

УДК 621.454.2.018

А.Н. КОВАЛЕНКО, Ю.В. БЛИШУН

ГП “Конструкторское бюро “Южное” им. М.К. Янгеля”, Днепропетровск, Украина

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ ПО ПРОВЕРКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЫСОТНЫХ ЖРД С ВЫТЕСНИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА ПРИ ВДУВЕ СВОБОДНОГО ГАЗА

Разработана методика для проведения испытаний ЖРД с вдувом нормированного количества свободного гелия в тракты двигателя. Разработана и отработана конструкция установки, обеспечивающая вдув гелия в тракты двигателя. Определена зависимость количества вдуваемого гелия в тракты от давления перед жиклером и давлением в тракте. Выработаны методы контроля прохождения гелия в составе смеси (жидкость - газ) по тракту. Выявлены особенности, требующие учета при проектировании и отработке конструкции стендовой установки для вдува свободного газа в тракты питания ЖРД с токсичными компонентами.

Ключевые слова: вдув, гелий, испытание, камера ЖРД, клапан, ресивер-накопитель.

Введение

При работе двигательных установок с вытеснительной системой подачи топлива могут возникать нештатные ситуации, связанные с «несанкционированным» поступлении газа наддува в топливные тракты двигателя, в том числе в камеру двигателя. Анализ возможных аварийных ситуаций показал, что поступление газа наддува может быть осуществлено как на запуске, так и в конце работы на стабильном режиме, в виде цельного пузыря или в виде высококонцентрированной газо-жидкостной эмульсии. Для сертификации двигателя необходимо выполнение проверок, охватывающих все возможные нештатные ситуации. Ранее подобные проверки проводились при отработке ЖРД с турбонасосной системой подачи топлива, однако в таких схемах относительный объем свободного газа в топливе был существенно меньше, так как критическим элементом, определяющим работоспособность двигателя, был топливный насос.

Данная работа выполнялась применительно к высотному ЖРД с вытеснительной системой подачи топлива, работающей на топливе АТ+НДМГ, тягой 245 кг. Исходными данными для разработки методики проверки были приняты следующие: номинальный объем свободного газа 5000 нсм^3 ; коэффициент квалификации - 2; способ вдува – с разрывом потока и без разрыва потока; продолжительность вдува – не более одной секунды; место вдува должно быть расположено на расстоянии не более расстояния (по заполняемому объему) от топливных баков до ЖРД в двигательной установке; вдув должен имитировать поступление свободного газа на запуске и на останове. Для определения реакции двигателя на вдув газа

на останове, вдув выполняли на стабильном режиме, а затем проводили сравнение основных характеристик двигателя до и после прохождения свободного газа через тракты двигателя.

Результаты исследований

Планирование проведения экспериментальных работ выполнялось на основе таких принципов:

- оптимальная разбивка работы на отдельные этапы, переход к следующему этапу только после завершения работ по предыдущему;
- постепенное наращивание экспериментальной установки, оборудование и средства измерений каждого из этапов используются, полностью или частично, в работах следующих этапов;
- выполнение всех требований технического задания при использовании минимально возможного количества узлов, оборудования, испытаний и трудозатрат;
- подготовка и проведение испытаний должны обеспечивать получение гарантировано достоверных результатов;
- при проведении испытаний и анализе результатов необходимо свести к минимуму влияние человеческого фактора, все процессы должны, по возможности, фиксироваться на электронные носители;
- применяемое стендовое оборудование должно моделировать основные гидродинамические характеристики штатной установки, быть простым по конструкции, универсальным и надежным в эксплуатации.

Была разработана система вдува строго определенного количества свободного газа в жидкостной

тракт. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Установка состоит из системы подвода газа, блока клапанов и ресивера-накопителя (РН) с дренажной магистралью. Система подвода газа включает ресивер объемом 5 литров, расположенный перед блоком клапанов. Применение газового ресивера обеспечивает стабильность входного давления непосредственно в процессе вдува. Блок клапанов состоит из основного пневмоклапана, управляющего электропневмоклапана и обратного клапана. Для повышения быстродействия системы управляющее давление используется с входа в пневмоклапан. Обратный клапан служит для защиты пневмоклапана от компонентов топлива. Регулирующим элементом в этой установке являются настроечный жиклер и блок клапанов с высокими динамическими характеристиками. Настроечный жиклер используется в качестве предварительной настройки на требуемый режим: для перехода с одного режима на другой необходимо произвести замену жиклера. Точная настройка осуществлялась изменением продолжительности процесса вдува, путем подбора циклограммы подачи электрических команд на блок клапанов. Для получения прогнозируемой и стабильной величины объема вдуваемого газа перепад давлений на жиклере всегда задается сверхкритическим.

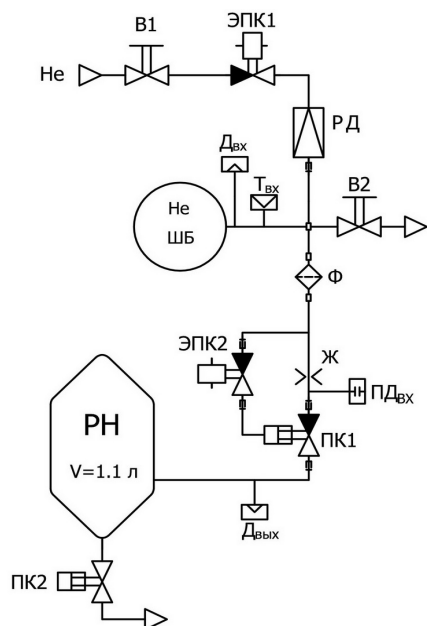


Рис. 1. Принципиальная схема установки вдува гелия

Перед монтажом блоки клапанов для установок окислителя и горючего проходили специальные испытания по определению стабильности динамических характеристик, в том числе и при наличии противодействия, определению фактического времени открытого состояния клапанов, которое соответствует продолжительности вдува. Для проведения калибровки системы вдува необходимо использование калибровочной емкости. В качестве этой емкости применен РН.

Объем вдуваемого гелия определялся по разнице состояния гелия в РН до и после вдува его в РН, при этом предполагалось, что гелий идеальный газ. Для уменьшения погрешности при определении объема вдуваемого газа необходимо учитывать изменение температуры гелия в РН, поэтому конечное состояние должно определяться после стабилизации температур. При заполнении РН, гелий, проходя через жиклер, дросселируется, при этом нагреваясь, это повышение температуры связано с эффектом Джоуля – Томпсона. Кроме того, увеличение температуры гелия в РН связано также с эффектом Дизеля, когда в замкнутом объеме быстро растет давление газа. Выдержка необходима также из-за расположения датчика температуры в нижней части РН, так как для расчета необходимо иметь среднее значение температуры по всему объему.

В данной работе в качестве газа наддува использовался гелий, свойства которого значительно отличаются от свойств воздуха, поэтому перед первым зачетным испытанием проводились не менее трех технологических включений, в процессе которых происходило замещение воздуха внутри ресивера-накопителя на гелий. При выравнивании температуры гелия по объему РН, одновременно происходит теплообмен в окружающую среду. На начальное изменение температуры реагирует и давление в РН. Для определения времени выдержки было проведено одно испытание продолжительностью 320 секунд с жиклером, обеспечивающим максимальный расход гелия. Было определено, что при выдержке в 60 секунд погрешность составляет не более 0,2%. Однако при такой выдержке даже небольшая утечка в клапанах ПК1, ПК2 или в других разъемных соединениях будет приводить к значительной погрешности. Поэтому, для обеспечения достоверных результатов была разработана специальная циклограмма испытаний. Для контроля герметичности клапана ПК1 выполняли контроль стабильности давления в РН продолжительностью не менее трех минут непосредственно перед вдувом газа – при наличии негерметичности давление $P_{вых}$ превышало начальное. Контроль герметичности клапанов ПК1 и ПК2 проводился путем сравнения характера стабилизации давления после вдува с эталонным испытанием. На эталонном испытании контроль герметичности выполнялся методами обмыливания и «мундштука». Применение этих методов для всей серии испытаний, включающей более 100 испытаний, значительно повышает продолжительность и трудоемкость отработки. Кроме того, результаты проверок герметичности фиксируются системой измерений, исключают человеческий фактор и в целом являются более достоверными. С целью обеспечения стабильности процесса вдува выполнялось не менее пяти включений каждого режима, при этом контролировалась разница приведенных к номинальным условиям величин объема гелия, которая не должна была превышать 2%. Типовое изменение давления гелия в РН показано на рис. 2.

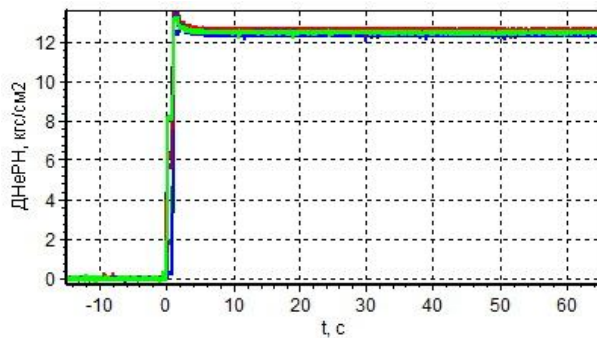


Рис. 2. Давление в РН (серия из шести включений)

В полете и при стендовых испытаниях вдув гелия в жидкостной тракт происходит при давлении жидкости около 3,2 МПа. Для точного определения фактического объема вдуваемого количества газа на огневом испытании были получены зависимости объема вдуваемого газа от входного давления газа и от величины противодавления. Определение зависимости от входного давления выполнялось следующим образом: перед началом работ был закрыт вентиль В1 и питание гелием осуществлялось из шаробаллона ШБ объемом 5 литров, поэтому при каждом последующем включении входное давление $P_{вх}$ было меньше предыдущего. После выдержки и определения объема гелия производилось дренирование через клапан ПК2. Такая зависимость определялась для каждого режима, типовая зависимость представлена на рис. 3. В исследованном диапазоне зависимость между входным давлением и приведенным объемом газа линейная, что соответствует многочисленным литературным данным [1 и др.].

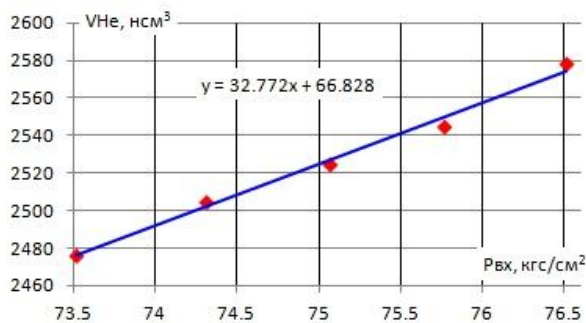


Рис. 3. Зависимость объема вдуваемого гелия в РН от величины давления гелия в ШБ

Определение зависимости от противодавления выполнялось следующим образом: перед началом испытаний был закрыт клапан ПК2 и дренирование гелия не производилось, питание гелием осуществлялось из ШБ с подпиткой от стендовой системы, поэтому при каждом последующем включении входное давление оставалось постоянным, а выходное давление $P_{вых}$ было больше предыдущего (рис. 4). Такая зависимость определялась для каждого режима, типовая зависимость представлена на рис. 5.

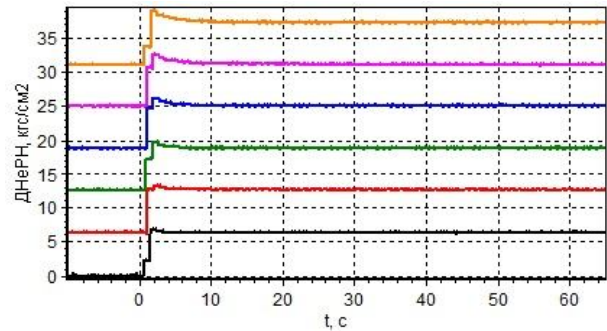


Рис. 4. Давление в РН при определении зависимости объема гелия от противодавления

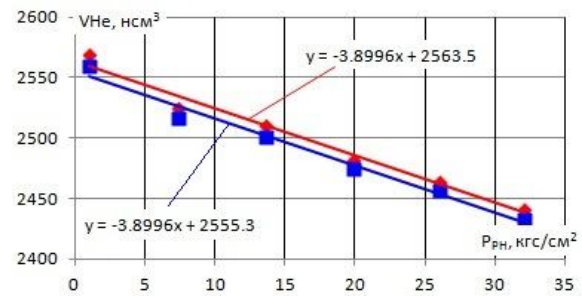


Рис. 5. Зависимость величины объема вдуваемого гелия в РН от давления в РН

Несмотря на гарантированный сверхкритический перепад на жиклере приведенный объем газа имеет некоторую зависимость от величины противодавления. Это объясняется некоторым изменением динамических характеристик обратного клапана при повышении давления на выходе из него, а также наличием небольшой, обусловленной конструктивными особенностями, полости, между жиклером и посадочным местом клапана ПК1, в которой перед включением находится входное давление.

Анализ результатов продувок для двух установок и четырех вариантов жиклеров (диаметром от 0,16 мм до 0,45 мм) показал наличие линейной зависимости количества гелия от времени продувки:

$$V = A\Delta t + B,$$

где Δt — продолжительность продувки (открытого состояния блока клапанов; A и B эмпирические коэффициенты. При этом отмечается, что коэффициент A прямо пропорционален площади проходного сечения жиклера.

Ресивер-накопитель представлен на рис. 6, конструктивно он состоит из цилиндрического и входного/выходного участков внутренней полости, а также коллектора вдува. Для обеспечения равномерного окружающего вдува, при минимальном объеме от обратного клапана до ресивера-накопителя коллектор вдува выполнен с тангенциальным подводом. Отверстия вдува соответствуют отверстиям в заборном устройстве топливного бака. Объем ресивера-накопителя выбран таким образом, чтобы при вдуве максимального количества гелия, объем газовой по-

душки занимал не более 40% от его объема. Конический выходной участок в ресивере-накопителе способствует сохранению целостности газового пузыря при поступлении в жидкостную магистраль с малым гидравлическим диаметром. Для гарантированного исключения остатков гелия и получения стабильных результатов при вдуве РН устанавливался вертикально, с отклонением от вертикали не более 5°.

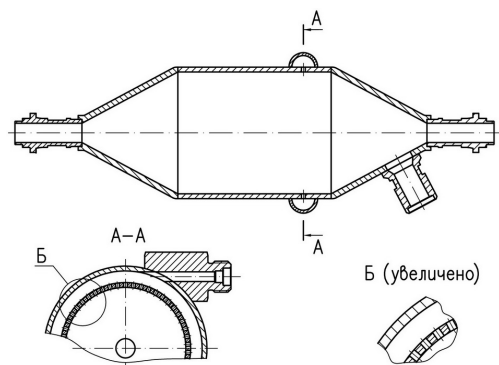


Рис. 6. Ресивер-накопитель

Подготовка и проведение огневых испытаний на высокотоксичных компонентах топлива требуют больших материальных затрат, при этом неотработанность или ошибка стендовых систем может привести к необратимым последствиям, вплоть до разрушения узла и повреждения стендового оборудования. Поэтому необходимо провести предварительные технологические испытания, необходимые для отработки стендовых процедур. Такую отработку целесообразно выполнять в два этапа: первый на модельной жидкости, второй – на компонентах топлива, но с уменьшенным объемом вдуваемого гелия. Главная цель предварительных технологических испытаний – отработать стендовые процедуры обеспечивающие проведение вдува гелия с разрывом/без разрыва потока, на запуске или на стабильном режиме; разработать методику оценки прохождения газового пузыря по трактам двигателя; определить степень влияния процесса прохождения газового пузыря на измеряемые параметры (в зависимости от типа первичных преобразователей и места их установки); разработать дополнительные, при необходимости, алгоритмы аварийного выключения двигателя (АВД).

С целью обеспечения проведения вдува гелия на запуске и на стабильном режиме, с разрывом/без разрыва потока на одной установке без переборок применена байпасная магистраль, а также гидравлический имитатор двигателя – жиклер ЖК (рис. 7). В процессе технологической отработки были определены для каждого вида испытаний оптимальные циклограммы подачи команд, определены динамические характеристики стендовых клапанов. В дальнейшем при проведении огневых испытаний использовался тот же комплект стендовых клапанов, включая линии подачи управляющего давления. Для исключения

аварийных ситуаций при огневых испытаниях, связанных с некачественной нейтрализацией, уменьшением продолжительности перехода с одного компонента на другой, были изготовлены две установки – одна для окислителя, другая для горючего.

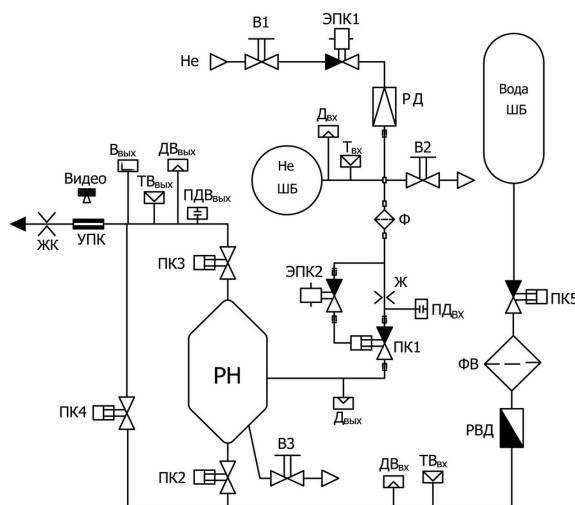


Рис. 7. Принципиальная схема установки для испытаний на модельной жидкости

Для оценки прохождения газового пузыря по трактам двигателя исследовалась реакция различных типов первичных преобразователей на факт прохождения газового пузыря или высококонцентрированной газо-жидкостной эмульсии. Применялись только те первичные преобразователи, которые широко используются при огневых (стендовых и летных) испытаниях ЖРД на высококипящих компонентах топлива: давление измерялось датчиками типа МД и АИР; пульсации давления – ЛХ-611; расход воды – ТПР-10; вибрации – АВС-134-02; температура – термопарами типа ХК. По этой причине не применялись специальные датчики сплошности, не имеющие соответствующего сертификата. С другой стороны необходимо иметь объективный, в какой-то степени эталонный, способ контроля, который позволил бы достоверно определить и подтвердить факт прохождения гелия. В качестве такого контроля для этапа технологических испытаний был выбран визуальный способ контроля, для реализации которого стендовая установка была оснащена прозрачным участком магистрали и высокоскоростной видеокамерой. При разработке приспособления с прозрачным участком магистрали необходимо обеспечить: отсутствие возмущений потока при прохождении стыков приспособления с трубопроводами; соответствие проходных сечений штатных трубопроводов и прозрачного элемента; скорость съемки видеокамеры должна обеспечивать фиксирование прохождения одиночного пузыря по длине прозрачного участка на не менее десяти кадрах; на испытаниях использовалась видеокамера, со скоростью съемки 600 кадров/с. Для обеспечения достоверных результатов испытаний в

поле зрения видеокамеры вдоль прозрачного участка была установлена измерительная линейка и размещен светодиод, на который подавался электрический сигнал, идущий также и на открытие одного из клапанов. Применение светодиода позволило с высокой точностью выполнить синхронизацию результатов измерений и видеосъемки, регистрация которых выполнялась на разные системы. Для получения достоверных результатов частота опроса датчиков давления, температуры, расхода составляла 1 кГц, пульсаций давления и вибраций – 64 кГц. Анализ результатов измерений статических давлений, пульсаций давления, расходов и вибраций показал [2], что наибольшую сходимость с видеозаписью прохождения газожидкостной эмульсии является расшифровка трехмерных спектрограмм. Характер прохождения газожидкостной эмульсии на участке прозрачного трубопровода хорошо согласуется с материалами, описанными в [3].

Выводы

Опыт проведения испытаний показывает, что для исключения влияния побочных эффектов, происходящих при прохождении газожидкостной эмульсии через

жиклер ЖК, необходимо увеличить расстояние между установкой с прозрачным участком магистрали и жиклером, так, чтобы в процессе всего прохождения газожидкостной эмульсии через прозрачную трубку фронт газового пузыря не взаимодействовал с жиклером. Подготовленные и проведенные в соответствии с вышеизложенными принципами подготовительные испытания, включающие разработку технологических процедур, стендовых схем и устройств, обеспечили успешное проведение серии огневых испытаний.

Литература

1. Вукалович, М.П. *Техническая термодинамика [Текст] / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 120 с.*
2. *Создание методики исследования влияния вдува гелия на рабочий процесс в камере жрд с вытеснительной системой подачи топлива [Текст] / В.Н. Шнякин, А.Н. Коваленко, В.Н. Коваленко, др. // Вестник СГАУ. – 2011. – № 1. – С. 150 – 162.*
3. Венгерский, Э.В. *Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок [Текст] / Э.В. Венгерский. – М.: Машиностроение, 1982. – 240 с.*

Поступила в редакцию 1.06.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Хорошилов, ГП “КБ “Южное” им. М.К. Янгеля”, Днепропетровск.

МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ПІДГОТОВКИ ТА ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ З ПЕРЕВІРКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ВИСОТНИХ РРД З ВИТИСНОЮ СИСТЕМОЮ ПОДАЧІ ПАЛИВА ЗІ ВДУВОМ ВІЛЬНОГО ГАЗУ

А.М. Коваленко, Ю.В. Блішун

Розроблена методика для проведення випробувань ЖРД з вдувом нормованої кількості вільного гелію в тракти двигуна. Розроблена та відпрацьована конструкція установки, що забезпечує вдув гелію в тракти двигуна. Визначено залежність кількості гелію, що вдувається в тракти від тиску перед жиклером та тиском у тракті. Вироблено методи контролю проходження гелію у складі суміші (рідина - газ) по тракті. Визначені особливості, що слід враховувати при проектуванні та відпрацюванні конструкції стендової установки для вдува вільного газу в тракти живлення ЖРД з токсичними компонентами.

Ключові слова: вдув, гелій, випробування, камера ЖРД, клапан, ресивер-накопичувач.

METHODOLOGICAL FEATURES OF PREPARATION AND TESTING THE OPERABILITY OF HIGH-ALTITUDE LRE WITH FREE GAS INJECTION BLOWDOWN PROPULSION

A.N. Kovalenko, Y.V. Blishun

It is developed the technique of LRE testing with normalized amount of free helium injection into engine's ducts. It is developed and proven the facility for helium injection into engine's ducts. The relation between injected helium amount versus orifice inlet pressure and duct pressure is determined. The spread helium (liquid – gas mixture) passage control techniques in a duct are developed. It is highlighted some features requiring particular consideration in design and adjustment of LRE toxic-species- feedlines free gas injection bench facility

Key words: injection, helium, test, LRE combustion chamber, valve, receiver- store.

Коваленко Андрей Николаевич – начальник отдела, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.

Блішун Юрий Вячеславович – инженер-конструктор I кат., Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина.