Уважаемые читатели!

По результатам проведенного в октябре 2020 года опроса половина наших авторов дала наивысшую оценку качеству журнала, а треть – такую же оценку качеству рецензирования.

Редакция журнала постоянно работает над повышением качества и скорости публикации статей. Так, за 2 недели отрецензированы 9 из 13 статей этого выпуска, а за 3 месяца опубликованы 11 из 13 поступивших в номер статей.

Вопросы по поводу публикации присылайте на мой электронный адрес **press@almaz-antey.ru** или по телефону +7 (495) 276-26-13. Напоминаю, что статьи принимаются от организаций России и зарубежья (публикация бесплатная), а на сайте журнала **http://journal.almaz-antey.ru** предоставлена возможность оформить бесплатную подписку на e-mail-рассылку электронной версии издания.

Заместитель главного редактора

Денис Большаков

Д. Ю. Большаков

Тематика статей авторов

Для анализа тематики опубликованных с 2011 по 2020 год статей собраны индексы универсальной десятичной классификации (УДК). Индекс УДК – обязательный атрибут научной статьи на русском языке по «ГОСТ Р 7.0.7-2009 Статьи в журналах…». На рисунке выше индексы УДК авторов статей приведены в облаке слов, размер шрифта в котором совпадает с частотой появления индекса на страницах журнала.

Знание тематики помогает редакции искать новых рецензентов для ускорения прохождения статей в журнале и постоянного формирования круга специалистов для оценки научной составляющей присылаемых рукописей. Это важно и для наших авторов, так как экспертное мнение по качеству материала дает положительную обратную связь от ученых и улучшает качество рукописи. А повышение качества статьи повышает и качество журнала.

В 72 % случаев для статей журнала УДК содержит корневой индекс «62», что совпадает с разделом «Инженерное дело. Техника в целом» классификатора. Следовательно, основу журнала составляют статьи по инженерным наукам, что соответствует определению научно-технического журнала по ГОСТ 7.60-2003 «*Научно-практический журнал, содержащий статьи, материалы, рефераты по техническим наукам, называется научно-техническим журналом*».

Четверть статей маркируются УДК по профильной для Концерна тематике: радиолокация, антенны и радиоэлектронная аппаратура. Однако 75 % оставшихся индексов УДК говорит о расширяющихся областях научных интересов наших авторов и тематик статей. Например, из 343 статей за 2011–2020 годы половина индексов УДК не повторяется. То есть опубликованные в журнале исследования в половине случаев не повторяются в издании. Дважды повторяющиеся индексы УДК появляются в 8 % случаев, трижды в 4 %, четырежды в 1 %.

Четыре года в журнале активно печатаются статьи по газодинамике, конструированию летательных аппаратов и испытаниям материалов для них. Количество статей по этим темам растет, и уже в № 2 за 2018 год больший объем журнала был посвящен разделу «Космические исследования и ракетостроение» и не содержал статей в разделе «Электроника. Радиотехника».

© Большаков Д. Ю., 2020

Редакция не вводит квот по разделам и не наполняет журнал по каждой профильной рубрике. Но редакция старается опубликовать авторов как можно скорее, о чем говорится в обращениях к читателям и где особо подчеркивается, как быстро статьи рецензируются и публикуются.

Редакция открыта для диалога с читателями. Предложения по расширению рассылки журнала, продвижению в Интернете, социальных сетях и международных реферативных базах, улучшению качества рецензирования и наполнению направляйте на электронный почтовый ящик press@almaz-antey.ru

---

Большаков Денис Юрьевич – кандидат технических наук, начальник отдела Акционерного общества «Концерн воздушно-космической обороны “Алмаз – Антей”».

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-6-14
УДК.621.391

Комплексная защита информации в каналах «земля-борт»

Е. М. Ватрухин

Акционерное общество «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва, Российская Федерация

Рассмотрен комплексный метод защиты информации от канальных помех, имитации и ознакомления на основе ансамблей отечественных стохастических кодов, позволяющий сократить количество кодовых и аппаратных средств, применяемых при раздельном решении задач, по сравнению с реализацией единого алгоритма защиты и однократного введения избыточности. Представлены возможности стохастических кодов по реализации заданной гарантированной вероятности безошибочного декодирования в каналах с различными моделями ошибок, включая коротковолновые.

Ключевые слова: стохастические коды, защита от помех, имитостойкость, скрытность, аппаратура передачи данных, достоверность информации, вероятность необнаруженной ошибки, двоичный симметричный канал, q-ичный симметричный канал

Для цитирования: Ватрухин Е. М. Комплексная защита информации в каналах «земля-борт» // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 6–14. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-6-14

For citation: Vatrukhin E. M. Integrated information protection in the ground-to-board channels // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 6–14. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-6-14

Поступила 16.11.2020 *Отрецензирована* 07.12.2020 *Одобрена* 18.12.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Введение

В статье «Новые возможности применения коротковолновой радиосвязи при решении боевой авиацией задач воздушно-космической обороны», опубликованной в № 2 за 2017 г. этого журнала, были рассмотрены вопросы новых информационных возможностей боевых летательных аппаратов за пределами радиогоризонта на базе технологий адаптивной коротковолновой радиосвязи, реализующих качество радиообмена, сравнимое с прямой видимостью.

Настоящий материал является продолжением темы в части одного из ключевых аспектов качества радиообмена, практически не затронутого в предыдущей статье, – возможности обеспечения комплексной защиты информации от всех возможных воздействий на нее в процессе передачи в каналах с непредсказуемыми характеристиками, в первую очередь коротковолновых. Тема статьи относится к вопросам сохранения целостности и скрытности информации в условиях помех и радиопротиводействия отечественной инновационной технологией ***комплексной защиты информации от помех, имитации и несанкционированного ознакомления, реализуемой стохастическими кодами с однократно вводимой избыточностью.***

Возможность широкого применения этой технологии стала результатом многолетних исследований отечественных ученых в теории передачи данных и защиты информации д.т.н. Л.М. Финка, д.т.н. В.И. Коржика, к.т.н. С.А. Осмоловского, д.т.н. Г.А. Кабатянского, д.т.н. И.Ю. Жукова, д.т.н. М.А. Иванова и др. [1–49]. Особая роль в использовании свойств универсальности помехозащитных случайных кодов, создании научного фундамента и реализации комплексной защиты информации с помощью стохастических преобразований принадлежит С.А. Осмоловскому (1946–2018), ученику одного из теоретиков теории связи д.т.н. Л.М. Финка.

© Ватрухин Е. М., 2020

Настоящей статьей автор хотел бы отдать дань уважения многолетнему труду товарища и однокурсника.

Основным фактором искажения информации всегда было и остается постоянное наличие помех в каналах связи, особенно в радиоканалах. Борьба с ними традиционно ведется применением обнаруживающих и/или исправляющих ошибки помехозащитных кодов, реализуемых, как правило, в аппаратуре передачи данных (АПД). Наибольшее распространение в сетях воздушной связи ВКС получила АПД типа Р-098 («Перевал»), эксплуатируемая в течение нескольких последних десятилетий.

Средства радиопротиводействия способны полностью или частично подавлять информационный обмен и/или изменять и навязывать ложную информацию. Защиту от таких воздействий обеспечивают специальные коды имитозащиты, реализуемые в отдельных устройствах. Нейтрализовать подавление обмена сосредоточенными шумовыми помехами можно программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), изменением направления и ширины диаграмм излучения антенн и др.

Конфиденциальность информации, то есть защита от несанкционированного ознакомления, обеспечивается обычно специальной аппаратурой шифрования с использованием криптографических кодов. В ряде случаев в этой аппаратуре задачи сохранения конфиденциальности и имитозащиты решаются одновременно.

Все упомянутые функции защиты традиционно решаются независимо друг от друга схожими кодовыми конструкциями в различных типах аппаратуры, но имеют одну конечную цель – ***сохранение целостности*** информации. При этом нарушение конфиденциальности можно тоже рассматривать, в некотором смысле, как нарушение ее целостности-неприкосновенности для посторонних.

Все функции защиты обеспечиваются кодами, имеющими некоторую количественную избыточность, за счет чего формируются массивы так называемых «запрещенных» кодовых комбинаций, в которые под воздействием помех могут переходить несущие информацию «разрешенные» комбинации. Несколько отлично формируются криптографические коды сохранения скрытности, где главным отличительным фактором их конструкции является статистически равновероятная последовательность сигналов, передаваемая в канал и не зависящая от статистики появления отдельных букв в исходной шифруемой последовательности.

Интуитивное понимание влияния на верность принимаемых дискретных данных избыточного кодирования как инструмента повышения достоверности может дать аналогия с процессом конфиденциального разговора двух абонентов по телефонному каналу с большим зашумлением. В этом процессе «обмена данными» неразборчивые слова и даже отдельные буквы приходится повторять по нескольку раз по просьбе принимающего. Чем больше в итоге было уточнений и повторов, т.е. чем длиннее «кодовая конструкция – информационный блок», тем ближе принятая фраза к оригиналу, т.е. выше достоверность информации.

Можно предположить, что если абонент в условиях шумов способен хоть что-то принимать осмысленно, то возможно в конце концов добиться приема со 100 % достоверностью любой сложности фразы даже в тяжелейших помеховых условиях.

Аналогичный смысл этой фразы для дискретного канала содержится в одной из главных теорем информации К. Шеннона, которая утверждает, что, в принципе, можно получить сколь угодно большую достоверность принимаемой информации, если скорость ее передачи в канале меньше ее пропускной способности (т.е. наихудшего состояния слышимости – «пропускной способности» в приведенном примере, при котором еще существует возможность осмысленно принимать слова и после изменения которого в сторону снижения общение становится бесполезным из-за полного прекращения понимания смысла произнесенного).

Продолжая аналогию с телефонным разговором, также предположим, что в соседнем помещении некто хочет записать с помощью технических средств подслушанный разговор. Абонент такую возможность имеет в виду

и для предотвращения несанкционированной записи включает воду из крана, «стохастический», т.е. случайный, шум которой делает невозможным сохранить смысл разговора при записи. Это сравнение схоже с влиянием случайных сигналов на секретность данных при дальнейшем рассмотрении в статье понятия q-ичного симметричного канала.

Важнейшим параметром оценки эффективности обмена данными служит достоверность получаемой информации, которая зависит главным образом от вероятности ошибки, не обнаруживаемой конкретным защитным кодом ($p_{но}$). Необнаруженная ошибка – это, по сути, потеря информации, возникающая из-за превращения под воздействием помех «разрешенной» комбинации снова в «разрешенную», но соответствующую другому символу. Поэтому для уменьшения этой вероятности перехода желательно выбирать код, ***имеющий большой процент запрещенных кодовых комбинаций***, что ***возможно только при увеличении числа избыточных символов, а значит, увеличении длины кодовой комбинации.***

Из существующего множества избыточных кодов, которые обнаруживают и исправляют ошибки, на практике используется только очень малая их часть: коды Хэмминга, БЧХ, Рида – Соломона, сверточные и появившиеся недавно турбокоды [26]. Объясняется это в первую очередь тем, что распределение ошибок в реальных каналах связи таково, что ни один из этого множества кодов не позволяет обеспечить наперед заданную или ***гарантированную*** (в интересах повышения точности реализации конкретного информационного процесса) вероятность правильного приема информации в конкретном канале связи.

Все они создавались с ориентацией на некоторые математические модели каналов, которые лишь в очень грубых чертах описывают свойства реальных каналов связи [5, 8].

Наиболее часто применяемой при расчете параметров помехозащитного кода является модель некоего идеализированного канала, называемая «двоичным симметричным каналом» (ДСК), где ошибки имеют равные вероятности искажения «0» или «1».

Наиболее ярким образцом нестационарных каналов являются коротковолновые. Нестабильность их характеристик, а также наличие постоянных группирующихся помех не позволило до сегодняшнего дня создать их математическую модель приемлемой точности.

Начался поиск такой модели, желательно универсальной, под которую можно было бы создать код, который при заданных значениях n и k (где n – длина кодовой комбинации с избыточностью в битах, k – длина информационных бит в кодовой комбинации) обеспечивает в любых каналах связи некоторую ***гарантированную*** величину $p_{но}$. При этом желательно, чтобы при малых $p_{но}$ (порядка 10^{-9}–10^{-8}) потребителю практически не выдавалась бы ложная информация, а уменьшение скорости передачи (n/k) информации должно явиться сигналом для перехода к другому качеству канала связи.

Способ создания такого кода был разработан коллективом специалистов военной Академии связи в 70-х годах прошлого столетия во главе с д.т.н. Л.М. Финком [1].

В статье «Универсальное стохастическое кодирование в системах с решающей обратной связью» был математически обоснован ***способ получения заданной вероятности необнаруженной ошибки методом случайного кодирования с помощью стохастических преобразований***.

Под случайным кодированием, введенным в рассмотрение К. Шенноном для помехоустойчивого кодирования, понимают случайный выбор кодовых слов из множества возможных комбинаций с длиной, равной длине кода.

Полученная в этой работе формула (1) вероятности необнаруженной ошибки в любом канале настолько проста, что становится очевидной необходимость построения очень длинных кодов с большой избыточностью для получения малой $p_{но}$

$$p_{но} < 1/2^{n-k}. \qquad (1)$$

Создание нового универсального кода было неразрывно связано с практической реализацией новой модели канала, так называемого $q(ку)$-ичного симметричного канала,

без которого новый код не имело смысла использовать, т. к. это, по сути, две стороны одной медали. С новой моделью появилась необходимость пересмотра некоторых традиционных взглядов на правила построения, кодирования и декодирования помехоустойчивых кодов.

Понятие q-ичного симметричного канала, строго говоря, уже существовало, но только как математическая абстракция. Заслуга С.А. Осмоловского заключается в превращении абстракции в реальную модель и создании под нее помехоустойчивых случайных избыточных кодов, в дальнейшем называемых стохастическими, которые в q-ичном симметричном канале обладают рядом оригинальных свойств. Автор пришел к выводу, что ни один из классических кодов в рамках новой модели использовать не имеет смысла из-за потери их свойств, связанных с обнаружением, локализацией и исправлением ошибок: необходимо создать новый код, использующий факт наличия преобразованного дискретного канала. В реализованной им схеме (рис. 1) применено предложенное в [1] двойное последовательное преобразование: операций кодирования (кодер К) и прямого стохастического преобразования с использованием псевдослучайной последовательности на передающей стороне (R) и операций обратного стохастического преобразования и декодирования на приемной стороне. Совокупность из двух стохастических преобразователей R и R^{-1}, соединенных дискретным каналом связи ДК, образует q-ичный симметричный канал.

Двоичное сообщение разбивается на L-разрядные двоичные наборы – q-ичные символы, общее количество таких символов $q = 2^L$, nL-разрядная кодовая последовательность рассматривается как n-разрядный кодовый блок, состоящий из q-ичных символов, из которых k – информационные, а $n - k$ – избыточные.

В блоке кодирования К происходит преобразование информации И в двоичный n,k код с дальнейшим формированием в кодовые блоки длиной n q-ичных символов, где k символов – информационные. Затем информация поступает в блок прямого стохастического преобразования R, реализующий функцию рандомизации (*Random*) данных в двоичном дискретном канале (ДК) на случайных таблицах с дважды стохастическими матрицами переходов, блок обратного стохастического преобразования, реализующий функцию R^1, блок декодирования, в котором происходит обнаружение и исправление ошибок и выдача потребителю И^1 [2]. Рандомизация двоичных последовательностей служит также средством повышения точности описания исходов декодирования. Блоки R и R^1 осуществляют преобразование каждого q-ичного символа, при этом результат преобразования статистически не зависит от результатов преобразования других символов кодовой последовательности, что присуще криптографическим алгоритмам.

Свойство, которым теперь обладает преобразованный канал, заключается в равновероятности всех ситуаций, в которых происходят ошибки декодирования.

Таким образом, был практически создан дискретный канал новой модели, в котором

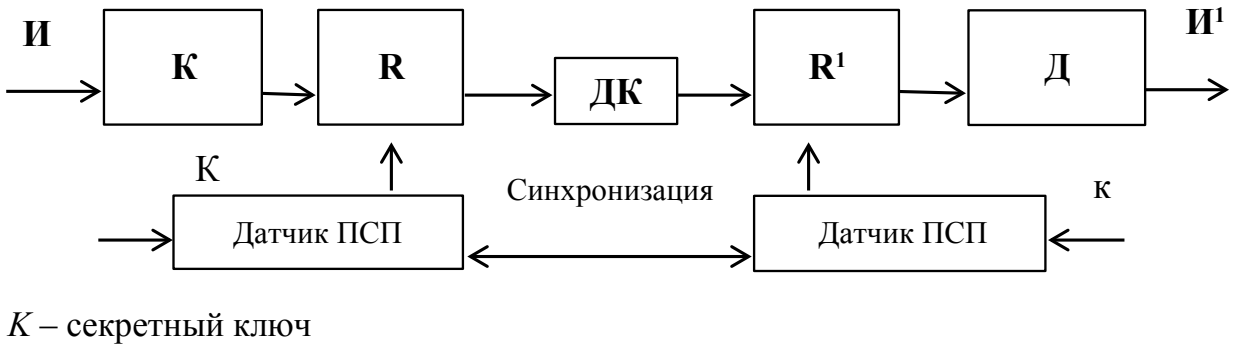


Рис. 1. Схема передачи данных в q-ичном симметричном канале с применением стохастического кодирования

каждая ошибка L-разрядного q-ичного символа равна вероятности ошибки всех его остальных (q – 1) символов. При этом вероятность появления каждой ситуации, приводящей к ошибке декодирования, можно легко рассчитать, что позволило обеспечить наперед заданную вероятность правильного приема информации [2]. Автор обосновал длину q-ичного символа L равной 32 бит, при которой $p_{но}$ гарантирована не хуже 10^{-9}.

Современная тенденция к повышению точности обработки информационных потоков является объективной, что требует пересмотра требований к гарантированной вероятности ошибок в принимаемых данных после декодирования в сторону ее уменьшения до 10^{-9} с обычной сегодня, в большинстве случаев, 10^{-6}.

Такое повышение достоверности информации необходимо сегодня в системах управления при передаче координат целей высокоточным средствам поражения, при обработке и хранении больших объемов данных (big data), команд на применение спецоружия, управления БПЛА, для защиты информации при передаче открытых ключей в общей сетевой среде, идентификации «свой-чужой», передачи информации в декаметровом диапазоне волн и т.п.

В основу построения стохастических кодов с исправлением ошибок положен принцип локализации правильно принятой последовательности, использующий, в том числе, и некоторые положения современной теории линейных двоичных кодов [7].

Кратность исправляемых стохастическими кодами ошибок имеет вид $t = d – 2$ (где d – кодовое расстояние) [3]. Для большинства помехозащитных кодов $t = d – 1/2$.

Оптимальные параметры (n,k,q)-кодов для обеспечения максимальной скорости передачи n/k связаны с качеством канала (вероятностью искажения q-ичного символа p_q), максимальной кратностью исправляемых ошибок $d – 2$ и длиной кода n выражением $np_q = d – 2$.

Стохастические коды имеют тесную взаимосвязь между свойствами помехозащищенности и информационной скрытности, что позволяет при соответствующей реализации одновременно дополнительно обеспечивать секретность и контроль целостности передаваемой информации.

Практический метод такой реализации предложен д.т.н. М.А. Ивановым, специалистом в области защиты информации. Учитывая, что процедуры создания средств обеспечения секретности в нашем государстве жестко регламентированы и новые методы ее обеспечения должны быть специфицированы установленным порядком, предложено решение этих задач выполнять в соответствии с хорошо адаптируемыми под стохастические коды требованиями размеров блочных шифров стандарта ГОСТ Р 34.12-2015 «Информационная технология. Криптографическая защита информации. Блочные шифры».

Чтобы получить необходимые дополнительные функции, предложено реализовать в качестве блоков R и R^{-1} (рис. 1) многораундовые стохастические преобразования, а для генерации параметров стохастического преобразования – многовыходной генератор псевдослучайной последовательности (ГПСП), имеющий двухступенчатую конструкцию и специфицированный в ГОСТ Р 34.12-2015 для реализации шифрования методом гаммирования.

Реализация предложенной схемы передачи данных позволяет обеспечить ***универсальную защиту передаваемых данных единым алгоритмом с одноразовым внесением избыточности.*** При этом ***решается задача защиты от помех элементами стохастического помехоустойчивого кодирования, а секретность и целостность информации обеспечиваются за счет иных, криптографических по сути, схем прямого и обратного стохастического преобразования и требованиями к ГПСП, специфицированными в ГОСТ Р 34.12-2015 [5].***

Исправляющая способность стохастических кодов была испытана в рамках выполненной в Концерне ВКО ОКР «Арго» (автор выполнял функции Главного конструктора) на ансамбле из четырех стохастических кодов различной длины (8,2; 8,4; 16,7; 16,11), которые в коротковолновом канале обеспечили возможность использования адаптации к его

состояниям с повышением исправляющей способности различными длинами одновременно с сигнально-кодовыми конструкциями примененных КВ модемов.

При управлении авиацией, где зачастую необходим только режим однонаправленной передачи с требуемой гарантированной вероятностью, применение стохастических кодов, исправляющих ошибки, может иметь хорошую перспективу. Исправление ошибок, в принципе, способствует качественному улучшению сетевых технологий, прежде всего в части повышения их производительности, поскольку отказ от алгоритмических методов защиты информации методом переспроса при обнаружении ошибки и переход к кодовым методам исправления существенно повышает производительность дорогостоящих сетевых ресурсов. Кроме того, при исключении временных потерь на перезапрос увеличивается скорость обмена данными в радиосетях.

Ну и, безусловно, возможность программно реализовать одной кодовой конструкцией еще две важные функции защиты информации – имитостойкость и скрытность – является пока уникальной по критерию «эффективность–стоимость».

Практическое применение для работы в коротковолновом канале стохастические коды нашли в разработке специальной аппаратуры «Весна-4М».

Заключение

Использование стохастических преобразований в области комплексной защиты информации не имеет аналогов.

Достижением отечественной науки, признанным за рубежом [4, 49], можно считать создание новой модели q-ичного канала и ансамблей случайных стохастических кодов. Их наличие позволило получать высокие гарантированные достоверности с оптимальными для конкретного состояния канала скоростями обмена данными в широком классе каналов с непредсказуемыми параметрами, в частности коротковолнового диапазона.

В течение всего сеанса связи, когда характеристики таких каналов могут меняться неоднократно, применение ансамблей кодов обеспечивает устойчивый обмен за счет выбора из ансамбля оптимальной к каждому состоянию канала длины кода.

Использование q-ичного симметричного канала в этом диапазоне может стать лучшей альтернативой, причем «бесплатной», специальной процедуре перемежения, нашедшей широкое применение в коротковолновых модемах. Эта процедура предпринимается с целью преобразования групповых ошибок (пакетов ошибок) в одиночные ошибки, поскольку пакеты ошибок с большой вероятностью рассыпаются на одиночные ошибки.

Теми же кодовыми конструкциями при необходимости обеспечивается секретность информации.

Стохастические коды могут занять свое место для универсальной защиты информации с минимальными затратами в перспективных системах управления ВКС, гражданской авиации, включая радиоканалы управления пилотируемыми и особенно беспилотными летательными аппаратами, где необходим высокий уровень защиты от всех воздействий без применения шифрующей аппаратуры [6, 50].

Они эффективны для защиты информации в любых каналах обмена данными, при их хранении в памяти ЭВМ, для защиты от перехвата и дешифровки трафика в локальных вычислительных сетях [50], а также при обращении информации на разных видах носителей.

Список литературы

1. Коржик В.И., Осмоловский С.А., Финк Л.М. Универсальное стохастическое кодирование в системах с решающей обратной связью // Проблемы передачи информации. 1974. Т. 10, вып. 4. С. 25–29.

2. Иванов М.А., Ковалев А.В., Мацук Н.А., Чугунков И.В. Стохастические методы и средства защиты информации в компьютерных системах и сетях / Под ред. д.т.н. И.Ю. Жукова. М.: Кудиц пресс, 2009. 602 с.

3. Осмоловский С.А. Стохастическая информатика: инновации в информационных системах. Монография. М.: Горячая линия-Телеком, 2012.

4. Torleiv Klove, Korzhik V.I. Error Detecting Codes.General Theory and Their Application

in Feedback Communication System. Springer, 1995. 249 p. (разд. 1.4, 4.2).

5. Иванов М.А. Способ обеспечения универсальной защиты информации, пересылаемой по каналу связи // Вопросы кибербезопасности. 2019. № 3 (31). С. 45–50.

6. Мальцев Г.Н. Помехоустойчивость и скрытность передачи информации по радиоканалам на основе комбинированного случайного кодирования // Кодирование и передача информации. 2015. С. 82–89.

7. Моисеенков И. Основы безопасности компьютерных систем // Компьютер Пресс. 1991. № 10. С. 19–24; № 11. С. 7–21.

8. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Советское Радио, 1970. 728 с.

9. Иванов М.А., Чугунков И.В. Криптографические методы защиты информации в компьютерных системах и сетях. Учебное пособие / Под ред. М.А. Иванова. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 400 с.

10. Осмоловский С.А. Универсальная защита информации: прецизионная защита информации. Монография. Издательский дом «Сталинград», 2014. 266 с.

11. Осмоловский С.А. Способ передачи и комплексной защиты информации. Патент РФ № 2367007, приоритет 20.08.2007. Решение о выдаче патента от 18.03.2009.

12. Осмоловский С.А. Построение и характеристики стохастических кодов, исправляющих ошибки // Вопросы радиоэлектроники. Серия общетехническая. 1980 (1981). Вып. 13/2. С. 136–146.

13. Осмоловский С.А. Стохастические методы передачи данных. М.: Радио и связь, 1991.

14. Осмоловский С.А. Стохастические методы защиты информации. М.: Радио и связь, 1995. С. 42–53.

15. Жуков И.Ю., Иванов М.А., Осмоловский С.А. Принципы построения генераторов псевдослучайных кодов, используемых при построении стойких криптоалгоритмов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2001. № 1. С. 27–44.

16. Осмоловский С.А. Стохастическая информатика // Радиоэлектроника и управление. 2003. № 10–12.

17. Осмоловский С.А. Способ блочного шифрования информации. Патент России № 2266622. Заявка на патент РФ № 2004108916/09 (009857), приоритет 29.03.2004.

18. Осмоловский С.А. Способ генерации случайных чисел. Патент России № 2246129. Заявка на патент РФ № 2003100491/09 (000765), приоритет 13.01.2003.

19. Осмоловский С.А. Алгоритмы декодирования и свойства стохастических кодов с исправлением ошибок // Техника средств связи. Сер. ТПС. 1984. Вып. 4. С. 96–109.

20. Осмоловский С.А. Устройство для коррекции ошибок в блоках памяти. Авторское свидетельство СССР № 1086460, приоритет 16.07.1982, опубликовано 15.04.84, бюллетень № 14.

21. Осмоловский С.А. Стохастические коды, исправляющие ошибки с гарантированной точностью // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2001. № 2, 3. С. 15–24.

22. Осмоловский С.А. Помехоустойчивое кодирование: кризис и пути выхода из него // Вестник РУДН. Серия Прикладная и компьютерная математика. 2004. Т. 3, № 1. С. 161–169.

23. Осмоловский С.А. О возможности универсальной защиты информации стохастическими кодами // Вестник РУДН. Серия Прикладная и компьютерная математика. 2004. Т. 3, № 1. С. 170–177.

24. Осмоловский С.А. Стохастические технологии в информационно-телекоммуникационных системах: цели и ожидаемые результаты применения // Вестник РУДН. Серия Прикладная и компьютерная математика. 2005. Т. 4, № 1. С. 179–190.

25. Осмоловский С.А. Корректирующие коды для систем с гарантированными характеристиками и алгоритмом декодирования на основе предварительной локализации правильно принятых символов // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2006. № 1, 2. С. 65–70.

26. Осмоловский С.А. Турбокоды со случайным перемежением и стохастические коды с исправлением ошибок: общие и отличающиеся черты и свойства // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2006. № 1, 2. С. 71–75.

27. Осмоловский С.А. Общие принципы построения, свойства и возможности стохастических кодов // Системы и средства связи,

телевидения и радиовещания. 2006. № 1, 2. С. 65–70.

28. Осмоловский С.А. Информационные технологии защиты информации стохастическими кодами с исправлением ошибок // Труды VII международной конференции ICINASTe-2001, Минск, 2001. Т. 3. С. 15–22.

29. Осмоловский С.А. Абсолютная секретность по Шеннону — подход к реализации // Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2002. Т. 12.

30. Осмоловский С.А. Стохастическое помехоустойчивое кодирование как средство обобщения и решения задач помехоустойчивости и секретности в постановке Шеннона // Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2002. Т. 12.

31. Осмоловский С.А. О возможности защитить информацию от всех видов воздействий в рамках одного алгоритма // Труды IV Международного научного семинара. Информационные сети, системы и технологии. Москва, 16–19 сентября 2003 г.

32. Осмоловский С.А. Новое поколение программных средств стохастической защиты информации // Труды Пятого Всероссийского симпозиума по прикладной и промышленной математике, Кисловодск, 2–8 мая 2004 г.

33. Осмоловский С.А. Стохастическая информатика как новое направление в прикладной информатике // Труды V Международного семинара. Информационные сети, системы и технологии. Москва, 26–27 октября 2004 г.

34. Осмоловский С.А. Стохастическая информатика // Труды V Международного семинара «Информационные сети, системы и технологии». Москва, 26–27 октября 2004 г.

35. Осмоловский С.А., Скворцов В.Д. Исследование свойств программной реализации методов стохастической защиты // Труды V Международного семинара «Информационные сети, системы и технологии». Москва, 26–27 октября 2004 г.

36. Осмоловский С.А. Искусственные стохастические информационные системы: цели и порядок применения // Проблемы и методы информатики. II Научная сессия ИПИ РАН. Тезисы докладов. М.: ИПИ РАН, 2005. С. 116–119.

37. Осмоловский С.А. Новые задачи, которые можно решать только стохастическими методами // Материалы 6-го Всероссийского симпозиума по прикладной и промышленной математике (весенняя сессия). Санкт-Петербург, 3–7 мая 2005 г. СПб.: Редакция журнала ОПиПМ. С. 171–172.

38. Осмоловский С.А. Стохастические методы защиты информации: отличительные черты // Материалы 6-го Всероссийского симпозиума по прикладной и промышленной математике (весенняя сессия). Санкт-Петербург, 3–7 мая 2005 г. СПб.: Редакция журнала ОПиПМ. С. 172–173.

39. Осмоловский С.А. Стохастическое преобразование как ансамбль шифров // Материалы 6-го Всероссийского симпозиума по прикладной и промышленной математике (весенняя сессия), Санкт-Петербург, 3–7 мая 2005 г. СПб.: Редакция журнала .ОПиПМ. С. 173–174.

40. Осмоловский С.А. Стохастическое кодирование с исправлением ошибок как прорывная технология в области защиты информации // Материалы 12-й Всероссийской школы-коллоквиума по стохастическим методам (осенняя сессия), Сочи, 1–7 октября 2005 г. СПб.: Редакция журнала ОПиПМ. Т. 12. Вып. 3. С. 675–676.

41. Осмоловский С.А., Першов А.Н. Создание конкурентоспособной продукции в сфере телекоммуникаций за счет использования отечественных информационных технологий // Материалы Международной научной конференции МКИССиТ-2006. Информационные сети, системы и технологии. Санкт-Петербург, 30 октября — 2 ноября 2006 г. С. 11–13.

42. Осмоловский С.А. Стохастическая комплексная защита информации как средство создания нового поколения телекоммуникаций // Материалы Международной научной конференции МКИССиТ-2006. Информационные сети, системы и технологии. Санкт-Петербург, 30 октября — 2 ноября 2006. С. 42–44.

43. Осмоловский С.А. О пропускной способности произвольного канала связи // Материалы 14-й Всероссийской школы-коллоквиума по стохастическим методам (осенняя сессия). Сочи, 29 сентября — 7 октября 2007 г. СПб.:

Редакция журнала ОПиПМ. Т. 13. Вып. 4. С. 735–737.
44. Kabatiansky G., Osmolovsky S. On decoding of interleaving codes // Proceedings of the Workshop .Coding theory days in St. Petersburg.. Saint-Petersburg, Russia, October 6–19, 2008. P. 22–26.
45. Осмоловский С.А. Способ защиты информации в радио и локальной вычислительной сети. Патент России № 2266621. Заявка на патент Российской Федерации № 2004108917/09 (009958), приоритет 29.03.2004.
46. Осмоловский С.А. Способ адаптивной передачи информации. Патент России № 2264647. Заявка на патент РФ № 2004108918/09(009859), приоритет 29.03.2004.
47. Осмоловский С.А. Способ комплексной защиты информации. Патент России № 2292122. Заявка на патент РФ № 2005113925/09(016013).
48. Осмоловский С.А. Универсальный способ передачи информации с контролируемыми параметрами. Патент России № 2319199. Заявка на патент РФ № 2006109371/09(010194), приоритет 27.03.2006.
49. Torleiv Klove. University of Bergen, Norway. Series on Coding Theory and Cryptology. Codes for Error Detecting. Ch. 2. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2007.

Об авторе

Ватрухин Евгений Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-технического центра воздушно-космической обороны Акционерного общества «Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва, Российская Федерация.
Область научных интересов: информационно-управляющие, телекоммуникационные, навигационные системы, защищенные системы, передача данных, радиосвязь.

Integrated information protection in the ground-to-board channels

E. M. Vatrukhin

“Almaz – Antey” Corporation, JSC, Moscow, Russian Federation

This paper considers an integrated method of information protection against channel interference, imitation and familiarization based on ensembles of domestic stochastic codes. In comparison with the use of a single protection algorithm and a single introduction of redundancy, the proposed method reduces the number of code and hardware tools used when problems are to be solved separately. The possibilities of stochastic codes for the implementation of a given guaranteed probability of error-free decoding in channels with various error models, including short-wave ones, are presented.

Keywords: stochastic codes, protection against interference, imitation resistance, secrecy, data transmission equipment, information reliability, probability of undetected error, binary symmetric channel, q-ary symmetric channel

Information about the author

Vatrukhin Evgeny Mikhailovich – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Research Organization,“Almaz – Antey” Corporation, JSC, Moscow, Russian Federation.
Research interests: information management, telecommunication and navigation systems; guarded systems; data transmission; radio communications.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-15-21
УДК: 621.396.67

Диаграмма направленности антенной решетки с неэквидистантным расположением приемных элементов

С. В. Зимина, М. Е. Францев

Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники», Нижний Новгород, Российская Федерация

В статье представлен анализ диаграммы направленности антенной решетки с неэквидистантным расположением приемных элементов. Данная задача является актуальной для синтеза антенных решеток с требуемым расположением нулей и максимумов в диаграмме направленности. Показано, что анализ позволяет получить аналитическое выражение диаграммы направленности плоской фазированной антенной решетки, приемные элементы которой расположены на полотне антенны.

Ключевые слова: диаграмма направленности, неэквидистантная антенная решетка, фазированная антенная решетка

Для цитирования: Зимина С. В., Францев М. Е. Диаграмма направленности антенной решетки с неэквидистантным расположением приемных элементов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 15–21. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-15-21

For citation: Zimina S. V., Frantsev M. E. Directional pattern of an antenna array with non-equidistant arrangement of receiving elements // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 15–21. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-15-21

Поступила 05.08.2020 *Отрецензирована* 21.08.2020 *Одобрена* 27.10.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Диаграмма направленности (ДН) – одна из основных характеристик антенного устройства. Аналитическое описание диаграммы направленности является актуальным при разработке новых радиолокационных станций (РЛС), поскольку позволяет синтезировать антенные системы с заранее известным расположением максимумов и нулей в зависимости от решаемых задач. Практически важным представляется создание многоканального автокомпенсатора помех (МКП) с использованием компенсационных каналов (КК), сформированных из произвольно выбранных приемных элементов фазированной антенной решетки (ФАР). Такое построение антенной решетки (АР) позволяет обеспечить многофункциональность полотна АР, а также позволяет сформировать КК с пространственно распределенными фазовыми центрами, что улучшает адаптацию такого автокомпенсатора к различному пространственному распределению помех и способствует более качественному их подавлению.

Для решения поставленной задачи был выбран вариант расположения элементов антенны на некотором условном прямоугольном полотне АР. Целью данной работы является получение общей формулы диаграммы направленности плоской антенной решетки с неэквидистантным расположением ее элементов.

1. Постановка задачи

Рассмотрим фазированную антенную решетку, схема расположения элементов которой приведена на рисунке 1. Из соображений практического выполнения подрешеток ее приемные элементы расположены неэквидистантно по полотну антенны. Для каждого из четырех блоков рассматриваемых элементов, размещенных вдоль четырех сторон полотна антенны, имеет место свое начальное расстояние от фазового центра антенны ($\{y_{0Н}, y_{0В}\}$, $\{z_{0Л}, z_{0П}\}$). Расстояния между горизонтально

© Зимина С. В., Францев М. Е., 2020

и вертикально расположенными элементами равны $\{y_{1H}, y_{1B}\}$ и $\{z_{1Л}, z_{1П}\}$ соответственно.

Получим аналитическую формулу диаграммы направленности антенны компенсационных каналов.

2. Задание систем координат и углов прихода сигналов

Для вычисления диаграмм направленности будем считать, что ось z расположена вдоль вертикальной стороны полотна антенны, ось y расположена вдоль нижней горизонтальной стороны полотна антенны. Ось x расположим перпендикулярно полотну антенны. При задании направления осей было предположено, что они составляют правую тройку. Начало координат расположим в левом нижнем углу полотна антенны. Будем считать, что фазовый центр антенной решетки расположен в начале координат.

Зададим углы прихода сигналов. Пусть азимутальный угол прихода сигналов φ отсчитывается от оси X и изменяется в горизонтальной плоскости в интервале [–π/2; π/2]. Пусть угол места θ отсчитывается от оси X и изменяется в вертикальной плоскости в интервале [–π/2; π/2]. Отрицательные значения углов означают левую и нижнюю полуплоскости, положительные – правую и верхнюю полуплоскости соответственно. Направление φ = 0; θ = 0 совпадает с осью Ox, расположенной по нормали к плоскости антенной решетки.

3. Диаграмма направленности антенной решетки по мощности с неэквидистантным расположением приемных элементов

Диаграмма направленности (множитель решетки) АРКК в горизонтальном направлении имеет вид [1, 2]:

$$A_g(\varphi,\theta) = \sum_{i=1}^{N_Г^{ААР}} \exp\{\tilde{j} \cdot \psi_{Гi}\}. \qquad (1)$$

Здесь $N_Г^{ААР} = N_{ГН} + N_{ГВ}$ – число горизонтально расположенных элементов АРКК, $N_{ГН}$ – число элементов в нижней линейке элементов, $N_{ГВ}$ – число элементов в верхней линейке элементов), $\psi_{Гi}$ – набег фазы на i-м горизонтальном элементе.

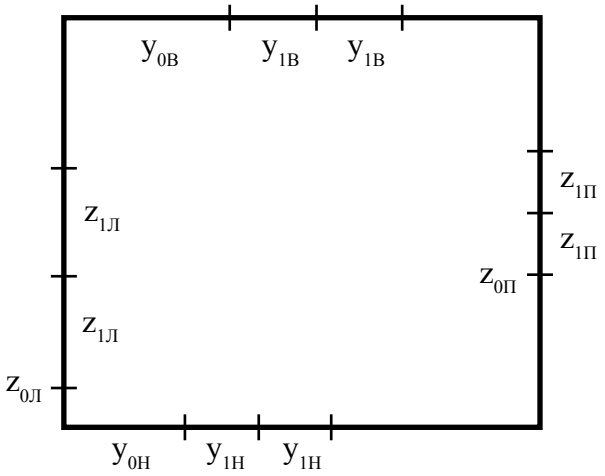


Рис. 1. Схема расположения приемных элементов фазированной антенной решетки

Поскольку имеются две горизонтальные линейки элементов, то и ряд (1) состоит из двух частей, описывающих набег фазы на этих линейках элементов:

$$A_g(\varphi,\theta) = \sum_{i1=1}^{N_{ГН}} \exp\{\tilde{j} \cdot \psi_{ГНi1}\} + \sum_{i2=1}^{N_{ГВ}} \exp\{\tilde{j} \cdot \psi_{ГВi2}\}. \qquad (2)$$

В выражении (2):

$$\begin{aligned} \psi_{ГНi1} &= \frac{2\pi}{\lambda}(y_{0H} + (i1-1)y_{1H}) \cdot \sin\varphi\cos\theta \\ \psi_{ГВi2} &= \frac{2\pi}{\lambda}(y_{0B} + (i2-1)y_{1B}) \cdot \sin\varphi\cos\theta \end{aligned} \qquad (3)$$

– набег фазы сигнала на нижней и верхней горизонтальных линейках элементов соответственно.

Подставляя (3) в (2) и проводя преобразования, имеем:

$$\begin{aligned} A_g(\varphi,\theta) &= \exp\left\{\tilde{j}\frac{2\pi}{\lambda} y_{0H} \sin\varphi\cos\theta\right\} \cdot \\ &\sum_{i1=1}^{N_{ГН}} \exp\left\{\tilde{j} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} y_{1H}(i1-1)\sin\varphi\cos\theta\right\} + \\ &+ \exp\left\{\tilde{j}\frac{2\pi}{\lambda} y_{0B} \sin\varphi\cos\theta\right\} \\ &\sum_{i2=1}^{N_{ГВ}} \exp\left\{\tilde{j} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} y_{1B}(i2-1)\sin\varphi\cos\theta\right\} \end{aligned} \qquad (4)$$

Обозначая:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_{ГН0} &= \frac{2\pi}{\lambda} y_{0H} \sin\varphi\cos\theta; \\ \tilde{\psi}_{ГН} &= \frac{2\pi}{\lambda} y_{1H} \sin\varphi\cos\theta \end{aligned} \qquad (5)$$

$$\tilde{\psi}_{ГВ0} = \frac{2\pi}{\lambda} y_{0B} \sin\varphi\cos\theta;$$
$$\tilde{\psi}_{ГВ} = \frac{2\pi}{\lambda} y_{1B} \sin\varphi\cos\theta \qquad (6)$$

и вычисляя значения сумм в (4), получаем формулу множителя решетки по азимутальному углу для неэквидистантной антенной решетки:

$$A_g(\varphi,\theta) = \frac{\sin\left(\frac{N_{ГН}\tilde{\psi}_{ГН}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\tilde{\psi}_{ГН}}{2}\right)} \exp\left\{\tilde{j}\left(\tilde{\psi}_{ГН0} + \frac{(N_{ГН}-1)\tilde{\psi}_{ГН}}{2}\right)\right\} + \frac{\sin\left(\frac{N_{ГВ}\tilde{\psi}_{ГВ}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\tilde{\psi}_{ГВ}}{2}\right)} \exp\left\{\tilde{j}\left(\tilde{\psi}_{ГВ0} + \frac{(N_{ГВ}-1)\tilde{\psi}_{ГВ}}{2}\right)\right\} \qquad (7)$$

Выполняя аналогичные вычисления, можно получить выражение множителя АР по углу места:

$$A_v(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{N_{ВЛ}\tilde{\psi}_{ВЛ}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\tilde{\psi}_{ВЛ}}{2}\right)} \exp\left\{\tilde{j}\left(\tilde{\psi}_{ВЛ0} + \frac{(N_{ВЛ}-1)\tilde{\psi}_{ВЛ}}{2}\right)\right\} + \frac{\sin\left(\frac{N_{ВП}\tilde{\psi}_{ВП}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\tilde{\psi}_{ВП}}{2}\right)} \exp\left\{\tilde{j}\left(\tilde{\psi}_{ВП0} + \frac{(N_{ВП}-1)\tilde{\psi}_{ВП}}{2}\right)\right\} \qquad (8)$$

Здесь:

$$\tilde{\psi}_{ВЛ0} = \frac{2\pi}{\lambda} z_{0Л} \sin\theta; \quad \tilde{\psi}_{ВЛ} = \frac{2\pi}{\lambda} z_{1Л} \sin\theta \qquad (9)$$

$$\tilde{\psi}_{ВП0} = \frac{2\pi}{\lambda} z_{0П} \sin\theta; \quad \tilde{\psi}_{ВП} = \frac{2\pi}{\lambda} z_{1П} \sin\theta \qquad (10)$$

Выражения (9)–(10) описывают набеги фазы на левой и правой вертикальных линейках элементов.

Умножая формулу (7) на (8) и вычисляя модуль полученного комплексного выражения, получим вид диаграммы направленности по мощности антенной решетки с неэквидистантным расположением элементов:

$$|A(\varphi,\theta)|^2 = \left\{ \frac{\sin^2\left(\frac{N_{ГН}\tilde{\psi}_{ГН}}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\tilde{\psi}_{ГН}}{2}\right)} + \frac{\sin^2\left(\frac{N_{ГВ}\tilde{\psi}_{ГВ}}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\tilde{\psi}_{ГВ}}{2}\right)} + 2\frac{\sin\left(\frac{N_{ГН}\tilde{\psi}_{ГН}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\tilde{\psi}_{ГН}}{2}\right)}\frac{\sin\left(\frac{N_{ГВ}\tilde{\psi}_{ГВ}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\tilde{\psi}_{ГВ}}{2}\right)} \times \right.$$
$$\left. \times \cos\left([\tilde{\psi}_{ГН0} - \tilde{\psi}_{ГВ0}] + [\frac{(N_{ГН}-1)}{2}\tilde{\psi}_{ГН} - \frac{(N_{ГВ}-1)}{2}\tilde{\psi}_{ГВ}]\right) \right\} \times$$
$$\times \left\{ \frac{\sin^2\left(\frac{N_{ВЛ}\tilde{\psi}_{ВЛ}}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\tilde{\psi}_{ВЛ}}{2}\right)} + \frac{\sin^2\left(\frac{N_{ВП}\tilde{\psi}_{ВП}}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\tilde{\psi}_{ВП}}{2}\right)} + 2\frac{\sin\left(\frac{N_{ВЛ}\tilde{\psi}_{ВЛ}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\tilde{\psi}_{ВЛ}}{2}\right)}\frac{\sin\left(\frac{N_{ВП}\tilde{\psi}_{ВП}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\tilde{\psi}_{ВП}}{2}\right)} \times \right.$$
$$\left. \times \cos\left([\tilde{\psi}_{ВЛ0} - \tilde{\psi}_{ВП0}] + [\frac{(N_{ВЛ}-1)}{2}\tilde{\psi}_{ВЛ} - \frac{(N_{ВП}-1)}{2}\tilde{\psi}_{ВП}]\right) \right\} \qquad (11)$$

Из структуры формулы (11) можно видеть, что диаграмма направленности состоит из произведения диаграмм направленности горизонтально расположенных и вертикально расположенных элементов (две фигурные скобки).

Рассмотрим частные случаи.

1. Антенная решетка эквидистантная и симметричная – расстояния между элементами, число элементов в верхнем и нижнем блоках горизонтально расположенных элементов и в левом и правом блоках вертикально

расположенных элементов, соответственно, одинаковое:

- $\tilde{\psi}_{ГН0} = \tilde{\psi}_{ГВ0} = \tilde{\psi}_{ГН} = \tilde{\psi}_{ГВ} = \tilde{\psi}_{Г}$;
- $N_{ГН} = N_{ГВ} = N_{Г}$;
- $\tilde{\psi}_{ВЛ0} = \tilde{\psi}_{ВП0} = \tilde{\psi}_{ВЛ} = \tilde{\psi}_{ВП} = \tilde{\psi}_{В}$;
- $N_{ВЛ} = N_{ВП} = N_{В}$.

В этих предположениях из формулы (11) получаем:

$$\left|A(\phi,\theta)\right|^2 = 4^2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{N_Г \tilde{\psi}_Г}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\tilde{\psi}_Г}{2}\right)} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{N_В \tilde{\psi}_В}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\tilde{\psi}_В}{2}\right)}. \quad (12)$$

Выражение (12) описывает ДН эквидистантной плоской антенной решетки [1], которая представляет собой частный случай неэквидистантной ФАР. Таким образом, общее выражение (11) диаграммы направленности неэквидистантной антенной решетки в предположениях, описывающих эквидистантную антенну, сводится к классической формуле диаграммы направленности, описанной в учебниках.

2. Рассмотрим частные случаи неэквидистантной ФАР. Антенная решетка симметричная и неэквидистантная – число элементов и расстояния между всеми горизонтально расположенными и вертикально расположенными элементами, соответственно, одинаковые. Расстояние линеек элементов до фазового центра антенны различное.

- $\tilde{\psi}_{ГН} = \tilde{\psi}_{ГВ} = \tilde{\psi}_{Г}$;
- $N_{ГН} = N_{ГВ} = N_{Г}$;
- $\tilde{\psi}_{ВЛ} = \tilde{\psi}_{ВП} = \tilde{\psi}_{В}$;
- $N_{ВЛ} = N_{ВП} = N_{В}$.

В этом случае ДН антенны по мощности имеет вид:

$$\left|A(\varphi,\theta)\right|^2 = 4^2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{N_Г \tilde{\psi}_Г}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\tilde{\psi}_Г}{2}\right)} \cdot \cos^2\left(\frac{\tilde{\psi}_{ГН0} - \tilde{\psi}_{ГВ0}}{2}\right) \times \frac{\sin^2\left(\frac{N_В \tilde{\psi}_В}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{\tilde{\psi}_В}{2}\right)} \cdot \cos^2\left(\frac{\tilde{\psi}_{ВЛ0} - \tilde{\psi}_{ВП0}}{2}\right). \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что диаграмма направленности неэквидистантной симметричной антенной решетки подобна ДН эквидистантной антенны, только в ней появляется дополнительное число локальных минимумов. В зависимости от задач использования АР в РЛС возможно создавать ДН с требуемым количеством или максимумов, или нулей.

Применение данной теории особенно актуально, если в процессе обработки сигналов в зависимости от текущей помеховой обстановки выбирать из элементов плоской неэквидистантной АР соответствующий контур, позволяющий сформировать нули в направлениях действующих в данный момент помех.

4. Использование формул диаграмм направленности для формирования нулей ДН антенной решетки

В принципе существует немало способов, используя теоретические формулы диаграмм направленности (11) и (13), сформировать нули в заданных направлениях, однако в каждом случае будут оставаться еще «побочные эффекты» выбранных решений в виде «лишних» нулей либо максимумов. Чтобы точно решить поставленную задачу, необходимо разместить неэквидистантным образом приемные элементы антенны не только на периметре ее полотна, но и по всему полотну. Тогда за счет увеличения числа настраиваемых расстояний между элементами появляется теоретическая возможность сформировать максимумы и нули ДН в любых направлениях.

Проиллюстрируем полученные формулы двумя примерами.

1. Пусть необходимо синтезировать АР с максимумами ДН по углу места в направлениях от 10º до 60º с интервалом в 10º. При построении рассматривалась 16-элементная антенная решетка, содержащая по четыре элемента в каждой из двух горизонтальных и двух вертикальных линеек элементов ($N_Г = N_В = 4$). Разность расстояний от фазового нуля до левой и правой вертикальных линеек элементов составляла $z_{0Л} - z_{0П} = k_1\lambda - k_2\lambda = 5{,}737 \cdot \lambda$. Расстояния между приемными элементами вертикальных линеек элементов антенны составляли

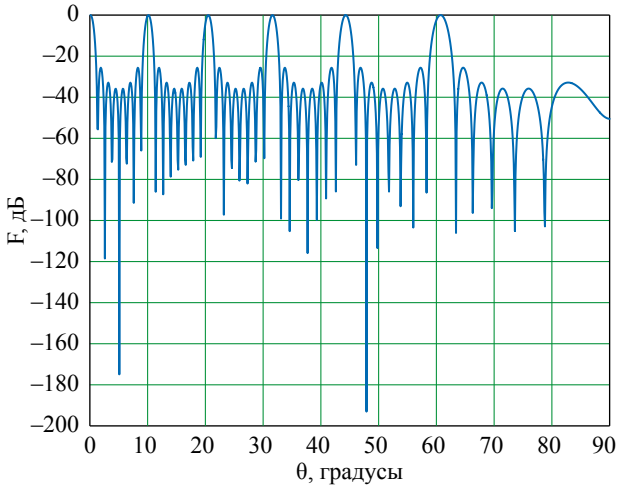


Рис. 2. Нормированная диаграмма направленности F (дБ) антенной решетки в зависимости от угла места θ (случай синтеза ДН, имеющей максимумы в направлениях от 10 до 60 градусов с интервалом в 10 градусов)

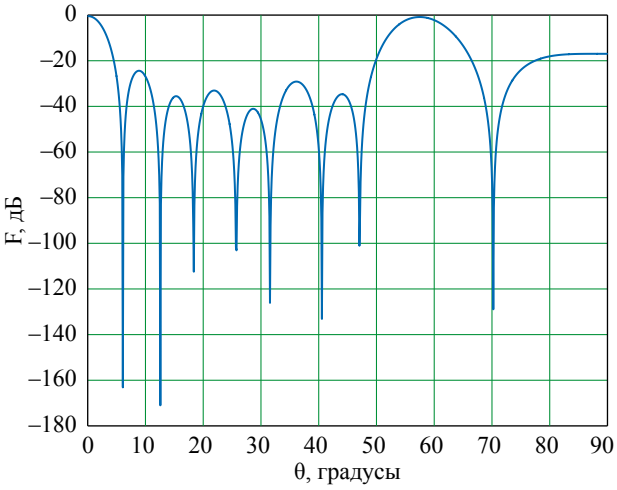


Рис. 3. Нормированная диаграмма направленности F (дБ) антенной решетки в зависимости от угла места θ (случай синтеза ДН, имеющей нули в направлениях от 6 до 70 градусов с интервалом в 12 градусов и максимум в направлении 60 градусов)

$z_1 = 11{,}474 \cdot \lambda$. Длина волны $\lambda = 104$ мм. На рисунке 2 представлен график диаграммы направленности F(дБ) антенной решетки в зависимости от угла места θ. Из рисунка можно видеть, что в интервале углов $\theta \in [0; \pi/2]$ по углу места диаграмма направленности имеет 5 главных максимумов $\tilde{\theta}_{max} \approx 10°; 20°; 31°; 44°; 60°$, которые с точностью от нескольких тысячных градуса – нескольких градусов совпадают с максимумами, которые нужно было исходно сформировать.

2. Пусть необходимо синтезировать АР с нулями ДН в направлениях от 6º до 70º с интервалом в 12º и максимумом в направлении 60º по углу места. При построении рассматривалась 16-элементная антенная решетка, содержащая по четыре элемента в каждой из двух горизонтальных и двух вертикальных линеек элементов ($N_Г = N_В = 4$). Разность расстояний от фазового нуля до левой и правой вертикальных линеек элементов составляла $z_{0Л} - z_{0П} = 4{,}783 \cdot \lambda$. Расстояния между приемными элементами вертикальных линеек элементов антенны составляли $z_1 = 1{,}155 \cdot \lambda$. Длина волны $\lambda = 104$ мм. На рисунке 3 представлен график диаграммы направленности F(дБ) антенной решетки в зависимости от угла места θ. Из рисунка можно видеть, что в интервале углов $\theta \in [0; \pi/2]$ по углу места диаграмма направленности имеет 5 требуемых нулей и 2 «лишних» нуля в направлениях $\tilde{\theta}_{min} \approx 6°; 18°; 26°; 31°; 40°; 47°; 70°$ и максимум в направлении 60º.

Таким образом, используя для формирования нулей в зависимости от текущей помеховой обстановки различные контуры с элементами из плоской ФАР, можно получать различного вида диаграммы направленности антенной решетки, позволяющие неадаптивным образом подавлять помехи.

Заключение

В представленной статье была получена общая формула диаграммы направленности антенной решетки с неэквидистантным расположением приемных элементов. Данная формула позволяет аналитически сформировать диаграмму направленности с нужным количеством максимумов и нулей, не прибегая к компьютерному моделированию. Наличие неэквидистантности дает возможность сформировать дополнительные нули диаграммы направленности. Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы:

1. Формула диаграммы направленности неэквидистантной антенной решетки является более общей по сравнению с классическим выражением ДН эквидистантной плоской антенны и дает возможность рассматривать частные случаи неэквидистантных антенных решеток

с различным числом приемных элементов и различными расстояниями между ними.

2. В неэквидистантной симметричной антенной решетке с одинаковым количеством приемных элементов на противоположных сторонах периметра антенны и различным начальным набегом фазы по каждой стороне периметра – диаграмма направленности отличается от ДН эквидистантной антенны наличием дополнительных нулей, что позволяет разместить их в дополнительных направлениях, по которым требуется обеспечить подавление помех.

3. Для большей точности при синтезе экстремумов диаграммы направленности антенной решетки необходимо задавать более мелкий шаг их размещения, поскольку это уменьшает искажения, вносимые функцией арксинуса.

4. Данный подход и приведенные в статье формулы позволяют моделировать любую антенную решетку с произвольным пространственным расположением ее элементов.

Список литературы

1. Воскресенский Д.И. Антенны с обработкой сигнала: Учеб. пособие для вузов. М.: Сайнс-Пресс, 2002. 80 с.

2. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Пер. с англ. Под ред. В. А. Лексаченко. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.

3. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику. 3-е изд. Под ред. С.М. Рытова. М.: Физматлит, 2007. 656 с.

Об авторах

Зимина Светлана Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Акционерного общества «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники», Нижний Новгород, Российская Федерация.

Область научных интересов: фазированные антенные решетки, обработка сигналов, адаптивные антенные решетки.

Францев Михаил Евтифеевич – заместитель начальника отдела Акционерного общества «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский институт радиотехники», Нижний Новгород, Российская Федерация.

Область научных интересов: фазированные антенные решетки, защита от активных помех, первичная обработка сигналов, радиолокация.

Directional pattern of an antenna array with non-equidistant arrangement of receiving elements

Zimina S. V., Frantsev M. E.

Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation

This article presents an analysis of the directional pattern of an antenna array with a non-equidistant arrangement of receiving elements. This problem is relevant for the synthesis of antenna arrays with the required location of zeros and maxima in the radiation pattern. The analysis is suitable for obtaining an analytical expression describing the directional pattern of a flat phased antenna array, the receiving elements of which are located on the antenna curtain.

Keywords: directional pattern, non-equidistant antenna array, phased antenna array.

Information about the authors

Zimina Svetlana Valerievna – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assistant Professor, Senior Researcher, Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation
Research interests: phased antenna arrays, signal processing, adaptive antenna arrays

Frantsev Michael Evtifeevich – Nizhny Novgorod Research Institute of Radio Engineering, Deputy Department Head, Nizhny Novgorod, Russian Federation,
Research interests: phased antenna arrays, active interference protection, primary signal processing, radar

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-22-33
УДК 661.174

Эффективность применения вспучивающегося огнезащитного покрытия в теплозащитной системе

Ф. Х. Абдрахманов[1], И. Г. Арефьев[2], А. И. Бекетова[1], Д. Н. Кожевников[3], С. А. Койтов[1], Д. В. Лейман[1], В. Н. Мельников[1]

[1] Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация
[2] Общество с ограниченной ответственностью «Институт прикладной химии и сертификации Фришберг», Екатеринбург, Российская Федерация
[3] Закрытое акционерное общество Научно-производственный холдинг «ВМП», Екатеринбург, Российская Федерация

Усиление абляционной защиты теплозащитных покрытий гиперзвуковых изделий – одна из актуальных задач. Одним из способов защиты базового теплозащитного покрытия является нанесение на его поверхность огнезащитных красок. Краски вспучивающегося типа могут способствовать блокированию теплового потока в поверхностном слое покрытия. Цель работы состояла в изучении свойств вспучивающихся композиций в составе теплозащитных материалов. Проведены испытания, подтвердившие обоснованность и эффективность применения данных красок в составе теплозащитных покрытий.

Ключевые слова: абляционная защита, теплозащитное покрытие, огнезащитное покрытие, огнезащитная вспучивающаяся композиция, климатические испытания, адгезионные испытания

Для цитирования: Абдрахманов Ф. Х., Арефьев И. Г., Бекетова А. И., Кожевников Д. Н., Койтов С. А., Лейман Д. В., Мельников В. Н. Эффективность применения вспучивающегося огнезащитного покрытия в теплозащитной системе // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 22–33. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-22-33

For citation: Abdrakhmanov F. Kh., Arefiev I. G., Beketova A. I., Kozhevnikov D. N., Koitov S. A., Leiman D. V., Melnikov V. N. Effectiveness of intumescent fire retardant coatings in thermal protection systems // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 22–33. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-22-33

Поступила 17.09.2020 *Отрецензирована* 02.10.2020 *Одобрена* 09.10.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Актуальность

В процессе полета изделия со сверх- и гиперзвуковой скоростью происходит торможение обтекающей среды на аэродинамических плоскостях, сопровождающееся преобразованием кинетической энергии набегающего потока среды в тепловую. При этом равновесная температура в точке торможения достигает значений от 1500 до 6000 °С. В данных условиях конструкционные материалы быстро утрачивают свои эксплуатационные свойства, поэтому возникает необходимость в их дополнительной защите. В таком случае для защиты конструкции изделий применяют абляционные теплозащитные покрытия (ТЗП) [1].

Взаимодействие набегающего потока с абляционными теплозащитными материалами (ТЗМ) сопровождается уносом массы (жертвенное разрушение ТЗМ), протекает с поглощением тепла с автоматическим регулированием температуры абляции (определяется составом ТЗМ), что в значительной степени ограничивает тепловой поток, поступающий к защищаемой конструкции [1].

На предприятии в качестве теплозащитных покрытий изделий применяют стеклопластики на основе эпоксидного связующего. Для данного типа связующего характерно

© Абдрахманов Ф. Х., Арефьев И. Г., Бекетова А. И., Кожевников Д. Н., Койтов С. А., Лейман Д. В., Мельников В. Н., 2020

падение прочности при эксплуатации свыше диапазона 80–150 °С [2], в то время как процесс деструкции связующего начинается при температуре примерно 300 °С.

Помимо стеклопластиков, в АО ОКБ «Новатор» также занимаются активной разработкой теплозащитных материалов, армированных углеродными волокнами, – углепластиков [3]. Температура начала деструкции углепластиков несколько выше по сравнению со стеклопластиками.

Исходя из всего вышесказанного, перед специалистами встает задача о дополнительном усилении абляционной защиты. Из эффективных и доступных способов придания дополнительной защиты подобного рода материалам наиболее перспективным является нанесение дополнительных лакокрасочных покрытий (ЛКП) со специальными защитными свойствами. В настоящее время среди имеющихся материалов подобного рода особый интерес представляют лакокрасочные покрытия вспучивающегося (интумесцентного) типа [4].

Интумесцентная технология защиты изделий от горения является сравнительно новой и заключается во вспучивании и превращении в кокс поверхностного слоя материала, подверженного воздействию аэродинамического нагрева. Огнезащитные краски вспучивающегося типа при воздействии температуры расширяются и образуют вокруг изделия толстый слой пенококса. Пенококс представляет собой пористую углеводородную субстанцию с низкой теплопроводностью, поры в которой формируются за счет фиксации в углеводородном скелете газов, выделяющихся в процессе разложения материала [5]. Пенококс обладает такими свойствами, как негорючесть [4], низкая теплопроводность [6], плотность от $3 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ г/см^3, коэффициент теплопередачи, близкий к данному показателю для воздуха. Вспененный слой действует в качестве физического барьера для продвижения теплового фронта от пламени к нижележащим слоям покрытия и защищаемой поверхности, при этом происходит уменьшение теплопередачи приблизительно в 100 раз [4].

Преимущества вспучивающихся покрытий состоят в том, что они тонкослойны, эффективно защищают поверхность материала от воздействия аэродинамического нагрева, могут быть нанесены на поверхность различными механизированными методами.

Снижение интенсивности теплового потока, воздействующего на ТЗП изделия в процессе прогрева и вспучивания огнезащитного покрытия (ОЗП), увеличивает время накопления теплоты в поверхностном слое ТЗП, замедляет развитие и скорость абляционных процессов в материале ТЗП.

Для того чтобы выбрать огнезащитную вспучивающуюся краску, были исследованы свойства различных марок ОЗП, таких как «Пламкор-5» (ЗАО НПХ «ВМП»), МПВО (НПЛ 38080), «Джокер М» (НПО «Ассоциация КрилаК»), произведенных в Российской Федерации. Продукты сравнивались по таким критериям, как состав, плотность, технологичность нанесения, массовая доля нелетучих веществ (сухой остаток) (табл. 1).

После анализа информации, представленной в таблице 1, было отдано предпочтение композиции «Пламкор-5» (ТУ 20.30.22-104-12288779-2017 [7]) производства ЗАО НПХ «ВМП».

Среди предложенных вариантов огнезащитных красок наибольший интерес композиция «Пламкор-5» представляет за счет того, что обладает самым высоким показателем по содержанию нелетучих веществ среди других продуктов. Данный показатель, именуемый также сухим остатком, играет значительную роль в производстве лакокрасочных композиций: его высокий процент позволяет получать на выходе большую толщину покрытия.

В составе «Пламкора-5» находится эпоксидная смола, обладающая низкой плотностью. Подобного рода основа способна обеспечить хорошую адгезию огнезащитной композиции со стеклопластиком, являющимся традиционным теплозащитным покрытием.

Производитель данного продукта также заявляет о простоте и удобстве применения, оптимальным расходе, обеспечении снижения нагрева металла под огнезащитным покрытием, отсутствии деформации металла.

ЗАО НПХ «ВМП», располагающийся в Екатеринбурге, представляет собой одно

Таблица 1

Сравнительный анализ марок вспучивающихся красок российских производителей

Марка ОЗП / Критерии	Пламкор-5	Джокер М	МПВО
Производитель (Россия)	ЗАО НПХ «ВМП», г. Екатеринбург	НПО «Ассоциация КрилаК», г. Москва	НПЛ 38080, г. Москва
Состав	Эпоксидная основа, алифатический полиаминный отвердитель, остальные компоненты являются ноу-хау изготовителей [7]	Водный раствор синтетического полимера с добавлением газо- и пенообразующих термостойких наполнителей [8]	Многокомпонентная однородная вязкая суспензия полимеров и наполнителей в органическом растворителе (сольвенте) с добавлением антипиренов и гасящих пламя добавок [9]
Способы нанесения	Безвоздушное распыление, шпатель/кисть [7]	Безвоздушное распыление, кисть/валик [8]	Краскораспыление/кисть [9]
Плотность, г/см^3	1,22–1,27 [7]	1,3 [8]	1,3 [9]
Массовая доля нелетучих веществ, %	94–97 [7]	70 [8]	68 [9]

Таблица 2

Характеристики объектов исследования

№ обр. п/п	Размеры, мм	Материал	Способ нанесения ОЗП	Толщина ОЗП, мм	Проводимые испытания
1	200×60×6	ТЗМКТ-8	Шпательно-кистевой	1,0÷1,4	Испытания в муфельной печи для определения характера прохождения теплового потока через ОЗП (ЗАО НПХ «ВМП»), определение предела прочности при сжатии
2					
3					
4	300×100×6			0,5	Климатические, прочность при равномерном отрыве
5				1,0	
6					Адгезионные испытания, прочность при равномерном отрыве
7			Пневматическое распыление		
8					

из крупнейших в России производителей огнезащитных лакокрасочных материалов, чья мощность производства в 2016 г. составила 2000–2500 т [10].

Целью данной работы является анализ эффективности работы огнезащитной вспучивающейся композиции Пламкор-5 в составе комплексного ТЗП изделия.

Объекты исследования

В качестве объектов исследования использовались образцы в виде прямоугольных пластин, покрытые ОЗП «Пламкор-5».

Основным материалом для образцов выступал стеклопластик ТЗМКТ-8, полученный методом пропитки под давлением, представляющий собой реактопласт на основе эпоксидного связующего ЭДТ-10 (смола КДА, отвердитель триэтаноламинтитанат (ТЭАТ)) и упрочняющего наполнителя из кремнеземной ткани объемного переплетения [11].

Огнезащитная вспучивающаяся композиция «Пламкор-5», предоставленная предприятием ЗАО НПХ «ВМП», представляет собой двухупаковочную композицию, состоящую из эпоксидной смолы и алифатического полиаминного отвердителя [7].

Огнезащитное покрытие на образцы стеклопластика ТЗМКТ-8 наносилось шпательно-кистевым и пневматическим напылением.

Подробные характеристики всех образцов (размеры пластин, толщина ОЗП, способ нанесения ОЗП) и проводимые с ними испытания приведены в таблице 2.

Задачи исследования

Для достижения цели работы определены следующие задачи:

1) исследовать характер прохождения теплового потока через ОЗП «Пламкор-5» вглубь материала ТЗМКТ-8 в статических условиях;

2) определить сохраняемость свойств ОЗП «Пламкор-5» при длительном температурном воздействии;

3) определить прочностные характеристики ОЗП в системе «Пламкор-5 – ТЗМКТ- 8».

Методы исследования

• Исследование характера прохождения теплового потока через ОЗП «Пламкор-5» вглубь материала ТЗМКТ-8 в статических условиях проводилось путем помещения образцов в муфельную печь в течение определенного времени и при заданных температурах. Затем осуществлялась визуальная оценка состояния материалов после проведения испытаний.

• Определение сохраняемости свойств ОЗП «Пламкор-5» при длительном температурном воздействии проводилось в камере для климатических испытаний VÖTSCH VCL 7010.

• Определение предела прочности при разрушении и изучение адгезионных свойств проводилось на испытательной машине Instron 5982.

Исследование характера прохождения теплового потока через ОЗП «Пламкор-5» вглубь материала ТЗМКТ-8 в статических условиях

Были проведены испытания образцов № 1–3 (табл. 2) на определение прохождения теплового потока вглубь стеклопластика.

Перед испытаниями в каждый образец с предварительно нанесенным покрытием «Пламкор-5» были установлены 3 термопары (Т), как показано на рисунке 1.

Термопара Т1 была установлена в нижней части образца ТЗМКТ-8, Т2 – в средней части по толщине стеклопластика, Т3 – на поверхности ТЗМКТ-8 под покрытием «Пламкор-5».

Термопара Т4 предназначена для фиксации температуры воздуха внутри муфельной печи в процессе испытания.

Образцы располагались в теплоизоляционной оправке из керамики, что способствовало подводу теплоты только с одной стороны, и помещались в муфельную печь при температурах 700, 950 и 1100 °С на 10 минут.

По прошествии 10 минут образцы извлекались из печи и проводилась визуальная оценка сохранности материала.

В таблице 3 показаны образцы после испытаний, а также срезы ТЗМКТ-8 для приблизительного определения глубины деструкции материала.

После испытаний все образцы представляли собой обугленный стеклопластик ТЗМКТ-8 со слоем пенококса покрытия «Пламкор-5» до 7 мм толщиной. Стоит отметить, что в каждом случае стеклопластик сохранил структурную целостность и остаточную прочность (рис. 2).

Для каждого из образцов была определена прочность при сжатии. Предварительно испытанные при высоких температурах образцы № 1–3 были очищены от вспенившегося пенококса, затем из них были изготовлены призмы размерами 14×10×7 мм. На испытательной

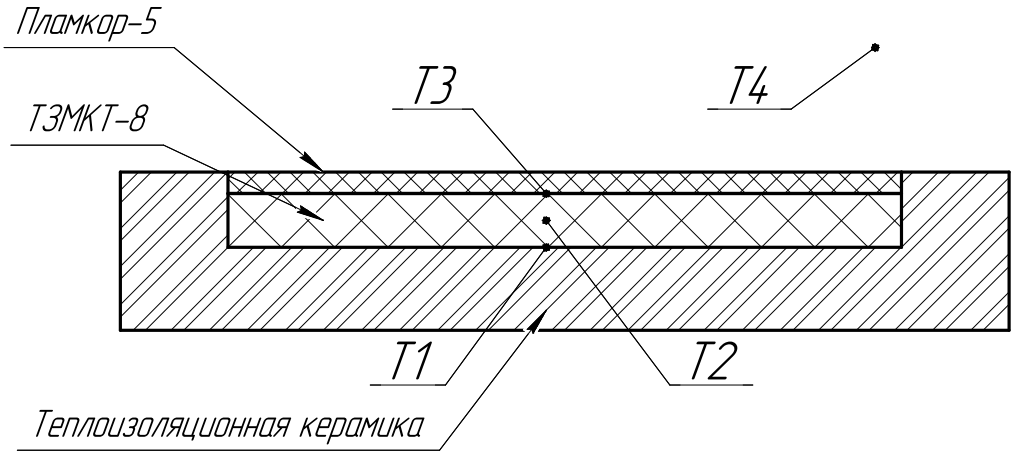
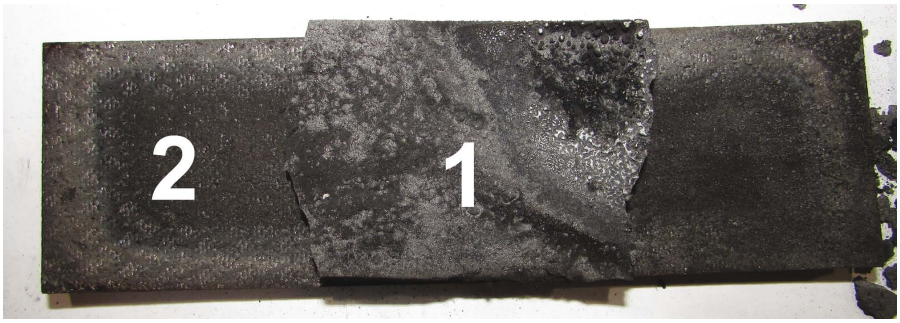


Рис. 1. Схема расположения термопар (Т) в образце с огнезащитным покрытием «Пламкор-5»

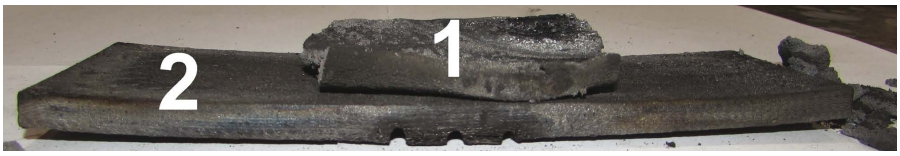
Таблица 3

Режимы и результаты испытаний образцов в муфельной печи

№ обр. по п/п	Т, °С	τ, мин	Фотографии образцов после испытаний в муфельной печи	
			образцы после испытаний	срез образцов для приблизительного определения глубины деструкции
1	700–750	10		
2	900–950			
3	1100			



А



Б

Области для установки термопар

В

Рис. 2. Образец № 2 после испытания. 1 – пенококс «Пламкор-5»; 2 – ТЗМКТ-8; А – лицевая сторона; Б – торцевая сторона; В – обратная сторона

установке Instron 5982 при скорости подвижного зажима 2 мм/мин был определен предел прочности при разрушении, результаты приведены в таблице 4.

Из таблицы 4 можно сделать вывод, что каждый образец сохранил остаточную прочность после воздействия теплового потока. При испытании образцов в высокотемпературной среде происходит значительное выгорание связующего и вследствие этого падение прочности при сжатии приблизительно в 3 раза, о чем говорит сопоставление справочной величины предела прочности и величины для образца № 1, испытанного при 700–750 °С. Показатель предела прочности при разрушении у образца с выдержкой при 700–750 °С на 93,7 % больше, чем у образца № 2, и на 90,3 % больше, чем у образца № 3. Образцы № 2 и 3 показали близкие значения остаточной прочности. Таким образом, можно сделать вывод, что после одностороннего воздействия высокотемпературного теплового потока на поверхность ТЗП с огнезащитным покрытием «Пламкор-5» стеклопластик сохраняет остаточную прочность, значение которой тем выше, чем ниже температура воздействия.

После осмотра все образцы были распилены пополам для анализа степени коксования материала ТЗМКТ-8 по толщине. При увеличении температуры воздействия от 700 до 1100 °С степень коксования материала закономерно увеличивалась: при 700 °С она приблизительно составила 40 %, при 900 °С – 60 %, при 1100 °С – 80 %.

На рисунке 3 представлены микрофотографии срезов материала ТЗМКТ-8, испытанного при температурах 700, 900 и 1100 °С.

Отчетливо видно, что нижняя часть образца, испытанного при 700 °С (рис. 3А), подверглась деструкции в меньшей степени, чем верхняя: об этом свидетельствует уцелевшая структура нитей кремнеземной ткани. В темной части среза структура ткани просматривается гораздо хуже. Таким образом, можно сделать вывод о начале процесса деструкции материала и частичного выгорания полимерного связующего.

Органическое связующее образцов, испытанных при 900 (рис. 3Б) и 1100 °С (рис. 3В), за 10 минут подверглось сильной деструкции и прококсовалось по глубине образца приблизительно на 60 и 80 % соответственно, что заключается по наличию сажи (технического углерода) на волокнах кремнеземной ткани в глубине материала ТЗМКТ-8.

Таким образом, при повышении температуры, воздействующей на покрытие, помимо деструкции полимерного связующего происходит также осаждение углеродного остатка от выгорания матрицы на кремнеземную ткань, частичное оголение структуры наполнителя с охрупчиванием волокон.

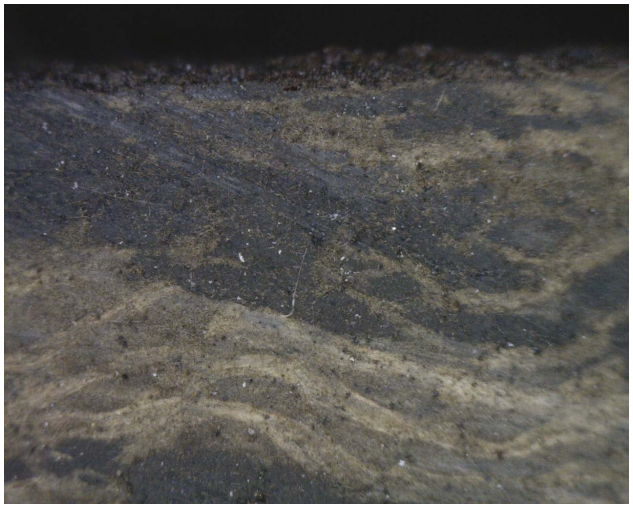
На рисунке 4 представлены результаты испытаний образца при температуре 700 °С. Показания термопары Т4 на графике не представлены, так как в данном эксперименте дополнительная термопара не использовалась.

Из рисунка 4 видно, что температура поверхности ТЗМКТ-8 под покрытием «Пламкор-5» более чем за 10 мин увеличилась до 350 °С при температуре в муфельной печи 700 °С. Разница температур между поверхностью ТЗМКТ-8 под покрытием «Пламкор-5» (Т3), средней (Т2) и нижней частью стеклопластика (Т1) увеличилась до 47–52 °С в течение первых 60 с, а затем постепенно снизилась до 18–24 °С к 600 с по мере прогрева образца.

Таблица 4

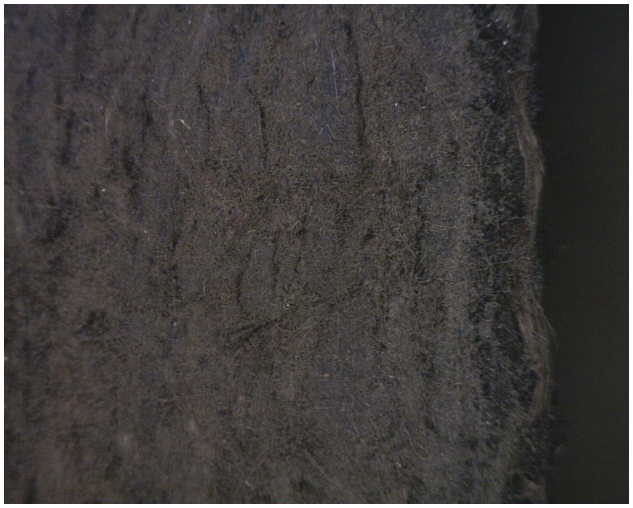
Результаты определения предела прочности при разрушении для образцов № 1–3

	σ, МПа			
Измерения	№ 1 (исп. при 700–750 °С)	№ 2 (исп. при 900–950 °С)	№ 3 (исп. при 1100 °С)	Значение предела прочности ТЗМКТ-8 при сжатии, МПа, при 20 °С (справочная величина)
1	51,2	3,1	4,9	147,6–149,6
2	66,4	3,2	4,1	
3	24,4	2,7	4,7	
Среднее значение	47,4	3,0	4,6	



А

Б



В

Рис. 3. Микрофотографии среза образцов, испытанных при температурах 700 °С (А), 900 °С (Б) и 1100 °С (В)

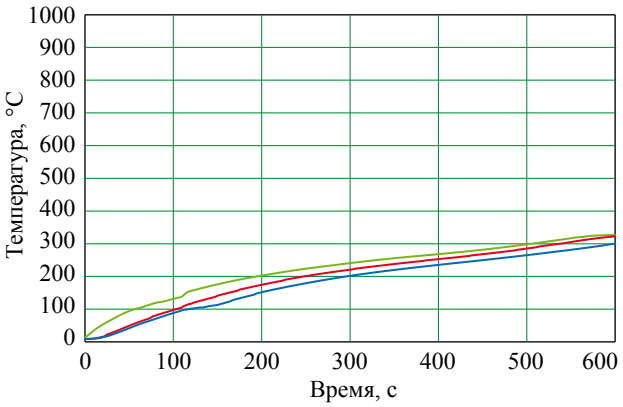


Рис. 4. Кривые прогрева образца при 700 °С
– Т1, – Т2, – Т3

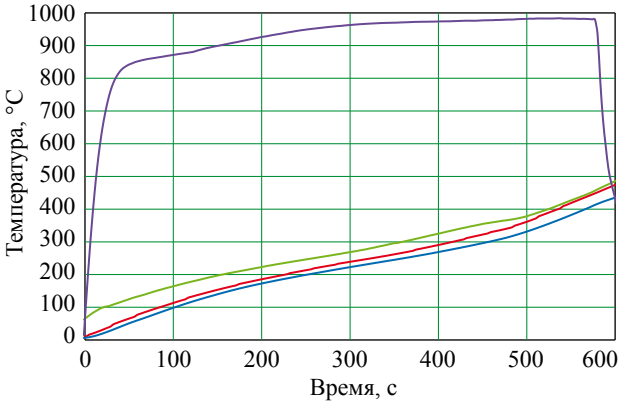


Рис. 5. Кривые прогрева образца при 900 °С
– Т1, – Т2, – Т3, – Т4

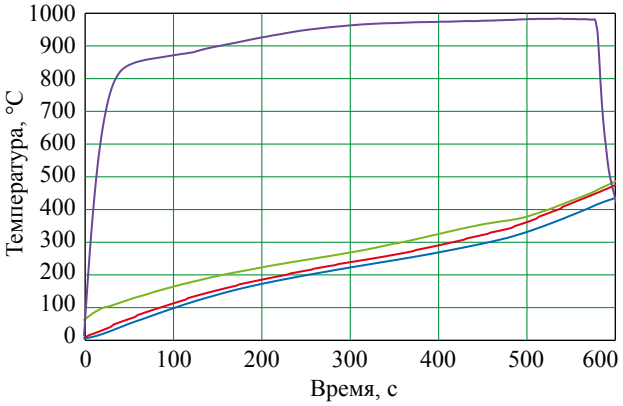


Рис. 6. Кривые прогрева образца при 1100 °С
– Т1, – Т2, – Т3, – Т4

При температуре испытания 900 °С наблюдалась в целом аналогичная ситуация (рис. 5). Максимальная температура поверхности покрытия ТЗМКТ-8 под покрытием «Пламкор-5» (Т3) и в средней части стеклопластика (Т2) к концу эксперимента составила около 500 °С. Температура нижней части стеклопластика оказалась на 80 °С ниже.

При температуре испытания 1100 °С кривые прогрева по толщине образца (рис. 6) имеют иной вид, чем при испытаниях при меньшей температуре, – ближе к завершению эксперимента рост температуры нижней части стеклопластика замедлился, а в средней части, наоборот, ускорился и стал выше, чем под покрытием «Пламкор-5». Максимальная температура поверхности покрытия ТЗМКТ-8 под покрытием «Пламкор-5» (Т3) и в средней части стеклопластика (Т2) к концу эксперимента составила около 470 °С. Температура нижней части стеклопластика оказалась на 200 °С ниже. Изменение характера прогрева при повышении температуры может быть обусловлено проникновением теплового потока в образовавшееся в ходе эксперимента отслоение между вспучившимся ОЗП «Пламкор-5» и поверхностью стеклопластика.

Из рисунков 4–6 видно, что разница температур между поверхностью ТЗМКТ-8, защищенной покрытием «Пламкор-5», и воздухом в муфельной печи в течение всего эксперимента составляла не менее 400 °С.

Таким образом, покрытие «Пламкор-5» за счет происходящих при вспучивании физико-химических превращений, а также за счет низкой теплопроводности образующегося пенококса значительно замедлило прохождение теплового потока внутрь защищаемого образца.

Огнезащитное вспучивающееся покрытие «Пламкор-5» толщиной от 1 до 1,5 мм эффективно блокирует статический тепловой поток от окружающей среды с температурой до 1100 °С в течение не менее 10 минут – температура поверхности ТЗМКТ-8 под покрытием «Пламкор-5» и воздухом в печи при температурах испытания 700, 900 и 1100 °С была не менее чем на 400 °С ниже температуры воздуха в муфельной печи.

Исследование старения материалов в климатической камере

Образцы № 4, 5 (табл. 2) были помещены в климатическую камеру VÖTSCH VCL 7010. Режимы проведения ускоренных климатических испытаний (УКИ) приведены в таблице 5.

Ускоренные климатические испытания [12] образцов № 4, 5 были проведены в 4 этапа, после каждого из которых проводился внешний осмотр образцов. По окончании четырех этапов огнезащитное покрытие образцов осталось без изменений, отслоений и других нарушений покрытия ОЗП в системе «Пламкор-5 – ТЗМКТ-8» не произошло.

Контроль состояния огнезащитного покрытия «Пламкор-5» на образцах № 4 и 5 до и после ускоренных климатических испытаний показал, что ОЗП и стеклопластик ТЗМКТ-8 образцов сохраняют свои свойства, обеспечивая эксплуатационную надежность соединения покрытия ТЗМКТ- 8 и огнезащитного покрытия «Пламкор-5».

Определение прочности при равномерном отрыве в системе «Пламкор-5 – ТЗМКТ- 8»

Прочность при равномерном отрыве в системе «Пламкор-5 – ТЗМКТ-8» определялась на образцах № 4–8 (табл. 2): на образцах № 4, 5 после проведения УКИ, на № 6–8 – без проведения УКИ.

Прочность образцов определяли методом отрыва грибков от них. Испытания

Таблица 5

Режимы ускоренных климатических испытаний

Этап	Вид испытания	Параметры испытания	
		температура, °С	время выдержки при температуре, ч
		образцы № 4, 5	
1	Температурное старение	+90 ± 2	184 (7 суток 16 часов)
2	Термостатирование	–60 ± 2	2
3	Термоциклирование (3 цикла)	20 ± 2	2
		+60 ± 2	2
		+20 ± 2	2
		–60 ± 2	2
4	Термостатирование	–60 ± 2	2

осуществляли на универсальной испытательной машине Instron 5982 при скорости перемещения подвижного зажима 10 мм/мин.

Результаты испытаний приведены в таблице 6.

Из результатов таблицы 6 видно, что прочность при отрыве на границе «Пламкор-5 – ТЗМКТ-8» возрастает при уменьшении толщины наносимого слоя и увеличении температуры отверждения.

При одинаковом режиме отверждения (при температуре цеха) образец № 7 с покрытием «Пламкор-5», нанесенным пневматическим распылением слоями от 0,1 до 0,13 мм, обладает на 47 % большей прочностью, чем образец № 6 с покрытием, нанесенным шпателем слоем 1 мм. Аналогично прочность при равномерном отрыве у образца № 4 с покрытием, нанесенным толщиной 0,5 мм, на 40 % выше, чем у образца № 5 с толщиной покрытия 1 мм.

При одинаковой толщине покрытия «Пламкор-5» и одинаковом методе нанесения прочность у образца № 8, выдержанного при 70 °С в течение 7 ч, выше на 26 %, чем у образца № 7, не подвергавшегося термообработке.

После проведения УКИ прочность при отрыве образца № 5 увеличилась на 11 % по сравнению с прочностью образца № 6, не участвовавшего в УКИ. При этом толщина покрытия «Пламкор-5», способ нанесения и режим отверждения данных образцов совпадает. Так как частью режима УКИ является термическое старение при 90 °С, то увеличение прочности после УКИ связано с набором прочности самого покрытия в результате более полного отверждения, превышающего снижение прочности при старении.

От толщины покрытия «Пламкор-5» и способа нанесения зависит характер разрушения на границе «Пламкор-5 – ТЗМКТ-8». При нанесении ОЗП методом пневматического напыления преобладает смешанный (адгезионно-когезионный) характер разрушения ОЗП в зоне отрыва (для образцов № 7, 8). Такое же преобладание данного типа характера разрушения наблюдается для образца № 4 со шпательным способом нанесения ОЗП. Для образцов № 5, 6 с покрытием, нанесенным шпателем, наблюдался преимущественно адгезионный характер разрушения на границе «Пламкор-5 – ТЗМКТ-8».

Таким образом, анализ прочности и характера разрушения при равномерном отрыве показывает, что наибольшая прочность при равномерном отрыве ОЗП достигается

Таблица 6

Таблица результатов испытаний на прочность с образцами № 4–8

№ образца		4		5		6		7		8	
Способ нанесения ОЗП		Шпательно-кистевой						Пневматическое напыление			
Толщина ОЗП, мм		0,5		1,0							
Режим отверждения ОЗП		1) $T_{цеха}$ ≈ 15–30 °С, 24 ч; 2) Выдержка после отверждения при $T_{цеха}$ ≈ 15–30 °С, 24 ч								1) $T_{цеха}$ ≈ 15–30 °С, 24 ч; 2) Т ≈ 70 °С, 7 ч; 3) Выдержка при $T_{цеха}$ ≈ 15–30 °С, 24 ч.	
Наличие УКИ		Да				Нет					
Результаты испытаний на прочность		σ, кгс/см^2	х-р разр.	σ, кгс/см^2	х-р разр.	σ, кгс/см^2	х-р разр.	σ, кгс/см^2	х-р разр.	σ, кгс/см^2	х-р разр.
Точки, в которых были приклеены грибки	1	17,4	А-К	15,0	А	13,1	А	20,1	А-К	30,9	А-К
	2	23,0	А-К	17,0	А	14,0	А	19,7	А-К	26,4	А-К
	3	21,1	К	7,6	А	10,7	А	25,4	А-К	33,1	А-К
	4	19,0	А-К	9,1	А-К	-	-	23,7	А-К	31,3	А
	5	18,4	А-К	10,8	А-К	4,4	А	11,9	А-К	15,4	А
Среднее значение прочности σ, кгс/см^2 (МПа)		19,8 (1,9)		11,9 (1,2)		10,6 (1,0)		20,2 (2,0)		27,4 (2,7)	

Примечание: х-р разр. – характер разрушения; А – адгезионный, К – когезионный, А-К – адгезионно-когезионный.

при нанесении методом пневматического напыления с режимом отверждения, включающим выдержку при температуре от 15 до 35 °С в течение 24 ч с последующей термообработкой при 70 °С не менее 7 ч.

Выводы

1. Равномерно нанесенное покрытие «Пламкор-5» толщиной от 1 до 1,5 мм эффективно блокирует статический тепловой поток с температурой до 1100 °С в течение не менее 10 минут, обеспечивая в течение этого времени снижение температуры защищаемой поверхности ТЗП ТЗМКТ-8 не менее, чем на 400 °С относительно наружной поверхности ОЗП, непосредственно подвергающейся воздействию тепла от окружающей среды (воздуха).

2. Контроль состояния огнезащитного покрытия «Пламкор-5» до и после ускоренных климатических испытаний показал, что ОЗП и стеклопластик ТЗМКТ-8 сохраняют свои свойства, обеспечивая эксплуатационную надежность соединения покрытия ТЗМКТ-8 и огнезащитного покрытия «Пламкор-5».

3. Испытания на отрыв показали, что наибольшей прочностью обладает ОЗП, нанесенное на поверхность методом пневматического напыления и отвержденного при смешанном температурном режиме (24 ч при температуре от 15 до 35 °С и 7 ч при 70 °С).

Заключение

Результаты по изучению свойств огнезащитной вспучивающейся композиции «Пламкор-5» в составе теплозащитного покрытия показали, что данная огнезащитная композиция при ее равномерном нанесении способствует эффективному блокированию теплового потока, воздействующего на поверхность ТЗП. ОЗП «Пламкор-5» обладает надлежащей устойчивостью в условиях длительного температурного воздействия, а также требуемыми прочностными характеристиками в зависимости от способа нанесения и режима отверждения покрытия.

Список литературы

1. Михайлин Ю. А. *Специальные полимерные композиционные материалы.* СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660 с.

2. Гаращенко А. Н., Рудзинский В. П., Каледин В. О. Обеспечение требуемых показателей пожаробезопасности конструкций из полимерных композиционных материалов с помощью огнезащиты // *Известия Южного федерального университета. Технические науки.* 2013. С. 143–149.

3. Абдрахманов Ф. Х., Волосов Д. Р., Карпузиков С. А. и др. Выбор композиционного материала в тонкостенных конструкциях, работающих при повышенных температурах // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей».* 2018. № 3. С. 87–97.

4. Павлович А. А., Владенков В. В., Изюмский В. Н. и др. Огнезащитные вспучивающиеся покрытия // *Лакокрасочная промышленность.* 2012. № 5.

5. Гравит М. В. Оценка порового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий // *Пожаровзрывобезопасность.* 2013. Т. 22. № 5. С. 33–37.

6. Кошелев В. А., Орлов А. А. Принципы обеспечения огнезащитных свойств материалов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура».* 2019. Т. 19. № 2. С. 50–54.

7. ТУ 20.30.22-104-12288779-2017 Огнезащитная вспучивающаяся композиция «Пламкор-5».

8. Огнезащитная краска «Джокер-М» // «Ассоциация КрилаК». URL: http://www.krilak.ru/catalog/1/untitled14.php (дата обращения: 10.07.2020).

9. Покрытие вспучивающееся огнезащитное МПВО // НПЛ38080. URL: https://npl38080.ru/?mod=content&id=65/ (дата обращения: 10.07.2020).

10. Кислова Ю. Анализ российского рынка огнезащитных ЛКМ для металлоконструкций в 2012–2016 гг. Прогноз до 2025 г. // *Промышленная окраска.* 2017. № 3. С. 17–23.

11. Койтов С. А., Мельников В. Н. Исследование теплоемкости, теплопроводности гетерофазных композиционных теплозащитных материалов с непрерывной полимерной фазой // *Вестник Южно-Уральского государственного университета.* 2012. № 12. С. 182–186.

12. *ГОСТ 9.707-81. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Материалы полимерные. Методы ускоренных испытаний на климатическое старение.* М.: Издательство стандартов, 1990. 82 с.

Об авторах

Абдрахманов Фарид Хабибуллович – генеральный директор, генеральный конструктор Акционерного общества «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: создание современных образцов вооружения.

Арефьев Игорь Геннадьевич – начальник лаборатории огнезащитных материалов и порошков Общества с ограниченной ответственностью «Институт прикладной химии и сертификации Фришберг», Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: огнезащитные лакокрасочные материалы.

Бекетова Анна Игоревна – инженер-химик II категории конструкторского отдела Акционерного общества «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: разработка и создание новых композиционных материалов и технологий изготовления из них современных изделий.

Кожевников Дмитрий Николаевич – доктор химических наук, профессор, заместитель генерального директора, вице-президент по научно-инновационной работе Закрытого акционерного общества Научно-производственный холдинг «ВМП», Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: специальные лакокрасочные материалы, люминофоры.

Койтов Станислав Анатольевич – доктор технических наук, главный химик, заместитель начальника конструкторского отдела Акционерного общества «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: разработка и создание новых композиционных материалов и технологий изготовления из них современных изделий.

Лейман Дмитрий Владимирович – кандидат химических наук, ведущий инженер-конструктор конструкторского отдела Акционерного общества «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: разработка и создание новых композиционных материалов и технологий изготовления из них современных изделий.

Мельников Владимир Николаевич – доктор технических наук, советник генерального конструктора по науке Акционерного общества «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация.
Область научных интересов: разработка и создание новых композиционных материалов и технологий изготовления из них современных изделий.

Effectiveness of intumescent fire retardant coatings in thermal protection systems

Abdrakhmanov F. Kh.[1], Arefiev I. G.[2], Beketova A. I.[1], Kozhevnikov D. N.[3], Koitov S. A.[1], Leiman D. V.[1], Melnikov V. N.[1]

[1] *Experimental Design Bureau NOVATOR JSC, Ekaterinburg, Russian Federation*
[2] *Frishberg Institute of Applied Chemistry and Certification LLC, Ekaterinburg, Russian Federation*
[3] *VMP Research and Production Holding CJSC, Ekaterinburg, Russian Federation*

Strengthening the ablative protection of heat-protective coatings of hypersonic products is an important research task. The conventional approach used to shield thermal protective coatings consists in the application of fire retardant paints. Intumescent paints can be used to block the heat flow in the surface coating layer. This work was aimed at investigating the properties of intumescent coatings in the composition of heat-shielding materials. A series of experiments was conducted to confirm the validity and effectiveness of using such paints in the composition of heat-shielding coatings.

Keywords: ablation protection, heat-protective coating, fire-retardant coating, fire-retardant intumescent composition, climatic tests, adhesion tests

Information about the authors

Abdrakhmanov Farid Khabibullovich – General Director, General Designer, Experimental Design Bureau NOVATOR JSC, Ekaterinburg, Russian Federation.
Research interests: creation of modern weapons.

Arefiev Igor Gennadievich – Laboratory Head, Laboratory of Fire Retardant Materials and Powders, Frishberg Institute of Applied Chemistry and Certification LLC, Ekaterinburg, Russian Federation.
Research interests: fire retardant paints and varnishes.

Beketova Anna Igorevna – Chemical Engineer of the II category, Design Department, Experimental Design Bureau NOVATOR JSC, Ekaterinburg, Russian Federation.
Research interests: development and creation of new composite materials and technologies for manufacturing new products.

Kozhevnikov Dmitry Nikolaevich – Dr. Sci. (Chemistry), Prof., Deputy General Director, Vice President for Research and Innovation, VMP Research and Production Holding CJSC, Ekaterinburg, Russian Federation.
Research interests: special paints and varnishes, phosphors.

Koitov Stanislav Anatolievich – Dr. Sci. (Engineering), Chief Chemist, Deputy Head of the Design Department, Experimental Design Bureau NOVATOR JSC, Ekaterinburg, Russian Federation.
Research interests: development and creation of new composite materials and technologies for manufacturing new products.

Leiman Dmitry Vladimirovich – Cand. Sci. (Chemistry), Leading Design Engineer, Design Department, Experimental Design Bureau NOVATOR JSC, Ekaterinburg, Russian Federation.
Research interests: development and creation of new composite materials and technologies for manufacturing new products.

Melnikov Vladimir Nikolaevich – Dr. Sci. (Engineering), Advisor to the General Designer for Research, Experimental Design Bureau NOVATOR JSC, Ekaterinburg, Russian Federation.
Research interests: development and creation of new composite materials and technologies for the manufacture of modern products from them.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-34-40
УДК 677.13, 697.137, 677.017.8

Метод учета старения материалов при длительной эксплуатации изделий

Н. Н. Дубровина[1], Г. Ф. Костин[1,2,3]

[1] *Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», г. Миасс, Челябинская область, Российская Федерация*

[2] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии» Уральского отделения Российской академии наук, г. Миасс, Челябинская область, Российская Федерация*

[3] *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Челябинский государственный университет», Миасский филиал, г. Миасс, Челябинская область, Российская Федерация*

В работе предложен метод одновременного совместного учета влияния условий внешней среды и соответствующего изменения свойств материалов в процессе старения на тепловлажностные режимы изделий. Представлены результаты сравнительных расчетов тепловлажностных режимов модельной конструкции из типовых материалов при одних и тех же условиях эксплуатации без учета и с учетом изменения свойств материалов в процессе старения, подтвердившие необходимость учета изменения свойств материалов при проектировании изделий в обеспечение их работоспособности. Предложенный метод основан на принципе выделения линеаризованной части уравнений переноса при малых отклонениях величин, входящих в уравнения, от реализующихся без учета старения. Метод более точен и требует меньших затрат времени на проведение расчетов по сравнению с методами раздельного последовательного учета изменения свойств материалов в процессе старения в условиях эксплуатации, что характеризует его научную новизну и практическую значимость.

Ключевые слова: старение материалов, влажность, температура.

Для цитирования: Дубровина Н. Н., Костин Г. Ф. Метод учета старения материалов при длительной эксплуатации изделий // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 34–40. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-34-40

For citation: Dubrovina N. N., Kostin G. F. A method for considering the aging of materials during long-term operation // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 34–40. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-34-40

Поступила 12.10.2020 *Отрецензирована* 13.10.2020 *Одобрена* 22.10.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Известно, что воздействия температуры и влажности при длительной эксплуатации и хранении изделий приводят к необратимым изменениям в материалах и, как следствие, к изменению их свойств и пределов работоспособности конструкций [1]. В связи с этим при расчетах тепловлажностных режимов изделий необходим учет изменения тепловлагофизических свойств материалов в процессе старения при длительных сроках эксплуатации. В свою очередь, изменение свойств материалов зависит от реализующихся тепловлажностных режимов изделий. Имеющиеся методики и программы расчета тепловлажностных режимов, в том числе и разработанные в АО «ГРЦ Макеева», построены на решении классических уравнений теплопроводности и влагопроводности, в которых учитывается зависимость тепло- и влагофизических свойств материалов от температуры и влагосодержания [2, 3]. В связи с этим для учета изменения свойств материалов в процессе старения можно проводить последовательный поочередный расчет тепловлажностных режимов на каком-либо интервале времени эксплуатации,

© Дубровина Н. Н., Костин Г. Ф., 2020

затем по отдельной методике соответствующего изменения свойств на этом интервале, затем с измененными свойствами вновь тепловлажностных режимов на следующем интервале времени и т.д. Интервалы времени можно выбирать произвольно, исходя из возможностей компьютерной базы и имеющегося физического времени на расчет. Чем меньше интервалы, тем точнее результаты расчетов, но их количество увеличивается, что требует большего физического времени на подготовку на каждом этапе начальных и других данных для расчетов и на обработку результатов расчетов. Теоретически наибольшая точность при таком подходе может быть достигнута при расчете приращений температуры, влажности и изменений свойств на каждом шаге счета по времени, и для обеспечения этого необходимы соответствующие программы одновременного расчета тепловлажностных режимов и изменения тепловлагофизических свойств материалов.

Классический подход к решению уравнений тепловлажностных режимов реализуется при задании зависимости тепло- и влагофизических свойств от температуры, влажности и т.п. без учета изменения этих свойств, обусловленных процессами старения [2, 3]. При расчетах тепловых режимов используется алгебраическая разностная аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности в декартовой (или другой ввиду общности метода) системе координат:

$$c_p\rho\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right) + q_V, \quad (1)$$

где τ – время, $T = T(x, y, z, \tau)$ – температура, c_p, ρ, λ – соответственно удельная теплоемкость, плотность, теплопроводность материала, q_V – источниковый член.

Вследствие старения характеристики зависят и от реализующихся при эксплуатации температурных и влажностных режимов. Соответственно, изменение свойств материалов в зависимости от условий эксплуатации и хранения описывается зависимостью свойств и от температуры, и от интеграла функции аррениусовского типа:

$$c_p = c_p\left(T, \int_0^\tau (k_{c_p} e^{-\frac{E_{c_p}}{R\cdot T(x,y,z,\tau)}})d\tau\right); \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda\left(T, \int_0^\tau (k_\lambda e^{-\frac{E_\lambda}{R\cdot T(x,y,z,\tau)}})d\tau\right); \quad (3)$$

$$\rho = \rho\left(T, \int_0^\tau (k_\rho e^{-\frac{E_\rho}{R\cdot T(x,y,z,\tau)}})d\tau\right), \quad (4)$$

где буквами k и E с индексами внизу обозначены предэкспонентный множитель и энергия активации процессов изменения соответствующих свойств материалов.

Изменения свойств материалов за период их функционирования в составе конструкций предполагаются относительно малыми. Это обусловлено требованиями по обеспечению работоспособности изделий в течение гарантийных сроков [4]. Данные, подтверждающие изменение свойств некоторых неметаллических материалов, исследуемых в АО «ГРЦ имени академика В.П. Макеева» после длительных сроков эксплуатации в составе конструкций изделий, приведены ниже.

Коэффициент теплопроводности изменился следующим образом:

у материала ТТПС-П возрос на 14,1…14,8 %;
у материала ТИМ-2 уменьшился на 1,8…5,6 %;
у материала АТ-342-ФЭ-В возрос на 5,9…19,6 %;
у материала ДСВ-2Р-2М или АГ-4В уменьшился на 5,0%;
у материала листового полиэтилена возрос на 2,35…7,35 %;
у материала ППЭ-Р изменился на –8,9…+12,2 %;
у материала ПКТ-ЦТ-БА-ОФ-Д возрос на 6,6…34,2 %;
у материала ОП 56379Н/ЭФ70-Н уменьшился на 1,1…21,1 %;

- удельная теплоемкость изменилась следующим образом:

у материала ТТП-ФС возросла на 5,9…32,9 %;
у материала ТТПС-П возросла на 8,9…13,1 %;
у материала ТИМ-2 уменьшилась на 1,1…1,5 %;
у материала АТ-342-ФЭ-В уменьшилась на 1,3…9,3 %;

у материала ДСВ-2Р-2М или АГ-4В уменьшилась на 27,9 %;
у материала ПКТ-ЦТ-БА-ОФ-Д изменилась на –10,2…+7,9 %;
у материала ОП 56379Н/ЭФ70-Н возросла на 0…13,6 %;

- плотность изменилась следующим образом:

у материала ТТП-ФС возросла на 6,2…32,5 %;
у материала ТТПС-П уменьшилась на 2,9…5,8 %;
у материала ТИМ-2 уменьшилась на 1,8…9,1 %;
у материала листового полиэтилена уменьшилась на 0,1 %;
у материала ПКТ-ЦТ-БА-ОФ-Д изменилась на –3,1…+1,8 %;
у материала ОП 56379Н/ЭФ70-Н изменилась на –8,3…+0,8 %.

Из представленных данных следует, что у большинства материалов теплопроводность возросла после длительной эксплуатации. Теплоемкость и плотность у разных материалов изменились как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, но изменения относительно малы, тем не менее эти изменения необходимо учитывать. Результаты расчетов относительной влажности в модельном отсеке для случаев использования номинальных (не изменяющихся за счет старения) свойств материалов и для случая ступенчатого последовательного учета изменения свойств представлены на рисунке 1.

Проведенные расчеты показали, что значения влагопоглощения в отсеке для случая использования номинальных (не изменяющихся за счет старения) свойств материалов и для случая ступенчатого изменения свойств на нескольких интервалах гарантийного срока отличаются существенно. Так же и результаты расчетов температурных режимов для одной из конструкций двигателя изделия РКТ для различных уровней отклонения в процессе старения свойств неметаллических материалов, входящих в конструкцию: теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности – показали, что отличия значений температуры на модельном цикле тепловлажностных воздействий на изделие достигают нескольких градусов (рис. 2, 3).

Таким образом, учет изменений свойств материалов вследствие старения необходим, при этом целесообразным является совместный расчет температуры, влажности и изменений свойств материалов на каждом шаге счета по времени.

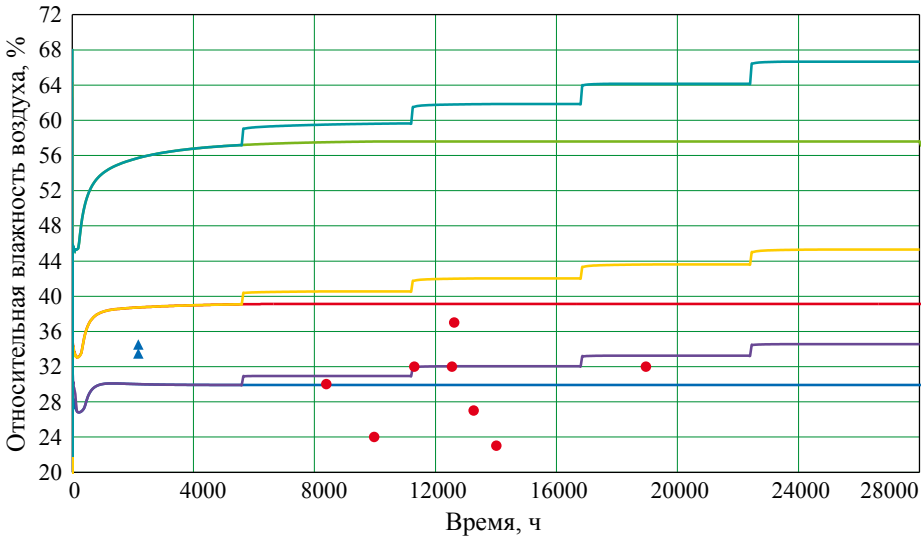


Рис. 1. Изменения относительной влажности в модельном отсеке для случая использования номинальных (не изменяющихся за счет старения) свойств материалов и для случая ступенчатого изменения свойств
Начальное влагосодержание конструктивных элементов отсека при относительной влажности:
– 30 %; – 40 % – 60 %; – 30 % с изменением $c\rho$ и диффузией до 15 %; – 40 % с изменением $c\rho$ и диффузией до 15 %, – 60 % с изменением $c\rho$ и диффузией до 15 %
Экспериментальные данные:
● – измерения влагомером в отсеке эксплуатируемых изделий; ▲ – полученные путем регенерации влагопатронов, снятых с разукомплектованного изделия

Введем обозначения с индексами «*ном*», «*н*», соответствующими исходным, «не состаренным» свойствам материалов и температуре при таких свойствах: теплоемкость $c_{p\ \text{ном}}(T) = c_{p\ \text{н}}$, плотность $\rho_{\text{ном}}(T) = \rho_{\text{н}}$, теплопроводность $\lambda_{\text{ном}}(T) = \lambda_{\text{н}}$, температура $T_{\text{ном}}(T) = T_{\text{н}}$. В (1) источниковый член q_V включает в себя источники $q_{V\ \text{ном}}$, соответствующие задаче без учета старения материалов, и при учете тепловыделения и теплопоглощения $\acute{q}_V$ за счет процессов старения материалов (продолжение полимеризации, деструкция и т.п.) следует записать: $q_V = q_{V\ \text{ном}} + \acute{q}_V$.

Соответственно значения температуры и характеристик материалов с учетом старения можно представить в виде:

$$T = T_{\text{н}} + \tilde{T}; \tag{5}$$

$$c_p = c_{p\text{н}} + \tilde{c_p}\left(T_{\text{н}}, \int_0^{\tau}\left(k_{c_p} e^{-\frac{E_{c_p}}{R\cdot T(x,y,z,\tau)}}\right)d\tau\right); \tag{6}$$

$$\lambda = \lambda_{\text{н}} + \tilde{\lambda}\left(T_{\text{н}}, \int_0^{\tau}\left(k_{\lambda} e^{-\frac{E_{\lambda}}{R\cdot T(x,y,z,\tau)}}\right)d\tau\right); \tag{7}$$

$$\rho = \rho_{\text{н}} + \tilde{\rho}\left(T_{\text{н}}, \int_0^{\tau}\left(k_{\rho} e^{-\frac{E_{\rho}}{R\cdot T(x,y,z,\tau)}}\right)d\tau\right), \tag{8}$$

где волной вверху обозначены малые отклонения от номинальных (без учета старения) значений.

Тогда уравнение (1) принимает вид:

$$\begin{gathered}(c_{p\text{н}} + \tilde{c_p})(\rho_{\text{н}} + \tilde{\rho}) \cdot \left(\frac{\partial T_{\text{н}}}{\partial \tau} + \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left[(\lambda_{\text{н}} + \tilde{\lambda})\left(\frac{\partial T_{\text{н}}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x}\right)\right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y}\left[(\lambda_{\text{н}} + \tilde{\lambda})\left(\frac{\partial T_{\text{н}}}{\partial y} + \frac{\partial \tilde{T}}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[(\lambda_{\text{н}} + \tilde{\lambda})\left(\frac{\partial T_{\text{н}}}{\partial z} + \frac{\partial \tilde{T}}{\partial z}\right)\right] + q_V.\end{gathered} \tag{9}$$

После отбрасывания малых второго порядка с учетом тождественного удовлетворения уравнения (1) при номинальных значениях, из (9) следует:

$$\begin{gathered}c_{p\text{н}}\rho_{\text{н}}\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{\text{н}}\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \text{x}}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{\text{н}}\frac{\partial \tilde{T}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{\text{н}}\frac{\partial \tilde{T}}{\partial z}\right) + \left[-(c_{p\text{н}}\tilde{\rho} + \tilde{\text{c}}_{\text{p}}\rho_{\text{н}})\frac{\partial \text{T}_{\text{н}}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \text{x}}\left(\tilde{\lambda}\frac{\partial \text{T}_{\text{н}}}{\partial \text{x}}\right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial y}\left(\tilde{\lambda}\frac{\partial \text{T}_{\text{н}}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\tilde{\lambda}\frac{\partial \text{T}_{\text{н}}}{\partial z}\right)\right] + \acute{q}_V = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{\text{н}}\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \text{x}}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{\text{н}}\frac{\partial \tilde{T}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{\text{н}}\frac{\partial \tilde{T}}{\partial z}\right) + \tilde{q}_V\end{gathered} \tag{10}$$

Уравнение (10) и исходное уравнение (1) по виду совпадают. Если зависимости (2)–(4) известны, то можно с использованием решения $T_{\text{н}} = T_{\text{н}}(x, y, z, \tau)$, полученного при номинальных значениях $c_{p\ \text{н}}$, $\lambda_{\text{н}}$, $\rho_{\text{н}}$, $q_{V\ \text{ном}}$, найти функции первого приближения для изменения характеристик в процессе старения, а с использованием этих функций определить

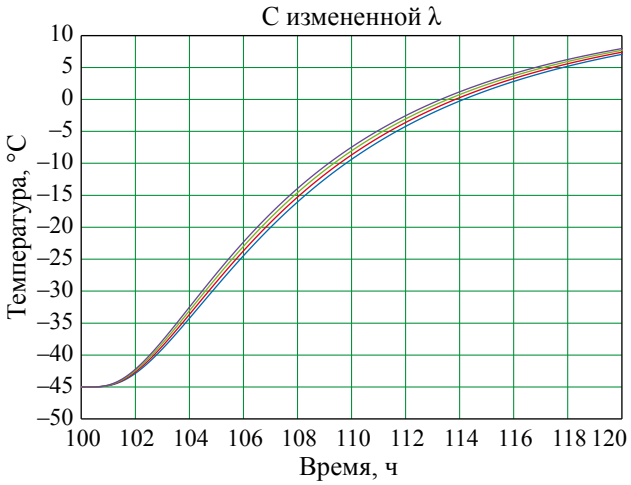


Рис. 2. Значения температуры для одной из конструкций двигателя и для различных уровней теплопроводности материалов в процессе старения

— – номинал, — – 5 %, — – 10 %, — 15 %

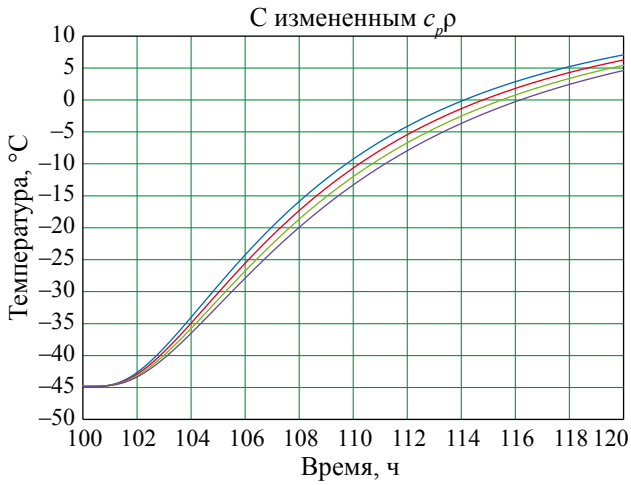


Рис. 3. Значения температуры для одной из конструкций двигателя ракеты для различных уровней отклонения комплекса $c_p\rho$ материалов в процессе старения

— – номинал, — – 5 %, — – 10 %, — 15 %

добавочный источниковый член за счет возмущений свойств. Затем из решения уравнения (10) при нулевых граничных и начальных условиях находится функция $\tilde{T} = \tilde{T}(x, y, z, \tau)$ отклонения поля температуры за счет изменения свойств материалов в процессе старения.

Суммирование этой функции с номинальным решением дает искомое изменение температуры в процессе хранения и эксплуатации с учетом изменения свойств при старении.

Аналогично можно найти решения других уравнений переноса в случае изменения свойств материалов или среды, в частности, уравнения влагопереноса при изменении влагофизических характеристик вследствие старения.

Исходное обобщенное уравнение влагопереноса имеет вид, аналогичный уравнению теплопроводности

$$(c\rho)\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = div(c\rho D grad\theta) + m_V. \qquad (11)$$

После раскрытия дифференциальных операторов уравнение (11) записывается в виде:

$$(c\rho)\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(c\rho D\frac{\partial\theta}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c\rho D\frac{\partial\theta}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(c\rho D\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) + m_V, \qquad (12)$$

где: θ – потенциал влагопереноса, %;
$\lambda в=(c\rho)D$ – коэффициент влагопроводности материала, кг$_в$/(м×сек);
ρ – плотность материала, кг/м^3;
$c = \partial u/\partial\theta$ – влагоемкость материала, кг$_в$/(кг×%);
$u(\theta,T)$ – равновесное влагосодержание материала, кг$_в$/кг;
$D(\theta,T)$ – коэффициент диффузии влаги в материале, м^2/сек;
m_V – источник (сток) влаги, кг$_в$/(м^3×сек).

Материалов в расчетной области может быть некоторое конечное число, но для каждой подобласти мономатериала справедлив представленный ниже метод.

Вследствие старения характеристики зависят от температуры, от влажности и от интеграла температуры:

$$c = c_н + \tilde{c}\left(\theta_н, T_н, \int_0^\tau k_c e^{-\frac{E_c}{RT_н(x,y,z,\tau)}} d\tau\right); \qquad (13)$$

$$\rho = \rho_н + \tilde{\rho}\left(\theta_н, T_н, \int_0^\tau k_\rho e^{-\frac{E_\rho}{RT_н(x,y,z,\tau)}} d\tau\right); \qquad (14)$$

$$D = D_н + \tilde{D}\left(\theta_н, T_н, \int_0^\tau k_D e^{-\frac{E_D}{RT_н(x,y,z,\tau)}} d\tau\right), \qquad (15)$$

где номинальные значения аналогично обозначаются нижним индексом «н»: $D_{ном}(\theta_{ном}, T_{ном}) = D_н$, $m_{vном}(x, y, z, \tau) = m_{vн}$, $c_{ном}(\theta_{ном}, T_{ном}) = c_н$ и т.д., а волной обозначены малые возмущенные отклонения функций от номинальных значений.

Считая добавки за счет старения малыми, представляем решение в виде

$$\theta = \theta_н + \tilde{\theta}, \qquad (16)$$

Тогда уравнение (12) примет вид:

$$[(c_н + \tilde{c})(\rho_н + \tilde{\rho})]\frac{\partial(\theta_н+\tilde{\theta})}{\partial\tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left([(c_н + \tilde{c})(\rho_н + \tilde{\rho})(D_н + \tilde{D})]\frac{\partial(\theta_н+\tilde{\theta})}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left([(c_н + \tilde{c})(\rho_н + \tilde{\rho})(D_н + \tilde{D})]\frac{\partial(\theta_н+\tilde{\theta})}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left([(c_н + \tilde{c})(\rho_н + \tilde{\rho})(D_н + \tilde{D})]\frac{\partial(\theta_н+\tilde{\theta})}{\partial z}\right) + m_V. \qquad (17)$$

После перемножения выражений в скобках и отбрасывания малых второго и большего порядков малости, с учетом тождественного выполнения при номинальных значениях уравнения (12), получим уравнение

$$(c_н\rho_н)\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial\tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(c_н\rho_н D_н\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_н\rho_н D_н\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(c_н\rho_н D_н\frac{\partial\tilde{\theta}}{\partial z}\right) + \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(c_н\tilde{\rho}D_н\frac{\partial\theta_н}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\tilde{c}\rho_н D_н\frac{\partial\theta_н}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(c_н\rho_н\tilde{D}\frac{\partial\theta_н}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_н\tilde{\rho}D_н\frac{\partial\theta_н}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\tilde{c}\rho_н D_н\frac{\partial\theta_н}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(c_н\rho_н\tilde{D}\frac{\partial\theta_н}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(c_н\tilde{\rho}D_н\frac{\partial\theta_н}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\tilde{c}\rho_н D_н\frac{\partial\theta_н}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(c_н\rho_н\tilde{D}\frac{\partial\theta_н}{\partial z}\right) - c_н\tilde{\rho}\frac{\partial\theta_н}{\partial\tau} - \tilde{c}\rho_н\frac{\partial\theta_н}{\partial\tau}\right]. \qquad (18)$$

Так как законы изменения свойств (13)–(15) считаем известными, например по результатам экспериментальных исследований, и известно номинальное решение

$\theta_н = \theta_н(x, y, z, \tau)$, то выражение в квадратных скобках в (18) есть известная зависимость. Обозначая ее через $\tilde{m}_V$, приводим уравнение (18) к виду уравнения (12) относительно функции $\tilde{\theta}$. Решая это уравнение при нулевых граничных и начальных условиях, получим решение для потенциала влагопереноса с учетом изменения свойств материалов в процессе старения.

На основе представленного метода с использованием кодов программ [2, 3] была разработана программа одновременного, на каждом шаге счета по времени, расчета изменения температурных и влажностных режимов с учетом изменения свойств материалов в процессе старения. Проверочный совместный расчет тепловлажностных режимов изделий с учетом изменения свойств материалов при длительных сроках хранения и эксплуатации показал, что предложенный метод позволяет неразрывным образом учитывать и прогнозировать процессы старения материалов и тепловлажностные режимы в обеспечение работоспособности изделий. В расчетах использовались модельные кинетические параметры процессов изменения свойств при длительной эксплуатации, а также модельные тепловые эффекты $\acute{q}_V$ процессов изменения внутренних структур материалов при старении (принимались существенно малыми с целью сопоставления с расчетами по разрывному методу). При проведении практических проектных расчетов необходимо использовать кинетические параметры и значения тепловых эффектов, получаемые в процессе ускоренных климатических и других испытаний и при дефектации изделий после длительных сроков хранения и эксплуатации.

Список литературы

1. Павлов Н.Н. *Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях.* М.: Химия, 1982.

2. Программа «Урал-А» расчета тепловых режимов. Свидетельство о регистрации № 2013611732. Дата приоритета 09.10.2012.

3. Программа «Урал-В» расчета влажностных режимов. Свидетельство о регистрации № 2013660367. Дата приоритета 06.09.2013.

4. Определение номенклатуры материалов и покрытий систем РК и БО, ЭХМП которых могут изменяться при длительном воздействии ТВР, и критериев допустимости изменения ЭХМП с точки зрения длительной эксплуатации РК и БО: техн. отчет 542/102-433-2012. Миасс: ОАО «ГРЦ Макеева», 2012. 71 с.

Об авторах

Дубровина Наталья Николаевна – инженер I категории Акционерного общества «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева» (АО «ГРЦ Макеева»), Миасс, Челябинская область, Российская Федерация. Область научных интересов: тепловлажностные процессы при эксплуатации изделий аэрокосмической и других отраслей.

Костин Геннадий Федотович – доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии» Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН «Ю-У НЦ МиГ» УрО РАН); ведущий научный сотрудник АО «ГРЦ Макеева» (по совместительству); профессор кафедры прикладной механики Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Челябинский государственный университет» (по совместительству), Миасс, Челябинская область, Российская Федерация.
Область научных интересов: тепломассообмен и тепловая защита летательных аппаратов.

A method for considering the aging of materials during long-term operation

Dubrovina N.N.[1], Kostin G.F.[1,2,3]

[1] *JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation*

[2] *South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation*

[3] *Chelyabinsk State University, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation*

The paper proposes a method for considering the joint influence of external conditions and the corresponding variation in the properties of materials during aging on the thermal and moisture parameters of products. Comparative calculations of the thermal and humidity parameters of a model structure made of standard materials were performed without considering and when considering changes in the properties of materials during aging under the same operating conditions. These calculations confirmed the importance of considering changes in the properties of materials for ensuring the required performance of finished products. The proposed method is based on the principle of separating the linearized part of transfer equations under small deviations in parameters from those realized without considering aging. This novel method is accurate and time-efficient compared to that of separate sequential accounting for changes in the properties of materials during aging under operating conditions.

Keywords: material aging, humidity, temperature.

Information about the authors

Dubrovina Natalya Nikolaevna – Engineer of the 1st category, JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation.
Research interests: heat and moisture processes during the operation aerospace and other products.

Kostin Gennady Fedotovich – Dr. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Leading Researcher, JSC Makeyev Design Bureau (part-time); Senior Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Professor, Department of Applied Mechanics, Chelyabinsk State University, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation.
Research interests: heat and mass transfer, thermal protection of aircrafts.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-41-46
УДК 629.735.33

Активная система управления обтеканием закрылка на модели отсека крыла пассажирского самолета

Д. А. Жоголев, А. А. Копылов, А. А. Никуленко, С. Я. Севостьянов, В. Г. Судаков

Научно-технический центр федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация

Разработана и изготовлена конструкция активной системы управления обтеканием закрылка. Работа активной системы управления обтеканием осуществляется за счет выдува воздуха под давлением на верхнюю поверхность закрылка. Система встроена в существующую крупномасштабную аэродинамическую модель отсека механизированного крыла и конструктивно состоит из устройства, подающего к закрылку сжатый воздух, и передней кромки закрылка, в которой непосредственно реализован выдув воздуха.

Ключевые слова: аэродинамическая модель, система активного управления обтеканием, закрылок, экспериментальные исследования.

Для цитирования: Жоголев Д. А., Копылов А. А., Никуленко А. А., Севостьянов С. Я., Судаков В. Г. Активная система управления обтеканием закрылка на модели отсека крыла пассажирского самолета // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 41–46. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-41-46

For citation: Zhogolev D. A., Kopylov A. A., Nikulenko A. A., Sevostyanov S. Ya., Sudakov V. G. An active system for controlling the wing flap flow on a model of a passenger aircraft wing section // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 41–46. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-41-46

Поступила 23.10.2020 *Отрецензирована* 04.11.2020 *Одобрена* 06.11.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Введение

Применение активных систем управления обтеканием аэродинамических поверхностей взлетно-посадочной механизации является одним из наиболее актуальных направлений совершенствования характеристик разрабатываемых самолетов [1]. При наличии многочисленных результатов и теоретических расчетных исследований практически отсутствует их экспериментальное подтверждение. Выполненные расчеты и ограниченные экспериментальные работы проведены для существенно упрощенных конфигураций обтекаемых поверхностей (цилиндры со щелями выдува в пограничный слой, прямоугольные поверхности со стилизованной аэродинамической профилировкой). В настоящей работе решается задача исследования эффективности управления пограничным слоем путем управляемого выдува в него струй для типичной аэродинамической компоновки магистрального самолета. Особо высока актуальность оценки эффективности управления пограничным слоем для отклоняемого закрылка применительно к оценке возможного повышения подъемной силы системы «крыло – отклоняемый закрылок» на взлетно-посадочных режимах.

Настоящая статья посвящена разработке аэродинамической модели отсека механизированного крыла и реализации системы выдува струй в пограничном слое для обеспечения исследования активного управления пограничного слоя для обеспечения исследования активного управления на взлете и посадке магистрального самолета.

Наиболее целесообразно исследование подобных систем проводить на крупномасштабных аэродинамических моделях,

© Жоголев Д. А., Копылов А. А., Никуленко А. А., Севостьянов С. Я., Судаков В. Г., 2020

что позволяет приблизиться к реальным условиям полета самолета и таким образом повысить информативность экспериментальных исследований [2].

Для проведения исследований принято решение об использовании ранее изготовленной крупноразмерной аэродинамической модели отсека механизированного крыла. Система управления обтеканием была разработана с учетом применения ее на существующей модели. Аэродинамическая модель представляет собой отсек механизированного крыла, размеры которой максимально приближены к реальным размерам самолета (масштаб ~ 1:1). Конструктивно модель состоит из отсека крыла, предкрылка, закрылка, отсечных шайб и мотогондолы. Размеры модели: длина 7900 мм, ширина 6000 мм. Масса модели 5200 кг.

Конструкция активной системы управления обтеканием закрылка

Включает устройство, подающее к закрылку сжатый воздух, и переднюю кромку закрылка, через профилированные щели и отверстия которой на его верхнюю поверхность выдается воздух под давлением.

Устройство, подающее к закрылку сжатый воздух, представляет собой разветвленную воздушную магистраль, состоящую из жестких стальных и алюминиевых труб, гибких труб с металлической оплеткой и гибких гофрированных труб из нержавеющей стали (рис. 1). Одна часть воздушной магистрали, по которой подводится сжатый воздух, расположена снаружи модели и соединена с другой ее частью. Другая часть магистрали сначала проходит внутри носовой части отсека крыла, после чего заводится внутрь отсека, проходя через его переднюю стенку примерно посредине. Эти части воздушной магистрали выполнены из жестких стальных труб большого диаметра (~ ∅100 мм). Далее внутри отсека крыла воздушная магистраль разделяется на три магистрали, которые подводятся к задней стенке отсека. Магистраль состоит из гибких труб с металлической оплеткой и жестких труб из алюминиевого сплава. Эти трубы имеют меньший размер диаметра по сравнению с трубами подводной магистрали. Каждая из труб в зоне задней стенки соединяется с гофрированными стальными трубами. Далее гофрированные стальные трубы прокладываются внутри задней кромки модели и подводятся непосредственно к закрылку.

Типы труб выбраны исходя из:

– условий их работы под высоким воздушным давлением с обеспечением герметичности в соединительных стыках;

– прокладки их в обводах ранее изготовленной модели с учетом закрепления на уже существующих элементах конструкции;

– условия сохранения пропорциональности площадей их проходных сечений площадям щелей на передней кромке закрылка, через которые воздух выдувается на его верхнюю поверхность. Пропорциональность площадей проходных сечений в трубах обеспечивает равномерный выдув воздуха на верхнюю поверхность закрылка по всему его размаху.

Из всего многообразия существующих в продаже труб наиболее целесообразно было применить гибкие гофрированные трубы из нержавеющей стали для размещения их в зоне задней кромки отсека крыла. Это объясняется необходимостью иметь трубы с большим количеством изогнутых участков для их прокладывания между близко размещенными элементами конструкции модели. Применение же гибких гофрированных труб вместе с поворотными штуцерами (рис. 2), которые размещаются на передней кромке закрылка, позволило обеспечить его поворот на угол до 60 градусов. Гофрированные трубы в момент поворота закрылка изгибаются без нарушения площадей их проходных сечений с сохранением способности выдерживать высокое воздушное давление, а поворотные штуцеры подвода воздуха, поворачиваясь, исключают недопустимые изгибы и изломы в гофрированных трубах в зоне соединения их с закрылком.

Передняя кромка закрылка включает четыре съемных носка. Внутри каждого носка имеются внутренние герметичные полости, в которые воздух под давлением 4 атм. подается из устройства подачи к закрылку сжатого воздуха. Из полостей воздух под давлением выдувается на верхнюю поверхность закрылка. Реализованы два способа выдува воздуха

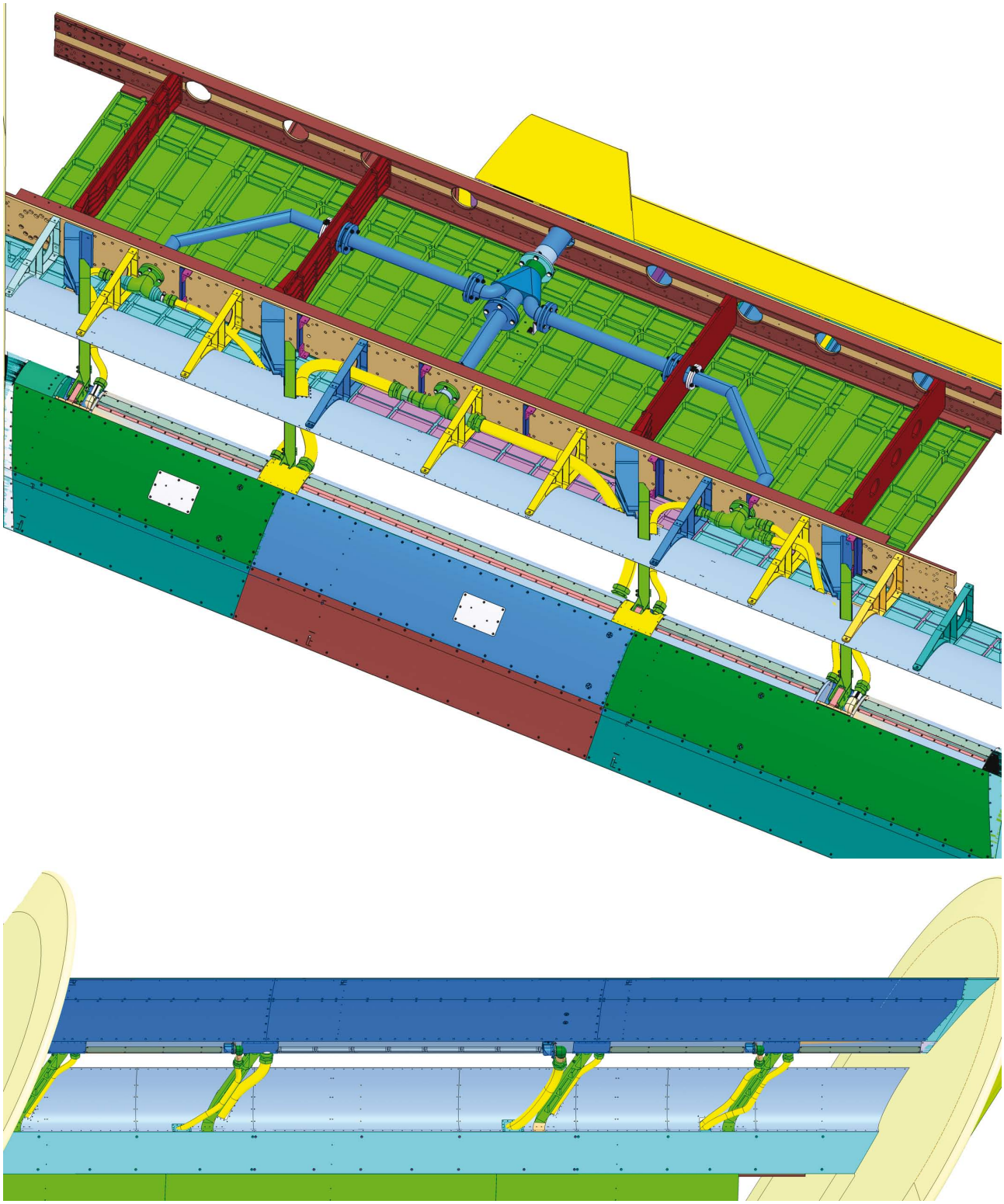


Рис. 1. Расположение элементов системы активного управления обтеканием на модели

из закрылка: тангенциальный выдув (рис. 3) и выдув воздуха с образованием струйных вихрегенераторов (рис. 4).

Для обеспечения двух различных типов выдува в конструкции носков закрылка имеются специальные вставки. Одни имеют прямоугольные щели, а другие – отверстия, расположенные под двумя углами к нормали выдуваемой поверхности. Герметичные полости в съемных носках предназначены

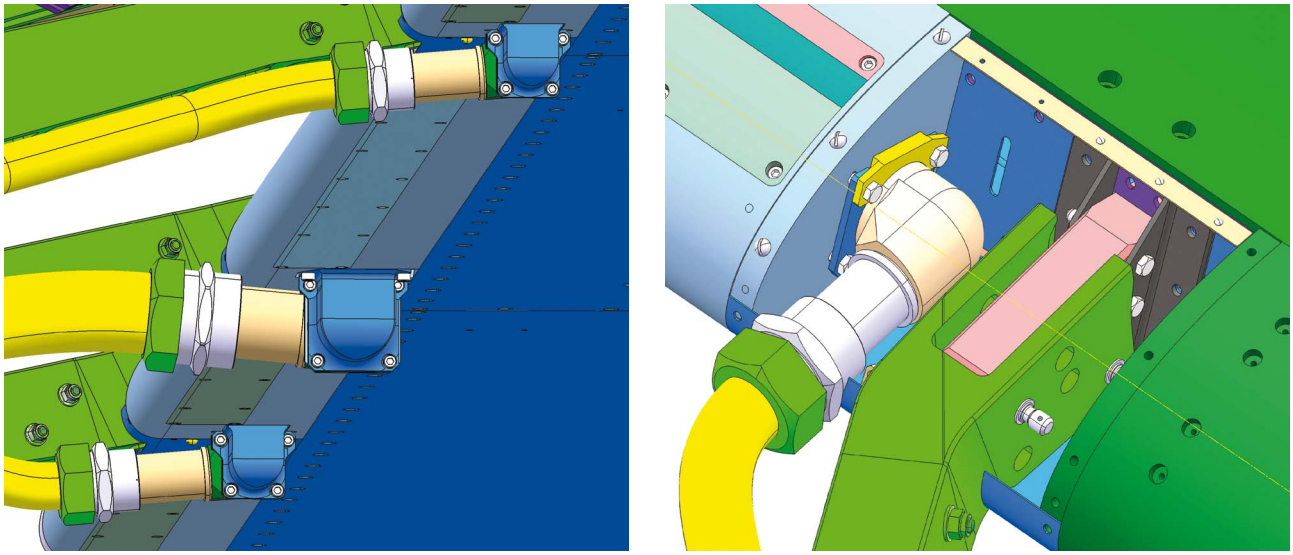


Рис. 2. Поворотные штуцеры подвода воздуха на передней кромке закрылка

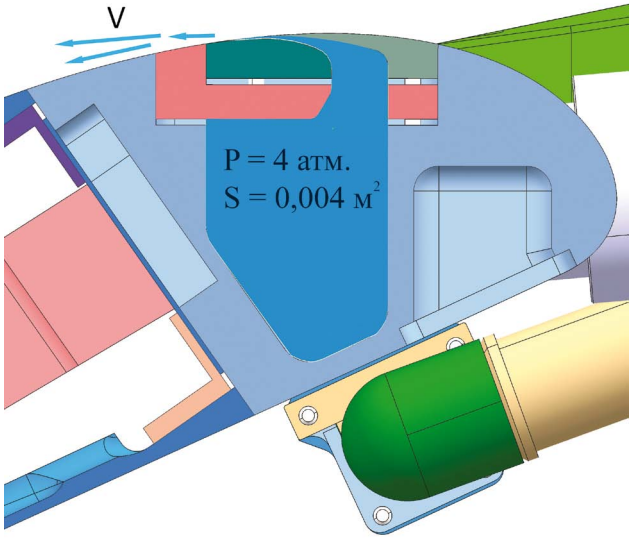


Рис. 3. Тангенциальный выдув

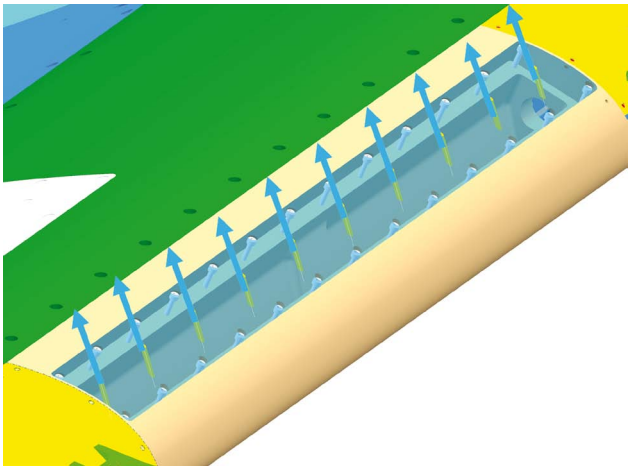


Рис. 4. Выдув воздуха с образованием струйных вихрегенераторов

для получения равномерного выдува воздуха из профилированных щелей или отверстий.

Во время проведения эксперимента производится визуализация потока воздуха при помощи мини-шелковинок, которые при безотрывном обтекании потока полностью прилегают к поверхности закрылка, а при отрывном обтекании колеблются. Для фиксации обтекания на модели в определенном месте внутри специального бокса установлена видеокамера и осветители (рис. 5).

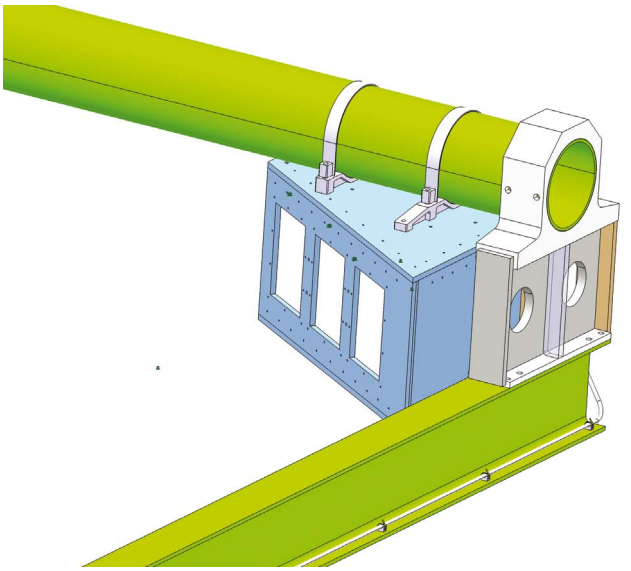


Рис. 5. Бокс с окнами для видеокамеры и осветителями, расположенными внутри

Вывод

В результате работы спроектирована система управления обтеканием закрылка,

конструкция которой изготовлена в опытном производстве, и проведены экспериментальные исследования в аэродинамической трубе Т-101 ЦАГИ.

Благодаря созданию данной системы управления обтеканием удалось успешно провести аэродинамический эксперимент в аэродинамической трубе без использования летных экспериментов на реальном самолете, что сопряжено с большими затратами на подготовку и проведение эксперимента. Большие затраты при создании подобной системы непосредственно на самолете вызваны проведением значительной модернизации систем двигателя и встраиванием дополнительной воздушной системы внутрь крыла, что трудно выполнимо на уже существующем самолете.

Список литературы

1. Разработка принципиальной конструктивной схемы и технологии большеразмерной аэродинамической модели крыла (в аэродинамическую установку Т-101). Научно-технический отчет № 10/3092, ЦАГИ, 2000 г.

2. Петров А.В. Аэродинамика транспортных самолетов короткого взлета и посадки с энергетическими системами увеличения подъемной силы. М.: Инновационное машиностроение, 2018.

Об авторах

Жоголев Денис Алексеевич – инженер 2 категории научно-технического центра федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.
Область научных интересов: аэродинамические модели.

Копылов Алексей Анатольевич – начальник сектора научно-технического центра федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.
Область научных интересов: аэродинамические модели.

Никуленко Алексей Алексеевич – ведущий инженер-конструктор научно-технического центра федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.
Область научных интересов: аэродинамические модели.

Севостьянов Сергей Яковлевич – ведущий инженер-конструктор научно-технического центра федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.
Область научных интересов: разработка аэродинамических моделей и гидравлических систем.

Судаков Виталий Георгиевич – доктор физико-математических наук, доцент, заместитель начальника отделения аэродинамики федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.
Область научных интересов: аэродинамика, механика жидкостей и газов.

An active system for controlling the wing flap flow on a model of a passenger aircraft wing section

Zhogolev D. A., Kopylov A. A., Nikulenko A. A., Sevostyanov S. Ya., Sudakov V. G.

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation

In this work, a model of an active system for controlling the wing flap flow was designed and manufactured. The presented active flow control system operates by blowing air under pressure onto the upper surface of the flap. The system consists of a device supplying compressed air to the flap and the flap leading edge, through which the air is blown out. For experimental testing, the system was built into the existing large-scale aerodynamic model of a mechanized wing compartment.

Keywords: aerodynamic model, active flow control system, flap, experimental research.

Information about the authors

Zhogolev Denis Alekseevich – Engineer of the 2nd category, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.
Research interests: aerodynamic models.

Kopylov Kopylov Aleksey Anatolevich – Sectoral Head, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.
Research interests: aerodynamic models.

Nikulenko Aleksey Alekseevich – Leading Design Engineer, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.
Research interests: aerodynamic models.

Sevostyanov Sergey Yakovlevich – Leading Design Engineer, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.
Research interests: development of aerodynamic models and hydraulic systems.

Sudakov Vitaly Georgievich – Dr. Sci. (Phys.- Math.), Assoc. Prof., Deputy Head, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.
Research interests: aerodynamics, mechanics of liquids and gases.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-47-53
УДК 004.942:532.5:629.76.085.5

Численное моделирование силовых и тепловых нагрузок на подводную лодку при старте ракеты

Е. С. Никулин[1], В. И. Пегов[1,2], А. Д. Чешко[1], И. Ю. Мошкин[1,2]

[1]Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», Миасс, Челябинская область, Российская Федерация
[2] Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии» Уральского отделения Российской академии наук, Миасс, Челябинская область, Российская Федерация

Статья посвящена численному моделированию силового и теплового воздействий на шахту при подводном старте ракеты из шахты подводной лодки. Экспериментальные исследования не всегда позволяют определить все интересующие параметры и детально изучить возникающую картину нестационарного течения. Удовлетворительное соответствие численного метода расчета и экспериментальных данных служит подтверждением корректности разработанного численного метода моделирования стартовых нагрузок на подводную лодку. Получены картины двухфазного течения, определены силовые и температурные воздействия при послестартовом затоплении шахты водой.

Ключевые слова: ракета, подводный старт, численный метод, экспериментальные исследования, подводная лодка, шахта, каверна, имитационное математическое моделирование, CFD-пакет, силовое воздействие, тепловое воздействие.

Для цитирования: Никулин Е. С., Пегов В. И., Чешко А. Д., Мошкин И. Ю. Численное моделирование силовых и тепловых нагрузок на подводную лодку при старте ракеты // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 47–53. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-47-53

For citation: Nikulin E. S., Pegov V. I., Cheshko A. D., Moshkin I. Yu. Numerical simulation of power and thermal loads on a submarine during an underwater missile launch // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 47–53. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-47-53

Поступила 12.10.2020 *Отрецензирована* 21.10.2020 *Одобрена* 23.10.2020 *Опубликована* 30.12.2020

На современном этапе разработки морских баллистических ракет остается актуальным вопрос определения гидродинамических нагрузок на стартующую ракету и подводную лодку. В настоящее время теоретическое решение этой проблемы сводится к решению следующих задач: определение нагрузок на стартующую ракету и отдельно на подводную лодку. Исходя из этих нагрузок определяются требования к прочности корпуса, системам управления и стабилизации подводных лодок. В настоящей работе представлена попытка численного моделирования силовых нагрузок на канал при непрерывном перемещении поршня и сопутствующем затоплении канала водой. Данная модель позволяет получить силовые и тепловые нагрузки на корпус канала, что дает возможность использовать данную модель для определения силовых и тепловых нагрузок на шахту подводной лодки. Надежность и достоверность разрабатываемого численного метода расчета подтверждается путем сравнения расчетных данных с экспериментальными [1].

Весь процесс гидрогазодинамического воздействия на подводную лодку условно можно разбить на три последовательных этапа:

- движение ракеты в шахте;
- послепусковое затопление шахты водой;
- выход газовых пузырьков из шахты.

Выход ракеты из шахты в набегающий поток может реализовываться по двум

© Никулин Е. С., Пегов В. И., Чешко А. Д., Мошкин И. Ю., 2020

расчетным схемам, представленным на рисунке 1. На рисунке 1а диаметр шахты равен диаметру ракеты. Данная модель выхода ракеты из шахты близка к эксперименту, описанному в данной работе. На рисунке 1б представлена модель, когда между ракетой и шахтой есть кольцевой зазор. Ракета движется в шахте по опорно-ведущим поясам [2].

Существуют различные модели, описывающие влияние начальной температуры газа на характеристики колебательного процесса (силового воздействия). В данной работе рассматривается следующая «равновесная» модель процесса. Пусть масса воды $dm_ж$ попадает в газ в мелкодиспергированном виде, «мгновенно» испаряется, а образованный пар прогревается до температуры газа [3].

Естественно, в этом случае теплообменом со стенками канала можно так же пренебречь, как и в «замороженном» по фазовым превращениям процессе.

Уравнение энергии для термодинамической системы газ–пар запишется в виде:

$$C_{vn}\,(T - T_ж)\,dm_ж + \tilde{r}(T_ж)\,dm_ж + \\ + (C_{vг}\,m_г + m_ж\,C_{vn})dT = -(P_г + P_n)dV, \quad (1)$$

где C_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме; $m_г$ – масса газа;

$m_ж$ – масса воды;

T – начальная температура в сосуде;

$T_ж$ – температура воды;

$\tilde{r}(T_ж)$ – внутренняя теплота фазового превращения, характеризующая изменение внутренней энергии жидкости при испарении:

$$\tilde{r}(T_ж) \approx r(T_ж) - \frac{RT_ж}{\mu_n}, \quad (2)$$

где $r(T_ж)$ – скрытая теплота фазового перехода, характеризующая изменение энтальпии. Значения парциальных давлений газа $P_г$ и пара P_n определяются из уравнения состояния идеального газа:

$$P_г = \frac{m_г}{\mu_г}\cdot\frac{RT}{V};\ P_n = \frac{m_ж}{\mu_n}\cdot\frac{RT}{V}. \quad (3)$$

Уравнение (1) можно использовать, пока пар остается ненасыщенным.

Экспериментальное моделирование процесса заливки канала жидкостью проводилось согласно схеме, представленной на рисунке 2. В канал (1) диаметром $D = 55$ мм и высотой $L = 450$ мм вставлен поршень (2). Сверху поршня находится жидкость (4) с гидростатическим давлением $P_ж$, внизу – газовый объем (3), давление в котором равно $P_{го} =^{\sim} P_{вх}$. В момент $t = 0$ поршень внезапно удаляется вверх, газ, находящийся под поршнем, расширяется, и в момент выхода поршня из канала в него начинает заливаться жидкость. Возмущение давления, возникающее при заливке, фиксируется на днище канала пьезоэлектрическим датчиком давления типа ЛХ610. Собственная частота датчика составляет 15 кГц, погрешность измерения 2 %.

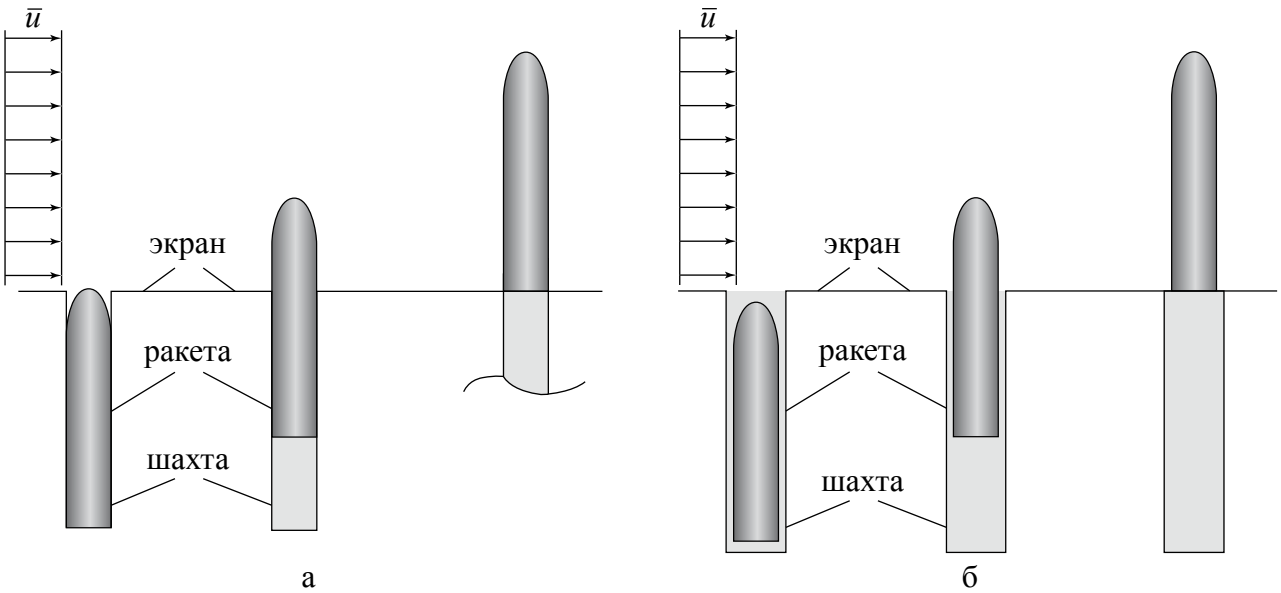


Рис. 1. Выход ракеты из шахты: а – диаметр шахты равен диметру ракеты; б – между ракетой и шахтой есть кольцевой зазор

Для решения гидрогазодинамической задачи применим метод контрольного объема (МКО) [4–7], в основе которого лежат уравнения сохранения в интегральной форме:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Omega}\rho\Phi\, d\Omega + \int_{S}\rho\Phi(\vec{V}\cdot\vec{n})\,\mathrm{dS} = \\ = \int_{S}\Gamma(grad\Phi\cdot\vec{n})\,\mathrm{dS} + Q(p, F_m), \quad (4)$$

где в левой части находятся нестационарный и конвективный члены, в правой – диффузионный и источниковый. Здесь также обозначены Ф – произвольная величина, значение которой зависит от рассматриваемого уравнения (например, в уравнении движения $\Phi = \tilde{} V$, уравнении энергии $\Phi = c_p T$); Г – коэффициент диффузии для величины Ф; $Q(p, F_m)$ – источниковый член, который может содержать составляющие как от массовых сил, так и от перепада давления.

Моделирование было проведено в нестационарной трехмерной постановке с учетом многофазности среды и наличия силы тяжести, при этом была использована реализация МКО на базе *CFD*-пакета. Замыкание системы уравнений проводилось с использованием двухпараметрической модели турбулентности *k-ε*. Для описания межфазного взаимодействия применена модель *VOF (VolumeOfFluid)*. Использовалась гексаэдрическая и тетраэдрическая расчетная сетка, перестраиваемая послойным наращиванием.

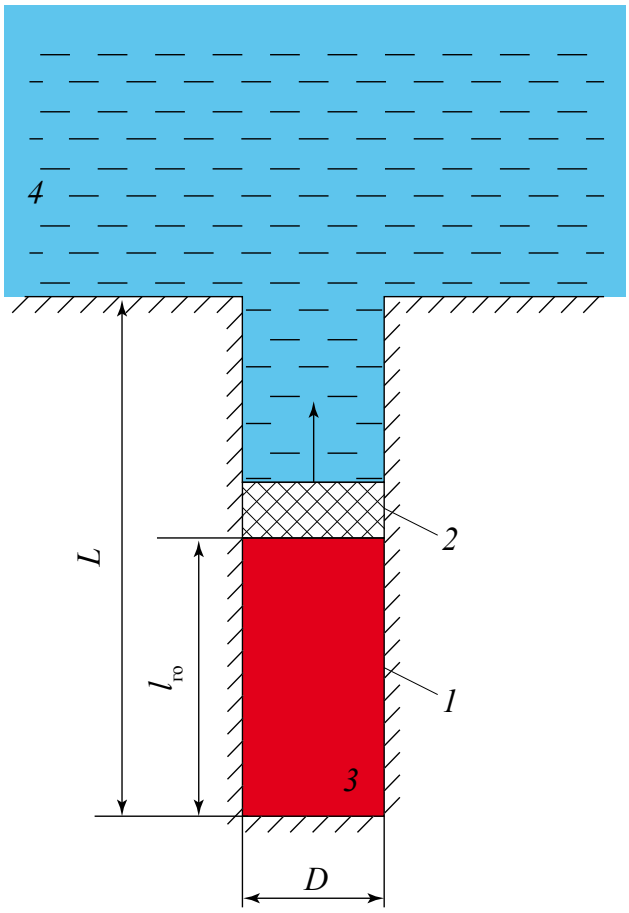


Рис. 2. Схема модельной установки: 1 – канал, 2 – поршень, 3 – газовый объем, 4 – жидкость

Межфазное взаимодействие учитывается посредством однородной модели Эйлера и модели свободной поверхности – данная комбинация используется для течений с ярко выраженной свободной поверхностью раздела фаз. Эти модели напрямую разрешают поверхность раздела между фазами, помещая в нее специальное граничное условие. Решается общий набор уравнений для обеих фаз (воды и газа) и отдельно рассчитывается граница взаимодействия этих фаз.

С помощью разработанной методики проведено численное исследование процесса выхода поршня из канала для двух случаев:

а) $P_ж > P_{го}$;

б) $P_ж < P_{го}$.

При этом размеры канала такие же, как и в эксперименте (D = 55 мм, L = 450 мм).

а) На рисунке 3 представлено сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными избыточного давления газа в канале. Отсчет времени проводится от момента начала движения поршня в канале.

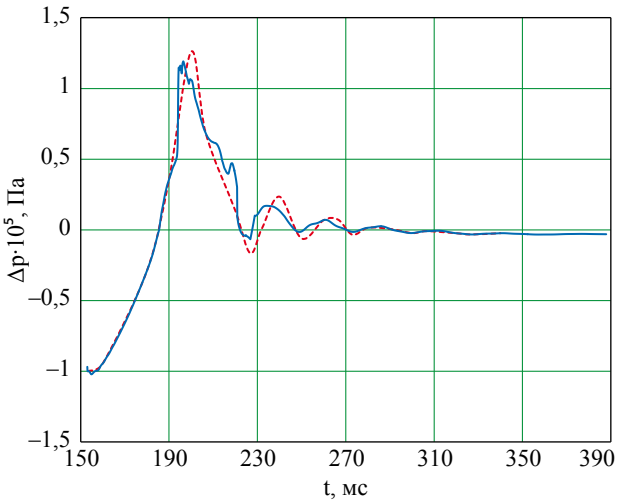


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная зависимости избыточного давления газа в канале:
— – расчетная, — – экспериментальная

Из рисунка 3 можно заключить, что струйное затекание воды в канал сопровождается колебаниями давления. Колебания затухают примерно к моменту времени t = 350 мс. Затем (при t > 350 мс) происходит всплытие газовых пузырей в канале.

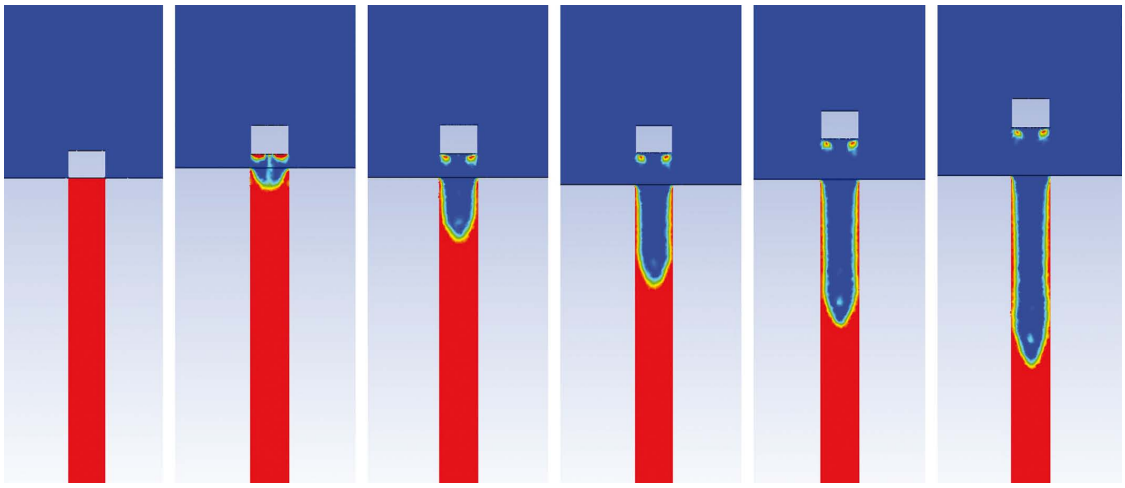


Рис. 4. Видеограмма процесса выхода поршня из канала

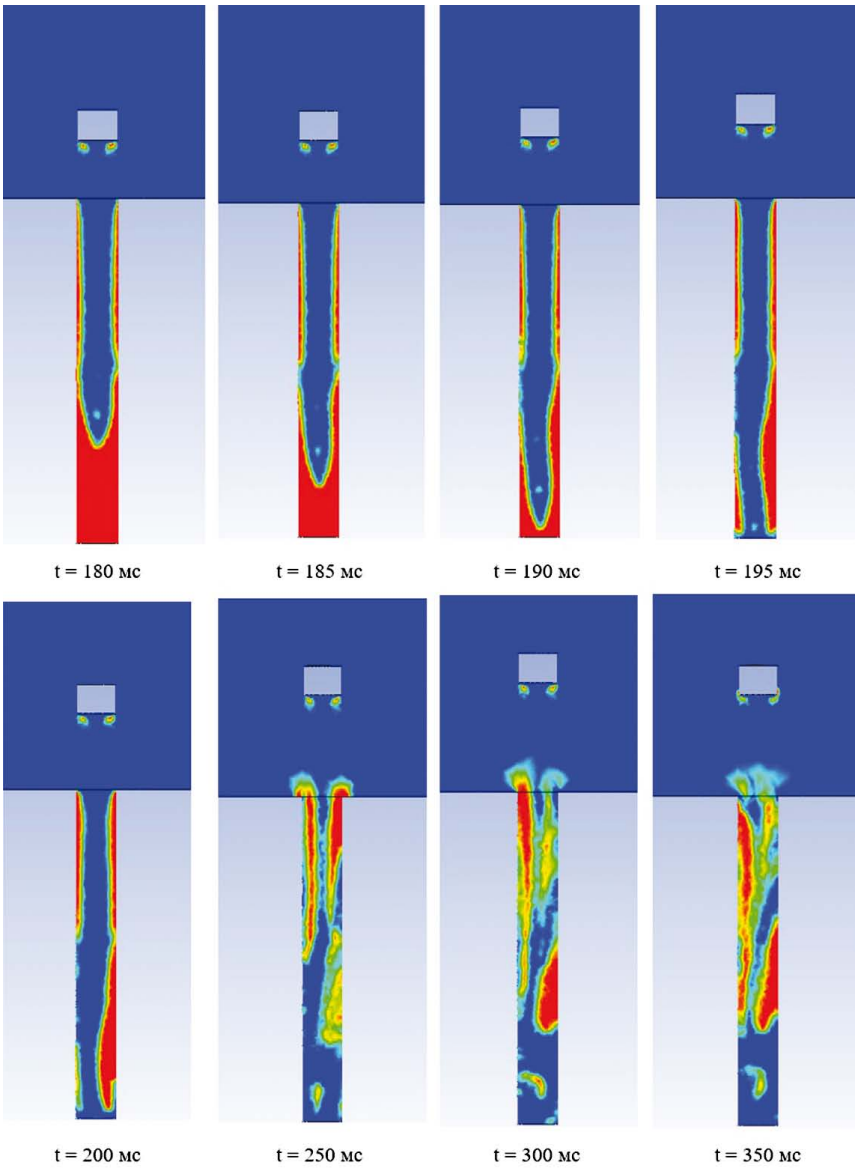


Рис. 5. Видеограмма процесса затопления канала

На рисунке 4 приводится полученная из расчета видеограмма процесса выхода поршня из канала.

На рисунке 5 представлена видеограмма затопления канала водой.

При численном моделировании процессов появляется возможность расчета процесса затопления канала при тепловом нагреве газа. На рисунке 6 приведены графики зависимости силовых воздействий на канал при нагреве и отсутствии нагрева газа.

При заполнении канала с горячим газом увеличение поверхности контакта газа с жидкостью ведет к процессу бурного парообразования с резким падением давления и температуры. Это приводит в конечном счете к повышению пиковых величин давления и увеличению периода их колебаний.

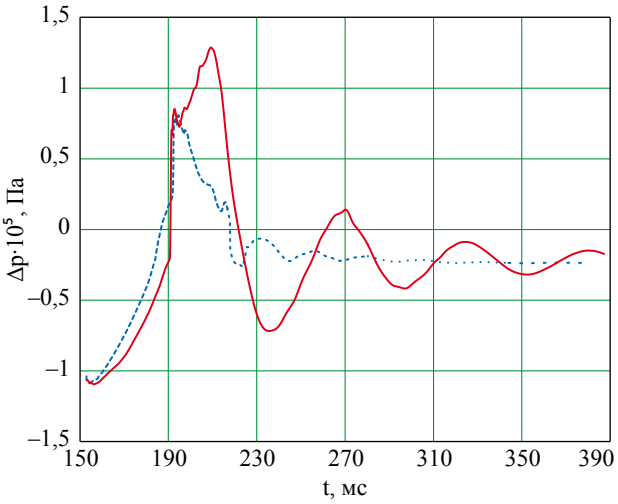


Рис. 6. Силовое воздействие на канал при нагреве газа: — $T_г$ = 500 К, — $T_г$ = 273 К

б) В работе было проведено численное моделирование процесса выхода поршня из канала для случая $P_ж < P_{го}$. Данная модель значительно отличается от эксперимента.

На рисунке 7 представлена видеограмма процесса выхода поршня из канала и последующее затопления канала водой для случая $P_ж < P_{го}$.

Вначале образуется газовый пузырь, близкий по форме к полусфере, затем за днищем поршня образуется цилиндрическая газовая каверна. Вследствие возникающего разрежения газа в канале происходит смыкание границ каверны. При этом за днищем поршня образуется донная газовая каверна, а по оси канала начинает втекать струя жидкости, которая достигает днища канала, тормозится и начинается струйное затопление канала. При этом давление на днище имеет колебательный характер по времени, от кормы поршня периодически отделяется донная каверна.

На рисунке 8 представлена зависимость избыточного давления газа в канале

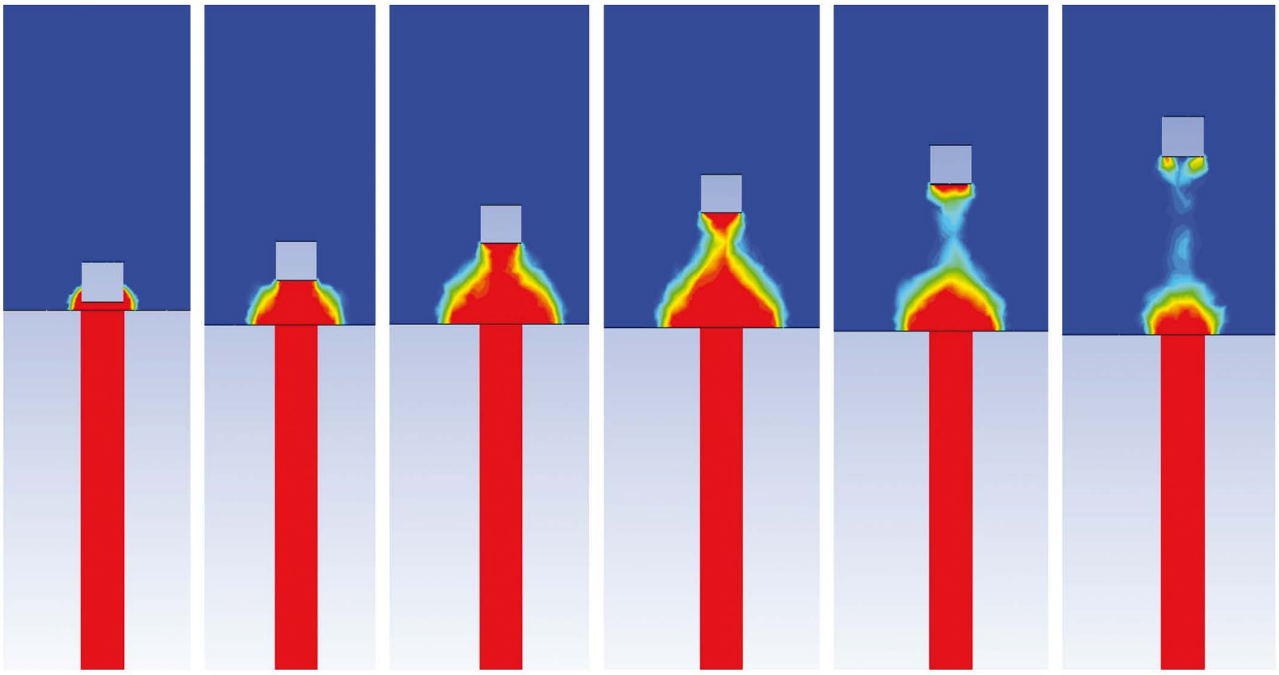


Рис. 7. Видеограмма процесса выхода поршня из канала

в зависимости от времени. Отсчет времени проводится от момента выхода поршня из канала.

На основе выполненных численных расчетно-теоретических исследований можно сделать следующие выводы.

1. Хорошее соответствие расчетов с результатами экспериментов служит подтверждением надежности и достоверности разработанного численного метода моделирования стартовых нагрузок на шахту подводной лодки (рис. 4).

2. В дальнейшем при численном моделировании стартовых нагрузок на шахту подводной лодки необходимо более детально учитывать архитектуру шахты и поле течения жидкости при обтекании ее корпуса.

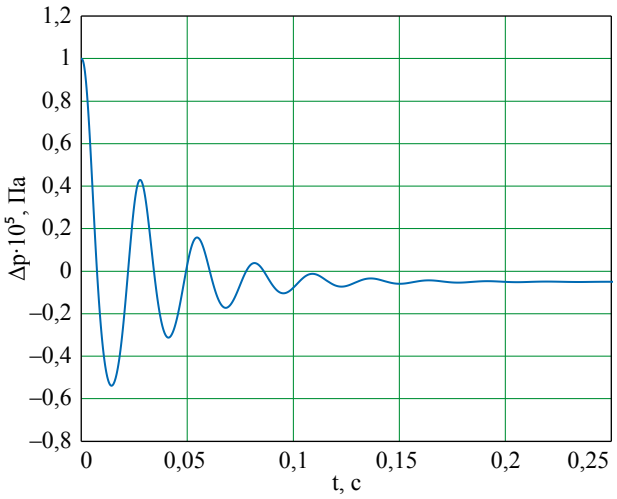


Рис. 8. Расчетная зависимость избыточного давления газа в канале

Список литературы

1. Исследование динамического процесса при заполнении канала: техн. отчет о научно-исследовательской работе № 166. Новосибирск: Институт теплофизики, 1987. 56 с.

2. *Дегтярь В.Г., Пегов В.И.* Гидродинамика подводного старта ракет. М.: Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2009. 448 с.: ил.

3. *Дегтярь В.Г., Пегов В.И., Мошкин И.Ю., Чешко А.Д.* Математическое моделирование процессов тепломассообмена горячих газовых струй с жидкостью при подводном старте ракет // Теплофизика высоких температур. 2019. Т. 57, № 5. С. 742–747.

4. *Дегтярь В.Г., Пегов В.И.* Физическое и математическое моделирование гидродинамики подводного старта ракет // Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей». 2015. № 1 (13). С. 65.

5. *Пегов В.И.* Численное исследование гидродинамики подводного старта ракет // Челябинский физико-математический журнал. 2019. Т. 1, вып. 5. С. 42–50.

6. *Пегов В.И., Мошкин И.Ю., Меркулов Е.С., Чешко А.Д.* Численное моделирование гидродинамических нагрузок на стартующую ракету и подводную лодку // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2016. № 3. С. 30–35.

7. *Пегов В.И., Мошкин И.Ю.* Расчет гидродинамики кавитационного способа старта ракет // Челябинский физико-математический журнал. 2018. Т. 3, вып. 4. С. 476–485.

Об авторах

Никулин Евгений Сергеевич – инженер Акционерного общества «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», Миасс, Челябинская область, Россия.
Область научных интересов: гидродинамика, газодинамика, динамика летательных аппаратов.

Пегов Валентин Иванович – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Россия; главный научный сотрудник АО «ГРЦ Макеева», Миасс, Челябинская область, Россия.
Область научных интересов: гидродинамика, газодинамика, динамика летательных аппаратов.

Чешко Антон Дмитриевич – начальник отдела гидрогазоаэродинамики АО «ГРЦ Макеева», Миасс, Челябинская область, Россия.
Область научных интересов: гидродинамика, газодинамика, тепломассообмен, динамика летательных аппаратов.

Мошкин Игорь Юрьевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Южно-Уральского федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН, Миасс, Челябинская область, Россия; ведущий научный сотрудник АО «ГРЦ Макеева», Миасс, Челябинская область, Россия.
Область научных интересов: гидродинамика, газодинамика, тепломассообмен, динамика летательных аппаратов.

Numerical simulation of power and thermal loads on a submarine during an underwater missile launch

Evgeny S. Nikulin[1], Valentin I. Pegov[1,2], Anton D. Cheshko[1], Igor Yu. Moshkin[1,2]

[1] JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation
[2] South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation

The article is devoted to the numerical modelling of the force and thermal effects acting on a submarine's missile silo during an underwater missile launch. Experimental studies are not sufficient for determining all the parameters of interest and elucidating the pattern of emergency situations. The correctness of the developed numerical method for modelling the loads acting on a submarine during an underwater missile launch was confirmed by comparing the results of the conducted numerical calculations and obtained experimental data, which were found to be in good agreement. Two-phase flow patterns were obtained; force and temperature effects were determined during post-start silo flooding with water.

Keywords: missile, underwater launch, numerical method, experimental research, submarine, missile silo, cavity, mathematical simulation, CFD package, force action, thermal effect.

Information about the authors

Nikulin Evgeny S. – Engineer, JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation.
Research interests: hydrodynamics, gas dynamics, aircraft dynamics.

Pegov Valentin I. – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Leading Researcher, South Ural Federal Research South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation; Chief Researcher, JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation.
Research interests: hydrodynamics, gas dynamics, aircraft dynamics.

Cheshko Anton D. – Head of the Hydrogas and Aerodynamics Department, JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation.
Research interests: hydrodynamics, gas dynamics, heat and mass transfer, aircraft dynamics.

Moshkin Igor Yu. – Cand. Sci. (Engineering), Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation; Leading Researcher, JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation.
Research interests: hydrodynamics, gas dynamics, heat and mass transfer, aircraft dynamics.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-54-61
УДК 004.942, 533.68

Численное моделирование аэродинамики артиллерийского снаряда для экспериментальной отработки элементов штатных образцов

М. С. Колкотина, Н. В. Сошникова

Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», Миасс, Челябинская область, Российская Федерация

Статья посвящена разработке имитационной математической модели и численному моделированию аэродинамических процессов при полете специального артиллерийского снаряда с использованием средств вычислительной аэродинамики. Специальный артиллерийский снаряд является прототипом управляемого артиллерийского снаряда, который позволяет размещать любые по габаритам и массам узлы и системы, входящие в конструкцию управляемого артиллерийского снаряда. Вместе с тем специальный артиллерийский снаряд отличается простотой своей конструкции, компактными размерами и уменьшенной массой. Рассмотрено несколько компоновок специального артиллерийского снаряда, имеющих различия в хвостовой части. Расчеты обтекания выполнены при числах Маха набегающего потока M_∞ = 0,6; 0,8; 0,9 и углах атаки α = 2° и 5°. Проведены проектно-конструкторские и расчетные работы, в результате которых получены трехмерные модели специального артиллерийского снаряда, картины течения и основные аэродинамические характеристики для различных расчетных случаев.

Ключевые слова: специальный артиллерийский снаряд, управляемый артиллерийский снаряд, аэродинамические характеристики, CFD-пакет

Для цитирования: Колкотина М. С., Сошникова Н. В. Численное моделирование аэродинамики артиллерийского снаряда для экспериментальной отработки элементов штатных образцов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 54–61. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-54-61

For citation: Kolkotina M. S., Soshnikova N. V. Numerical simulation of the aerodynamics of a ballistic projectile for experimental development of standard samples // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 54–61. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-54-61

Поступила 12.10.2020 *Отрецензирована* 25.10.2020 *Одобрена* 25.10.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Введение

В настоящее время в АО «ГРЦ Макеева» ведутся работы по созданию отечественного опытного образца управляемого артиллерийского снаряда (УАС) с повышенной точностью стрельбы и дальностью полета изделия.

Рассматриваемый специальный артиллерийский снаряд предназначен для экспериментальной отработки штатных узлов и систем УАС, что позволяет снизить финансовые затраты и сократить цикл разработки опытного образца УАС.

Целями данной работы являются разработка имитационных моделей специальных артиллерийских снарядов, определение аэродинамических характеристик (АДХ) [1] путем проведения расчетов и уточнение аэродинамической формы специального артиллерийского снаряда (САС), в том числе вариантов спасаемого САС.

Поставлены следующие задачи:

- проведение проектно-конструкторских работ;
- проведение численных расчетов САС;
- анализ АДХ САС;
- анализ возможностей снижения финансовых затрат на изготовление и сборку САС;
- уточнение аэродинамической формы САС.

В результате выполненных проектно-конструкторских проработок предлагается

© Колкотина М. С., Сошникова Н. В., 2020

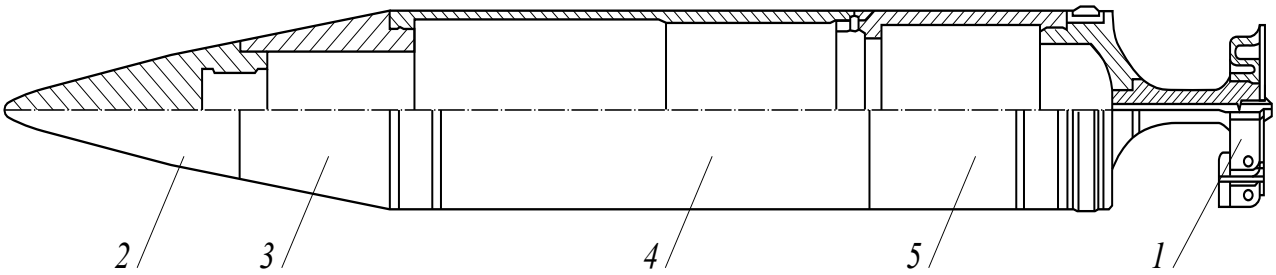


Рис. 1. Специальный артиллерийский снаряд: 1 – хвостовой отсек открытой конструкции – испытываемый узел, 2 – наконечник – штатный, 3 – корпус агрегатного отсека – укороченный вариант, 4 – корпус переднего отсека – доработанный штатный в части стыковки, 5 – корпус заднего отсека – штатный

создать следующий вариант специального артиллерийского снаряда, представленного на рисунке 1.

Ранее для экспериментальной отработки узлов и систем, входящих в состав штатного образца УАС, закупались осветительные снаряды, в составе которых размещались испытуемые сборочные единицы разработки предприятия. Такой способ является достаточно трудоемким и дорогостоящим.

Кроме того, отсек осветительного снаряда, в который можно помещать испытуемую сборочную единицу, имеет небольшие габариты, не позволяющие размещение штатных экспериментальных узлов.

В настоящее время для экспериментальной отработки узлов и систем, входящих в состав УАС, используются полномасштабные макеты УАС разработки АО «ГРЦ Макеева».

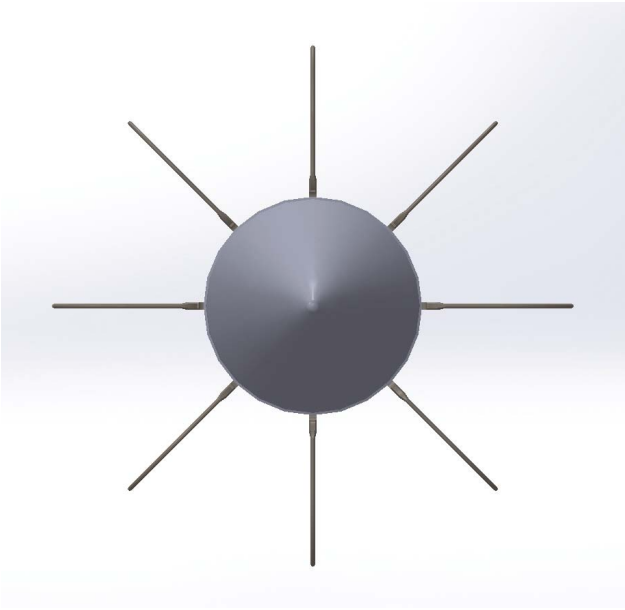


Рис. 2. Специальный артиллерийский снаряд

Предлагается создать собственный специальный артиллерийский снаряд, позволяющий размещать любые по габаритам и массам узлы и системы, входящие в состав УАС, и вместе с тем отличающийся простотой конструкции, компактными размерами и уменьшенной массой, что существенно снизило бы стоимость его изготовления и, соответственно, стоимость проведения испытания с использованием данного снаряда.

Проведенный анализ показывает, что корпус штатного агрегатного отсека можно заменить на корпус укороченного варианта, а корпус передний доработать, наконечник и корпус задний использовать без изменений с заимствованием материальной части с предыдущих испытаний. Испытуемый узел – хвостовой отсек конструкции открытого типа (без поддона) изготовить согласно КД.

Для отработки перспективных узлов и систем УАС, таких как головка самонаведения, бортовая система управления, телеметрия, целесообразной становится разработка модификации САС с системой спасения.

Условия расчетов, картины обтекания, АДХ конфигураций

В обеспечение выбора оптимальной аэродинамической компоновки САС, в том числе спасаемого, и получения аэродинамических характеристик САС разработаны 3D-модели и проведены расчеты обтекания для трех вариантов модельных конфигураций САС, представленных на рисунках 2–4.

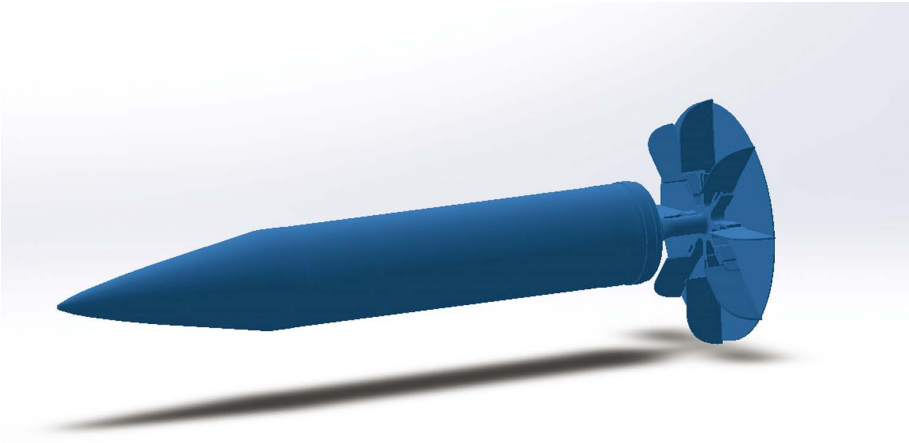


Рис. 3. Специальный артиллерийский снаряд (спасаемый, вариант 1)

Расчеты обтекания выполнены на основе уравнений Навье – Стокса в CFD-пакете. Рассматривалось внешнее обтекание воздухом при дозвуковых скоростях потока. На границах расчетной области задавались параметры набегающего потока: параметр скорости задан в безразмерном виде числом Маха M_∞ = 0,6; 0,8 и 0,9, рассмотрены углы атаки α = 2º и 5º, давление P_∞ = 101325 Па, температура T_∞ = 293,2 К. Условие симметрии применялось по оси OZ – это дало возможность сократить время проведения расчетов. Использовалась периодическая адаптация сетки, общее количество ячеек во всей расчетной области достигло примерно 10 000 000.

На основе проведенных трехмерных численных расчетов получены следующие картины обтекания:

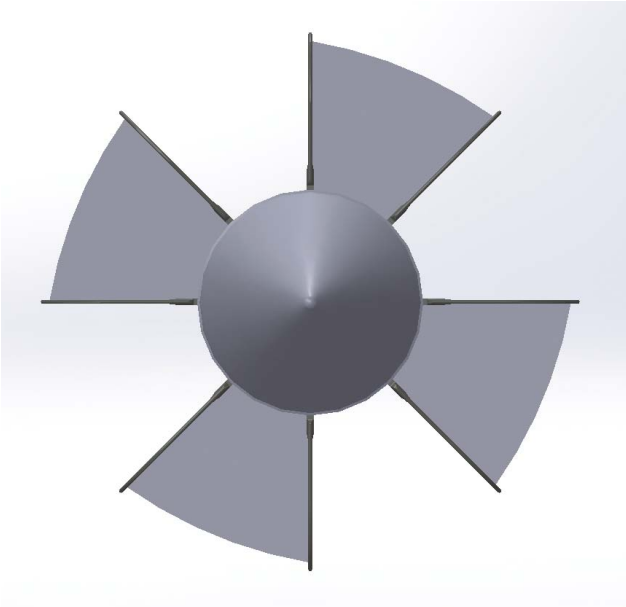


Рис. 4. Специальный артиллерийский снаряд (спасаемый, вариант 2)

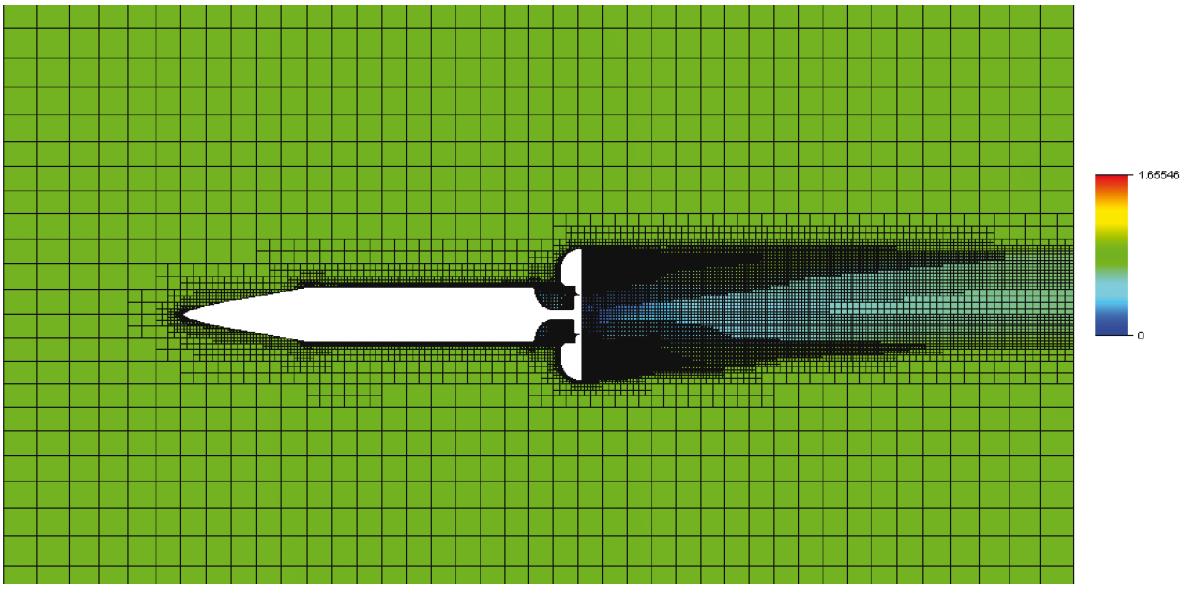


Рис. 5. Поле чисел Маха M_∞ = 0,8 при α = 2º

- для специального артиллерийского снаряда;

- для специального артиллерийского снаряда (спасаемого, вариант 1);

- для специального артиллерийского снаряда (спасаемого, вариант 2).

Из рисунков 7, 10 и 12 видно, как влияют геометрические различия в хвостовой части

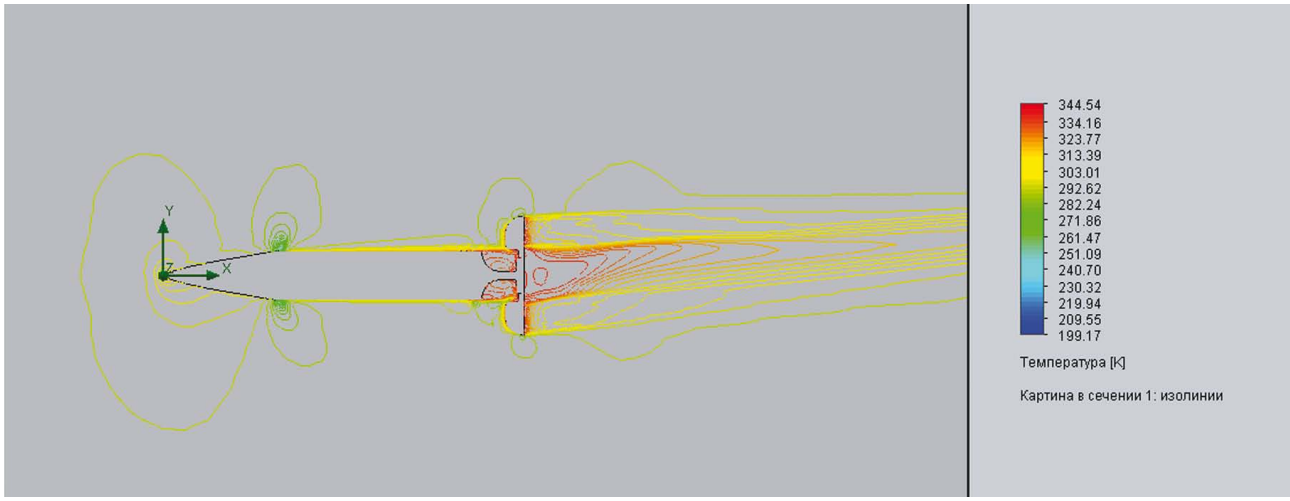


Рис. 6. Поле температуры в виде изолиний при $M_\infty = 0{,}9$, $\alpha = 5^\circ$

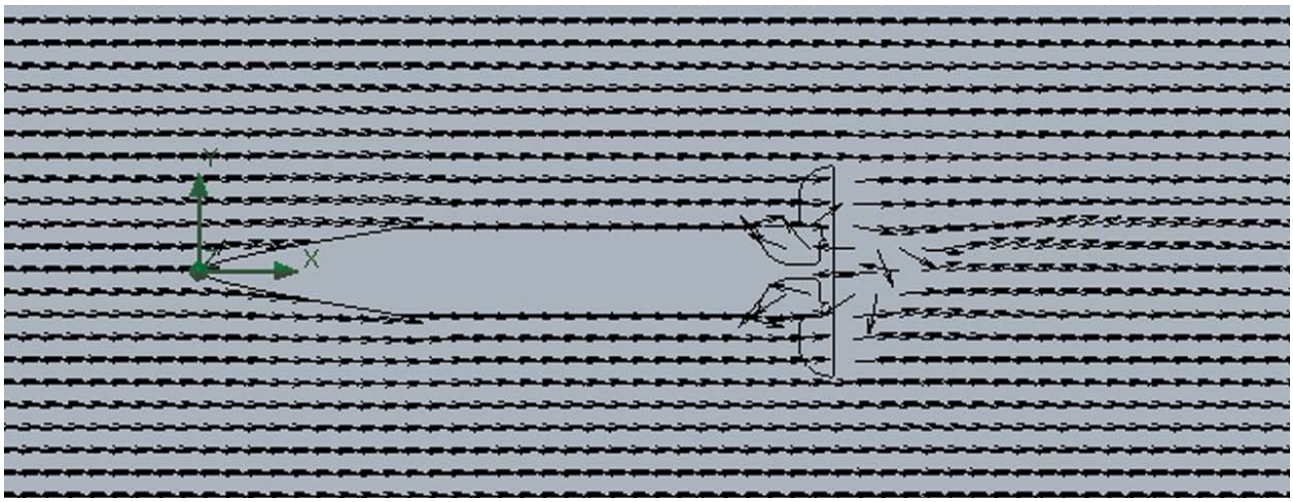


Рис. 7. Поле векторов скорости при $M_\infty = 0{,}9$, $\alpha = 5^\circ$ (min = 0 м/с, max = 534,024 м/с)

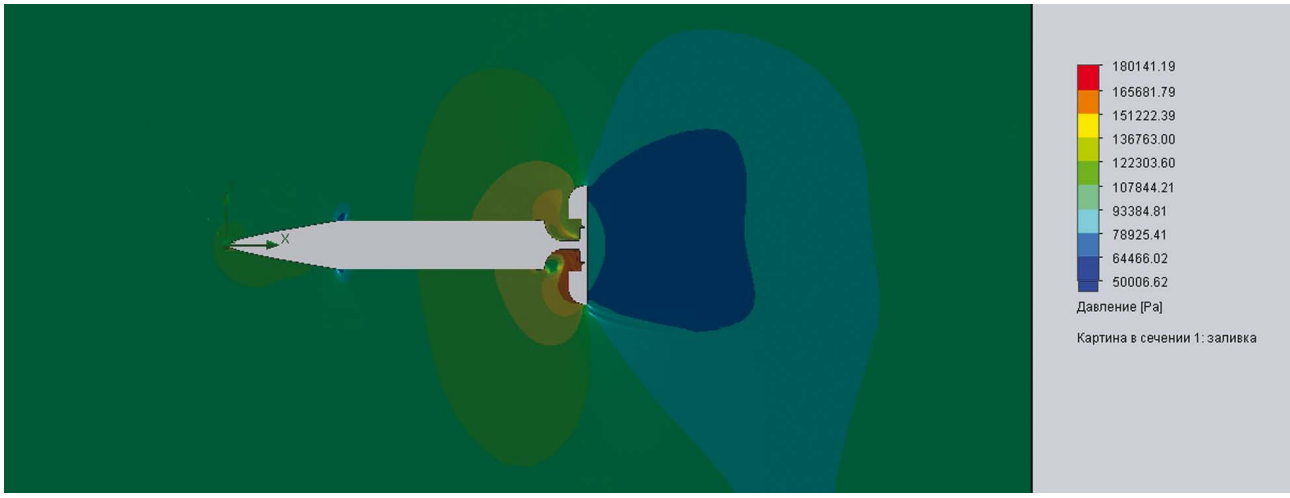


Рис. 8. Поле давления при $M_\infty = 0{,}9$, $\alpha = 5^\circ$

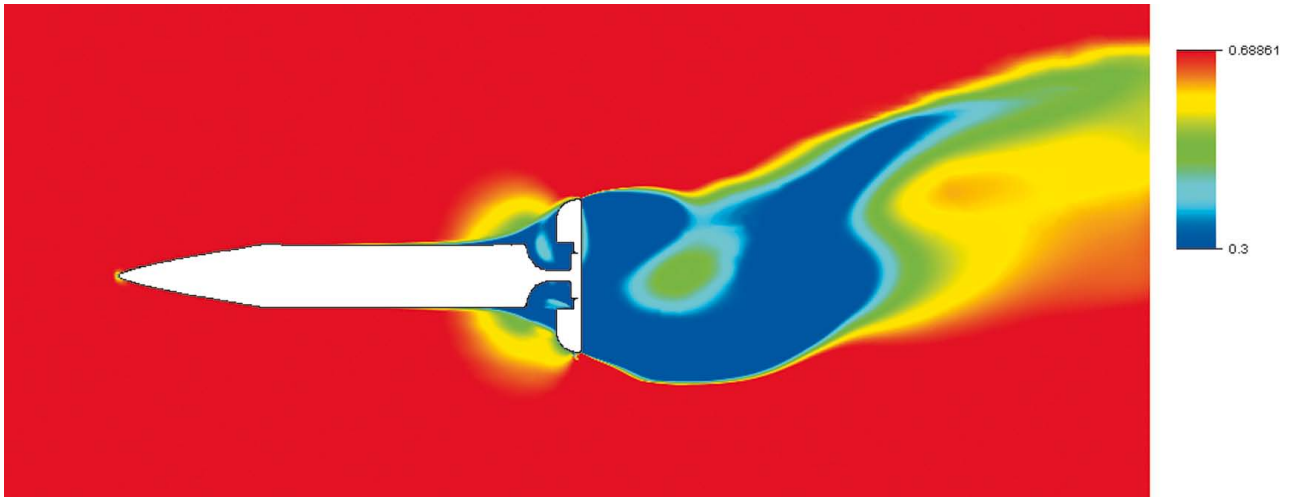


Рис. 9. Поле чисел Маха при $M_\infty = 0{,}8$, $\alpha = 2^\circ$

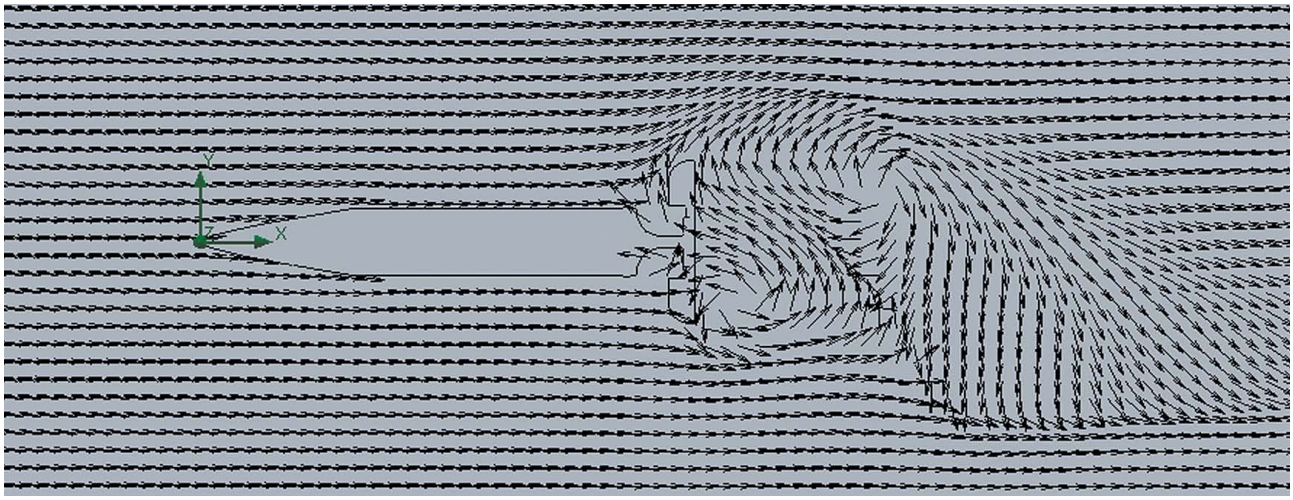


Рис. 10. Поле векторов скорости при $M_\infty = 0{,}6$, $\alpha = 5^\circ$ (min = 0 м/с, max = 283,274 м/с)

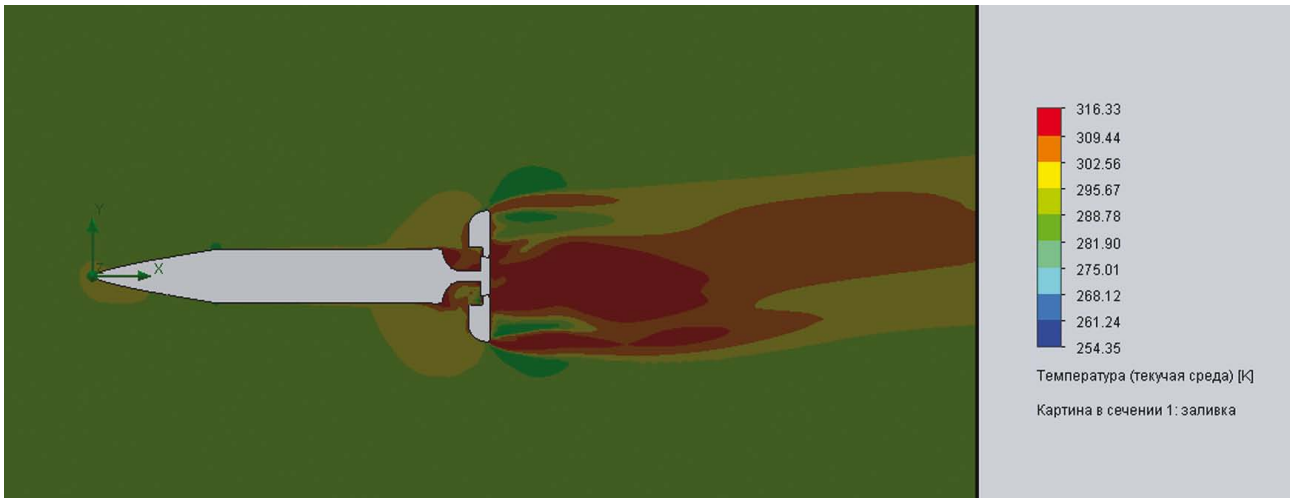


Рис. 11. Поле температуры при $M_\infty = 0{,}6$, $\alpha = 5^\circ$

снаряда на поле векторов скорости. Заметно, что за стабилизаторами образуется вихревое нестационарное течение. Из картин обтекания полей температур наблюдаем, что ее максимальное значение достигается в зоне перед стабилизаторами и за ними.

Ниже в табличном виде приведены аэродинамические характеристик (АДХ)

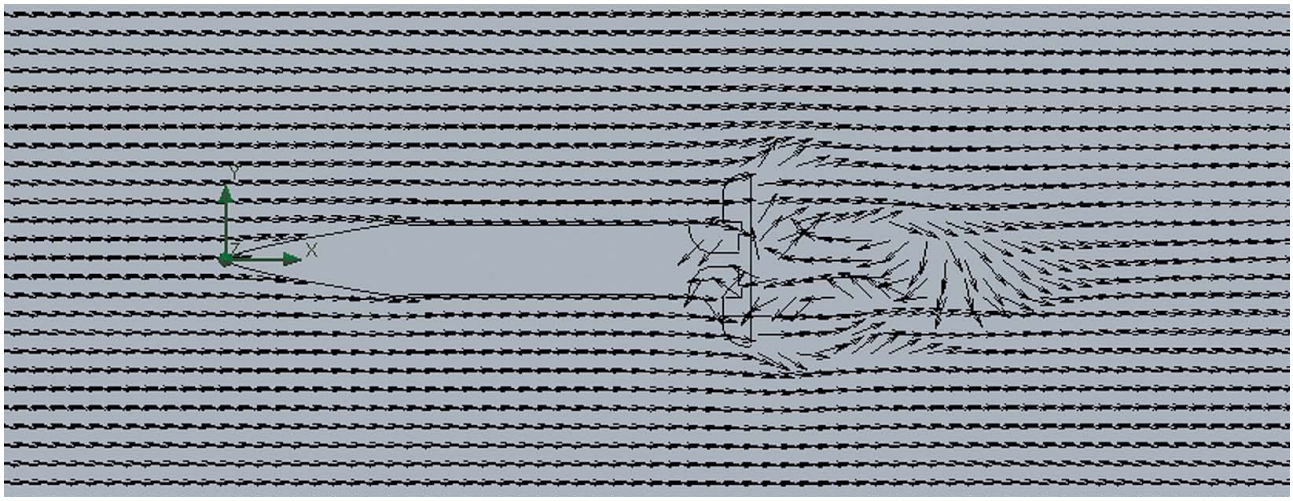


Рис. 12. Поле векторов скорости при $M_\infty = 0{,}6$, $\alpha = 5^\circ$

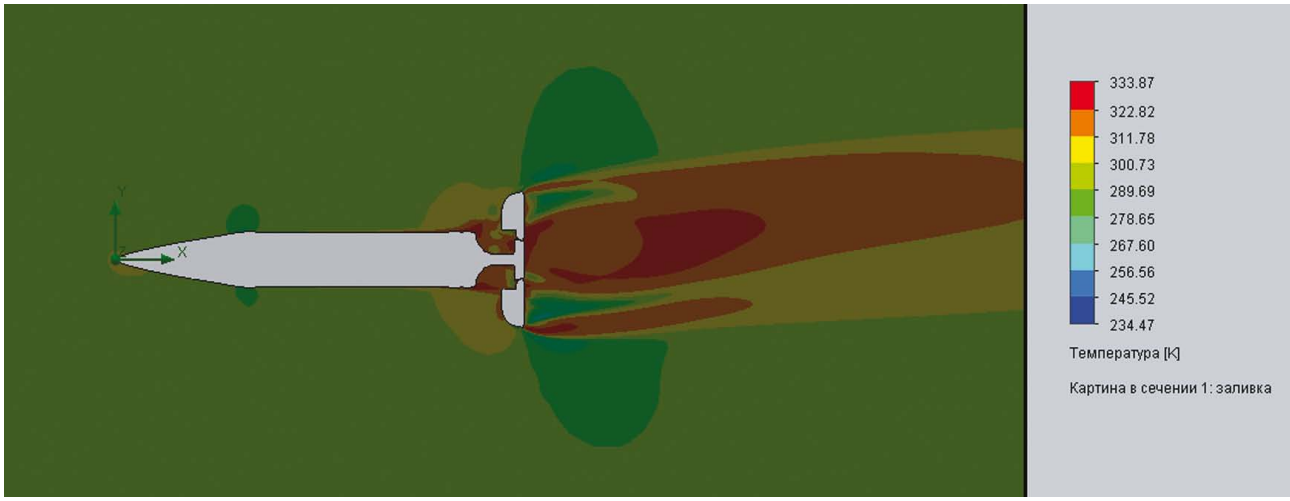


Рис. 13. Поле температуры при $M_\infty = 0{,}8$, $\alpha = 5^\circ$

для различных вариантов геометрии снаряда, где c_x – коэффициент продольной силы, c_y – коэффициент нормальной силы, x_f – коэффициент центра давления, отсчитывается от носка. Для представления суммарных аэродинамических сил использовалась скоростная система координат. При расчете аэродинамических коэффициентов силы нормировалась на скоростной напор набегающего потока и характерную площадь, определяемую по диаметру миделевого сечения конфигурации.

Результаты численных расчетов показывают, что при расположении центра масс специального снаряда на его оси на расстоянии 600 мм от носка все исследуемые конфигурации снарядов статически устойчивы, а требуемое снижение скорости полета снаряда (торможение) может быть обеспечено

Таблица 1

АДХ для специального артиллерийского снаряда

M	α°	c_x	c_y	x_f
0,6	2	0,409	0,222	0,702
0,6	5	0,363	0,541	0,709
0,8	2	0,435	0,235	0,723
0,8	5	0,412	0,560	0,733
0,9	2	0,487	0,243	0,732
0,9	5	0,475	0,631	0,740

Таблица 2

АДХ для специального артиллерийского снаряда, спасаемого, вариант 1

M	α°	c_x	c_y	x_f
0,6	2	6,269	0,031	1,059
0,6	5	6,683	0,640	0,985
0,8	2	6,269	0,261	1,013
0,8	5	7,036	0,697	1,014
0,9	2	5,502	0,331	1,072
0,9	5	6,071	0,742	1,021

Таблица 3

АДХ для специального артиллерийского снаряда, спасаемого, вариант 2

M	α°	c_x	c_y	x_f
0,6	2	3,810	0,133	0,772
0,6	5	3,774	0,538	0,780
0,8	2	3,886	0,200	0,975
0,8	5	3,909	0,532	0,794
0,9	2	4,122	0,258	0,975
0,9	5	4,014	0,613	0,846

за счет увеличения аэродинамического сопротивления при выборе соответствующей хвостовой части.

Выводы

Проведены следующие работы.

1. Разработаны 3D-модели и проект общего вида на специальный артиллерийский снаряд, предназначенный для экспериментальной отработки элементов, узлов и систем, входящих в состав штатного образца УАС.

2. Проведены численные расчеты для выбора оптимальной аэродинамической формы САС в зависимости от применения.

3. В результате проведенных численных расчетов получены картины обтекания, аэродинамические характеристики, необходимые для выбора основных конструктивных параметров вариантов САС, в том числе хвостовой части.

4. Получены АДХ в достаточном объеме для проведения расчетов динамики движения САС.

5. Рассмотрена возможность изготовления и сборки конструкции данного снаряда с доработкой уже изготовленной и ранее испытанной материальной части.

Список литературы

1. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Ч. I. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла. Учебник для втузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1976. 384 с.; ил.

2. Анурьев В.Т. Справочник конструктора-машиностроителя: В 3 т. Т. 1. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.: ил.

Об авторах

Колкотина Мария Сергеевна – инженер 2 категории Акционерного общества «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», Миасс, Челябинская область, Российская Федерация..
Область научных интересов: аэродинамика летательных аппаратов.

Сошникова Надежда Владимировна – инженер-конструктор 3 категории Акционерного общества «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», Миасс, Челябинская область, Российская Федерация.
Область научных интересов: проектирование летательных аппаратов.

Numerical simulation of the aerodynamics of a ballistic projectile for experimental development of standard samples

Kolkotina M. S., Soshnikova N. V.

JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation

This article is aimed at developing a mathematical model and conducting numerical modelling of aerodynamic processes during the flight of a ballistic projectile using the method of computational aerodynamics. The use of a ballistic projectile as a prototype allows various units and systems of any size and mass to be included in the design of a guided artillery projectile. At the same time, the design of the developed ballistic projectile is characterized by simplicity, compact size and reduced weight. Several layouts of the proposed ballistic projectile with different tail sections were developed. The flow calculations were performed under the Mach numbers of M_∞ = 0.6, 0.8, 0.9 and the attack angles of $\alpha = 2^\circ$ and $\alpha = 5^\circ$. Engineering calculations produced three-dimensional models of a ballistic projectile, flow patterns and main aerodynamic characteristics for various design layouts.

Keywords: ballistic projectile, guided artillery projectile, aerodynamic characteristics, CFD package.

Information about the authors

Kolkotina Maria Sergeevna – Engineer of the 2nd category, JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation.
Research interests: aircraft aerodynamics.

Soshnikova Nadezhda Vladimirovna – Design Engineer of the 3rd category, JSC V.P. Makeev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation.
Research interests: aircraft design.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-62-68
УДК 629.7.015.4:533.6.013.43:629.7.03

Опыт применения в аэродинамической трубе динамических успокоителей колебаний моделей летательных аппаратов

А. Н. Корякин

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский Московской области, Российская Федерация

Излагается метод безопасного проведения испытаний моделей летательных аппаратов в аэродинамической трубе с установкой внутри модели нелинейного динамического успокоителя колебаний. Нелинейность успокоителя колебаний определяется использованием упругого элемента в виде пакета тонких плоских пружин. Представлены действующие конструкции нелинейных динамических успокоителей и результаты применения. Показано положительное влияние повышения диссипативных свойств упругого крепления модели в рабочей части аэродинамической трубы на расширение диапазона допустимых углов атаки в эксперименте.

Ключевые слова: аэродинамическая труба, модель летательного аппарата, динамический успокоитель колебаний, динамическая устойчивость, безопасность эксперимента

Для цитирования: Корякин А. Н. Опыт применения в аэродинамической трубе динамических успокоителей колебаний моделей летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 62–68. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-62-68

For citation: Koryakin A. N. Application of a dynamic vibration damper in aircraft models tested in a wind tunnel // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 62–68. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-62-68

Поступила 23.10.2020 *Отрецензирована* 18.11.2020 *Одобрена* 18.11.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Введение

В аэродинамических трубах (АДТ) основной объем испытаний моделей летательных аппаратов (ЛА) проводится с целью определения действующих на них аэродинамических сил и моментов. Обычно модель устанавливается на механизме изменения угла атаки α с использованием хвостовой державки (рис. 1). Между моделью и державкой располагаются тензометрические весы, служащие для измерения нагрузок. При проведении экспериментов с трансзвуковыми скоростями потока серьезной проблемой является внезапное возникновение колебаний модели, величина которых, как правило, стремительно увеличивается. Предотвратить аварию в такой ситуации можно только экстренным прекращением эксперимента.

В ведущей аэродинамической трубе Евросоюза ETW в качестве средств борьбы с данным явлением используются стационарные активные (управляемые средствами автоматики) антивибрационные системы.

В трансзвуковой промышленной трубе Т-128 ЦАГИ с этой целью применяются пассивные динамические успокоители колебаний, размещаемые внутри моделей (рис. 1).

Причины внезапных интенсивных колебаний моделей ЛА и возможности применяемых способов борьбы с ними

На рисунке 1 вектором Y изображена перпендикулярная к потоку воздуха составляющая суммарной силы, действующей на модель ЛА. Данную составляющую можно разбить

© Корякин А. Н., 2020

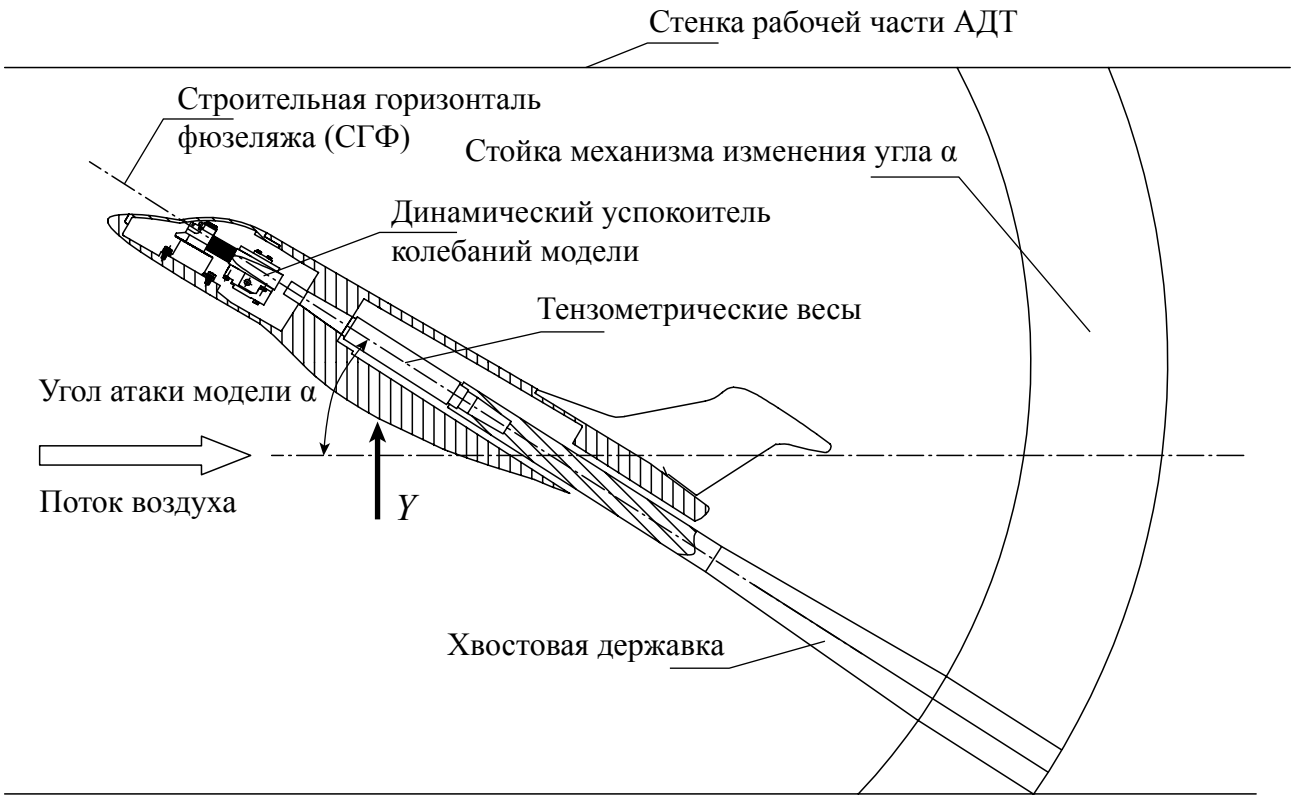


Рис. 1. Установка модели ЛА в рабочей части АДТ

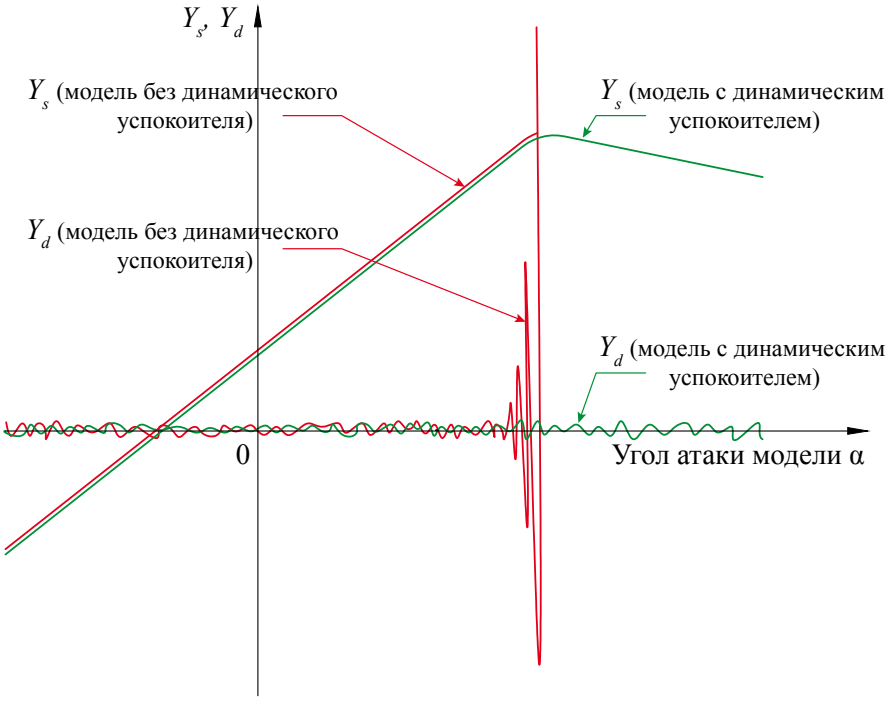


Рис. 2. Иллюстрация влияния динамического успокоителя на колебания модели ЛА в потоке воздуха

на две силы: $Y = Y_s + Y_d$, где Y_s – статическая сила, Y_d – динамическая сила. На рисунке 2 красным цветом изображены зависимости Y_s и Y_d от угла атаки α модели без динамического успокоителя. Зависимости показывают, что с увеличением угла α происходит закономерный рост силы Y_s до значений $Y_s = \max$ и стремительный рост размаха колебаний силы Y_d при близком приближении к значениям $Y_s = \max$. Размахи колебаний силы Y_d

и размахи колебаний модели взаимосвязаны, их неограниченный рост неминуемо заканчивается аварией.

Данное явление вызывается потерей динамической устойчивости системы «модель – хвостовая державка» под воздействием обтекания потоком воздуха при больших углах α. Впервые его объяснил Дж. П. Ден-Гартог, анализируя раскачивание («галопирование» – термин) линий электропередач при ветре [1]. Он показал, что провода раскачиваются, если производная силы Y по углу α отрицательна, и ввел следующий критерий динамической устойчивости:

$$\frac{dY}{d\alpha} < 0 - \text{неустойчивость}, \quad \frac{dY}{d\alpha} > 0 - \text{устойчивость}$$

(предполагается, что внутреннее трение в конструкции отсутствует).

В работе [2] показано, что с увеличением угла α в потоке воздуха потеря динамической устойчивости упругой системы наступает раньше, чем $\frac{dY}{d\alpha}$ достигнет отрицательных значений. При малых, но еще положительных значениях $\frac{dY}{d\alpha}$ начинается интенсивный рост производной подъемной силы по скорости изменения угла атаки (производной $\frac{dY}{d\dot{\alpha}}$), это ускоряет начало динамической неустойчивости системы «модель – хвостовая державка».

Использование динамических успокоителей колебаний в АДТ-128 (рис. 2 – зеленые линии), как правило, позволяет преодолеть рассмотренный недостаток аэродинамических экспериментов с моделями ЛА на хвостовой державке. Конкретные результаты экспериментов далее будут показаны.

Нелинейные динамические успокоители колебаний

Динамический успокоитель колебаний (ДУК) преобразует исходную, практически лишенную внутреннего трения динамическую систему «модель – хвостовая державка» в новую систему с внутренним трением «модель – ДУК – хвостовая державка». ДУК, ранее широко применяемые в АДТ-128 ([2], авторы Гоздек В.С., Корякин А.Н., ЦАГИ), названы линейными, поскольку по характеристикам близки к линейным устройствам. Схема такого устройства изображена на рисунке 3. Обязательными составными частями здесь являются подвижная масса, упругий элемент, демпфер и основание. Действие на модель динамической нагрузки приводит к колебаниям подвижной массы успокоителя в линейном y и угловом φ направлениях, что, в свою очередь, вызывает колебания штока демпфера и поглощение демпфером энергии колебаний модели.

Анализ устойчивости движения динамической системы «модель – ДУК – хвостовая державка» в линейной постановке сводится к определению соответствия ее требованиям критерия Рауса – Гурвица. Расчетным путем установлено, что введение в систему «модель – хвостовая державка» дополнительного внутреннего трения за счет использования ДУК позволяет, при определенных параметрах ДУК, обеспечить достаточный запас динамической устойчивости [2]. Практика подтвердила теоретические прогнозы, и поэтому ДУК прочно закрепились в АДТ-128 в качестве средства борьбы с опасными колебаниями моделей ЛА. Конструкция их постепенно совершенствовалась в направлении повышения эффективности с одновременным уменьшением габаритов.

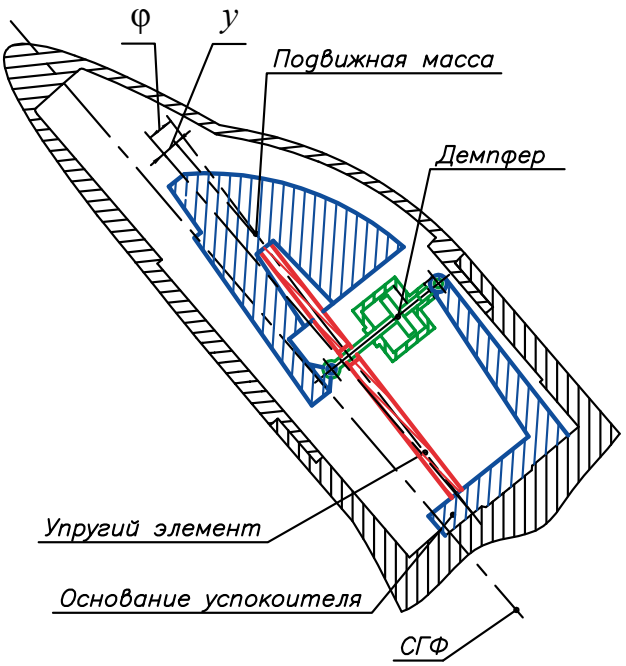


Рис. 3. Линейный ДУК модели ЛА в потоке воздуха

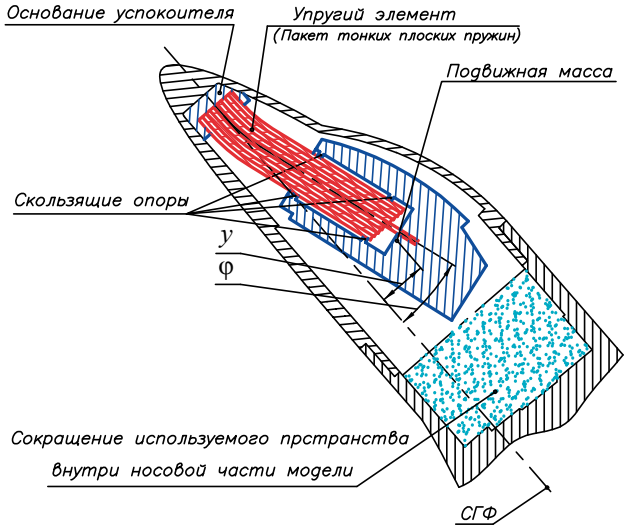


Рис. 4. Нелинейный ДУК модели ЛА в потоке воздуха

В результате произошел переход к использованию ДУК с нелинейными параметрами (нелинейных ДУК, [3]). Схематически это устройство показано на рисунке 4.

В основании нелинейного ДУК консольно зажат упругий элемент, выполненный в виде пакета тонких плоских пружин. Пакет касается скользящих опор внутри подвижной массы поверхностями крайних пружин и соединен с нею за среднюю пружину. При движении подвижной массы происходит изгиб плоских пружин и их относительное смещение с трением друг о друга и о подвижную массу. Работа сил трения, происходящая в процессе смещения пружин пакета, приводит к преобразованию энергии колебаний модели в тепловую энергию, которая рассеивается в окружающем пространстве. Преимуществом используемого здесь упругого элемента является компактность с одновременной реализацией высоких показателей гибкости, прочности и диссипативных свойств. Для проектирования нелинейных успокоителей разработаны инженерная методика и программы расчета. Инженерная методика расчета изложена в работе [4]. Нелинейные ДУК обеспечили возможность надежного получения стационарных аэродинамических характеристик моделей ЛА в АДТ-128 при больших углах атаки и скольжения и являются в настоящее время основой безопасности такого эксперимента. На рисунке 5 изображен чертеж успешно функционирующего на протяжении более чем десятка лет варианта конструкции такого успокоителя для модели истребителя.

Графики на рисунке 6 демонстрируют диссипативные свойства системы «модель – ДУК – хвостовая державка» с названным устройством. Представлены результаты воздействия на модель скачка в изменении

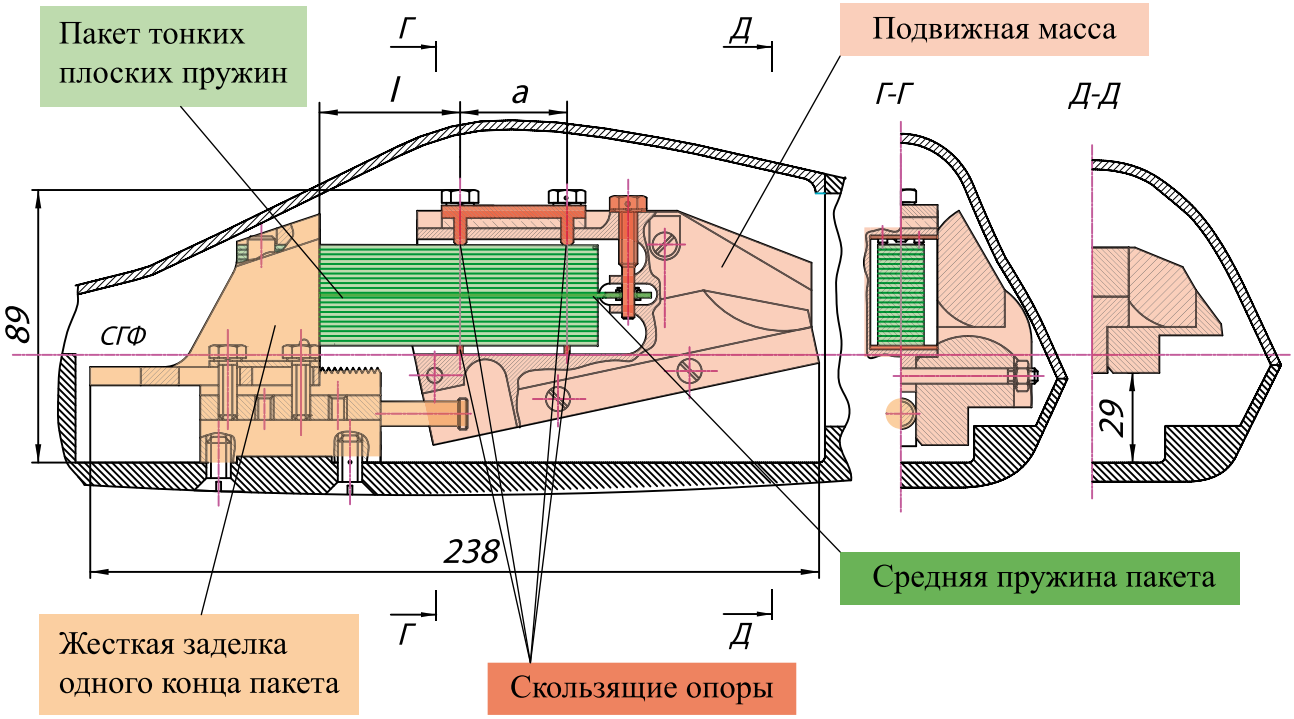


Рис. 5. Установка нелинейного ДУК в носовой части модели истребителя

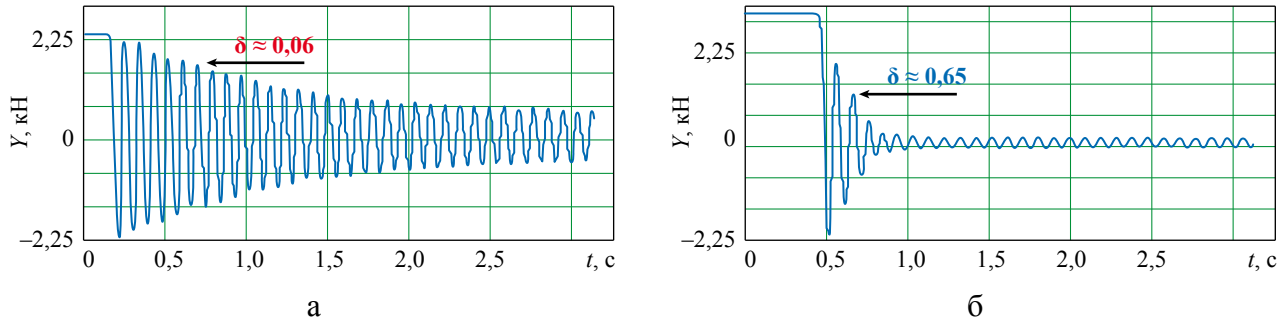


Рис. 6. Изменение динамической нагрузки на модель истребителя при свободных колебаниях на хвостовой державке без потока воздуха: а) без ДУК, б) с нелинейным ДУК

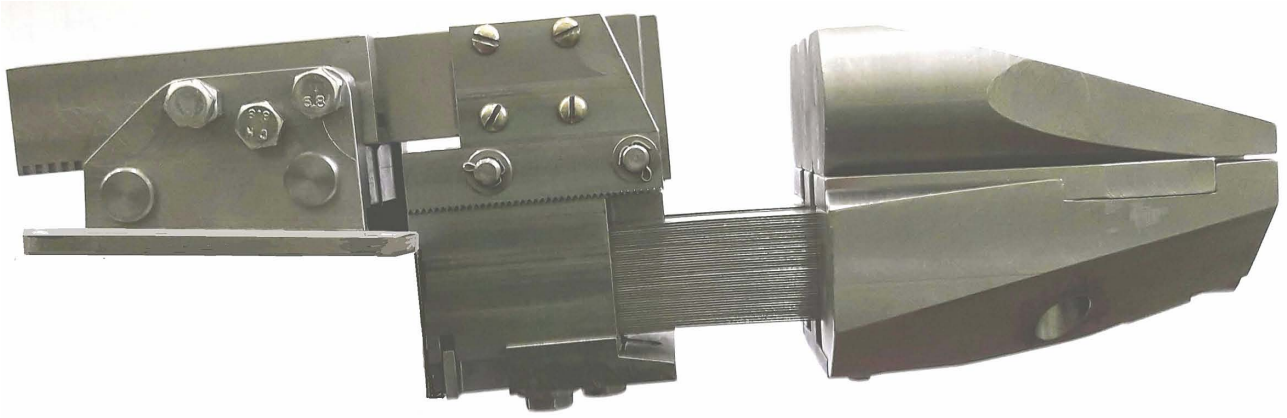


Рис. 7. Фото отдельного варианта ДУК, действующего в двух плоскостях движения

вертикально действующей силы Y без ДУК (рис. 6а) и с ДУК внутри модели (рис.6б).

Скачок создавался путем изгиба системы домкратом с точкой приложения усилия примерно в центре масс модели. Домкрат заканчивался принудительно «ломающимся» наконечником. Производилась регистрация изменений компонента Y тензометрических весов штатной измерительной аппаратурой АДТ-128 после «перелома» наконечника домкрата и возникновения колебаний модели. Результаты измерений показали, что установка ДУК обеспечила примерно десятикратное увеличение логарифмического декремента колебаний δ.

Разработаны конструкции ДУК, которые могут предотвращать опасные колебания как в вертикальной, так и горизонтальной плоскости движения. С этой целью его упругое звено выполняется из двух пакетов тонких плоских пружин с ортогонально ориентированными поверхностями (рис. 7).

Подвижные массы ДУК обычно выполняются из тяжелого сплава на основе вольфрама, но, при наличии возможностей, могут быть и свинцовыми.

Все представленные ДУК сконструированы, подготовлены к экспериментам в АДТ-128 и настраивались в процессе испытаний автором данной работы.

Графики на рисунке 8 отражают возможности ДУК по обеспечению безопасного определения характеристик моделей ЛА в АДТ-128 согласно всем требованиям рабочей программы эксперимента и в необходимом диапазоне измеряемых параметров, включающем величины производных $C_y^\alpha \leq 0$.

Успешная эксплуатация ДУК в АДТ-128 подтвердила положения работы [2] о пользе обоснованного использования внутреннего трения в узлах подвески аэродинамической модели с целью обеспечения ее динамической устойчивости в потоке воздуха. В работе было предложено крепить хвостовую державку к стойке механизма α не жестко, а на двух шарнирах. Причем ближний к модели шарнир установлен на стойке неподвижно, а крайний закреплен на упругом звене с демпфером. На рисунке 9 изображен вариант такого решения. Поворот модели по углу α сопровождается неминуемым поворотом

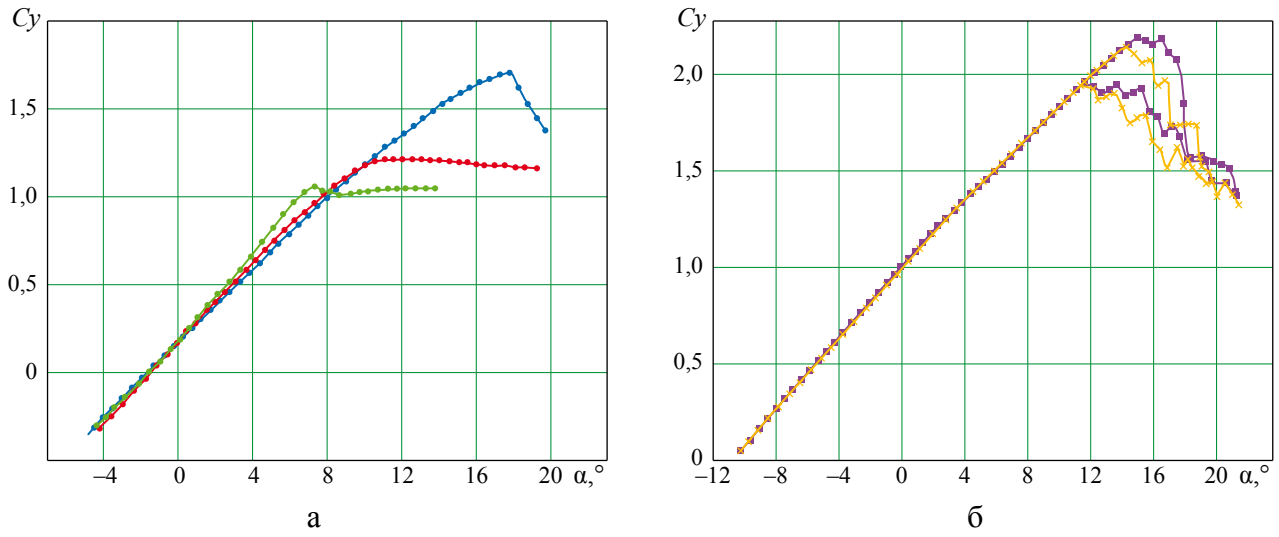


Рис. 8. Экспериментальные возможности АДТ-128 с динамическими успокоителями колебаний моделей: а) эксперименты при различных числах М, б) эксперименты по исследованию аэродинамического гистерезиса
– М = 0,25, – М = 0,50, – М = 0,75, М = 0,199, М = 0,249

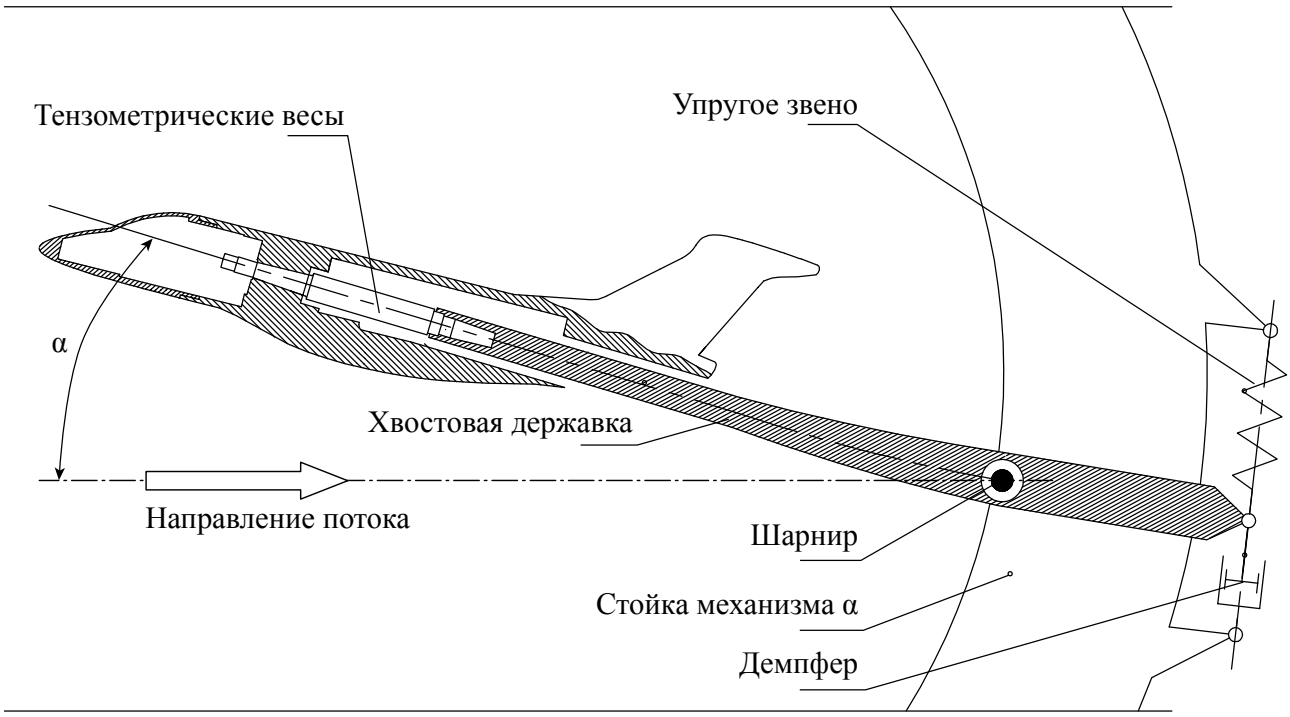


Рис. 9. Крепление хвостовой державки к стойке механизма α при помощи упругого звена и демпфера

хвостовой державки на ближнем к модели шарнире с линейной деформацией упругого звена и смещением штока демпфера на ее конце. В результате энергия колебаний модели, как и в динамическом успокоителе, преобразуется в демпфере в тепловую энергию и рассеивается в окружающем пространстве. Расчеты показали [2], что некоторое уменьшение низшей частоты колебаний модели при этом соизмеримо с привычным уменьшением ее в реальном эксперименте за счет установки динамического успокоителя.

Заключение

Многолетний опыт стабильной и успешной эксплуатации динамических успокоителей колебаний моделей летательных аппаратов в аэродинамической трубе Т-128 показал, что повышение диссипативных характеристик динамической системы из державки и модели оказалось

правильным решением. В перспективе существует возможность исключить обязательное использование динамических успокоителей, придав стационарной подвеске моделей необходимые диссипативные свойства.

Список литературы

1. Ден.-Гартог Дж. П. Механические колебания. М.: Физматгиз, 1960. 580 с.

2. Корякин А. Н. Исследование динамики моделей на тензометрических весах в аэродинамической трубе // Тр. ЦАГИ. 1993. Вып. 2513. 42 с.

3. Патент РФ 2375691 М. Кл.[3] G01M 9/04 Динамический успокоитель колебаний аэродинамической модели / Быковский А. В., Корякин А. Н., Стрелков К. С.; заявл. 06.06.2008, опубл.10.12.2009 Бюл. № 34.

4. Корякин А. Н. Нелинейный динамический успокоитель колебаний модели с упругим звеном из пакета тонких плоских пружин // Тр. ЦАГИ. 2009. Вып. 2683. С. 232–237.

Об авторе

Корякин Александр Николаевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: летательные аппараты, прочность и аэроупругость, теория колебаний.

Application of a dynamic vibration damper in aircraft models tested in a wind tunnel

Koryakin A. N.

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation

This paper presents a method for safe testing of aircraft models equipped with a nonlinear dynamic vibration damper in a wind tunnel. The nonlinearity of the tested vibration damper is provided by an elastic element consisting in a package of thin flat springs. Nonlinear dynamic dampers of various designs are presented, along with the results of their application. It is experimentally shown that improved dissipative properties of the proposed elastic fastening of the model under test to the wind tunnel surface have a positive effect on the expansion of the range of admissible attack angles.

Keywords: wind tunnel, aircraft model, dynamic vibration damper, dynamic stability, experiment safety

Information about the author

Koryakin Alexander N. – Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.

Research interests: aircraft, strength, aeroelasticity, vibration theory.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-69-76
УДК 536.46

Воспламенение тринитрорезорцината свинца от нити накаливания в пироузле

А. М. Липанов[1], В. Д. Головатенко[2]

[1] *Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», Москва, Российская Федерация*

[2] *Акционерное общество «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация, Екатеринбург, Российская Федерация*

Показано, что температура воспламенения тринитрорезорцината свинца описывается трансцендентным уравнением, включающим инерционность инициирующего состава и глубину его прогрева. Произведен расчет температуры нити накаливания в момент воспламенения инициирующего вещества. Найдено, что при значениях тока накаливания на нагревательном элементе, близких к 5 А, горение тринитрорезорцината свинца переходит во взрыв (детонацию), а при токе на нити накаливания 2 А скорость его горения находится в пределе от 215 до 750 м/с.

Ключевые слова: пироузел, температура воспламенения, тринитрорезорцинат свинца.

Для цитирования: Липанов А. М., Головатенко В. Д. Воспламенение тринитрорезорцината свинца от нити накаливания в пироузле // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 69–76. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-69-76

For citation: Lipanov A. M., Golovatenko V. D. Ignition of lead styphnate by a filament in an explosive attachment // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 69–76. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-69-76

Поступила 29.10.2020 *Отрецензирована* 13.11.2020 *Одобрена* 02.12.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Известно из термодинамики, что температура воспламенения есть интенсивная (качественная) характеристика и вместе с энтропией определяет энергию, которую необходимо подвести к горючему, чтобы началось его горение. Поскольку в каждом конкретном случае скорость подвода энергии от источника нагрева и условия, в которых находится исследуемое вещество, различны, то полученные экспериментальные результаты для описания случаев воспламенения в других устройствах и условиях нагрева не могут быть однозначно использованы. Так, в работах [1–5] приводится значение температуры воспламенения тринитрорезорцината свинца (ТНРС) в пределах от 265 до 280 °С, а температура вспышки этого вещества, согласно Краткой химической энциклопедии [6], определена величиной в 240 °С. Так как определить температуру воспламенения ТНРС непосредственно в пироузле путем накаливания нити электрическим током не представляется возможным, то необходимо ее аналитически определить, используя теплофизические свойства инициирующего вещества и величину приложенного электрического напряжения на нити накаливания в конкретной конструкции пироузла.

Используемое в опытах пиротехническое устройство (узел) включало два нагревательных элемента (НЭ), изготовленных из константановой проволоки диаметром 40 мкм и длиной 3,3 мм (указана длина контакта проволоки с ТНРС между электрическими штырями в пироузле), припаянной к электрическим

© Липанов А. М., Головатенко В. Д., 2020

контактам, заключенными в электроизолятор, на которые под давлением 30 МПа был напрессован порошок ТНРС, а поверх него напрессовывалась пиротехническая смесь, изолированная от внешней среды металлической мембраной. Собранная схема помещена в стальную цилиндрическую оболочку, имеющую с одной стороны вывод к электрическим контактам, а с другой – проход для истечения продуктов горения.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема установки, состоящая из следующих блоков:

- источник питания Б5.30/10; контактор ТКД 503;
- измерительно-вычислительный комплекс «МАК 520» и преобразователь аналого-цифровой N1 9215 четырехканальный.

Аппаратура обеспечивает стабильное протекание электрического тока по НЭ до момента воспламенения ТНРС величиной 2 и 5 А.

В схеме использованы резисторы марки МЛТ-0,5: R1 – 100 кОм, R2 и R5 – 10 кОм, R3 – 15 кОм, R4 – 1,5 кОм и R6 – 1,0 кОм. С помощью переменного резистора R1, выполненного из проволоки диаметром 1 мм и изготовленного из сплава нихром с бифилярной обмоткой, калибровался источник питания на соответствующий ток при напряжении питания 27 В для каждого пиротехнического узла вследствие того, что НЭ в изготовленных узлах имели разброс величин омического сопротивления в пределах от 0,8 до 1,1 Ом. Измерение сопротивления НЭ выполнено мостом переносным постоянного тока Р3043 Т2 ТО 3.454.020, имевшим класс точности 5. Собранная схема обеспечивала опрос параметров с частотой 50 кГц.

Метод определения температуры воспламенения спрессованного порошка ТНРС в пиротехническом узле основан на определении промежутка времени между началом протекания электрического тока по рабочему нагревательному элементу и моментом разрушения телеметрического мостика накаливания, расположенного параллельно рабочему на фиксированном расстоянии при воздействии на него продуктов горения (детонации) инициируемого вещества, тем самым позволившим определить количество энергии, затраченной на воспламенение ТНРС в пиропатроне. На основании имеющихся технических данных по пиротехническому узлу плотность уплотненного ТНРС (плотность заряжания) составляла 2,9 г/см^3. Из литературных данных [7] при плотности

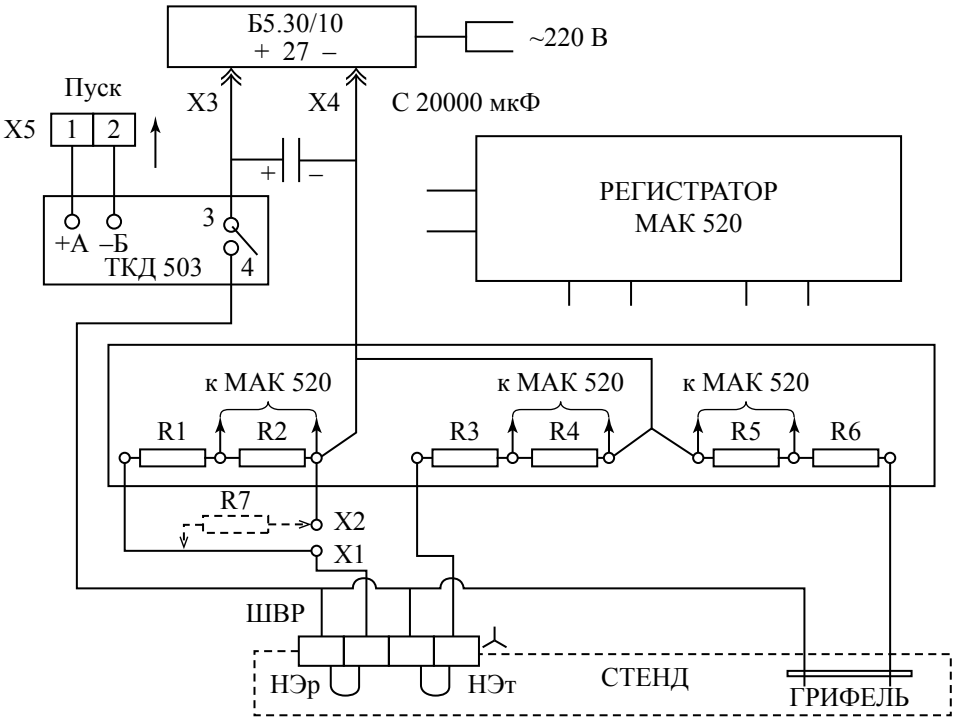


Рис. 1. Схема установки для определения времени разрыва НЭ в пироустройстве под действием продуктов взрыва ТНРС

заряжания Δ = 1 скорость детонации составляет 1603 м/с, а при плотности заряжания Δ = 2,9 она достигает величины 5200 м/с (данные [1]). Кристаллическая плотность ТНРС равна 3,1 г/см^3, а скорость детонации при этом равна около 5500 м/с. Последняя величина определена из принятия положения, что скорость детонации ТНРС так же, как и скорости детонаций взрывчатых веществ, исследованных авторами [2], линейно зависит от плотности заряжания в испытываемом узле. Для определения начала перемещения продуктов детонации из полости пиротехнического узла, которое принималось и за начало воспламенения нанесенного поверх ТНРС пиротехнического состава, крепился стержень, упирающийся одним концом в защитную мембрану пирозапала (пироузла), а другим концом касался графитового стержня (рис. 2). Момент разрушения графитового стержня свидетельствует о начале перемещения продуктов горения веществ, заключенных в экспериментальный узел. Принято, что грифели, извлеченные из чертежных карандашей диаметром 2 мм, имеют высокую степень хрупкости и, что проверялось экспериментально, с достаточно малым электрическим сопротивлением.

Теоретически для определения температуры воспламенения вещества, запишем уравнение изменения температуры в зависимости от теплового потока, создаваемого нагревательным элементом при протекании по нему электрического тока, в виде:

Рис. 2. Внешний вид пироузла (к графитовому стержню прикреплены токосъемники)

$$\frac{h\ell}{4a}\frac{d(T-T_0)}{dt}+(T-T_0)=\frac{Ꝑth}{\lambda F}, \qquad (1)$$

где:

h – глубина прогрева ТНРС перед воспламенением, которая зависит от плотности упаковки порошка инициирующего вещества и его фракции;

ℓ – длина проволоки нагревательного элемента;

α – температуропроводность;

λ – коэффициент теплопроводности ТНРС;

F – поверхность контакта между нитью накаливания и ТНРС, через которую осуществляется теплопередача;

T – температура участка соприкосновения ТНРС с нагревательным элементом, по которому протекает электрический ток;

T_0 – начальная температура испытываемого пироузла;

t – текущее время;

$Ꝑ = rI^2$ – мощность электрической цепи;

I – величина электрического тока, протекающего по нити накаливания;

r – сопротивление нити накаливания электрического мостика.

Принимается, что тепловой поток от нити накаливания образуется мгновенно и в течение всего процесса является величиной постоянной. Последнее соответствует экспериментальным и расчетным данным К. Дрекопфа (см. [8]). Так, время нарастания тока до величины 2 А (см. ниже на рис. 3) произошло за 0,02 мсек, а промежуток времени нарастания тока до 5 А составлял 0,1 мсек.

Введем обозначения:

$$\frac{h\ell}{4\alpha}=\tau;\ T-T_0=y;\ \frac{Ꝑth}{\lambda F}=\beta. \qquad (2)$$

Тогда уравнение (1) примет вид:

$$\frac{\tau dy}{dt}+y=\beta. \qquad (3)$$

Ищем решение однородной части уравнения (3)

$$\tau\frac{dy}{dt}+y=0, \qquad (4)$$

решение которого после его интегрирования будет иметь вид:

$$\ln y=-\frac{1}{\tau}t+\ln C, \qquad (5)$$

где C – постоянная интегрирования,

или $$y = Ce^{-\frac{1}{\tau}\cdot t}. \qquad (6)$$

Подставим решение уравнения (6) в дифференциальное уравнение (3) и, полагая постоянную C зависящей от t, получим

$$\tau\left[\frac{dC}{dt}e^{-\frac{1}{\tau}t} - \frac{C}{\tau}e^{-\frac{1}{\tau}t}\right] + Ce^{-\frac{1}{\tau}t} = \beta,$$

или $$\tau\frac{dC}{dt}e^{-\frac{1}{\tau}t} - Ce^{-\frac{1}{\tau}t} + Ce^{-\frac{1}{\tau}t} = \beta.$$

Преобразуя последнее соотношение, получим

$$\tau\frac{dC}{dt}e^{-\frac{1}{\tau}t} = \beta,$$

и далее $$\frac{dC}{dt}e^{-\frac{1}{\tau}t} = \frac{\beta}{\tau}.$$

Интегрируя последнее уравнение относительно постоянной C:

$$dC = \frac{\beta}{\tau}e^{\frac{1}{\tau}t}dt\,,\ \int dC = \int \frac{\beta}{\tau}e^{\frac{t}{\tau}}dt,$$

получим

$$C = \frac{\beta}{\tau}\tau e^{\frac{1}{\tau}t} + K = \beta e^{\frac{1}{\tau}t} + K, \qquad (7)$$

где K – новая постоянная интегрирования.

Подставляя уравнение (7) в уравнение (6), имеем

$$y = \left(\beta e^{\frac{1}{\tau}t} + K\right)e^{-\frac{1}{\tau}t} = \beta + Ke^{-\frac{1}{\tau}t},$$

или $$y = \beta + Ke^{-\frac{1}{\tau}t}.$$

Переходя от условных переменных (2) к действительным, получим:

$$T = T_0\frac{Pth}{\lambda F} + Ke^{-\frac{1}{\tau}t}.$$

Положив $K = -\frac{Pth}{\lambda F}$, находим частное решение:

$$T = T_0 + \frac{Pth}{\lambda F}\left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}t}\right), \qquad (8)$$

где $\tau = \frac{h\ell}{4a}$ – комплекс, определяющий инерционность системы (или постоянная времени процесса исследуемого устройства, см. [9]).

Решение сформулированной проблемы представлено в виде трансцендентного уравнения. Последнее включает две неизвестные физически зависимые переменные, а именно температуру воспламенения ТНРС и глубину его прогрева h, которые определяются скоростью теплообмена между нитью накаливания и инициирующим веществом. Динамика прогрева нити накаливания, в свою очередь, зависит от величины протекающего по ней электрического тока. Неопределенность решения может быть устранена путем привлечения экспериментальных данных. Так, приняв данные [8] о мгновенном воспламенении ТНРС при температуре 623 К, определим глубину прогрева h инициирующего вещества с учетом экспериментальных данных, полученных при токе 2 А (рис. 3) и токе 5 А (рис. 4). Примем также, что при малых временах протекания тока по нити накаливания, как это экспериментально показал К. Дрекопф (см. [8]), тепловыми потерями в присоединительные штыри к нити накаливания можно пренебречь, а сама нить накаливания практически по всей длине имеет одну и ту же температуру при протекании по ней вышеуказанных величин электрического тока. При этом принимается, что воспламенение ТНРС может начаться с любого его зерна, находящегося в контакте с нагревательным элементом. По уравнению (8), решенному относительно h, и опытным данным (см. рис. 3 и 4) определялась глубина прогрева ТНРС при принятии температуры воспламенения этого вещества равной 623 К [10].

На рисунках 3 и 4 приведены характерные – при токе 2 и 5 А (сверху вниз) копии осциллограмм. Все испытания проведены при значении температуры окружающей среды 22 °С.

При расчетах использовались физические характеристики ТНРС, определенные для серийно изготовляемых стандартных устройств, значения которых: λ = 0,165 Ват/мсекºС и с = 750 Дж/кгºС.

Очевидно, что значения температуры воспламенения ТНРС и величины температуры, на которую успеет прогреться нить накаливания при протекании по ней электрического тока за одно и то же время, различны. Это впервые теоретически и экспериментально было определено К. Дрекопфом (см. [8]). Зная количество теплоты, выделившегося в нити накаливания при протекании по ней электрического тока, определяемое по закону Джоуля – Ленца,

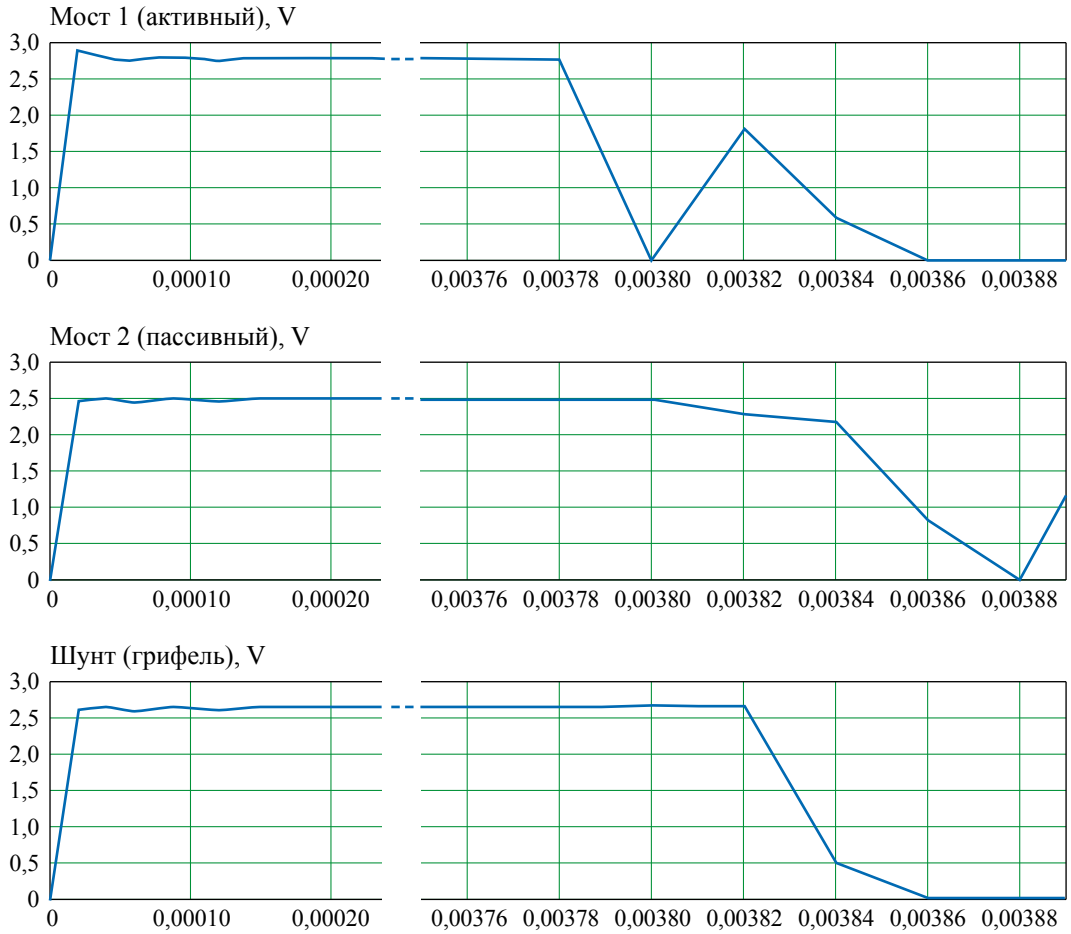


Рис. 3. Испытание при протекании по нити накаливания тока 2 А

и физические характеристики нити накаливания (ее массу, теплоемкость металла), определяли температуру, на которую нить накаливания будет нагрета перед воспламенением ТНРС. Естественно, что значение этой температуры будет зависеть от величины тока, протекшего через нить накаливания, и характеристик последней в одной и той же конструкции пиротехнического узла. Так, для случая протекания тока по нити накаливания в 2 А в исследуемом узле нить накаливания нагрета перед воспламенением ТНРС до 890 °С, а при токе в 5 А температура нагрева нити накаливания в момент воспламенения ТНРС находится в пределах 1100…1200 °С (температура плавления константана, как известно, равна 1290 °С). Такая неопределенность связана с тем, что в продукте разложения ТНРС присутствует Pb, а пиротехнический состав в качестве горючего включал алюминий, и после распада окислителя – перхлората калия в числе проводников электричества появилась жидкая фаза KCl. При этом скорость горения ТНРС при токе 2 А, при расстоянии между активным мостом (нитью накаливания) и пассивным мостом в 4,3 мм, оценена в 215 м/с, а в ряде случаев она ускорялась и достигала величины в 750 м/с. Такое изменение скорости для первичных и вторичных взрывчатых веществ – ускоряющееся горение отмечают авторы [11] и для вторичных взрывчатых веществ. При токе в 5 А можно положить, что происходит взрыв (детонация) ТНРС, так как временная разница между началом горения ТНРС около нити накаливания и моментом разрушения пассивной нити, измеренная на разработанной установке (см. рис. 1), не была выявлена.

Скорость расширения продуктов горения из полости узла определена для случая, представленного на рисунке 3, в 132,5 м/с, а для опыта (см. рис. 4) эта скорость определена в 345 м/с.

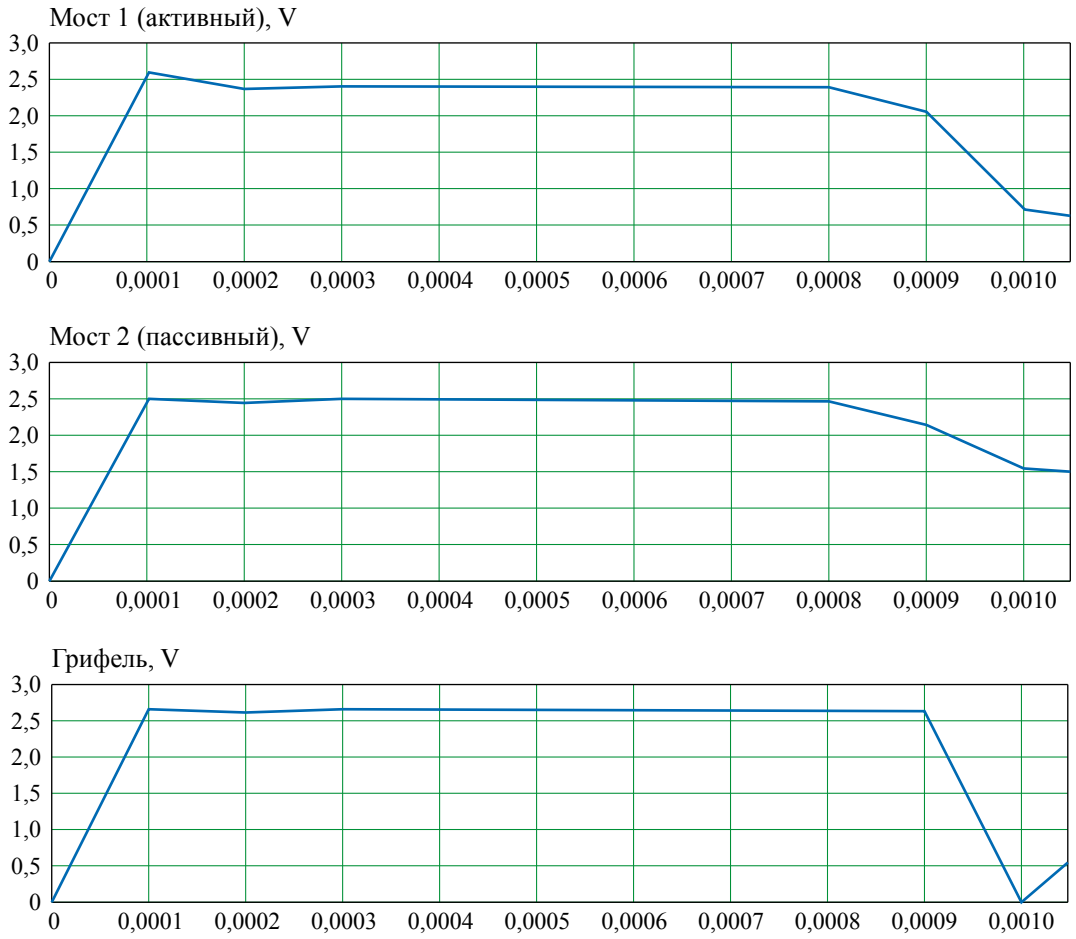


Рис. 4. Испытание при протекании по нити накаливания тока 5 А

Расчет толщины прогретого слоя ТНРС перед его воспламенением по уравнению (7) при температуре воспламенения ТНРС, равной 623 К [10], дает для тока, поданного на мостик накаливания 2 А, в первом приближении величину ≈ 0,1 мкм. Это значение можно сравнить с данными, приведенными в [11] для вторичных взрывчатых веществ Тэна, Гексогена и Тетрила, для которых критический радиус разогрева для случая возбуждения взрыва ударом, с которого начинается горение, имеет величину от 1 до 10 мкм. Таким образом, значение глубины прогрева взрывчатых веществ перед их взрывом (детонацией) определяет и качественное различие между инициирующими и вторичными ВВ. Следует отметить, что, согласно [11], мгновенная температура воспламенения взрывчатого вещества значительно выше, чем при тепловом воздействии (см. [6]), и может быть больше в 1,5–2 раза, исходя из данных, полученных при возбуждении взрыва ударом взрывчатых веществ.

Найдено, что температура воспламенения инициирующего вещества и глубина прогрева последнего перед воспламенением функционально связаны и описываются трансцендентным уравнением, как показано выше, и, в свою очередь, эта зависимость (по значениям параметров) определяется конкретной конструкцией пироузла. Таким образом, приведенные расчетные величины параметров исследованной конструкции пиротехнического узла показывают порядок неизвестных величин, которые будут наблюдаться при определении искомого параметра и в других конструкциях.

Заключение

1. Температура воспламенения ТНРС в пироузле как интенсивная составляющая термодинамического уравнения энергии

Дж.В. Гиббса совместно с экстенсивной величиной – глубиной прогрева взрывчатого вещества представлена трансцендентным уравнением.

2. По экспериментальным данным и трансцендентному уравнению определена толщина прогрева спрессованного порошка ТНРС в пироузле, которая составляет около 0,1 мкм при нагреве током 2 А нити накаливания.

3. Скорость горения ТНРС в исследуемом пироузле при токе нагрева 2 А нити накаливания в нагревательном элементе находилась в пределах от 215 до 750 м/с, первое значение соответствует стабильному горению, а бóльшая величина – ускоренному.

4. При токе нагрева нити накаливания в 5 А горение воспламенившегося ТНРС переходит в детонацию, и, предположительно, одновременно происходит взрыв нагревательного элемента пироузла.

5. Скорость истечения продуктов горения пиротехнической навески из использованного в экспериментах пироузла определена в зависимости от величины поданного электрического тока на нить накаливания в пределах от 132,5 до 345 м/с.

Список литературы

1. Штетбахер А. Пороха и взрывчатые вещества. М.: Главная редакция химической литературы, 1937. 619 с.

2. Будников М.А., Левкович Н.А., Быстров И.В., Сиротинский В.Ф., Шехтер Б.И. Взрывчатые вещества и пороха. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1955. 363 с.

3. Андеев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. М.: Государственное научно-техническое издательство Оборонгиз, 1960. 595 с.

4. Росси Б.Д., Поздняков З.Г. Промышленные взрывчатые вещества. Справочник. М.: Недра, 1971. 176 с.

5. Герасимов В.А., Зуйков А.И. Взрывчатые вещества. Конспект лекций. Тула: Тульский политехнический институт, 1977. 59 с.

6. Краткая химическая энциклопедия. Том 5 (Т–Я). М.: Советская энциклопедия, 1957. С. 261–262.

7. Росси Б.Д. Константы взрывчатых веществ для горной промышленности. 1948.

8. Лурье А.И. Электрическое взрывание зарядов. М.: Углетехиздат, 1957. 290 с.

9. Кочеров А.В. Постоянная времени. Большая Советская Энциклопедия. М.: Издательство Советская Энциклопедия, т. 20, 1975. С. 419 (ст. 1244–1245).

10. Бубнов П.Ф. Инициирующие взрывчатые вещества. Ч. 1. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1940. 324 с.

11. Боуден Ф.П., Иоффе А.Д. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких веществах. М.: Иностранная литература, 1955. 119 с.

Об авторах

Липанов Алексей Матвеевич – доктор технических наук, академик РАН, главный научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: анализ, разработка и испытание твердотопливных двигателей для летательных аппаратов.

Головатенко Владислав Денисович – кандидат технических наук, заслуженный конструктор России, ведущий инженер-конструктор Акционерного общества «Опытное конструкторское бюро «НОВАТОР», Екатеринбург, Российская Федерация

Область научных интересов: исследование импульсных процессов, протекающих в установках малой мощности автоматизации летательных аппаратов.

Ignition of lead styphnate by a filament in an explosive attachment

Lipanov A. M.[1], Golovatenko V. D.[2]

[1] *Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russian Federation*

[2] *Novator JSC, Ekaterinburg, Russian Federation*

It is shown that the ignition temperature of lead styphnate can be described by a transcendental equation including the inertia of the initiating composition and the depth of its heating. The filament temperature at the moment of ignition of the initiating substance was calculated. It was found that, when the heating element current is close to 5 A, the combustion of lead styphnate leads to an explosion (detonation). At the same time, when the filament current equals 2 A, the combustion rate of lead styphnate ranges from 215 m/s to 750 m/s.

Keywords: explosive attachment, ignition temperature, lead styphnate

Information about the authors

Lipanov Alexey Matveevich – Dr. Sci. (Engineering), RAS Academician, Chief Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russian Federation.
Research interests: analysis, development and testing of solid-fuel engines for aircrafts.

Golovatenko Vladislav Denisovich – Honoured Design Specialist of Russia, Cand. Sci. (Engineering), Leading Design Engineer, Novator JSC, Ekaterinburg, Russian Federation.
Research interests: investigation of impulse processes occurring in low-power devices for aircraft automation.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-77-86
УДК 629.7.015.4:533.6.013.43:629.7.03

Результаты исследований опытного образца механического демпфера вибраций с вращательными парами трения

В. Д. Вермель, М. Ч. Зиченков, А. Н. Корякин, С. Э. Парышев

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация

Рассмотрены результаты расчетно-экспериментального исследования специализированного макета – демонстратора демпфера вибраций авиационного двигателя, размещаемого в мотогондоле на пилоне крыла магистрального самолета.

Ключевые слова: демпфер, вращательные пары, коэффициент трения, антифрикционные самосмазывающиеся органопластики

Для цитирования: Вермель В. Д., Зиченков М. Ч., Корякин А. Н., Парышев С. Э. Результаты исследований опытного образца механического демпфера вибраций с вращательными парами трения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 77–86. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-77-86

For citation: Vermel V. D., Zichenkov M. Ch., Koryakin A. N., Paryshev S. E. Study of an experimental prototype simulating a mechanical vibration damper with rotational friction pairs // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 77–86. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-77-86

Поступила 23.10.2020 *Отрецензирована* 03.11.2020 *Одобрена* 14.11.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Введение

Для конструкций самолетов характерны вибрации, обуславливаемые воздействием целого ряда факторов. Одним из наиболее существенных является длящееся в течение всего полета воздействие двигателей. При негативном влиянии на оборудование, экипаж и пассажиров вибрации ведут к накоплению усталостных повреждений конструкции. Снижение их уровня возможно за счет повышения жесткости конструкции, которое связано с увеличением ее массы. Более эффективным средством подавления нежелательных вибраций может стать использование специализированных демпферов, успешно применяемых в различных технических приложениях.

К демпферам вибраций авиационных конструкций предъявляются требования малой массы, низких эксплуатационных расходов и высокой надежности. Распространенным препятствием эффективному демпфированию колебаний отдельных объектов (например, двигателя на пилоне крыла самолета) является невозможность установить демпфер в оптимальных точках, где перемещения наиболее большие, а нагрузки на демпфер минимальны. Единственно возможным вариантом может оказаться размещение демпфера в непосредственной близости к опорам крепления демпфируемого объекта или вместо одной из опор. Здесь условия размещения далеки от оптимальных, требуется подавление вибраций с интенсивными динамическими нагрузками при чрезвычайно малых амплитудах. Применительно к удовлетворению таких требований был разработан демпфер сухого трения, в котором малые поступательные вибрационные перемещения преобразуются в значительные угловые перемещения валов во вращательных парах с трущимися поверхностями [1–3]. В описаниях к патентам [1] и [2] приводится широкий перечень аналогов изобретения, эффективно работающих в оптимальных

© Вермель В. Д., Зиченков М. Ч., Корякин А. Н., Парышев С. Э., 2020

условиях крепления к защищаемому объекту, но теряющих многие свои преимущества в названных специфических условиях эксплуатации. Особенностью исследуемого в данной работе демпфера является зависимость коэффициентов трения во вращательных парах от нагрузок на трущихся поверхностях и скоростей их относительного движения. При этом в расчете учитывается влияние жесткости и инерционных масс конструкции на эффективность работы демпфера.

1. Описание конструкции демпфера

Принципиальная схема демпфера изображена на рисунке 1.

Демпфер содержит основание 1 с закрепленной на нем полукольцевой пружиной 2. На конце полукольцевой пружины находится кольцо 3. В отверстии основания расположено кольцо 4. Внутри кольца 4 помещен вал-эксцентрик 5 с кронштейном и валом на его конце. В отверстии вала-эксцентрика установлено кольцо 6 с валом вертикальной тяги 7. Вал на конце кронштейна и кольцо 3 образуют вращательную пару с осью вращения *A*. Вал вертикальной тяги и кольцо 6 образуют вращательную пару с осью вращения *B*. Вал-эксцентрик и кольцо 4 образуют вращательную пару с осью вращения *C*. Оси *A, B* и *C* расположены в одной плоскости. На внутренние цилиндрические поверхности всех колец нанесены трибологические покрытия.

При приложении внешней силы вдоль вертикальной тяги 7 происходит поворот вала 5 вокруг оси вращения *C* вместе с присоединенным к кронштейну концом кольцевой пружины 2, что деформирует последнюю и нагружает трущиеся поверхности всех вращательных пар. Результатом работы моментов сил трения во вращательных парах становится диссипация энергии колебательного движения демпфируемого объекта в рассеиваемую тепловую энергию. Зависимость (рис. 1б), связывающая силу F_B на тяге демпфера с реакцией пружины и параметрами перемещения вала (подробнее см. [4]):

$$F_B = \frac{r_k + (\rho_A + \rho_C)\,\mathrm{sign}(\alpha_k \omega_k)}{\Delta_B \cos\alpha_k - (\rho_C + \rho_B)\,\mathrm{sign}(\alpha_k \omega_k)} R_A, \quad (1)$$

где:

F_B – сила, приложенная к вертикальной тяге,

R_A – сила от пружины, приложенная к шарниру *A*,

ρ_B, ρ_C, ρ_A – радиусы кругов трения,

$\rho_B = f_B \cdot r_B$, $\rho_C = f_C \cdot r_C$, $\rho_A = f_A \cdot r_A$,

r_B, r_C, r_A – радиусы валов по осям *B*, *C*, *A* соответственно,

f_B, f_C, f_A – коэффициенты трения скольжения валов по внутренней поверхности колец

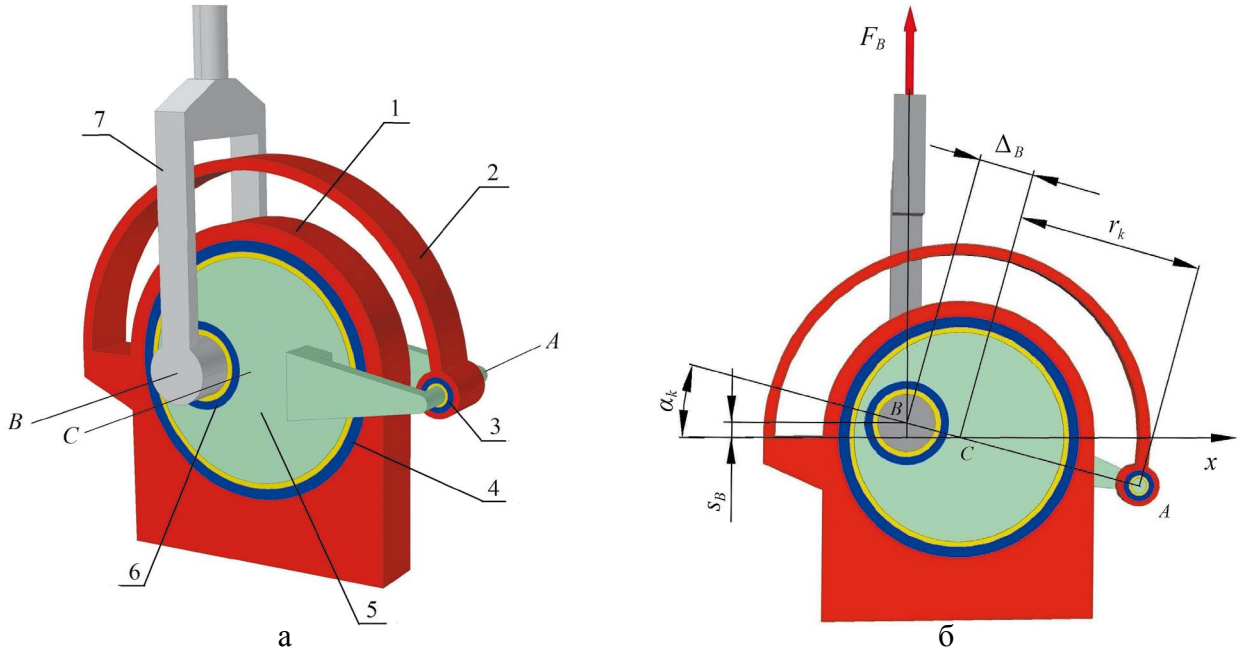


Рис. 1. Схема специализированного демпфера трения: а) общий вид, б) разрез по плоскости симметрии в нагруженном состоянии

вращательных пар с осями вращения B, C, и A соответственно,

ω_k – скорость изменения угла α_k.

При этом:

$$s_B = \Delta_B \sin \alpha_k, \quad \Delta_B \cos \alpha_k > \rho_C + \rho_B. \qquad (2)$$

Условие $\Delta_B \cos \alpha_k > \rho_C + \rho_B$ является основным для реализации движения демпфера. При несоблюдении его демпфер заклинит.

Теоретическая зависимость нагрузки F_B на тягу демпфера от ее перемещения дана на рисунке 2. Коэффициенты трения приняты постоянными, а тяга считается абсолютно жесткой. Конструкция демпфера невесомая.

Площадь петли гистерезиса на рисунке 2, равная работе демпфера за один цикл колебаний, определяется по формуле:

$$U = \frac{r_k(\rho_B + \rho_C) + (\rho_A + \rho_C)\sqrt{\Delta_B^2 - A_B^2}}{\Delta_B^2 - A_B^2 - (\rho_C + \rho_B)^2} N_A A_B, \quad (3)$$

где A_B и N_A – амплитуды параметров s_B и R_A соответственно.

Согласно формуле (3) при относительно малых радиусах кругов трения можно выбором величины эксцентриситета Δ_B изготовить демпфер с нужной величиной работы, совершаемой за цикл колебаний. Данное преимущество конструкции демпфера позволяет использовать в его вращательных парах покрытия трущихся поверхностей с малыми коэффициентами трения и, как следствие, с высокой износостойкостью.

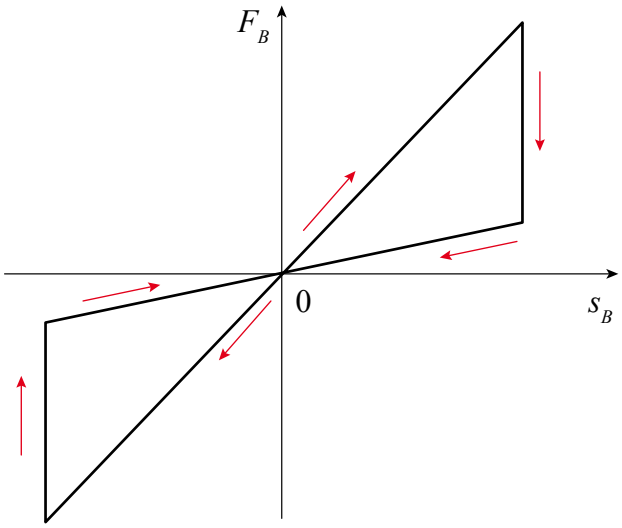


Рис. 2. Теоретическая зависимость нагрузки на тягу демпфера от ее перемещения при постоянных коэффициентах трения во вращательных парах

2. Результаты экспериментальных и аналитических исследований

Исследованный демпфер (рис. 3) является одним из промежуточных опытных вариантов демпфера [2]. Вал-эксцентрик был выполнен в виде коленчатого вала с регулируемой величиной эксцентриситета Δ_B. Принцип его действия не имеет отличий от принципа, изложенного выше. Примененный в качестве покрытия внутренних поверхностей колец подшипников антифрикционный самосмазывающийся органопластик (АСО) давно и широко применяется в общем машиностроении, авиации и космонавтике (подробнее см. [3] и [4]). Высокие показатели

Рис. 3. Установка опытного образца (макета-демонстратора) демпфера на испытательном стенде

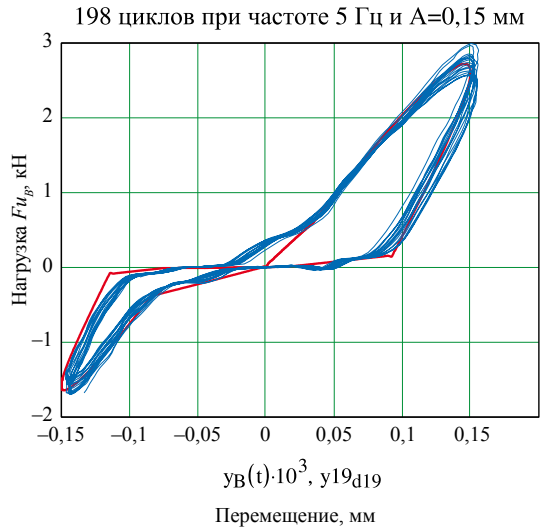
износостойкости, широкий диапазон рабочих температур и хорошие нагрузочные характеристики обеспечили его надежное применение в подшипниках скольжения, в частности в серийных подшипниках ШЛТ Саратовского подшипникового завода. Конструкцией демпфера предусмотрена регулировка изменения размеров люфтов во вращательных парах в соответствии с описанием патента [2].

В эксперименте задавались синусоидальные движения тяги демпфера с определенными частотами (от 4 до 5,5 Гц), амплитудами (от 0,15 до 1,0 мм) и количеством циклов для отдельного этапа непрерывного движения (не менее чем 150 циклов колебаний). Фиксировались зависимости от времени перемещений тяги демпфера и действующей силы. Время остановок не превышало время на изменение в компьютере значения амплитуды или частоты цикла.

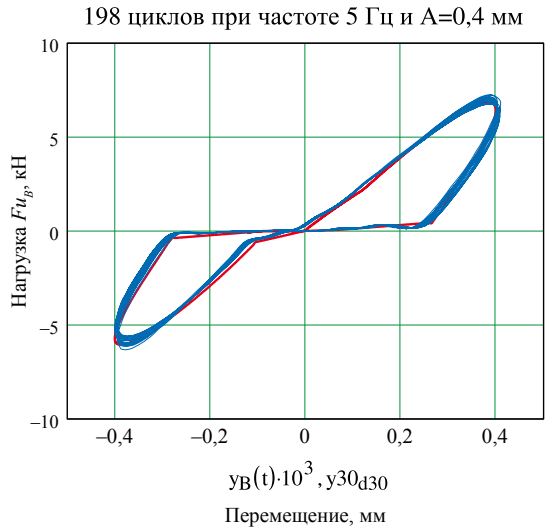
В качестве примера на рисунке 4 показаны результаты эксперимента. Перемещение конца вертикальной тяги обозначено символом y, поскольку оно отлично от вертикального перемещения s_B оси B коленчатого вала по причине деформации вертикальной тяги. Действие внутренних инерционных сил в демпфере, учитываемое в расчете, также требует признания некоторой разницы в силах, действующих на ось B и на конец вертикальной тяги. Поэтому сила на конце вертикальной тяги обозначена символом Fu_B. Эксперимент и расчет удовлетворительно совпадают. Экспериментальные характеристики на графиках выполнены синими, а расчетные – красными линиями. Нелинейность характеристик определяется зависимостью коэффициентов трения во вращательных парах от давлений на трущихся поверхностях, скоростей относительного движения последних, упругостью и инерционностью конструкции демпфера. Особенности нанесения покрытия АСО на внутренние поверхности колец подшипников, выполненные с некоторой волнистостью, определили асимметрию локальных давлений на трущихся поверхностях при знакопеременных нагрузках, а следовательно, и асимметрию полученных характеристик. Дополнительное влияние на асимметрию оказали конструкция регулируемого эксцентриситета Δ_B и способ крепления кольцевой пружины. Асимметрия указывает на определенные недостатки конкретной конструкции, которые должны быть исключены в последующих изделиях.

Данный демпфер был изготовлен с целью поиска на испытательном стенде зависимости коэффициентов трения выбираемых трибологических покрытий от давлений на рабочих поверхностях вращательных пар и скоростей их относительного перемещения. Цель эксперимента определила конструкцию демпфера, в частности регулируемый эксцентриситет Δ_B коленчатого вала и узлы крепления на стенде. Поэтому габариты и масса демпфера оказались увеличенными, что приемлемо для устройства, созданного для достижения конкретной цели эксперимента, а не для эксплуатации. Детали демпфера сделаны из стали 30ХГСА, включая пружину. На основании выполненных исследований определились параметры рабочего образца демпфера [2] для установки его на пилон двигателя магистрального самолета, близкого по параметрам к самолету МС-21 с массой двигателя 4000 кг. Сравнение габаритов рабочего и опытного образцов демпфера дано на рисунке 5. Обращает на себя внимание факт, что при увеличении нагрузок на рабочий вариант демпфера в 5 раз по сравнению с опытным образцом его масса уменьшилась в 1,63 раза.

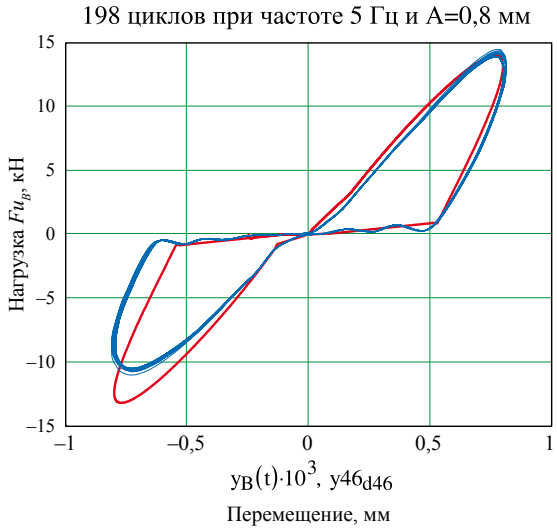
В описании изобретения к патенту [1] рассматривается демпфирование свободных колебаний балки (рис. 6 – изображение дано как в оригинале) длиной L_1 = 8,4 м с тремя сосредоточенными массами. Крепление демпферов (макетов-демонстраторов) к балке выполнено на расстояниях L_2 = 0,2 м от опор в положениях статических равновесий ее и демпферов (без начальных усилий). Жесткость балки равна жесткости коробки из двух швеллеров № 14 ГОСТ 8240-56 (момент инерции $J = 2\times491$ см^4). Величины масс: средней – m_1 = 97,5 кг, двух крайних – m_2 = 440 кг. В расчете считалось, что масса балки пренебрежительно мала по сравнению с массой груза. Частоты свободных колебаний



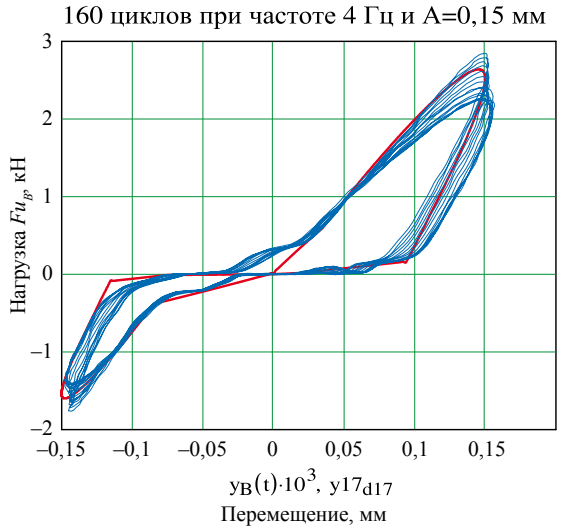
а) Зависимость нагрузки на тягу демпфера от ее вертикальных колебаний с амплитудой 0,15 мм



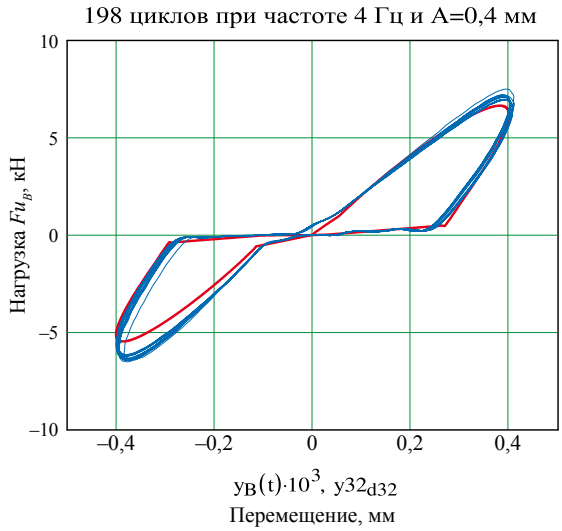
б) Зависимость нагрузки на тягу демпфера от ее вертикальных колебаний с амплитудой 0,40 мм



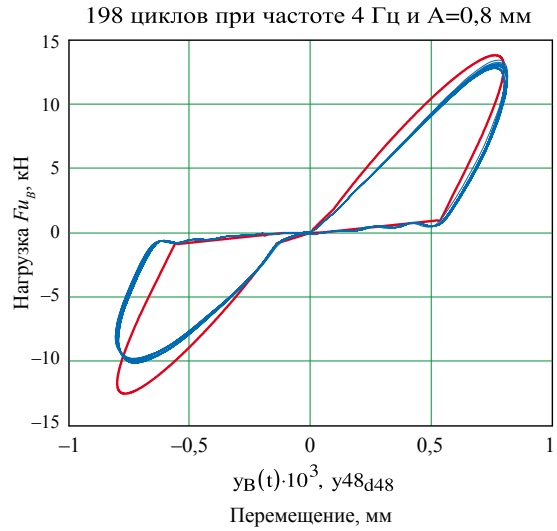
в) Зависимость нагрузки на тягу демпфера от ее вертикальных колебаний с амплитудой 0,8 мм



г) Зависимость нагрузки на тягу демпфера от ее вертикальных колебаний с амплитудой 0,15 мм



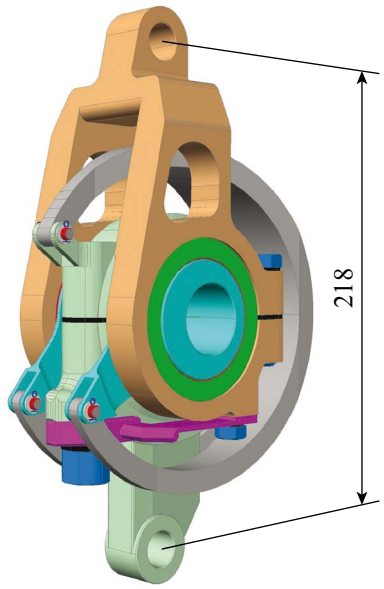
д) Зависимость нагрузки на тягу демпфера от ее вертикальных колебаний с амплитудой 0,40 мм



е) Зависимость нагрузки на тягу демпфера от ее вертикальных колебаний с амплитудой 0,8 мм

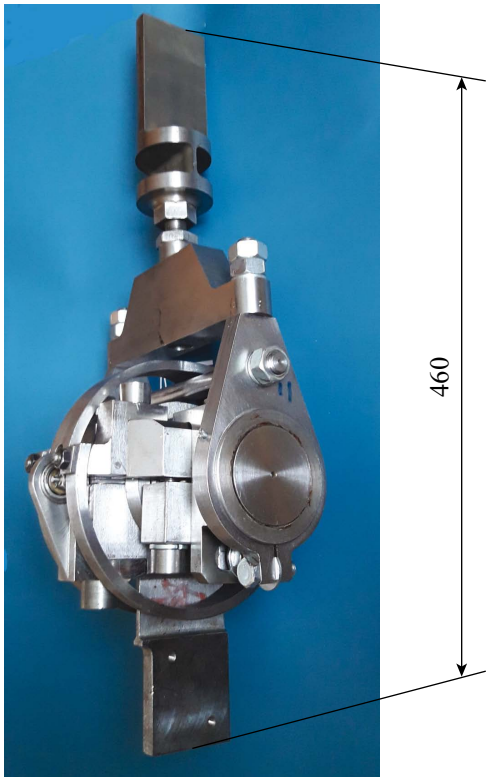
Рис. 4. Зависимость нагрузки на тягу демпфера от ее вертикальных колебаний

Рабочий образец демпфера
(проект)



Нагрузки: от –100 до 100 кН
Перемещения: от –1,2 до 1,2 мм
Масса: 6,2 кг

Опытный образец демпфера
(макет-демонстратор)



Нагрузки: от –20 до 20 кН
Перемещения: от –1,2 до 1,2 мм
Масса: 10,1 кг

Рис. 5. Сравнение рабочего и опытного образцов демпфера в едином масштабе

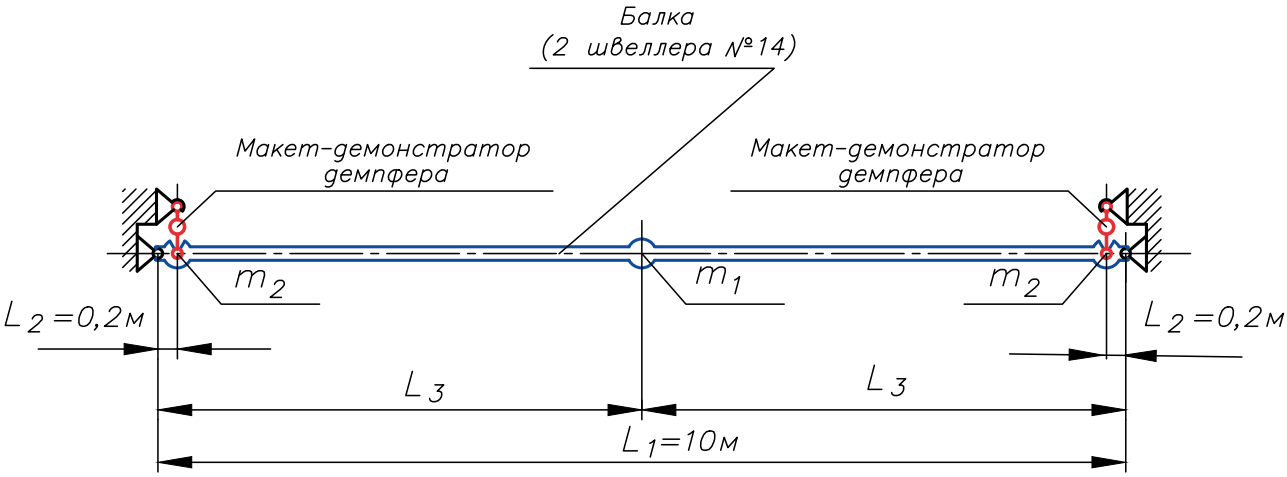


Рис. 6. Схема балки с сосредоточенными массами и демпферами из описания к патенту [1]

без демпфирования: $\omega_1 = 6{,}4$ Гц, $\omega_2 = 47{,}9$ Гц, $\omega_3 = 57{,}5$ Гц. Коэффициенты трения во вращательных парах были приняты постоянными и не учитывалась деформация демпфера.

В настоящей работе представлен похожий расчет этого же объекта (рис. 6) с реальной характеристикой исследованного демпфера. Рассматривались свободные колебания балки после приложения к средней массе прямоугольного импульса силы величиной 2,9 кН с продолжительностью действия 0,05 с. Результаты расчета даны на рисунках 7–9.

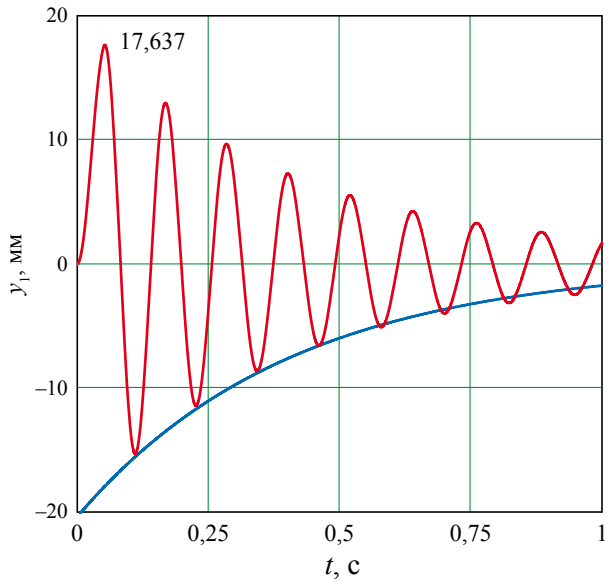


Рис. 7. Свободные колебания середины балки

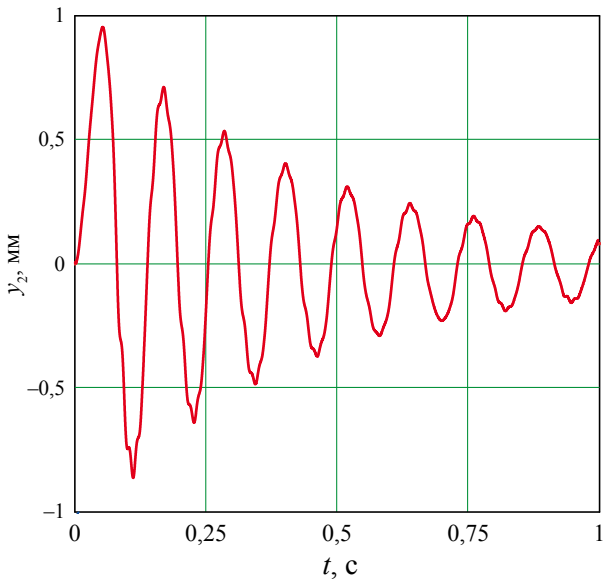


Рис. 8. Свободные колебания точки соединения балки с демпфером (левый и правый демпферы)

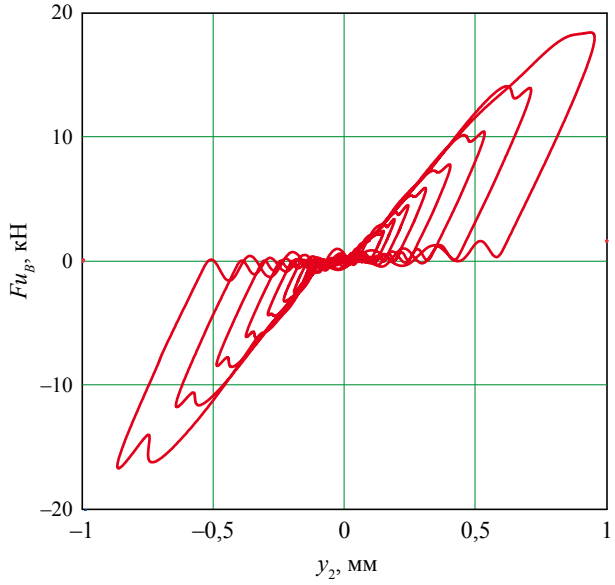


Рис. 9. Зависимость нагрузки на демпфер от перемещений точки его соединения с балкой (левый и правый демпферы)

Зависимости для левого и правого демпферов получились практически равными, что ожидаемо. Частота первого тона стала равной 8,3 Гц вместо 6,4 Гц, характерной для свободных колебаний без демпферов. Экспонента, огибающая локальные минимумы зависимости на рисунке 7, характеризуется показателем степени –2,5 t, что соответствует логарифмическому декременту колебаний 0,3. Данный пример иллюстрирует высокую эффективность работы демпферов в непосредственной близости к опорам защищаемой балки.

По результатам данного исследования были разработаны варианты демпфера с вращательными парами трения из серийных сферических подшипников серии ШЛТ. Способы их установки на пилоне двигателя магистрального самолета с соблюдением основных пропорций показаны на рисунках 10, 11. Информация о массах дана на рисунке 11. В данных демпферах применен улучшенный способ регулировки люфтов во вращательных парах и повышена жесткость конструкции. Дополнительно совместно с Ростовским государственным университетом путей сообщения предложен способ диагностики их диссипативных характеристик в процессе работы. Регулировка люфтов во вращательных парах в сочетании с диагностикой их диссипативных характеристик в процессе работы и накопленным опытом использования в авиации покрытий АСО позволяет ожидать приемлемый ресурс работы демпферов при эксплуатации.

В машиностроении существует много различных ситуаций, когда необходимость демпфирования вынуждает располагать демпфер либо рядом с опорами, либо использовать его в качестве демпфирующей опоры. Приведенные примеры такого использования могут быть полезны конструкторам разнообразных объектов, подверженных вибрациям,

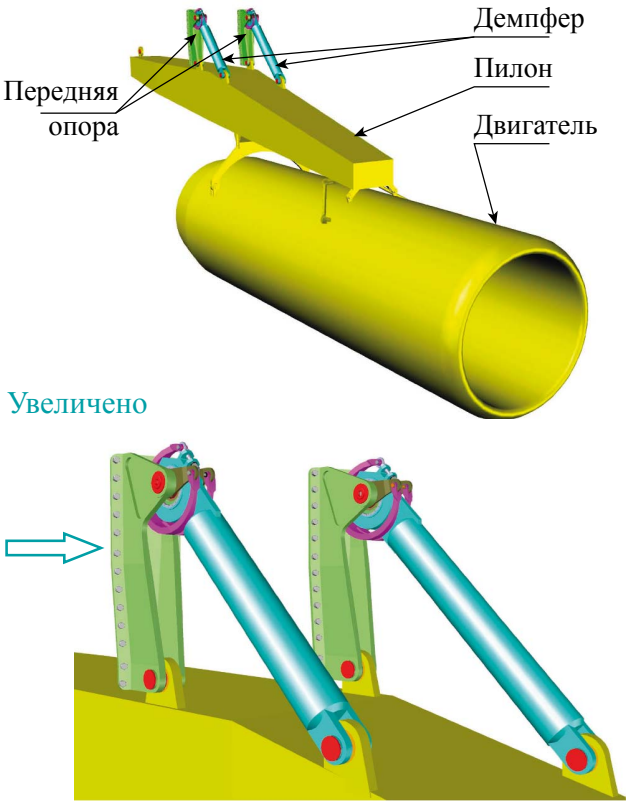


Рис. 10. Установка демпфера перед передними опорами пилона двигателя магистрального самолета

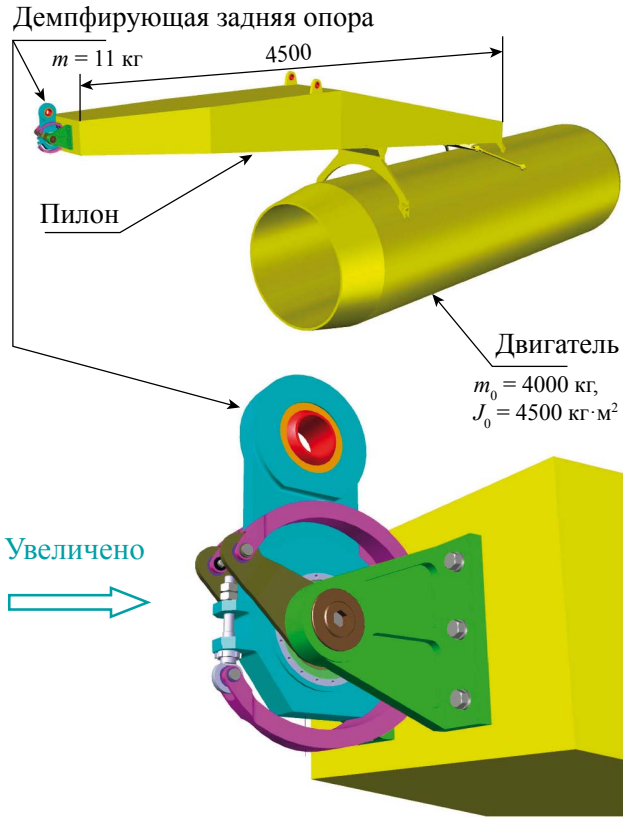


Рис. 11. Установка демпфера в качестве задней демпфирующей опоры пилона двигателя магистрального самолета

как прецеденты. Следует подчеркнуть, что показанные демпферы были созданы применительно к конкретным ситуациям. Для каждого отдельного случая эксплуатации возможна своя, персональная конфигурация демпфера. Поскольку ключевыми элементами в демпфере являются лишь вращательные пары, то объединение усилий конструкторов конкретного объекта и демпфера представляется более рациональным, чем разработка некоего универсального демпфирующего устройства. В объектах ВКО и ПВО проблемы борьбы с вибрациями не менее актуальны, чем в авиации, но лишь отдельным специалистам они наиболее близки и понятны. Здесь как нигде актуальна совместная работа конструкторов.

Заключение

Расчет удовлетворительно отражает характер изменения нагрузки на демпфере в исследованном диапазоне сочетания скорости трения (до 0,1 м/с) и давлений на поверхностях трения (до 12 МПа) в температурных условиях выполненного эксперимента. При этом следует учесть, что технология нанесения покрытия АСО в данном эксперименте не обеспечила полное отсутствие волнистости. Прилегание валов во вращательных парах было локальным и менялось по мере притирания. Поэтому расчетное давление и реальные локальные давления на поверхностях касания валов с покрытиями могут отличаться.

Исследования подтвердили возможность конструирования эффективных рабочих образцов демпферов с вращательными парами трения. Приведенные примеры демпфирования колебаний балки на шарнирных опорах и двигателя на пилоне крыла самолета показали наличие широких возможностей для успешного применения такого демпфера в различных технических приложениях, в том числе и изделиях ВКО и ПВО.

Список литературы

1. Механический демпфер низкоамплитудных колебаний с вращательными парами трения: пат. 2544046 РФ: МПК F16F 7/06 / О.Е. Барышников [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. № 2013134428/11; заявл. 24.07.2013; опубл. 27.01.2015. Бюл. № 3. 14 с.

2. Демпфер низкоамплитудных колебаний: пат. 181778 РФ: МПК F16F 7/06 / О.Е. Барышников [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. № 2017136536; заявл. 17.10.2017; опубл. 26.07.2018. Бюл. № 21.

3. Дроздов Ю.Н. и др. Трибологические свойства и применение антифрикционных покрытий в шарнирах и подшипниках скольжения – демпферах колебаний авиационных конструкций // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения: сб. ст. / Российская академия наук, Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). М.: Наука, 2016. С. 461–472.

4. Вермель В.Д. и др. Разработка и исследование механического демпфера с вращательными парами трения скольжения // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения: сб. ст. / Российская академия наук, Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ). М.: Наука, 2016. С. 445–460.

Об авторах

Вермель Владимир Дмитриевич – доктор технических наук, начальник научно-технического центра Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: математика, механика, цифровые модели траекторий движения, механика технологических процессов, авиация, теория управления, управление и автоматизация технологической подготовки производства

Зиченков Михаил Чеславович – кандидат технических наук, заместитель генерального директора, начальник комплекса прочности летательных аппаратов Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: авиация, аэроупругость, аэродинамика, математика, механика, теория колебаний, статическая и динамическая прочность, летательные аппараты, прочность и аэроупругость.

Корякин Александр Николаевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: авиация, аэроупругость, аэродинамический эксперимент, математика, механика, теория колебаний, статическая и динамическая прочность, летательные аппараты, прочность и аэроупругость.

Парышев Сергей Эмильевич – кандидат технических наук, начальник отделения норм прочности, нагрузок и аэроупругости летательных аппаратов Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Жуковский, Московская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: авиация, аэроупругость, аэродинамика, математика, механика, теория колебаний, статическая и динамическая прочность, летательные аппараты, прочность и аэроупругосгь.

Study of an experimental prototype simulating a mechanical vibration damper with rotational friction pairs

Vermel V. D., Zichenkov M. Ch., Koryakin A. N., Paryshev S. E.

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation

This paper presents the results of a computational and experimental study of an experimental prototype simulating an aircraft engine vibration damper installed in an engine nacelle on the wing pylon of a mainline aircraft.

Keywords: damper, rotational pairs, friction factor, antifriction self-lubricating organoplastics

Information about the authors

Vermel Vladimir Dmitrieviich – Dr. Sci. (Engineering), Sectoral Head, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.
Research interests: mathematics, mechanics, digital models of motion trajectories, mechanics of technological processes, aviation, control theory, management and automation of production technologies

Zichenkov Mikhail Cheslavovich – Cand. Sci. (Engineering), Deputy General Director, Head of the Aircraft Strength Department, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.
Research interests: aviation, aeroelasticity, aerodynamics, mathematics, mechanics, oscillation theory, static and dynamic strength, aircraft, strength and aeroelasticity.

Koryakin Alexander Niikolaevich – Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.
Research interests: aviation, aeroelasticity, aerodynamic experiment, mathematics, mechanics, vibration theory, static and dynamic strength, aircraft, strength and aeroelasticity.

Paryshev Sergey Emiilievich – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Department for Strength, Load and Aeroelasticity Aircraft Standards, Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Zhukovsky, Moscow region, Russian Federation.
Research interests: aviation, aeroelasticity, aerodynamics, mathematics, mechanics, vibration theory, static and dynamic strength, aircraft, strength and aeroelasticity.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-87-94
УДК 539.3

Экспериментальное исследование и математическое моделирование взаимодействия полусферического днища контейнера со связным грунтом

Р. Ф. Шамгунов[1], Л. А. Игумнов[2], К. П. Жегалова[2], В. Л. Котов[2], В. С. Метрикин[2], Д. А. Казаков[2]

[1] *Акционерное общество «Нижегородский завод 70-летия Победы», Нижний Новгород, Российская Федерация*

[2] *Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация*

Объектом настоящего исследования является изделие ПВО (контейнер). Проведены экспериментальные и расчетные исследования процессов силового взаимодействия твердого тела, моделирующего днище контейнера, с пылевато-глинистым грунтом различной влажности с целью оценки параметров силы взаимодействия контейнера с грунтом. Показано, что эмпирическая модель проникания в грунт, предполагающая постоянное напряжение на поверхности контакта индентор–грунт, позволяет описать полученные экспериментальные данные.

Ключевые слова: изделия ПВО, днище контейнера, математические модели взаимодействия твердых тел с грунтами, грунт, грунт в обойме, металлическая обойма, сферический индентор, квазистатическое нагружение

Для цитирования: Шамгунов Р. Ф., Игумнов Л. А., Жегалова К. П., Котов В. Л., Метрикин В. С., Казаков Д. А. Экспериментальное исследование и математическое моделирование взаимодействия полусферического днища контейнера со связным грунтом // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 87–94. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-87-94

For citation: Shamgunov R. F., Igumnov L. A., Zhegalova K. P., Kotov V. L., Metrikin V. S., Kazakov D. A. Experimental study and mathematical modelling of the interaction between the hemispherical bottom of a container with cohesive soil // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 87–94. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-87-94

Поступила 16.11.2020 *Отрецензирована* 23.11.2020 *Одобрена* 10.12.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Введение

Изделия ПВО типа С-400 могут применять поражающие средства дальнего и ближнего радиуса действия, устанавливаемые в транспортные контейнеры (ТПК) одной и той же пусковой установки (ПУ). Ракеты ближнего радиуса действия должны запускаться одна за другой с малыми интервалами времени (менее 3 сек). Однако после каждого пуска ракеты ПУ и ее контейнеры совершают продольно-поперечные колебания в течение большего времени, что может создать неблагоприятные условия для старта следующей ракеты. Поэтому такие колебания необходимо гасить. Для определения параметров демпфирования и разработки технических средств гашения таких колебаний требуется разработать математические модели взаимодействия твердых тел (ТПК и ПУ) с грунтами различного типа. Для получения результатов достаточной точности для реальных изделий необходимо выполнить расчетно-экспериментальные исследования с физическими моделями, чему и посвящена данная работа.

Моделирование взаимодействия твердого тела с грунтом важно также для гашения

© Шамгунов Р. Ф., Игумнов Л. А., Жегалова К. П., Котов В. Л., Метрикин В. С., Казаков Д. А., 2020

колебаний вращающихся радиолокаторов, базирующихся на подвижных или неподвижных вывешенных на домкратах платформах, т.к. сильная качка может серьезно исказить картину подсветки и приема, а также уменьшить ресурс опорно-поворотных устройств.

Для оценки сил, действующих на изделие ПВО (контейнер) при его силовом взаимодействии с грунтом, необходимо обладать экспериментальными данными о прочности или сцеплении грунта. Для определения величины сил сцепления дисперсных связных грунтов и вязких пород с учетом изменения их во времени применяется метод испытаний шарового штампа Н.А. Цытовича [1]. При испытании на специальном приборе или в натуре на особой установке измеряют осадки шарового штампа при некоторой постоянной нагрузке. Величина нагрузки при этом должна быть не очень малой, чтобы упругими деформациями грунта можно пренебречь. В качестве расчетных зависимостей используется решение А.Ю. Ишлинского [2], полученное для модели идеальной жесткопластической среды. Как показывают соответствующие исследования, сцепление, определяемое по методу шарового штампа, следует рассматривать как некоторую комплексную характеристику, позволяющую оценить не только сцепление, но для пластичных грунтов в известной мере и внутреннее трение, что может быть использовано, например, при вычислении предельной нагрузки на глинистые грунты по формулам идеально связанных тел (без учета трения, которое автоматически учитывается величиной сцепления грунта) [1]. Среднее контактное давление определяется как отношение нормальной нагрузки на сферу к площади проекции отпечатка на поверхности деформируемого полупространства – или твердость по Майеру [3].

Другая модель для оценки сопротивления квазистатическому внедрению тела в грунт, нашедшая широкое практическое применение [4, 5], основана на предположении о постоянстве напряжения, действующего по нормали к поверхности индентора. С учетом разброса свойств реальных грунтов и неопределенности их состава подобная модель может оказаться предпочтительнее при соответствующей калибровке на основе экспериментальных данных [6].

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных и расчетных исследований процессов взаимодействия твердого тела, моделирующего днище контейнера, с пылевато-глинистым грунтом различной влажности с целью оценки параметров силы взаимодействия контейнера с грунтом. Показано, что эмпирическая модель проникания в грунт, предполагающая постоянное напряжение на поверхности контакта индентор–грунт, позволяет описать полученные экспериментальные данные.

Методика проведения экспериментов

Проведены испытания по внедрению стального индентора в специально приготовленный грунт, заключенный в стальной обойме в статическом режиме нагружения. Испытания были проведены для двух партий грунта разной влажности, заключенного в металлической обойме. Был использован пылевато-глинистый грунт влажностью 25 % для партии 1 и 20 % для партии 2. Грунт был специально приготовлен и утрамбован в металлические обоймы. Часть испытаний проводились с использованием смазки поверхности индентора минеральным маслом.

Для проведения испытаний была изготовлена оснастка. Инденторы диаметром 5, 10 и 13,5 мм были изготовлены из стали 40Х. Металлическая обойма была изготовлена из металлической электросварной прямошовной трубы по [7]. Наружный диаметр обоймы 88 мм, внутренний диаметр 81,4 мм, высота обоймы 60 мм. Размеры инденторов и обойм принимались в соответствии с минимальными размерами образцов в зависимости от диаметра индентора, указанными в [8].

Эксперименты выполнялись на испытательном комплексе Z100 ZWICK/ROEL, позволяющем проводить испытания на растяжение, сжатие сплошных и трубчатых образцов, сложное нагружение на трубчатых образцах при одновременном синхронизированном по времени задании параметров – скорость изменения продольной силы (перемещения) – скорость

изменения крутящего момента (угла закручивания) – скорость изменения внутреннего давления. Предельные значения параметров испытательной техники – по силе ±100 кН. Измерительная аппаратура комплекса включает в себя датчик силы 0–250 кН, класс точности 1 по ISO 7500-1. Измерение глубины индентирования проводилось «косвенным методом» с помощью штатного устройства измерения перемещений, связанного с подвижной траверсой испытательной машины Z100 с точностью порядка 1 мкм от измеряемой величины (осевые перемещения испытуемого образца, жестко связанного с подвижной траверсой машины, фиксируются встроенным в установку цифровым датчиком перемещений, который обеспечивает позиционирование траверсы в искомой точке с точностью не более 1 мкм). Управление экспериментом, регистрация и обработка данных, полученных в ходе испытания, осуществляются с помощью электронной системы, включающей ПК с программным комплексом TestXpert2, адаптированным для данной испытательной машины. Программное обеспечение testXpert настраивается для проведения различных типов испытаний и предоставляет возможность получения необходимых экспериментальных значений параметров исследуемого процесса в параметрическом или других видах с последующей их обработкой.

Метрологическое обеспечение представляемых экспериментов подтверждается Сертификатами о поверке используемого оборудования, выданными Нижегородским ЦСМ.

Результаты испытаний

Проведены испытания внедрения стального индентора в специально приготовленный грунт, заключенный в стальной обойме, в статическом режиме нагружения. Испытания были проведены для двух партий грунта разной влажности.

Партия 1. Скорость движения индентора (скорость подвижной траверсы испытательной машины) принималась в соответствии с возможностями испытательной машины V_1 = 10 мм/мин, V_2 = 8 мм/сек. Показано, что изменение скорости нагружения в данном диапазоне не оказывает влияния на результаты. Поэтому при испытании следующей партии образцов скорость была принята V_1 = 10 мм/мин.

Партия 2. Скорость движения индентора принималась V_1 = 10 мм/мин. Для образцов № 2.2, 2.3, 2.4, 2.6, 2.9, 2.10 перед испытанием была проведена смазка индентора минеральным маслом (для снижения сил трения на боковой

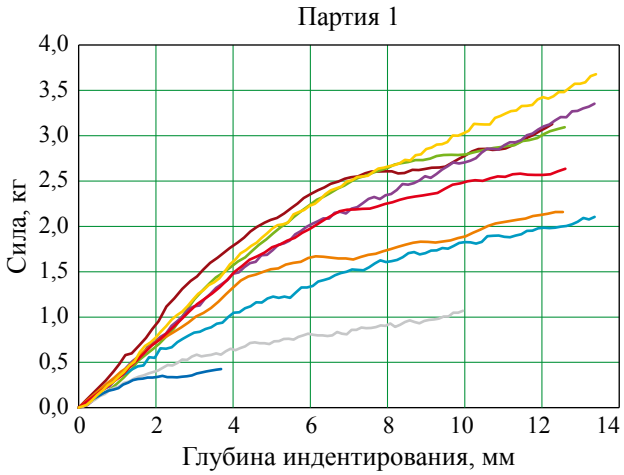


Рис. 1. Диаграмма индентирования для партии 1
— – 1,1 d = 13,5 мм V = 8 мм/с; — – 1,2 d = 13,5 мм V = 8 мм/с; — – 1,3 d = 13,5 мм V = 10 мм/мин; — – 1,4 d = 10 мм V = 10 мм/мин; — – 1,5 d = 10 мм V = 8 мм/с; — – 1,6 d = 5 мм V = 10 мм/мин; — – 1,7 d = 5 мм V = 8 мм/с; — – 1,8 d = 13,5 мм V = 8 мм/с; — – 1,9 d = 13,5 мм V = 10 мм/мин

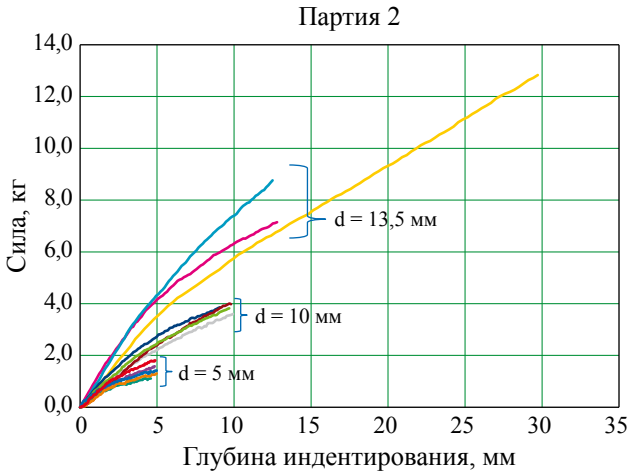
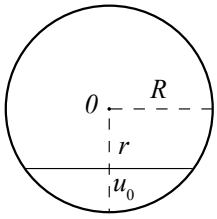


Рис. 2. Диаграмма индентирования для партии 2
— – 2,1 d = 13,5 мм; — – 2,2 d = 13,5 мм смазка; — – 2,3 d = 13,5 мм смазка; — – 2,4 d = 10 мм смазка; — – 2,5 d = 10 мм; — – 2,6 d = 10 мм смазка; — – 2,7 d = 10 мм; — – 2,8 d = 5 мм; — – 2,9 d = 5 мм смазка; — – 2,10 d = 5 мм смазка; — – 2,11 d = 5 мм; — – 2,12 d = 5 мм

поверхности индентора при глубине индентирования, превышающей радиус индентора). Показано, что смазка индентора не оказывает влияния на полученные результаты.

Пересчет машинной диаграммы «усилие ~ глубина индентирования» в диаграмму «напряжение ~ деформация» проводился по следующим формулам:

	Напряжение:	Деформация:
 $r = \sqrt{R^2 - (R - u_0)^2}$	$\sigma = F/s$, $\sigma = \frac{10*F}{\pi*r^2}$, где F – усилие, выдаваемое оборудованием, кгс; S – площадь сегмента, мм^2	$U = \frac{u_0}{R}$, где u_0 – глубина индентирования, мм

Полученные диаграммы приведены на рисунках 3, 4.

Модель квазистатического взаимодействия твердой сферы с грунтом

В механике грунтов при аппроксимации нормального давления на поверхности тела, взаимодействующего с грунтом, получила распространение [4, 5] зависимость вида

$$\sigma_n = \alpha V^2 + \gamma,$$

где α – коэффициент, равный плотности грунта, более подробно рассмотрен в работах [9, 10]; V – нормальная компонента вектора скорости движения тела; γ – постоянный коэффициент, равный прочности грунта на сжатие.

Касательное напряжение на поверхности движущегося в среде тела определим в соответствии с моделью трения Кулона

$$\sigma_\tau = k_f \sigma_n,$$

где k_f – постоянный коэффициент поверхностного трения.

Уравнение силы сопротивления может быть представлено в виде:

$$F = 2\pi R^2 \int_0^\varphi (\sigma_n \cos\varphi + \sigma_\tau \sin\varphi) \sin\varphi \, d\varphi,$$

где φ – угол, отсчитываемый от вершины сферы в направлении свободной поверхности.

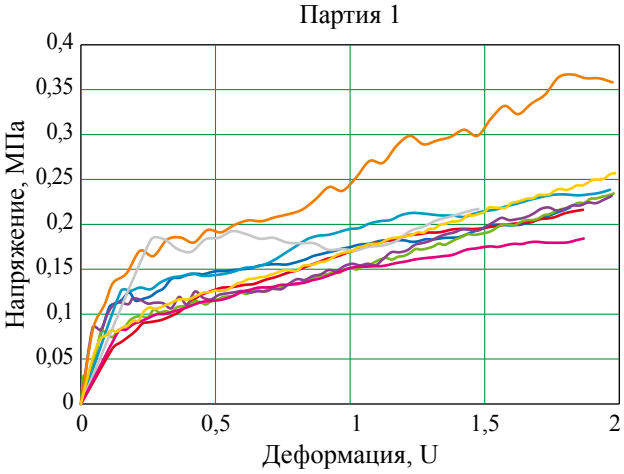


Рис. 3. Диаграммы для партии 1
– 1,1 d = 13,5 мм V = 8 мм/с; – 1,2 d = 13,5 мм V = 8 мм/с; – 1,3 d = 13,5 мм V = 10 мм/мин; – 1,4 d = 10 мм V = 10 мм/мин; – 1,5 d = 10 мм V = 8 мм/с; – 1,6 d = 5 мм V = 10 мм/мин; – 1,7 d = 5 мм V = 8 мм/с; – 1,8 d = 13,5 мм V = 8 мм/с; – 1,9 d = 13,5 мм V = 10 мм/мин

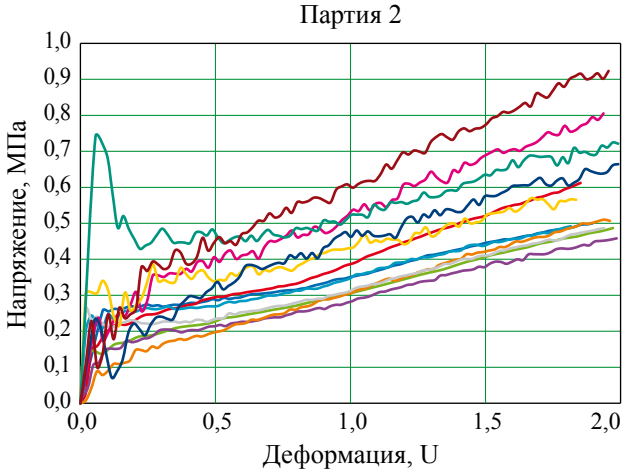


Рис. 4. Диаграммы для партии 2
– 2,1 d = 13,5 мм; – 2,2 d = 13,5 мм смазка; – 2,3 d = 13,5 мм смазка; – 2,4 d = 10 мм смазка; – 2,5 d = 10 мм; – 2,6 d = 10 мм смазка; – 2,7 d = 10 мм; – 2,8 d = 5 мм; – 2,9 d = 5 мм смазка; – 2,10 d = 5 мм смазка; – 2,11 d = 5 мм; – 2,12 d = 5 мм

После интегрирования получим:

$$F = \alpha\frac{\pi R^2 V^2}{2}\left(1 - cos^4\varphi + k_f\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{1}{2}\cos\varphi\sin\varphi - \right.\right.$$
$$\left.\left. - \sin\varphi\, cos^3\varphi\right)\right) + \gamma\pi R^2(sin^2\varphi +$$
$$+ k_f(\varphi - cos\varphi sin\varphi)).$$

Определим среднее давление как

$$p_m = \frac{F}{\pi r^2},$$

где r – радиус пятна контакта.

$$p_m(\varphi = 0) = \alpha V^2 + \gamma,\ p_m\left(\varphi = \frac{\pi}{2}\right) =$$
$$= \alpha\frac{V^2}{2}\left(1 + k_f\frac{\pi}{4}\right) + \gamma\left(1 + k_f\frac{\pi}{2}\right)$$

(при $\varphi = 0 \rightarrow r = R$, при дальнейшем погружении индентора пятно контакта не растет).

Применим линейную интерполяцию для среднего давления в зависимости от глубины проникновения и приближенно определим силу сопротивления следующим образом:

$$F = (A + Bw)\,\pi\alpha^2 = \pi\,(2ARw +$$
$$(2BR - A)w^2 - Bw^3),$$

где $A = \alpha V^2 + \gamma$, $B = k_f\frac{\pi}{2R}\left(\alpha\frac{V^2}{4} + \gamma\right) - \alpha\frac{V^2}{2R}$. При выводе также использовалось соотношение $r^2 = 2Rw - w^2$.

Рассмотрим случай малых глубин погружения сферы, полагая $\cos\varphi \approx 1$, $\frac{\alpha}{R} = \sin\varphi \approx \varphi$ и пренебрегая членами более высокого порядка малости 0(w), будем иметь линейную зависимость силы сопротивления внедрению от глубины проникновения:

$$F \approx 2(\alpha V^2 + \gamma)\frac{w}{R}\pi R^2 = 2(\alpha V^2 + \gamma)\tilde{w}\pi R^2,$$

где обозначено $\tilde{w} = \frac{w}{R}$ – безразмерная глубина проникновения.

В случае погружения с малыми скоростями (квазистатическое вдавливание) будем иметь $A \approx \gamma\, B \approx \gamma k_f\frac{\pi}{2R}$ и

$$F \approx \pi R^2\left(2\frac{w}{R} + (k_f\pi - 1)\left(\frac{w}{R}\right)^2 - k_f\frac{\pi}{2}\left(\frac{w}{R}\right)^3\right)\gamma =$$
$$= \pi R^2\left(2\tilde{w} + (k_f\pi - 1)\tilde{w}^2 - k_f\frac{\pi}{2}\tilde{w}^3\right)\gamma.$$

Преобразуем выражение для силы сопротивления при учете равенства $r^2 = 2Rw - w^2$

$$F \approx \pi r^2\left(1 + k_f\frac{\pi}{2}\frac{w}{R}\right)\gamma.$$

Таким образом, отношение силы сопротивления квазистационарному внедрению к текущей площади миделя (наибольшее по площади поперечное сечение) поверхности индентора определяет величину прочности грунта. Отклонение зависимости от горизонтальной прямой линии свидетельствует о вкладе трения в результирующую силу сопротивления.

Для определения значений постоянных коэффициентов воспользуемся экспериментальными данными.

Результаты экспериментов и расчетов

Для апробации полученных соотношений были выбраны результаты экспериментов с индентором диаметром 10 мм.

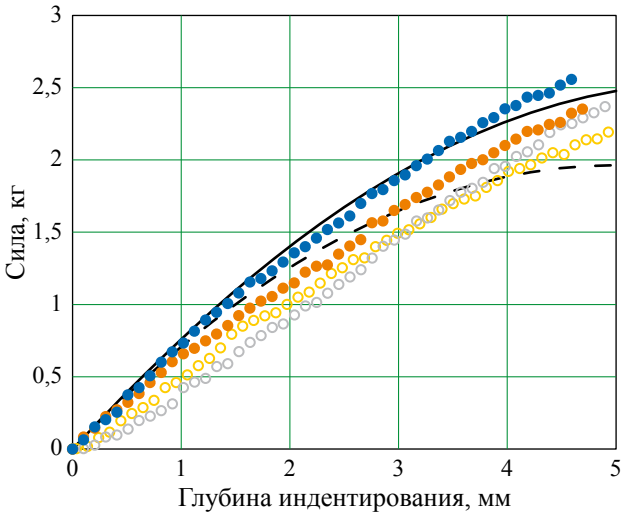


Рис. 5. Сила сопротивления внедрению: эксперимент и расчет

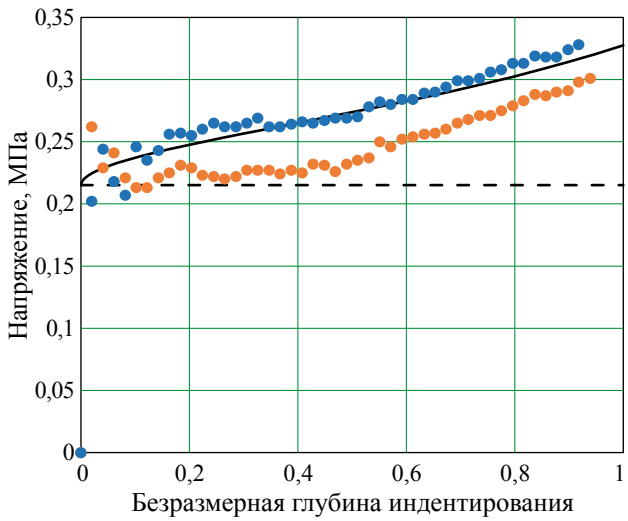


Рис. 6. Прочность грунта: эксперимент и расчет

На рисунке 5 приведены силы сопротивления внедрению, полученные в эксперименте (темные маркеры – без смазки, светлые маркеры – со смазкой) и эмпирической зависимости при наличии трения (сплошная линия) и при отсутствии трения (штриховая линия) при значениях параметров $\gamma = 0{,}215$ МПа, $k_f = 1/3$ (данные значения определялись методом наименьших квадратов).

На рисунке 6 приведены силы сопротивления внедрению, отнесенные к текущей площади миделя, полученные в эксперименте (темные маркеры – без смазки) и на основе теоретической зависимости при наличии трения (сплошная линия) и при отсутствии трения (штриховая линия).

Можно отметить, что результаты расчетов при значениях параметров $\gamma = 0{,}215$ МПа, $k_f = 1/3$ достаточно хорошо соответствуют полученным экспериментальным данным.

Для грунта второй партии экспериментов проведены аналогичные сравнения. Таким образом, проведенные расчетные и экспериментальные исследования показали практическую применимость эмпирической модели, ее достаточную чувствительность к изменению влажности грунта.

Выводы

Проведенные экспериментальные и расчетные исследования процессов силового взаимодействия твердого тела, моделирующего днище контейнера, с грунтом позволили с применением современной технологии проведения экспериментов на современном оборудовании получить оценки характеристик исследуемого процесса в зависимости от скорости погружаемого тела, прочности грунта, геометрических размеров погружаемого тела, оценить величину возникающих напряжений.

Испытания по внедрению стального индентора в специально приготовленный грунт, заключенный в стальной обойме, в статическом режиме нагружения показали, что изменение скорости нагружения в данном диапазоне (минимальная скорость 10 мм/мин, максимальная скорость 8 мм/сек) и смазка индентора не оказывают существенного влияния на характеристики процесса внедрения индентора.

Приведенные диаграммы индентирования и данные экспериментов позволяют получить справочный материал по величине погружения твердого тела (днища контейнера) в зависимости от его веса, геометрии, прочности грунта.

Используемая современная измерительная аппаратура комплекса, высокоточные датчики перемещения траверсы и программное обеспечение testXpert дали возможность предоставлять необходимые экспериментальные значения параметров исследуемого процесса в параметрическом виде, удобном для практического использования.

Проведенные испытания по индентированию стальной сферы в пылеватый глинистый грунт позволили установить увеличение прочности практически в два раза при изменении влажности с 25 до 20 %. Для получения количественной зависимости прочности грунта от влажности и/или других показателей необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Список литературы

1. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 288 с.

2. Ишлинский А.Ю. Осесимметричная задача пластичности и проба Бриннеля // Прикладная математика и механика. 1944. Том 8. Вып. 3. С. 201–224.

3. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.

4. Котов В.Л., Брагов А.М., Баландин Вл.В., Баландин Вл.Вл., Линник Е.Ю. Применение модели локального взаимодействия для определения силы сопротивления внедрению ударников в песчаный грунт // Прикладная механика и техническая физика. 2013. Том. 54. № 4. С. 114–125.

5. Баженов В.Г., Баландин В.В., Григорян С.С., Котов В.Л. Анализ моделей расчета движения тел вращения минимального сопротивления в грунтовых средах // Прикладная математика и механика. 2014. Т. 78. Вып. 1. С. 98–115.

6. Брагов А.М., Баландин Вл.В., Баландин Вл.Вл., Котов В.Л. Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 6. С. 62–70.

7. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросталь ные прямошовные.
8. ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю.
9. Баландин Вл.В., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М., Котов В.Л. Экспериментальное изучение динамики проникания твердого тела в грунтовую среду // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 6. С. 62–70.
10. Bragov A.M., Balandin V.V., Igumnov L.A., Kotov V.L., Kruszka L., Lomunov A.K. Impact and penetration of cylindrical bodies into dry and water-saturated sand // International Journal of Impact Engineering. 2018. V. 122. P. 197–208.

Об авторах

Шамгунов Риф Файзелхакович – кандидат технических наук, начальник бюро гидравлических систем Акционерного общества «Нижегородский завод 70-летия Победы», Нижний Новгород, Российская Федерация.
Область научных интересов: гидромеханика.

Игумнов Леонид Александрович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, профессор Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.
Область научных интересов: теоретическая и экспериментальная механика.

Жегалова Ксения Петровна – аспирант Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.
Область научных интересов: механические испытания.

Котов Василий Леонидович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.
Область научных интересов: вычислительная математика и механика геоматериалов и пористых сред.

Метрикин Владимир Семенович – кандидат физико-математических наук, доцент Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.
Область научных интересов: механика (прочность, динамика, ресурс).

Казаков Дмитрий Александрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института механики Федерального государственного автономного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Нижний Новгород, Российская Федерация.
Область научных интересов: физико-механические испытания материалов.

Experimental study and mathematical modelling of the interaction between the hemispherical bottom of a container with cohesive soil

Shamgunov R. F.[1], Igumnov L. A.[2], Zhegalova K. P.[2], Kotov V. L.[2], Metrikin V. S.[2], Kazakov D. A.[2]

[1] *70th anniversary of Victory Nizhny Novgorod Plant, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

[2] *Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation*

The object of this study was a product (container) for air defence systems. Experimental and computational studies of the processes of force interaction of a solid body, modelling the bottom of a container, with silt-loam soils of different moisture were carried out in order to assess the parameters of the interaction between the container and the soil. It is shown that the developed empirical model of soil penetration, which assumes constant stress on the indenter-soil contact surface, is suitable for describing the obtained experimental data.

Keywords: air defence products, container bottom, mathematical models, solid body–soil interaction, soil, backfill ring

Information about the authors

Shamgunov Rif Fayzelkhakovich – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Bureau of Hydraulic Systems of the 70th anniversary of Victory Nizhny Novgorod Plant, Nizhny Novgorod, Russian Federation.
Research interests: hydromechanics.

Igumnov Leonid Aleksandrovich – Dr. Sci. (Phys.-Math)., Prof., Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN); Chief Researcher, Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.
Research interests: theoretical and experimental mechanics.

Zhegalova Ksenia Petrovna – Postgraduate student, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.
Research interests: mechanical testing.

Kotov Vasily Leonidovich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN); Chief Researcher, Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.
Research interests: computational mathematics and mechanics of geomaterials and porous media.

Metrikin Vladimir Semenovich – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.
Research interests: mechanics (strength, dynamics, resource).

Kazakov Dmitry Alexandrovich – Cand. Sci. (Engineering), Laboratory Head, Research Institute of Mechanics, Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhny Novgorod, Russian Federation.
Research interests: physical and mechanical testing of materials.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-95-100
УДК 004.932

Построение ортогонального базиса на основе псевдослучайных последовательностей

Г. В. Светлов[1], Н. А. Суменков[1], Б. В. Костров[1], Н. Н. Гринченко[1], Е. А. Трушина[2]

[1] *Акционерное общество «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Российская Федерация*

[2] *Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань, Российская Федерация*

Рассмотрен процесс построения ортогонального преобразования на основе псевдослучайных последовательностей в целях обеспечения помехоустойчивого кодирования. Данный подход позволяет гарантировать отсутствие перегрузок в канале и решить задачу ограничения доступа в конфиденциальных системах.

Ключевые слова: псевдослучайная последовательность, ортогональный базис, помехоустойчивое кодирование, системы цифровой передачи информации

Для цитирования: Светлов Г. В., Суменков Н. А., Костров Б. В., Гринченко Н. Н., Трушина Е. А. Построение ортогонального базиса на основе псевдослучайных последовательностей // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 95–100. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-95-100

For citation: Sumenkov N. A., Kostrov B. V., Grinchenko N. N., Trushina E. A. Construction of an orthogonal basis based on pseudorandom sequences // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 95–100. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-95-100

Поступила 24.11.2020 *Отрецензирована* 04.12.2020 *Одобрена* 04.12.2020 *Опубликована* 30.12.2020

Задача обеспечения помехоустойчивого кодирования в системах цифровой передачи информации остается и будет еще долго оставаться весьма актуальной. Снижение вероятности передачи ошибочных бит позволяет снижать мощности передающих устройств, уменьшать габариты систем. Особенно это актуально в системах, допускающих определенную вероятность ошибки передачи, не влияющую на потребительское качество получаемой информации. В системах передачи изображений [1–3], например, можно допустить определенные искажения, не влияющие на их восприятие. В таких системах применяют протоколы сжатия и помехоустойчивое кодирование на основе ортогональных преобразований с кусочно-постоянными базисными функциями [4–6]. Несмотря на простоту и понятность использования таких преобразований, они обладают и рядом недостатков. В качестве основного можно привести неравномерное распределение энергии по базису преобразования, что приводит к существенным пульсациям энергии в канале передачи.

В данной работе предлагается построить ортогональное преобразование на основе псевдослучайных последовательностей (далее – ПСП), порождаемых регистром сдвига с линейной обратной связью. Случайность смены состояний (шумоподобность) в таких последовательностях гарантирует отсутствие резких перепадов мощности на интервале преобразования и позволит гарантировать отсутствие перегрузок в канале. Кроме того, применение такого подхода может решить задачу ограничения доступа в конфиденциальных системах.

© Светлов Г. В., Суменков Н. А., Костров Б. В., Гринченко Н. Н., Трушина Е. А., 2020

Исходной информацией для построения ПСП является образующий многочлен

$$M(x)=\sum_{i=1}^{N} a_i x^i, \qquad (1)$$

где a_N, $a_1 = 1$; $a_i \in \{0,1\}$; N – число разрядов регистра сдвига.

Образующий многочлен должен быть неприводимым и примитивным. Среди множества полиномов, отвечающих этим требованиям, наиболее удобны полиномы, имеющие наименьшее число нулевых членов, что обеспечивает минимальную конфигурацию формирователя ПСП с наименьшим числом суммирований по модулю два в обратных связях. При этом необходимо, чтобы полином задавал начальное состояние ($a_1 = 1$) в младшем разряде, в противном случае образуется нулевая последовательность.

Любому образующему полиному можно поставить в соответствие генератор Фибоначчи [7]

$$\begin{cases} g_1(k+1)=\sum_{i=1}^{N} a_i g_i(k); \\ g_i(k+1)=g_{j-1}(t),\ j=\overline{2,N}, \end{cases} \qquad (2)$$

где $g_i(t)$ – состояние i-го разряда регистра сдвига на такте k; $i=\overline{1,N}$; $k=\overline{1,2^N-1}$.

В матричном виде алгоритм формирования последовательности будет

$$\mathbf{G}(k+1)=\mathbf{\Psi}\cdot\mathbf{G}(k), \qquad (3)$$

где $\mathbf{\Psi}=\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{N-1} & a_N \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Рассмотрим пример.

$$M(x)=x^3+x^2+1.$$

В соответствии с (2) можно записать:

$$\begin{aligned} g_1(k+1) &= a_1 g_1(k)+a_2 g_2(k)+a_3 g_3(k); \\ g_2(k+1) &= g_1(k); \\ g_3(k+1) &= g_2(k). \end{aligned} \qquad (4)$$

Или в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} g_1(k+1) \\ g_2(k+1) \\ g_3(k+1) \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} g_1(k) \\ g_2(k) \\ g_3(k) \end{bmatrix} \qquad (5)$$

Таблица состояний разрядов регистра, построенная в соответствии с (4) и (5), приведена ниже.

Как видно из таблицы, полный цикл последовательности состоит из 8 тактов, 7 из которых не повторяются, 8-й такт является началом нового периода. ПСП снимается с разряда g_3. Ее период равен 2^N-1, N – число разрядов.

Рассмотренные последовательности обладают следующими свойствами.

1. Период ПСП, формируемый в соответствии с образующим полиномом $M(x)$, равен

$$M=2^N-1. \qquad (6)$$

2. Для заданного $M(x)$ существует M различных ПСП, полученных путем цикличного сдвига исходной последовательности.

3. Число единичных символов на периоде ПСП равно 2^{N-1}, а нулевых $2^{N-1}-1$.

4. В ПСП серии из одного символа встречаются 2^{N-2} раз, из двух одинаковых символов – 2^{N-3} раз и так далее. Серии из $N-1$ нулей и N единиц присутствуют только один раз.

5. Автокорреляционная функция полученной последовательности определяется выражением:

Таблица

Состояния разрядов регистра сдвига

k	g_1	g_2	g_3
1	1	0	0
2	0	1	0
3	1	0	1
4	1	1	0
5	1	1	1
6	0	1	1
7	0	0	1
8	1	0	0

$$R_M(\tau)=\begin{cases}1, \textit{при } \tau=0;\\ -1/M, \textit{при } \tau\neq 0.\end{cases} \qquad (7)$$

6. Децимация последовательности по четному индексу $j = M - 1$ приводит к инверсии исходной последовательности, которая соответствует последовательности, порождаемой полиномом $M^{-1}(x)$, обратным $M(x)$. $\{b_i\} = \{c_{-i}\}$, где b_i – инверсная ПСП, c_i – прямая.

Рассмотренные ПСП принято называть последовательностями максимального периода, или М-последовательностями.

Количество различных полиномов $M(x)$ порождающих М-последовательность, зависит от ее периода $M = 2^n - 1$. Оно быстро возрастает с увеличением n. Для $n = 8$ количество порождающих полиномов равно 16 [8]. Конкретный вид получаемой последовательности будет зависеть еще и от начальных условий, заданных для инициализации формирования последовательности. При $n = 8$ количество начальных условий равно 255. Таким образом, при заданном $n = 8$ количество разновидностей М-последовательностей составляет 16 $(2^n - 1) \approx 4000$. С увеличением n это число быстро возрастает (при $n = 10$, например, до 60 000).

Таким образом, используя механизм формирования [7] последовательностей максимального периода, можно построить достаточно большое количество ортогональных преобразований, которые можно использовать для преобразования сигналов при передаче их по каналам связи [9].

Рассмотрим процесс формирования матрицы преобразования. Как следует из свойства 2, необходимое количество строк матрицы может быть получено путем цикличного сдвига исходной последовательности. Количество строк в такой матрице будет равно периоду $M = 2^n - 1$, и матрица будет иметь размер $M \times M$. Все строки и столбцы данной матрицы будут представлять собой М-последовательности. Пример формирования такой матрицы представлен на рисунке 1а. Данная матрица обладает свойством симметричности строк и столбцов в соответствии со свойством 5. Автокорреляционная функция при совпадающих строках и столбцах равна 1. Однако при несовпадении строк и столбцов значение автокорреляционной функции равно $-1/M$. Результат произведения матрицы $\mathbf{M}$ на $\mathbf{M}^{\mathbf{T}}$, где $\mathbf{M}^{\mathbf{T}}$ – транспонированная матрица, приведен на рисунке 1б. Результат умножения не является единичной матрицей, что не соответствует признакам ортогонального преобразования.

Для выполнения условий ортогональности необходимо:

- выровнять количество нулевых и единичных символов на периоде ПСП, сделав его равным 2^{n-1};
- внести знакопеременность в ПСП для обеспечения нулевой постоянной составляющей в строках и столбцах матрицы.

Сформированная таким образом матрица преобразования $\mathbf{M}_0^8$ и соответствующее ей произведение на транспонированную $\mathbf{M}_0^{8\mathbf{T}}$ приведены на рисунке 2.

$$\mathbf{M}=\begin{bmatrix}0&0&1&0&1&1&1\\0&1&0&1&1&1&0\\1&0&1&1&1&0&0\\0&1&1&1&0&0&1\\1&1&1&0&0&1&0\\1&1&0&0&1&0&1\\1&0&0&1&0&1&1\end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}\cdot\mathbf{M}^{\mathbf{T}}=\begin{bmatrix}7&-1&-1&-1&-1&-1&-1\\-1&7&-1&-1&-1&-1&-1\\-1&-1&7&-1&-1&-1&-1\\-1&-1&-1&7&-1&-1&-1\\-1&-1&-1&-1&7&-1&-1\\-1&-1&-1&-1&-1&7&-1\\-1&-1&-1&-1&-1&-1&7\end{bmatrix}$$

а б

Рис. 1. Матрица получения сдвигом влево последовательности при $M(x) = x^3 + x^2 + 1$ и начальном состоянии 100(4) (а) и результат умножения на транспонированную матрицу (б)

$$\mathbf{M}_0^8 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}; \qquad \mathbf{M}_0^8 \cdot \mathbf{M}_0^{8\mathbf{T}} = \frac{1}{8}\begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$$

а б

Рис. 2. Ортогональная матрица, соответствующая $M(x) = x^3 + x^2 + 1$ и начальному состоянию 100(4) (а), и результат умножения $\mathbf{M_0} \cdot \mathbf{M_0^T}$ (б)

а б в

Рис. 3. Использование ортогонального преобразования для передачи спутникового изображения по каналу с шумами: исходное изображение (а), результат воздействия шумов (СКО = 40) при передаче без преобразования (б) и результат передачи с преобразованием (СКО = 2,55) (в)

Как видно из рисунка 2, матрица $\mathbf{M}_0^8$, построенная для примера, приведенного выше, соответствует требованиям ортогональности и может быть использована для преобразования сигналов. Количество таких матриц зависит от необходимого числа n и соответствует количеству М-последовательностей, которые могут быть построены на основе разнообразных образующих полиномов. В общем случае можно записать пару преобразования:

$$\begin{cases} \mathbf{F_c^n} = \mathbf{M_0^n B_c^n} \text{ – } \textit{прямое преобразование}; \\ \mathbf{B_c^n} = \mathbf{F_c^n M_0^{nT}} \text{ – } \textit{обратное преобразование}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\mathbf{F_c^n}$ – матрица (матрица-строка) коэффициентов преобразования сигнала; $\mathbf{B_c^n}$ – матрица (матрица-столбец) сигнала; $\mathbf{M_0^{nT}}$ – транспонированная матрица преобразования.

На рисунке 3 представлен результат использования данного подхода для моделирования процесса передачи спутниковых изображений [10–12] по каналу связи. Образующий полином $M(x) = x^7 + x^5 + x^4 + x^3 + 1$, начальное состояние 10101101(173). В качестве сигнальной матрицы $\mathbf{B_c^n}$ выступает матрица яркостей изображения. Поскольку матрица $\mathbf{M_0}$ – симметричная, то в операции транспонирования необходимости нет.

$$\mathbf{F_n^n} = \mathbf{M_0^n B_n^n}; \ \mathbf{B_n^n F_n^n} = \mathbf{F_n^n M_0^{nT}}. \quad (9)$$

Приведенный пример показывает, что применение шумоподобных ортогональных преобразований имеет перспективу для построения систем помехоустойчивого кодирования и защиты информации в конфиденциальных системах.

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006. 616 с.

2. Злобин В. К., Костров Б. В., Саблина В. А. Место и роль методов секвентного анализа в обработке аэрокосмических изображений // Радиотехника. 2012. № 3. С. 64–72.

3. Костров Б. В., Саблина В. А. Адаптивная фильтрация изображений со структурными искажениями // Цифровая обработка сигналов. 2008. № 4. С. 49–53.

4. Ахмед Н., Рао К. Р. Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / под ред. И. Б. Фоменко. М.: Связь, 1980. 248 с.

5. Злобин В. К., Костров Б. В., Свирина А. Г. Спектральный анализ изображений в конечных базисах. М.: КУРС: ИНФРА, 2016. 172 с.

6. Костров Б. В., Бастрычкин А. С. Сжатие изображений на основе ортогональных преобразований // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 9. С. 113–118.

7. Гарифуллина З. Р., Иванов М. А., Рябков В. Е., Чугунков И. В. Способ формирования нелинейных М-последовательностей // Безопасность информационных технологий. 2011. № 2. С. 31–36.

8. Захаров И. Д., Ожиганов А. А. Использование порождающих полиномов М-последовательностей при построении псевдослучайных кодовых шкал // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. №. 6. С. 49–55.

9. Костров Б. В., Соломенцева Н. И. Моделирование канала связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 2. С. 95–100.

10. Костров Б. В. Особенности формирования аэрокосмических изображений радиотехническими системами // Проектирование и технология электронных средств. 2011. № 1. С. 41–43.

11. Костров Б. В., Гринченко Н. Н., Степанов Д. С., Упакова А. Г. Алгоритм передачи изображения с восстановлением постоянной составляющей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 9. Ч. 1. С. 244–249.

12. Костров Б. В., Упакова А. Г. Квазидвумерная фильтрация синхронных помех на изображении // Проектирование и технология электронных средств. 2012. № 1. С. 32–35.

Об авторах

Светлов Геннадий Валентинович – кандидат экономических наук, генеральный директор Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Российская Федерация.
Область научных интересов: системы повышения качества разработки и эксплуатации сложных систем.

Суменков Николай Александрович – доктор технических наук, заместитель генерального директора – главный инженер Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Российская Федерация
Область научных интересов: эксплуатация сложных радиотехнических комплексов.

Костров Борис Васильевич – доктор технических наук, профессор, заместитель начальника отдела автоматизированной системы управления Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Российская Федерация.
Область научных интересов: обработка изображений, искусственный интеллект, информационные технологии.

Гринченко Наталья Николаевна – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер-программист КБ «Сигма» Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Российская Федерация.
Область научных интересов: обработка изображений, искусственный интеллект, информационные технологии.

Трушина Евгения Александровна – аспирант Рязанского государственного радиотехнического университета, Рязань, Российская Федерация.
Область научных интересов: применение информационных технологий и мультимедийных систем в обработке изображений.

Construction of an orthogonal basis based on pseudorandom sequences

Svetlov G. V.[1], Sumenkov N. A.[1], Kostrov B. V.[1], Grinchenko N. N.[1], Trushina E. A.[2]

[1] *Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation*

[2] *Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russian Federation*

In this paper, we consider an approach to constructing an orthogonal transform based on pseudorandom sequences with the purpose of providing noiseless coding. This approach ensures the absence of congestion in the channel thus allowing the problem of restricted access in confidential systems to be solved.

Keywords: pseudorandom sequence, orthogonal basis, noiseless coding, digital information transmission systems

Information about the authors

Svetlov Gennady Valentinovich – Cand. Sci. (Economics), General Director, JSC Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation

Sumenkov Nikolay Aleksandrovich – Dr. Sci. (Engineering), Deputy General Director, Chief Engineer, JSC Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation
Research interests: operation of complex radio engineering systems.

Kostrov Boris Vasilievich – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy Head, Automated Control System Department, JSC Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation.
Research interests: image processing, artificial intelligence, information technologies

Grinchenko Natalya Nikolaevna – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Leading Software Engineer, Sigma Design Bureau, JSC Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation.
Research interests: application of information technologies and multimedia systems in image processing

Trushina Evgeniya Aleksandrovna – Postgraduate Researcher, Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russian Federation.
Research interests: application of information technologies and multimedia systems in image processing.

https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-101-107
УДК 004.9: 681.518

Разработка математической модели процесса передачи ландшафтных изображений через зашумленный канал связи

Б. В. Костров, Н. Н. Гринченко, Н. И. Хизриева, Н. С. Фокина

Акционерное общество «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Российская Федерация

Обосновывается необходимость моделирования систем передачи ландшафтных изображений по каналам связи. Разработаны алгоритмы преобразования изображений для процесса моделирования. Также разработан алгоритм генерации случайных помех в канале связи, основанный на распределении Пуассона. Разработана модель, которая может использоваться для решения множества задач передачи данных ДЗЗ.

Ключевые слова: аэрокосмическое изображение, моделирование канала связи, распределение Пуассона

Для цитирования: Костров Б. В., Гринченко Н. Н., Хизриева Н. И., Фокина Н. С. Разработка математической модели процесса передачи ландшафтных изображений через зашумленный канал связи // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 4. С. 101–107. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-101-107

For citation: Kostrov B. V., Grinchenko N. N., Khizrieva N. I., Fokina N. S. Development of a mathematical model of the process of transferring landscape images through a noisy communication channel // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 4. P. 101–107. https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-4-101-107

Поступила 24.11.2020 *Отрецензирована* 04.12.2020 *Одобрена* 04.12.2020 *Опубликована* 30.12.2020

В настоящее время для защиты передаваемой информации от ошибок используются методы помехоустойчивого кодирования, направленные на обнаружение и исправление ошибок, возникающих в ходе передачи данных по каналам связи. При проектировании системы передачи данных одним из важных этапов является выбор соответствующего способа кодирования из большого количества существующих. Для упрощения этой задачи зачастую используется процесс моделирования, в ходе которого используется модель системы передачи данных, над которой проводятся экспериментальные исследования и осуществляется поиск наиболее подходящего метода помехоустойчивого кодирования и его параметров для конкретной ситуации [1, 2].

В процессе моделирования строится математическая модель, которая является и средством, и объектом экспериментов. С помощью выявленных математических зависимостей необходимо имитировать прохождение всех этапов работы системы. На вход модели подаются некоторые исходные данные, задаются параметры, которые требуют корректировки. На выходе получается некоторый результат, который может соответствовать ожиданиям или же, наоборот, быть прямо противоположным. В зависимости от этого корректируются параметры моделирования, выявляются новые зависимости. В ходе процесса моделирования могут также возникнуть новые взаимные зависимости параметров и исключительные ситуации, которые не были обнаружены на этапе формирования гипотезы.

В качестве объекта моделирования выбран процесс передачи данных по зашумленному каналу связи. При передаче изображений по каналу связи возникают ошибки [3]. Они выражаются в виде искаженных пикселей или областей на изображении [4]. Сами изображения передаются построчно, следовательно,

© Костров Б. В., Гринченко Н. Н., Хизриева Н. И., Фокина Н. С., 2020

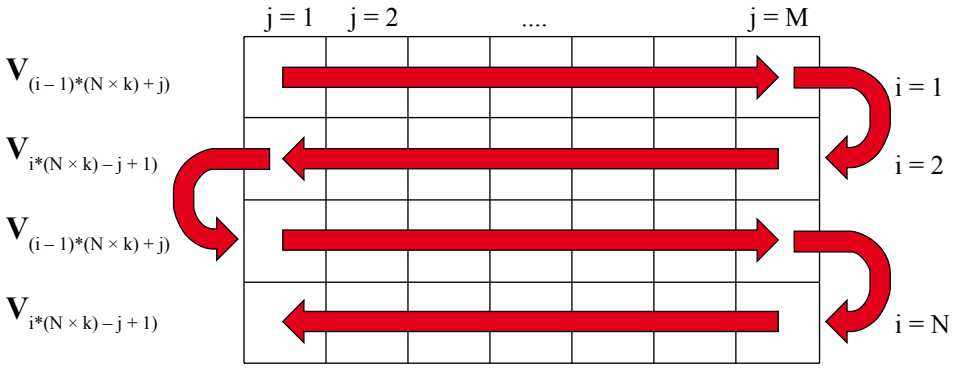


Рис. 1. Прямое преобразование

перед началом передачи их необходимо привести к векторному виду. Поскольку по каналу связи данные передаются в двоичном виде, для моделирования работы канала необходимо представить изображения в виде бинарных последовательностей [5]. Для этого были разработаны алгоритм преобразования изображения в бинарный вектор и алгоритм для обратного преобразования.

При использовании алгоритма прямого преобразования необходимо построчно проходить по матрице исходного изображения и чередовать перенос элементов в вектор слева направо и справа налево в зависимости от номера строки. Предполагается, что в этом случае на вертикальных границах изображения не будет разрыва в значениях яркостей пикселей и трафик в сети не будет пульсировать.

Формула преобразования может быть записана как:

$$\mathbf{V} = \begin{cases} \mathbf{V}_{(i-1)*(N\times k)+j)} = \mathbf{M}_{i,j}, i \oplus 2 = 1 \\ \mathbf{V}_{i*(N\times k)-j+1)} = \mathbf{M}_{i,j}, i \oplus 2 = 0 \end{cases}, \qquad (1)$$

где i и j – номера строки и столбца матрицы исходного изображения, N – количество строк в исходном изображении, k – количество разрядов для представления пикселя изображения, M – матрица исходного изображения, V – результирующий вектор.

Схематическое изображение преобразования представлено на рисунках 1 и 2.

Алгоритм прямого преобразования состоит из следующих этапов:

1. Элементы матрицы исходного изображения grayImg заменяются своими двоичными представлениями в матрице binMatrix размером M×(N×k), где k – максимальное

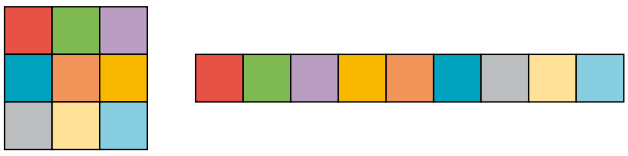


Рис. 2. Прямое преобразование –порядок следования пикселей в векторе передачи

количество бинарных символов, необходимых для представления элементов матрицы grayImg, а M×N – размер исходного изображения.

2. Генерируется вектор binArray длиной M×(N×k), заполненный нулями.

3. В цикле необходимо пройти по всем строкам матрицы binMatrix. Если строка нечетная, то элементы строки матрицы последовательно с 1-го по (N×k) заносятся в вектор. Если строка четная, то элементы заносятся в вектор, начиная с последнего в строке, то есть с (N×k), до 1-го.

В ходе передачи информации в СПД канал связи подвергается различным внешним воздействиям, помехам. В результате возникают искажения сигнала, которые негативно влияют на качество передаваемой по каналу информации. Зачастую помехи возникают случайным образом. Поэтому в процессе моделирования необходимо выбрать соответствующий закон распределения случайной величины (РСВ), на основании которого будут генерироваться помехи в модели канала связи. По условиям моделирования изображение передается по каналу связи в бинарном виде. Соответственно, помехи также генерируются в бинарном виде. Из этого следует, что случайная величина в данном случае принимает значение из множества {0; 1}, что означает, что данная случайная величина

является дискретной [6]. Для моделирования процесса генерации помех в канале связи было решено использовать распределение Пуассона. Данное распределение является дискретным и представляет собой один из предельных случаев биноминального распределения [7]. Посредством распределения Пуассона можно смоделировать возникновение более редких событий, для описания которых не подходит нормальное распределение. Формула вероятности в данном случае имеет вид:

$$P(\xi = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}, \qquad (2)$$

где $k = 0, 1, 2\ldots$, λ – задаваемый параметр.

Результаты, получаемые в ходе вычислений вероятностей по данному распределению, наиболее близки к реальной картине возникновения искажений в канале связи.

Алгоритм генерации бинарного вектора помех:

1. Задание параметра λ. Для наибольшего соответствия действительности следует удовлетворять неравенству $0{,}01 \le \lambda \le 0{,}5$.

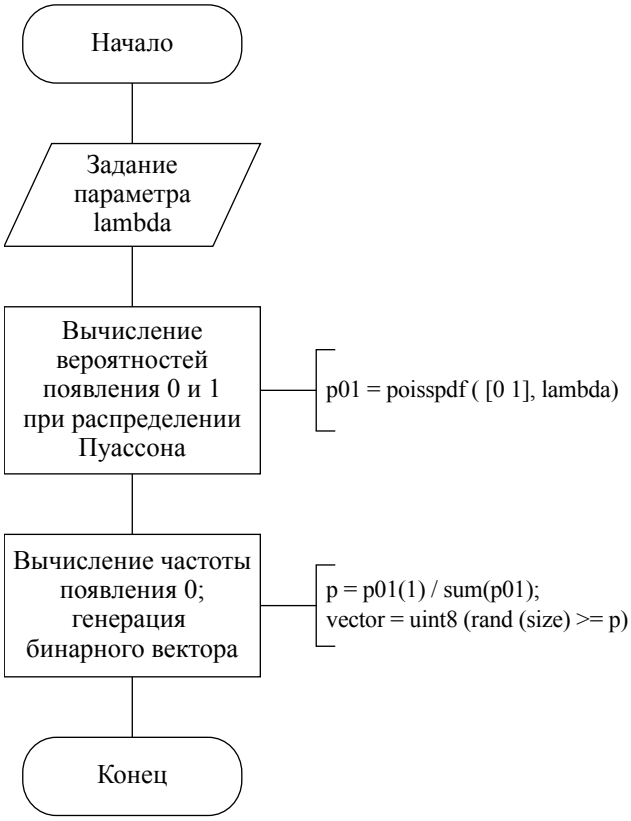


Рис. 3. Схема алгоритма генерации вектора помех

2. Вычисление вероятностей P1 и P2 появления 0 и 1 при распределении Пуассона с заданным λ.

3. Вычисление отношения P вероятности появления 0 к сумме вероятностей P1 и P2.

4. Генерация 0 и 1 случайным образом, при этом вероятность появления 0 равна P.

5. Запись полученных элементов в вектор заданной длины.

Алгоритм наложения вектора помехи:

1. На вход алгоритма подаются вектор изображения imgVector и вектор помехи noiseVector длиной N.

2. Создается результирующий вектор noisedVector, равный вектору изображения.

3. В цикле результирующий вектор и вектор изображения суммируются поэлементно. Элементы, равные 2, заменяются на 0.

На рисунке 3 изображена схема алгоритма генерации бинарного вектора помех, а на рисунке 4 – схема алгоритма наложения помехи на вектор изображения.

Для обратного преобразования полученного вектора в матричный вид необходимо построчно проходить по матрице результирующего изображения и чередовать перенос элементов в нее из вектора слева направо и справа налево в зависимости от номера строки (рис. 5). В математическом виде это можно представить следующим образом:

$$\mathbf{M}_{i,\mathrm{j}} = \begin{cases} \mathbf{V}_{(\mathrm{i}-1)*(\mathrm{N}\times\mathrm{k})+\mathrm{j})}, i \oplus 2 = 1 \\ \mathbf{V}_{\mathrm{i}*(\mathrm{N}\times\mathrm{k})-\mathrm{j}+1)}, i \oplus 2 = 0 \end{cases}, \qquad (3)$$

где i и j – номера строки и столбца матрицы результирующего изображения, N – количество строк в результирующем изображении, k – количество разрядов для представления пикселя изображения, M – матрица результирующего изображения, V – вектор с наложенной помехой.

Алгоритм обратного преобразования (рис. 6):

1. Генерируется матрица binMatrix размером M×(N×k), заполненная нулями.

2. В цикле необходимо пройти по всем строкам матрицы binMatrix. Если строка нечетная, то элементы из вектора последовательно заносятся в строку матрицы с 1-го по (N×k). Если строка четная, то элементы из вектора

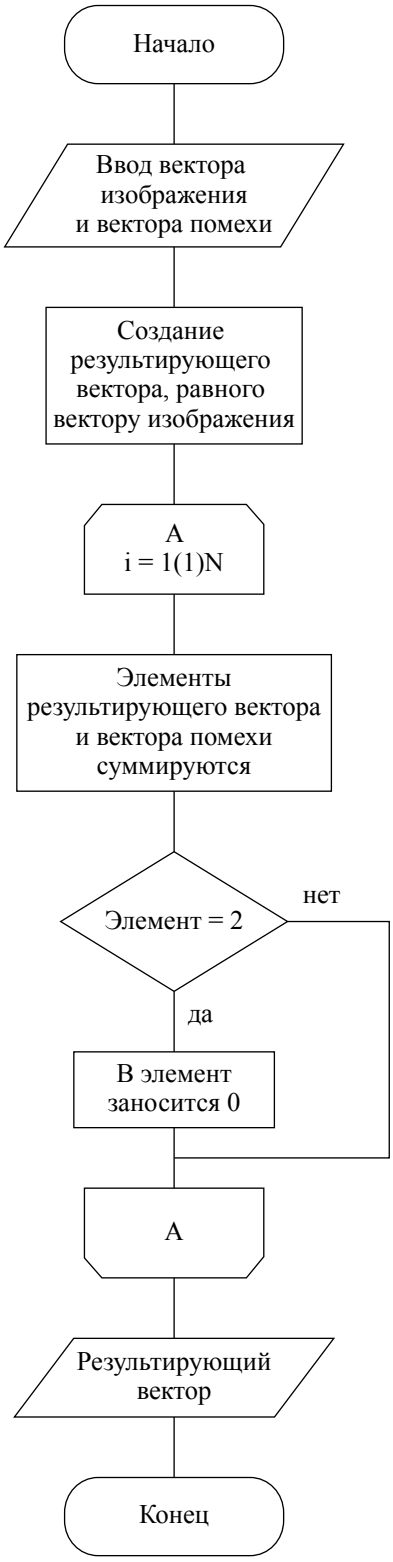


Рис. 4. Схема алгоритма наложения вектора помехи

заносятся в строку, начиная с последнего индекса строки, то есть с (N×k), до 1-го.

3. Элементы матрицы binMatrix записываются в десятичном виде и заносятся в матрицу matrix размером M×N. Эта матрица и является изображением.

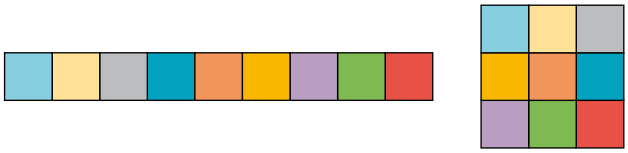


Рис. 5. Обратное преобразование

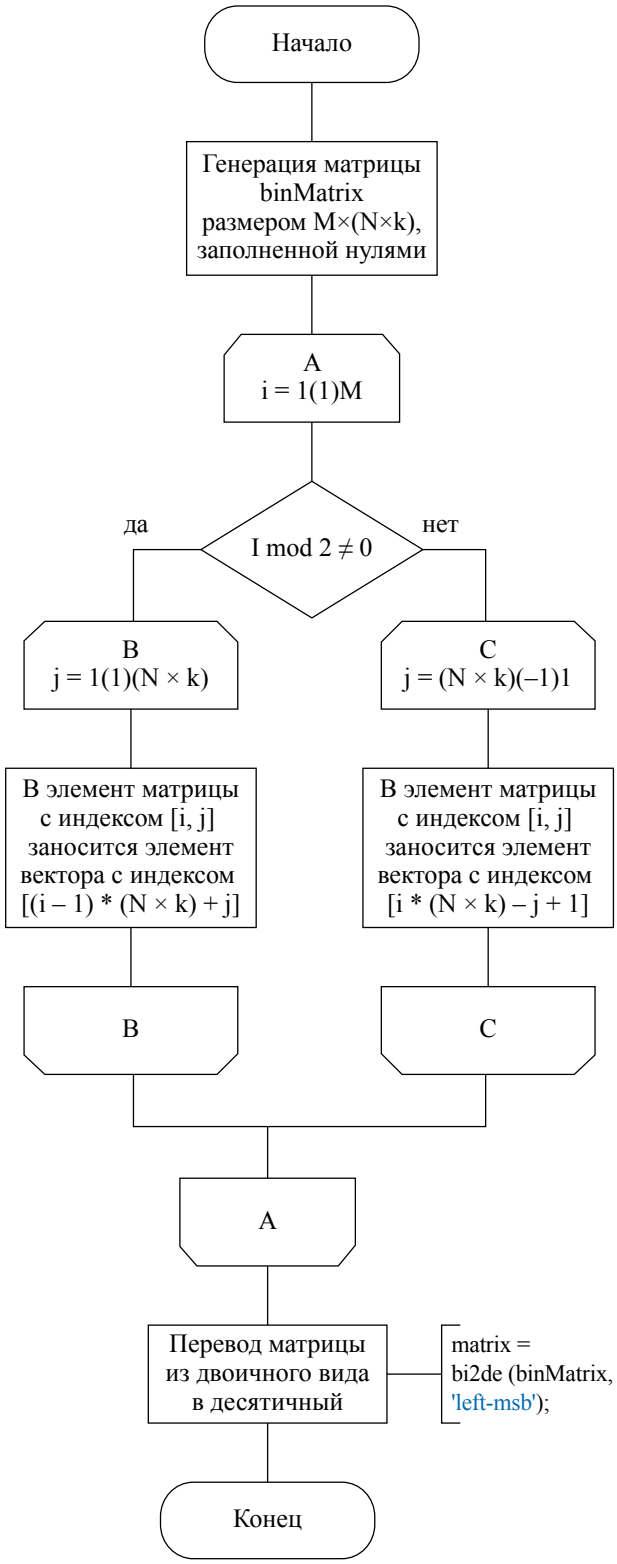


Рис. 6. Схема алгоритма обратного преобразования

Рис. 7. Исходное изображение

Рис. 8. Результат для помехи с λ = 0,0005

Рис. 9. Результат для помехи с λ = 0,01

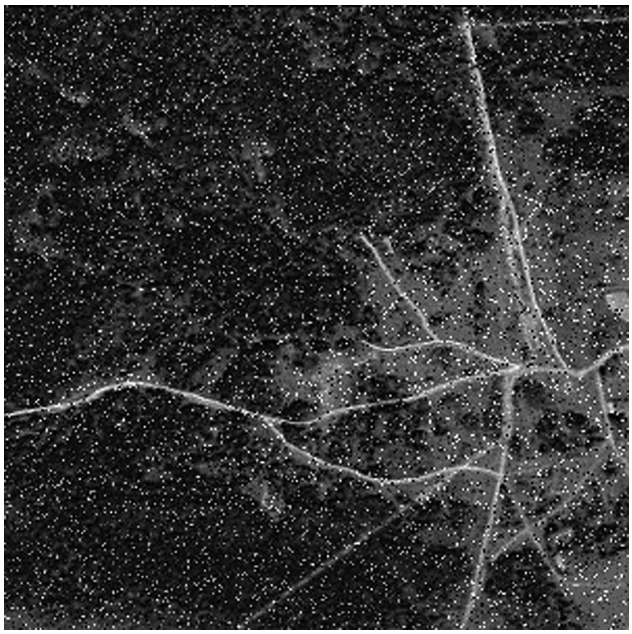


Рис. 10. Результат для помехи с λ = 0,05

На рисунке 7 представлено исходное изображение, а на рисунках 8–10 представлены результаты реализации данных алгоритмов в системе программирования MATLAB [8]. В процессе моделирования величина помехи задается с помощью специального параметра λ.

Данная модель позволяет задавать различную частоту возникновения ошибки в бинарном канале связи, что дает возможность оценивать эффективность тех или иных методов помехоустойчивого кодирования применительно к передаче данных дистанционного зондирования Земли. Разработанная модель может использоваться в дальнейшем и для решения других задач эффективной передачи ландшафтных изображений по каналам связи.

Список литературы

1. Ежова К. В. Моделирование и обработка изображений. Учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 93 с.

2. Костров Б. В., Соломенцева Н. И. Моделирование канала связи // Известия ТулГУ. Технические науки 2017. Вып. 2. С. 95–100.

3. Костров Б. В. Основы цифровой передачи и кодирования информации. Рязань: РГРТУ, 2010. 196 с.
4. Гринченко Н. Н., Королева Е. П., Хизриева Н. И. Повышение скорости работы декодера в системах передачи данных за счет использования параллельных вычислений // Известия ТулГУ. Технические науки 2019. Вып. 3. С. 217–222.
5. Костров Б. В., Бастрычкин А. С., Костров Б. А., Степанов Д. С. Протокол передачи изображений по каналу связи // Интеллектуальные и информационные системы: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Тульский государственный университет. Тула, 2016. С. 220–225.
6. Шведов А. С. Теория вероятностей и математическая статистика. М: ГУ-ВШЭ, 2005. 254 с.
7. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 543 с.
8. Потемкин В. Г. Вычисления в среде MATLAB. М.: Диалог-МИФИ, 2004. 720 с.

Об авторах

Костров Борис Васильевич – доктор технических наук, профессор, начальник сектора автоматизации планирования и контроля КБ «Сигма» Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань Российская Федерация.
Область научных интересов: обработка изображений, искусственный интеллект, информационные технологии.

Гринченко Наталья Николаевна – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер-программист КБ «Сигма» Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Российская Федерация.
Область научных интересов: применение информационных технологий и мультимедийных систем в обработке изображений.

Хизриева Наталья Илесовна – инженер-программист КБ «Сигма» Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Российская Федерация.
Область научных интересов: применение информационных технологий и мультимедийных систем в обработке изображений.

Фокина Наталья Сергеевна – заместитель генерального директора по общим вопросам Акционерного общества «Рязанское производственно-техническое предприятие «Гранит», Рязань, Российская Федерация.
Область научных интересов: применение информационных технологий и мультимедийных систем в обработке изображений.

Development of a mathematical model of the process of transferring landscape images through a noisy communication channel

Kostrov B. V., Grinchenko N. N., Khizrieva N. I., Fokina N. S.

JSC Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation

The necessity of modeling systems for transmitting landscape images through communication channels is substantiated. Algorithms for transforming images for the modeling process have been developed. An algorithm for generating random noise in the communication channel based on the Poisson distribution has also been developed. A model has been developed that can be used to solve a variety of remote sensing data transmission problems.

Keywords: aerospace image, communication channel modeling, Poisson distribution.

Information about the authors

Kostrov Boris Vasilievich – Dr. Sci. (Engineering), Prof., Head of the Planning and Control Automation Sector, Sigma Design Bureau, JSC Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation.
Research interests: image processing, artificial intelligence, information technologies.

Grinchenko Natalya Nikolaevna – Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., Leading Software Engineer, Sigma Design Bureau, JSC Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation.
Research interests: application of information technologies and multimedia systems in image processing.

Khizrieva Natalya Ilesovna – Software Engineer, Sigma Design Bureau, JSC Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation.
Research interests: application of information technology and multimedia systems in image processing.

Fokina Natalya Sergeevna – Deputy General Director for General Issues, JSC Ryazan Industrial and Technical Enterprise 'Granit', Ryazan, Russian Federation.
Research interests: application of information technologies and multimedia systems in image processing.