a crystal lattice of elements are presented. The method of planning experiment on the basis of what percentage of each chosen element is specified is used, ranges of temperatures, time and quantity of experiences are revealed. Roengenphase and thermal analyses research phase transformations an alloy of new structure which results have confirmed reliability of the offered approach.

Key words: gas turbines; protective coatings; correlation-regression analysis; planning experiment.

Tabl. 2. Ref.: 5 items.

УДК 537.58 : 533.9.07

Plankovsky S., Ostrovsky Y., Tsegelnyk Y. **Impregnated cathode on basis of barium-scandat** // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 78-84.

The problems of electrophysical units improvement, which use electron jets of high intensity, demand the development and investigation of new class of high temperature thermoemission materials with low work of electron function. The investigations results of thermo emission cathode's properties, which were gained via tungsten sponge impregnation by complicated oxide $Ba_3Sc_4O_9$ are shown. The investigation of cathode's poisoning, heated by the ambient air, and the multiple contacts of cold cathode with the atmosphere, allows to recommend the such cathode to use in different electro-physical equipment: in charged particle accelerators, in plasmatrones and in electrojet engines of space vehicles.

Key words: cathode, tungsten, porous tungsten sponge, barium-scandat, electron function work, thermionic emission.

Fig. 6. Ref.: 8 items.

УДК 621.438:504.3.064

Gerasimenko V., Osipov V. **The soil of atmosphere by exit gas of gasturbine engines** // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 85-88.

The main measures of improvement of gasturbine engine's ecology characteristics have been considered. We suddested the calculation method of bad substance in exit gas GTE and mounting in conduct of measuring theirs concentration by gasanalyser in dry products of burning various coal-hydrogen fuels. It have been received the Arrenyu's equations of formation's speed of oxides nitrogen in GTE combustor on the base of "summer reaction" model in the Zeldovich's chain mechanism. The chain mechanism of quickly oxides nitrogen in received equations of formation's speed of oxides nitrogen has been taken into account.

Ключові слова: газотурбінний двигун, шкідливі викиди, забруднення атмосфери, газоаналізатор.
Лл. 1. Бібліогр.: 8 назв.

УДК 551.465

Слободян В.О. Дослідження інформативності тестових фігур із застосуванням кореляційного аналізу // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 89-92.

Розглянуті всі види забруднень, характерних для Чорного й Азовського морів з метою створення автоматизованої системи ідентифікації типів забруднень морських акваторій. Запропоновано математичну модель виділеного контуру, що дозволяє застосовувати до оцифрованих даних математичні функції. Запропоновано набір тестових фігур з метою застосування методу виділення ознак по взаємній кореляції між контурами досліджуваної плями й тестових фігур. Проведено експерименти для дослідження корельованості запропонованих тестових фігур по кожному типу забруднення. Отримані результати дають можливість проведення подальших досліджень з метою автоматизації процесу розпізнавання типів забруднень.

Ключові слова: тестові фігури, взаємна кореляційна функція, генератор випадкових чисел, перетворення Фур'є, автоматизація розпізнавання.
Лл. 6. Бібліогр.: 10 назв.

УДК 681.322

Замирець М.В., Щеголь В.А. Оптимізація витрат на створення компонентної архітектури космічного виробу // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 2 (49). – С. 93-95.

Здійснено постановку завдання оптимізації витрат, пов'язаних зі створенням компонентної архітектури складної космічної техніки. Виділено типи компонентів (нові, повторного використання, змішані тощо). Залежно від состава компонентів у компонентній архітектурі визначаються витрати на проект створення нового космічного виробу (КВ). Запропоновано критерії оптимізації витрат (створення КВ, модифікація і адаптація компонент, придбання компонентів тощо). Як обмеження виступають: строки реалізації проекту, кількість інноваційних компонентів тощо. Побудована оптимізаційна модель, у якій використовуються запропоновані критерії і обмеження, у вигляді моделі цілочисельного лінійного програмування з використанням булевих змінних.

Ключові слова: компонентна архітектура, проект створення нової космічної техніки, компоненти повторного використання
Бібліогр.: 2 назв.

Key words: gasturbine engine, bad substance, soil of atmosphere, gasanalyser
Fig. 1. Ref.: 8 items.

UDC 551.465

Slobodian V. Research informations test figures with application of the correlation analysis // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 89-92.

All kinds of pollution, characteristic for the Black and Azov seas for the purpose of creation of the automated system of identification of types of pollution of sea water areas are considered. The mathematical model of the allocated contour that allows to apply mathematical functions to the digitized data is offered. The set of test figures for the purpose of application of a method of allocation of signs on mutual correlation between contours of an investigated stain and test figures is offered. Experiments for research correlations the offered test figures on each type of pollution are made. The received results give the chance carrying out of the further researches for the purpose of automation of process of recognition of types of pollution.

Key words: test figures, mutual correlation function, the generator of random numbers, transformation Fourier, recognition automation.
Fig. 6. Ref.: 10 items.

UDC 681.322

Zamirets N., Schegol V. Optimization of expenses on creation of the component structure of cosmic workpieces // Aerospace technic and technology. – 2008. – № 2 (49). – P. 93-95.

The problem of optimization of expenses connected with the creation of component structure of the complex cosmic technique is stated. The following component types have been outlined: new, recycled, mixed and others. The expanses on the project of new cosmic workpiece creation depending on the composition of the component architecture are defined. The criteria of expenses (cosmic workpiece creation, modification and adaptation of components, purchase of components and others) optimization are proposed. The following limits are noted: project realization terms, number of innovation components and others. The optimization model that uses the proposed criteria and limits in a form of integer-value linear programming with the use of Boolean variables has been built.

Key words: component architecture, project of new cosmic technique creation, recycling components
Ref.: 2 items.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АВИЛОВ Игорь Сергеевич	ООО «Научно–промышленные системы» КБ «Взлет», директор, главный конструктор
АМБРОЖЕВИЧ Александр Владимирович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
АМБРОЖЕВИЧ Майя Владимировна	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
БАКСТ Евгений Евсеевич	Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
БАТЫГИН Юрий Викторович	Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
БОЙЧУК Игорь Петрович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», ассистент
БОКУЧАВА Гурам Васильевич	Сухумский физико-технический институт им. И. Векуа, кандидат технических наук, начальник отдела
БОНДАРЕНКО Александр Юрьевич	Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры
ВАРБАНЕЦ Роман Анатольевич	Одесский национальный морской университет, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
ВОРОБЬЕВ Александр Юрьевич	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», студент
ВОРОБЬЕВ Юрий Анатольевич	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
ГЕРАСИМЕНКО Владимир Петрович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», доктор технических наук, профессор, профессор кафедры
ЗАМИРЕЦ Николай Васильевич	Государственный научно-исследовательский технологический институт приборостроения, доктор технических наук, профессор, главный конструктор
КАРАЧУН Владимир Владимирович	Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
КАРУМИДЗЕ Гурам Семенович	Национальный центр высоких технологий Грузии, Тбилиси, Грузия, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории
КОРЖ Александр Федорович	ННЦ «Харьковский физико-технический институт», кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
КРАШАНИЦА Юрий Александрович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

МЕЛЬНИЧУК Александр Петрович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», кандидат технических наук, доцент кафедры
МИХАЙЛОВ Дмитрий Юрьевич	Multimedia Marine Group corp., Одесса, суперинтендант
МОРОЗОВ Алексей Игоревич	Одесская национальная академия связи, преподаватель
НИКОЛЕНКО Александр Иванович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», заведующий лабораторией
ОСИПОВ Виталий Владимирович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», студент
ОСТРОВСКИЙ Евгений Константинович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник
ПЛАНКОВСКИЙ Сергей Игоревич	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», кандидат технических наук, доцент, помощник ректора по внешнеэкономической деятельности
САМЕДОВ Адалят Солтан оглы	Национальная академия авиации, Баку, Азербайджан, кандидат технических наук, доцент, декан факультета
СЕРЕДА Владислав Александрович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», аспирант
СЕРИКОВ Георгий Сергеевич	Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, аспирант
СИЛЕВИЧ Владимир Юрьевич	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», студент
СЛОБОДЯН Вера Александровна	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», аспирант
СМОВЗЮК Лина Владимировна	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», аспирант
ТОЛМАЧЕВ Николай Григорьевич	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», кандидат технических наук, старший научный сотрудник
УСУБАЛИЕВ Турал Бейбала оглы	Национальная академия авиации, Баку, Азербайджан, аспирант
ЦЕГЕЛЬНИК Евгений Владимирович	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», научный сотрудник
ЧЕСНОКОВ Алексей Викторович	Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
ШАЛЯЛЬ Фаяд Алуан	Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», аспирант
ШИРОКОВ Борис Михайлович	ННЦ «Харьковский физико-технический институт», кандидат технических наук, начальник отдела
ЩЕГОЛЬ Виктор Андреевич	Государственный научно-исследовательский технологический институт приборостроения, соискатель

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Авилов И.С.	5	Морозов А.И.	65
Амброжевич А.В.	55	Николенко А.И.	32
Амброжевич М.В.	5	Осипов В.В.	85
Бакст Е.Е.	51	Островский Е.К.	78
Батыгин Ю.В.	45	Планковский С.И.	78
Бойчук И.П.	55	Самедов А.С.	73
Бокучава Г.В.	60	Середа В.А.	5
Бондаренко А.Ю.	45	Серигов Г.С.	45
Варбанец Р.А.	65	Силевич В.Ю.	55
Воробьев А.Ю.	32	Слободян В.А.	89
Воробьев Ю.А.	32	Смовзюк Л.В.	27
Герасименко В.П.	85	Толмачев Н.Г.	22
Замирец Н.В.	93	Усубалиев Т.Б.	73
Карачун В.В.	9	Цегельник Е.В.	78
Карумидзе Г.С.	60	Чесноков А.В.	51
Корж А.Ф.	60	Шаляль Фаяд Алуан	18
Крашаница Ю.А.	18	Широков Б.М.	60
Мельничук А. П.	39	Щеголь В.А.	93
Михайлов Д.Ю.	65		

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В соответствии с требованиями ВАК Украины (бюл. ВАК № 2,3 2008) изменяются правила оформления статей. Текст статьи выполняется в Microsoft Office Word for Windows (*.doc)

Параметры страницы:

Размер бумаги - А4 (210x297 мм); Отступ сверху и снизу листа - 25 мм, справа и слева – 22,5 мм.

Структура статьи.

УДК (UDC); И.О.Ф. автора(ов). Организация, страна. Заголовок статьи. Аннотация на языке оригинала (например, на русском языке). Ключевые слова. Текст статьи. Литература. Информация о поступлении статьи в редакцию и рецензенте. Заголовок статьи, И.О.Ф. автора, аннотация, ключевые слова на украинском языке. Заголовок статьи, И.О.Ф. автора, аннотация, ключевые слова на английском языке. Фамилия, Имя, Отчество (полностью), научная степень, научное звание, должность, организация, город расположения организации, страна, e-mail и контактный телефон каждого автора (ов).

УДК

УДК XXX.XXXX

Без абзаца. Прописные, 12pt Times New Roman, выравнивание по левому краю, 1 межстрочный интервал.
(пустая строка, 10pt, 1 межстрочный интервал)

И.О.Ф. Автора

Без абзаца. Прописные, жирный, 12pt Times New Roman, выравнивание по левому краю, 1 межстрочный интервал.
(пустая строка, 10pt, 1 межстрочный интервал)

Организация, Страна

Без абзаца. Строчные, курсив, жирный, 12pt Times New Roman, выравнивание по левому краю, 1 межстрочный интервал)
(пустая строка, 10pt, 1 межстрочный интервал)

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ

Без абзаца. Прописные, 12pt Times New Roman, жирный, выравнивание по центру, 1 межстрочный интервал.
(пустая строка, 10pt, 1 межстрочный интервал)

Аннотация

Без абзаца. На языке оригинала статьи (например, на русском языке). Слово «Аннотация» не пишется. Аннотация должна быть не менее 500 знаков и не должна превышать 14 строк, шрифт - 10pt Times New Roman, выравнивание по ширине, курсив, один межстрочный интервал, отступ слева – 7,5 мм.
(пустая строка, 10pt, 1 межстрочный интервал)

Ключевые слова

Без абзаца. Абзац начинается с надписи **Ключевые слова:** (*Ключові слова:*, *Key words:*) (курсив, жирный, 10pt Times New Roman), а далее разделенные запятой - 6 – 10 слов на языке оригинала статьи. (курсив, 10pt Times New Roman, выравнивание по ширине, один межстрочный интервал, отступ слева – 7,5 мм.).
(пустая строка, 10pt, 1 межстрочный интервал)

Текст статьи.

Оформляется в две колонки по 8 см, интервал между колонками текста - 5 мм.

Шрифт - Times New Roman,

Размер шрифта 10 пунктов, интервал шрифта – обычный (без растяжения или уплотнения),

Межстрочный интервал - 1.1,

Выравнивание текста - по ширине,

Автоматическая расстановка переносов слов.

Абзацы должны начинаться с красной строки (отступ 7,5 мм).

Полное заполнение страниц (**неполная страница в публикацию включена не будет**).

Иллюстрации к статье

Подаются в виде файлов с расширением *.TIF или *.JPG (серое изображение, разрешение 300 dpi, масштаб 1:1). Рисунки должны быть пронумерованы.

Подписуточные надписи

Подписуточная надпись выполняется шрифтом основного текста на расстоянии одной строки от рисунка, межстрочный интервал – одинарный, например:

Рис. 1. Схема отбора сжатого воздуха от ГТД:

1 – энергия набегающего потока; 2 – отбор воздуха от компрессора низкого давления

Надпись центрируется. Качество рисунков и графиков должно обеспечивать прочтение и тиражирование.

Таблицы

Таблицы должны быть пронумерованы: Таблица 1, Таблица 2, ...и т.д (слово Таблица располагается по правому краю страницы). Заголовок таблицы центрируется. Межстрочный интервал – одинарный. При необходимости размер шрифта можно уменьшить. Никакие сокращения слов, кроме общепринятых, в таблицах не допускаются.

Формулы

Набираются в редакторе формул MathType. Использовать для набора формул графические объекты, кадры и таблицы – запрещается. Произвести настройки редактора в меню:

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

РАЗМЕР→ОПРЕДЕЛИТЬ вести размеры:	
Обычный	10 пт
крупный индекс	80 %
мелкий индекс	70 %
крупный символ	150 %
мелкий символ	90 %

Стиль→ОПРЕДЕЛИТЬ установить параметры			
Стиль	Шрифт	полужирный	курсив
Текст	Times New Roman		
Функция	Times New Roman		
Перемен.	Times New Roman		
Стр. греч.	Symbol		
Пр. греч.	Symbol		
Символ	Symbol		
Матрица	Times New Roman	V	
Числа	Times New Roman		

Формула располагается по центру (без абзаца) строки, нумерация цифровая, сквозная. Номер формулы (в круглых скобках, 10 пт) располагается по правому краю страницы на одном уровне с формулой или ниже. Формульное окно принудительно растягивать или сжимать нельзя. Пояснения значений символов и числовых коэффициентов следует располагать непосредственно под формулой, в той последовательности, в какой они представлены в формуле. Каждое значение необходимо пояснять в новом абзаце с отступом 7,5 мм. Первый ряд пояснений начинают со слова «где» (без отступа), например:

$$\text{Re}_T^{**} = \int_0^x q_w dx \left[\mu^* (i_w^* - i_w) \left(\frac{2}{\pi} \beta + 1 \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где β – угол натекания струи на преграду;

μ^* – вязкость теплоносителя при температуре T^* ;

ψ_Σ – суммарный коэффициент отличия данного процесса теплообмена от стандартного.

Списки

Маркированный (–), нумерованный: формат номера Times New Roman 10пт, абзац 7,5 мм, табуляция после номера 5 мм.

Заголовки

Заголовки каждого раздела должны быть пронумерованы 1, 2, ...

Шрифт – Times New Roman полужирный, строчный, 12пт, выравнивание по центру, 1 межстрочный интервал, отступы абзацев отсутствуют, от окружающего текста отделяется пустыми строками.

Подразделы

При включении подразделов и подпунктов необходимо использовать для каждого заголовка

Шрифт – Times New Roman полужирный, строчный, 10пт, выравнивание по центру, 1 межстрочный интервал, отступы абзацев отсутствуют, от окружающего текста отделяется пустыми строками.

Литература

При цитировании литературы в тексте необходимо указывать номер в квадратных скобках [1]. Нумерация литературы в порядке упоминания. Список использованной литературы приводится в конце статьи (отступ от последней строчки статьи 1 строка одинарного интервала) и начинается ключевым словом **Литература**, набранным строчными буквами (шрифт полужирный 12 пт, по центру, без абзаца). Источники списка литературы оформляются в соответствии с библиографическими требованиями **ДСТУ ГОСТ 7.1:2006** (шрифт курсив 10 пт, выравнивание по ширине, абзац 7,5 мм, 1 межстрочный интервал).

Дополнительная информация

После текста статьи приводится информация, расположенная в одну колонку. Дополнительная информация отделяется от последней строчки текста статьи 1-й строкой, 1 межстрочный интервал. Указывается информация о поступлении статьи в редакцию (курсив, выравнивание по правому краю, 1 межстрочный интервал текста) в виде – *Поступила в редакцию 00.00.2008*

(пустая строка, 10пт, 1 межстрочный интервал)

Далее приводится информация о рецензенте.

Без абзаца, строчный шрифт, 10пт Times New Roman, выравнивание по центру, 1 межстрочный интервал. Начинается текст со слова **Рецензент:** (шрифт полужирный) с указанием научной степени, научного звания, должности, Ф.И.О., организации и города расположения организации.

(пустая строка, 10пт, 1 межстрочный интервал)

Далее приводятся 2 информационных блока на русском, украинском или английском языках (исключается основной язык статьи) в следующем порядке:

Блок на первом языке, (пустая строка, 10пт, 1 межстрочный интервал), **Блок на втором языке**

Каждый блок имеет следующий формат:

ЗАГОЛОВОК СТАТЬИ на соответствующем языке

Без абзаца. Прописные, 10пт Times New Roman, жирный, выравнивание по центру, 1 межстрочный интервал.

И.О.Ф. авторов на соответствующем языке

Без абзаца. Прописные, жирный, курсив, 10пт Times New Roman, выравнивание по центру, 1 межстрочный интервал), интервал перед и после строки – 3 пт.

Аннотация на соответствующем языке

Абзац 7,5 мм. Слово «Аннотация» не пишется. Шрифт - 10пт Times New Roman, выравнивание по ширине, один межстрочный интервал.

Ключевые слова на соответствующем языке

Абзац 7,5 мм. Абзац начинается с надписи **Ключові слова:** (**Ключевые слова:** или **Key words:**) (курсив, жирный, 10пт Times New Roman), а далее разделенные запятой - 6 – 10 слов на соответствующем языке (курсив, 10пт Times New Roman, выравнивание по ширине, один межстрочный интервал).

(пустая строка, 10пт, 1 межстрочный интервал)

За информационными блоками располагаются сведения про авторов.

Приводится информация о каждом авторе статьи.

Фамилия, Имя, Отчество (полностью), научная степень, научное звание, должность, организация, город расположения организации, страна, e-mail, номер контактного телефона.