

УДК 621.43.019.4:621.43.019.8

О.В. Галак

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПУЛЬСУЮЧИХ ДЕТОНАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ. ТРУДНОЩІ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

Використання пульсуючих детонаційних двигунів у майбутньому надасть можливість використовувати компактні масо габаритні установки на суші, у воді, в повітрі, а також у космосі які за економічністю суттєво відрізняються від газотурбінних. Одним із питань, які потребують вирішення, є зменшення втрат енергії на пряме ініціювання детонації.

Ключові слова: детонаційний двигун, детонація.

Вступ

Постановка проблеми. Гіперзвукові і детонаційні технології відносяться до критичних технологій. Дані технології можуть бути реалізовані в пульсуючих детонаційних системах, наприклад, пульсуючих детонаційних двигунах (ПДД), системах ініціювання об'ємного вибуху. Високі техніко-експлуатаційні характеристики ПДД зумовлюють широкі можливості по їх застосуванню в бойових системах, насамперед в силових установках для крилатих ракет і літаків.

Основною проблемою практичної реалізації пульсуючих детонаційних систем є періодичне ініціювання детонації. На теперішній час пряме ініціювання детонації здійснюється потужним іскровим розрядом. Але через високі витрати енергії на ініціювання детонації в реальних умовах, застосування іскрового розряду стає недоцільним в даних системах. Відомо, що коефіцієнт перетворення енергії іскрового розряду в ударну хвилю, що забезпечує ініціювання детонації, складає не більше 1 %. Тому створення технології, що забезпечує підвищення коефіцієнта перетворення енергії іскрового розряду в ударну хвилю, відносяться до технологій подвійного призначення. Таким чином, задача зниження потреб потужності, яка споживається в системі ініціювання детонації за рахунок зменшення втрат енергії розряду [3], є актуальною.

Метою даної роботи є аналіз літературних джерел щодо розвитку пульсуючих детонаційних двигунів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Починаючи з 1950-х років в різних державах, у тому числі в Радянському Союзі, створювалися моделі пульсуючих детонаційних камер згоряння. У ряді інститутів Російської Федерації (Центральному інституті авіаційного моторобудування (ЦІАМ), Центральному Аерогідродинамічному інституті (ЦАГІ), інституті хімічної фізики ім. Н.Н. Семенова Російської академії наук (ІХФ РАН) і ОКБ (включаючи ОКБ Самарського науково-

технічного комплексу імені Н.Д. Кузнецова), у ВАТ КБ "Електроприлад" проводилися і проводяться дослідження дослідних зразків ПДД.

Найбільші результати в напрямку створення працюючого ПДД досягнуті в США. НДЦ ім. Глена (США) займає лідируюче положення в питаннях досліджень проблем детонаційного горіння. Результати цих робіт майже не публікуються. В останні десятиліття дослідження активізувалися у великих західних компаніях, таких як General Electric, Pratt - Whitney, Lockheed Martin, які виробляють двигуни для літальних апаратів різного призначення. Довгостроковий бюджет досліджень в області пульсуючої детонації в кожній з цих компаній становив приблизно від 5 млрд. до 6 млрд. доларів. Створені прототипи детонаційних двигунів, які можуть розміщуватися на літаках різного призначення. У 2005 році перші гіперзвукові апарати були запущені в Австралії та США в рамках програми IHPRT "Integrated High Payoff Rocket Propulsion Technology Program" лабораторією AFRL "Air Force Research Laboratory's" у співпраці з фірмою "Adroit Systems Inc". Лабораторія AFRL проектує двигуни двох типів: повітряно-реактивного зі споживанням атмосферного кисню PDE (Pulse Detonation Engine) і ракетного PDRE (Pulse Detonation Rocket Engine). Перші силові установки, що працюють на вуглеводневому пальному, здатні ефективно функціонувати починаючи від моменту зльоту до швидкостей $M = 3-4$, що робить їх особливо привабливими для користування в складі бойових крилатих ракет. Двигунів PDRE призначаються в основному для космічних польотів. Зацікавленість в подібних рухових установках проявляють не тільки повітряні сили, а й NASA. Кожне з цих відомств виділив на даний проект приблизно по 1,5 млн. доларів. Компанія Pratt and Whitney на початку 2001 р. викупила у фірми ASI її відділення Astronautics and Aerosciences Div і створила спеціалізований центр Pratt and Whitney Seattle Aerosciences Center. Одним з перших проектів Центру стало створення експериментального п'ятикамерного двигуна PDE, перші стендові запуски якого відбулися

на початку 2003 р. Даний проєкт фінансується ВМС, які планують використовувати подібні силові установки у складі крилатих ракет та безпілотних літальних апаратів. Найбільш пріоритетним завданням проєкту є створення проти корабельної ракети з крейсерською швидкістю польоту $M = 2,5-4$ на висоті 12,2 км і дальністю дії 1300 – 1500 км. Фахівці ВМС залучили до її реалізації практично всі організації, що займаються детонаційними двигунами. Крім компанії Pratt and Whitney, в роботах беруть участь компанії United Technologies і Boeing Phantom Works.

Перевагою детонаційного режиму горіння над дефлаграційним є більш швидке виділення енергії, що дозволяє проєктувати пристрої з високою питомою потужністю. При детонаційному спалюванні киснево-водневої газової суміші питомі потужності енерговиділення можуть на порядок перевершувати питому потужність ракетних киснево-водневих двигунів. Температуру і тиск продуктів згорання при детонаційному горінні палива в кілька разів вище, ніж при звичайному спалюванні. Крім того, в пульсуючому детонаційному пристрої використовується цикл, що перевершує за своїми параметрами термодинамічний цикл при постійному обсязі.

В роботі [4] зазначається, що конструктивні рішення в авіадвигунобудуванні (рис. 1) впритул наблизилися до меж їх можливостей внаслідок обмежень при використанні освоєного термодинамічного циклу з постійним тиском робочого процесу і малих швидкостей в камері згорання (цикл Брайтона).



Рис. 1. Макетний зразок ПДД малої тяги, розроблений у ВАТ КБ “Електроприлад”

У зв'язку з цим в якості перспективного питання розвитку розглядається можливість розробки тягового пристрою періодичної дії з використанням детонаційного горіння [4]. Такий напрям розвитку пов'язують з організацією горіння при надзвучових швидкостях в термодинамічному циклі, близькому до $V = \text{const}$ (цикл Гемфрі), простотою конструкції через відсутність рухомих деталей, з низькими витратами на виготовлення і т. п. Передбачається, що даний вид пульсуючого детонаційного двигуна (ПДД) замінить газотурбінні двигуни (ГТД) [5, 6].

Повільне горіння має швидкість від 0,2 до 3 метрів за секунду. Швидкість детонації є майже в тисячу разів більше і становить, як правило, від 1,5 тис. до 3 тис. метрів за секунду. Оскільки це горіння поширюється набагато швидше, ніж швидкість зву-

ку, перед фронтом полум'я завжди можлива сильна ударна хвиля, у якій вихідна горюча суміш стискається до тиску в десятки атмосфер і температур понад 1000 градусів. В цих умовах в речовині стає можливим протікання дуже швидких ланцюгових хімічних реакцій, що призводять до майже миттєвого звільненню енергії, іншими словами, до вибуху.

В даний час розробкою детонаційних реактивних двигунів займаються багато наукових центри і вузи США: Astronautics, NPS, NRL, APRI, MURI, Stanford, USAF RL, NASA Glenn, DARPA - GE C & RD, Combustion Dynamics Ltd, Defense Research Establishments, Suffield and Valcartier, University of Poitiers, University of Texas at Arlington, University of Poitiers, McGill University, Pennsylvania State University, Princeton University.

Для розробки ПДД в ряді країн створені програми, над реалізацією яких працюють видатні організації. Наприклад, в США над цією проблемою вже протягом семи років працюють Міністерство оборони США і NASA, а також 5 аерокосмічних фірм, об'єднаних в групу NASP. Ближче всіх до кінцевої розробки детонаційних двигунів (рис. 2) підійшов концерн ASI “Ambient Sound Investments”, який вважає, що розробка детонаційних двигунів спрямована на забезпечення технічного прориву в ряді галузей: космічної, авіаційної, на транспорті, а також у військовій сфері. ASI вважає, що розробка таких двигунів забезпечить стрибок в області створення повітряно-реактивних двигунів (ПРД) для комерційних і військових цілей.

При великій різноманітності наявних схем ПДД, в них детонаційне горіння передбачається порушувати і здійснювати в детонаційних трубах значною довжини (рис. 1). Але всім цим схемам властивий ряд недоліків. Головними з них є: малі частоти пульсацій (менш 100 Гц), високий рівень шуму і низька економічність. Тому пошук інших способів збудження височастотного детонаційного горіння є актуальним.

В авіаційних областях розробники націлені на використання високооктанових видів вуглеводневого палива. Крім того, проводяться роботи щодо скорочення тимчасового інтервалу між запалюванням і детонацією, що дозволить вкоротити труби, а отже, зменшити масу і збільшити частоту запалювання ПДД.

Можна вважати, що перший діючий ПДД був створений дослідною лабораторією ВВС США спільно з фірмою-підрядником ISSI (рис. 2). В експериментальному ПДД, встановленому на летальному апараті, застосовувалося 4 детонаційні труби. У даних трубах частота імпульсів становила до 20 Гц, що сумарно на 4 трубах забезпечило пульсації силової установки з частотою 80 Гц. Максимальна тяга даного двигуна склала $F = 900$ Н. На даному літальному апараті, використовуючи тягу детонаційного двигуна, забезпечився політ

зі швидкістю 190 км/год. вздовж траси Мохейв (США) на висоті 20 – 30 м над землею. Слід зазначити, що літальний апарат забезпечувався також малогабаритним газотурбінним двигуном JATO [7]. Це свідчить про недостатню тягу, яка розвивається з існуючими детонаційними двигунами. Причина цього пов'язана з недостатньо високою частотою пульсацій, і малим діаметром детонаційних труб. Рішення даної проблеми можливе шляхом забезпечення прямого ініціювання детонації в пульсуючих детонаційних двигунах.



Рис. 2. Чинний зразок ПДД, створений дослідною лабораторією ВВС США спільно з фірмою підрядником ISSI

Фахівці компанії “Дженерал електрик” вважають, що газогенератори, робота яких основана на принципі пульсуючої детонації, можуть в найближчі 10 років знайти застосування в промислово-газотурбінних установках на базі авіаційних двигунів, що дозволить накопичити досвід їх експлуатації до використання в авіації, де воно очікується в найближчі 20 років. У 2003 – 2004 роках випробування ПДД проводились на авіаційному бензині. Під час льотних досліджень ПДД працював на пропані, хоча, як показали дослідження, найкращі характеристики займання і детонації має водень. Незважаючи на те що конкретних планів продовження льотних випробувань ПДД поки немає, фундаментальні дослідження в цій галузі будуть продовжені [1].

В даний час в НДЦ фірми “Дженерал електрик” (штат Нью-Йорк) ведеться підготовка до підключення експериментального трьохтрубного ПДД до невеликої турбіни діаметром 130 мм з метою перевірки, наскільки ефективно осьова турбіна витягує потужність з швидкою пульсації. Кожна з труб запускається по черзі 20 разів на секунду, забезпечуючи частоту роботи 60 Гц. Компанія протягом десяти років виконує дослідження в цій області і за контрактом з НАСА вже продемонструвала перший багато трубний гібридний ПДР-ВМД. У ньому було використано вісім труб з кільцевою схемою розташування в поєднанні з осьовим одноступінчастою турбіною надув. Працюючи на етилені в якості палива, гібридний двигун досягав короточасної дії.

Експериментально встановлено, що пряме ініціювання детонації в паливо повітряних сумішах

вимагає імпульсних джерела енергії, потужність яких занадто висока для практичних пристроїв. Тому, сформовано помилкова думка про недоцільність застосування іскрового розряду як джерело ініціювання в пульсуючих детонаційних системах. Дане думка сформована без розуміння процесів ініціювання детонації іскровим розрядом. Тому, механізми зниження витрат енергії розряду на ініціювання були виявлені.

Викладення основного матеріалу

Основні положення матеріалу статті. Детонаційний двигун працює таким чином (рис. 3): труба заповнюється горючою вуглеводно-кисневою або вуглеводно-повітряною сумішшю (стадія I), потім з боку закритого кінця труби ініціюється детонаційна хвиля (стадія II), яка в подальшому поширюється по горючій суміші (стадія III). Детонаційне згоряння суміші призводить до зростання температури й тиску в утворених продуктах хімічної реакції. У результаті продукти детонації протікають у бік відкритого торця детонаційної труби, і, тим самим, створюють реактивну тягу (стадія IV).

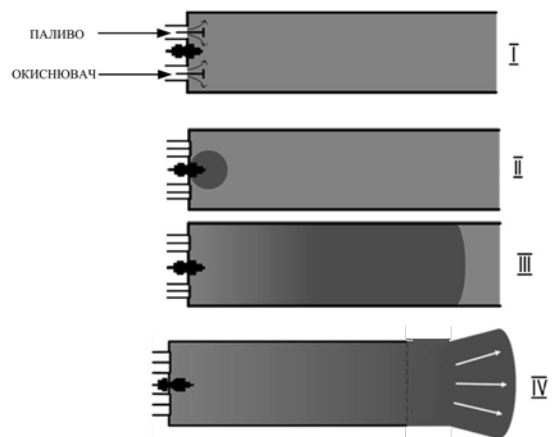


Рис. 3. Цикли роботи пульсуючих детонаційних систем

Повторення детонаційних циклів із високою частотою (близько 100 Гц) може забезпечити практично рівномірну роботу ПДД. Для широкого застосування ПДД необхідно, щоб детонація в камері згоряння розвивалася за досить короткий час на невеликій довжині камери. У цьому разі витрати енергії від зовнішнього (бортового) джерела ініціювання детонації повинні бути мінімальними. Результатом детонаційного згоряння є зростання тиску та температури у продуктах хімічної реакції, серед яких присутні молекули диоксиду вуглецю CO_2 .

Таким чином, детонаційне згоряння палива у пульсуючих детонаційних системах виключає потребу у використанні турбокомпресорів для прокачування детонаційної труби з відповідним зменшенням енерго-

витрат. Періодичний режим роботи пульсуючих детонаційних систем з заповнюванням труби холодною сумішшю забезпечує її часткове охолодження.

Визначено, що енергія імпульсу ініціювання не повинна перевищувати 50 Дж, що можна досягнути, якщо ККД потужних іскрових розрядів не перевищує 1 %. Здійснено математичне моделювання процесу ініціювання детонації [2] та розроблена техніка за рахунок якої зменшені повні витрати енергії іскрового розряду в 3 рази порівняно з існуючими системами. Це дає можливість перейти до практичній реалізації пульсуючого детонаційного двигуна з наступними параметрами (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри роботи
пульсуючої детонаційної системи

Параметри	Значення
Енергія на поодинокі ініціювання детонації, Дж	50
Частота ініціювання детонації, Гц	50
Споживана потужність, кВт	4
Вихідна потужність, кВт	50
Робоча суміш	пропан-кисень

Частота ініціювання детонації практично визначає потужність пульсуючих детонаційних систем. Для детонаційних систем військового призначення частота ініціювання повинна досягати 100 Гц та вище.

Висновки

1. Із аналізу літературних джерел встановлено, що наявні пульсуючі детонаційні двигуни мають ряд суттєвих недоліків, а саме: велику вагу установки; високі витрати енергії; низький коефіцієнт корисної дії.

2. Великі затрати на фінансування – є головним чинником для створення компактної установки за своїми масогабаритними параметрами, вирішенням питання енергоефективності та збільшенням ККД за рахунок більш високої температури.

Список літератури

1. Кайнов О. Разработка в США пульсирующих детонационных двигателей / О. Кайнов // Зарубежное военное обозрение. – 2008. – № 12. – С. 60-62.
2. Корытченко К.В. Моделирование инициирования детонации в водородно-кислородной смеси по экспериментальной динамике ввода энергии в искровой канал / К.В. Корытченко, В.Ф. Болюх, А.В. Галак // Техническая электродинамика: тем. выпуск. – 2011. – С. 281-286.
3. Корытченко К.В. Экспериментальное исследование эффективности ввода энергии в газовом разряде с предионизацией / К.В. Корытченко, В.Ф. Болюх, А.В. Галак // Прикладная радиоэлектроника. – 2011. – Т. 10, № 3. – С. 361-367
4. Стенд огневых испытаний пульсирующих детонационных двигателей / [Говоренко Герман, Поринев Владимир, Тетерин Дмитрий и др.]. – Разработки авиации. Саратов, 2009. – СТА 3. – С. 58-62.
5. Тарасов А.И. Использование пульсирующих детонационных технологий для повышения тяговой эффективности двигателей / А.И. Тарасов, В.А. Щипаков // Общие вопросы двигателестроения. – 2010. – С. – 69-72.
6. Цыбизов Ю.И. Управляемый пульсирующий детонационный двигатель / Ю.И. Цыбизов, Л.П. Шелудько // Авиационная и ракетно-космическая техника. – 2009. – С. 83-88.
7. Biet Jeffrey Ignition by Electric Spark and by Laser-Induced Spark of ultra-lean CH₄/air and CH₄/CO₂/air mixtures // Joffrey Biet, Marie Ndem, Mahmoud Idir, Nabih Chaumeix // ICARE – CNRS UPR 3021 23rd ICDERS. – 2011.

Надійшла до редколегії 25.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Єрмаков, факультет військової підготовки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, Харків.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ТРУДНОСТИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

А.В. Галак

Использование пульсирующих детонационных двигателей в будущем предоставит возможность использовать компактные массогабаритные установки на суше, воде, в воздухе, а также в космосе, которые по экономичности существенно отличаются от газотурбинных. Одним из вопросов, требующих решения, является уменьшение потерь энергии на прямое инициирование детонации.

Ключевые слова: детонационный двигатель, детонация.

PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF PULSE DETONATION ENGINES. DIFFICULTIES OF THEIR REALIZATION

A.V. Galak

Use of pulse detonation engines in the future will provide the opportunity to use the weight and compact installation on land, in water, in the air, and in space which cost significantly differ from the gas turbine. One of the issues that need to be solved are the reduction of energy losses in direct initiation of detonation.

Keywords: detonation engines, detonation.