

надёжности и увеличение ресурса электроприводных устройств.

#### Библиографический список

1. Гулиенко А.И., Гуревич О.С. Методы обеспечения надёжности систем топливопитания с электроприводными насосами. Сборник тезисов докладов всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века». -М.: ЦИАМ, 2015. 1133 с. С. 856.

2. Гольберг Ф.Д., Гуревич О.С., Петухов А.А. Бортовая математическая модель двига-

теля в составе САУ ГТД для повышения отказоустойчивости и качества управления. Труды ЦИАМ № 1346. Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями / Под ред. О.С. Гуревича. - М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. 264 с. С. 81-89.

3. Besnard J.P., Biais F., Martinez M. Electrical rotating machines and power electronics for new aircraft equipment systems. 25 International congress of aeronautical sciences, 2006.

УДК 621.43.

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ДВУХФАЗНОГО КРИОГЕННОГО ПРОДУКТА ПРИ ИСПЫТАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

©2016 В.А. Шишков

### DEVELOPMENT OF EMISSIONS REDUCTION METHODS OF A BIPHASE CRYOGENIC PRODUCT AT THE POWER INSTALLATION TEST

Shishkov V.A. (Togliatty, Russian Federation)

*Technological processes and levels of losses of a cryogenic product in a complete cycle from the moment of his delivery before termination test of power installation are certainly situated at its operational development. The purpose is to decrease the cost of test realization. Tasks on minimization and use of losses of a cryogenic product are put at realization of tests. Has been developed algorithms and techniques to define losses of a cryogenic product in various technological processes which allow to optimize realization of power installation test. On the basis of the developed techniques, the accounts are executed and the relative losses of a cryogenic product are certainly depending on used thermal isolation of cryogenic pipelines and fixture, initial and final temperature of system of submission, pressure of a cryogenic product during cooling, material of pipelines and kind of a cryogenic product (hydrogen, nitrogen, oxygen). Has been offered methods and technical decisions on to decrease and use emissions of cryogenic product, depending on their charges, in technological processes at realization of tests of power installations. Has been given the recommendations for parameters to decrease losses of a cryogenic product and conditions at realization of technological operation of pipelines cooling, units of the stand and power installation at its test. The work is intended to the designers and technologists of test stations.*

#### Актуальность работы

Энергетический кризис, порождённый быстрым ростом производственных мощностей и снижением запасов природных богатств органических соединений на основе нефти, требует ускорения темпов по разработке, испытаниям, доводке и вводу в эксплуатацию энергетических установок, работающих на перспективных топливах. Одними из перспективных топлив являются жидкий водород [1] и сжиженный природный газ. Для испытаний энергетических установок и их топливо-регулирующей аппаратуры

были созданы испытательные стенды. Но стенды не имеют достаточной проработки всех систем. Поэтому возникли большие расходы криогенного продукта, связанные с выбросом в атмосферу азота, гелия, водорода и метана [2, 3].

Потери криогенного продукта при проведении испытаний энергетической установки: при транспортировке криогенного продукта от завода производителя до хранилища испытательного стенда – 0,7...0,9%; при сливе криогенного продукта из транспортных ёмкостей в ёмкости хранилища на стен-

де – 1,2...2,3%; при хранении жидкого криогенного продукта в ёмкостях на стенде между испытаниями –0,7...0,9%; при термостатировании ёмкости за счёт выпаривания части жидкой фазы криогенного продукта перед испытанием для получения более низкой температуры на входе энергетической установки – до 3,5%; при захолаживании криогенных трубопроводов и арматуры перед испытанием – 3,4...4,3%; выбросы при проведении испытаний насосного агрегата для энергетической установки – 12,6...18,6% (захолаживание агрегатов для проверки их прочности и работоспособности при низких температурах; определение рабочих характеристик; испытание энергетической установки); наддув хранилища жидкого криогенного продукта – 0,17...0,22% (выбросы через дренаж в атмосферу); при очистке трубопроводов до и после проведения испытания – до 1,72%.

Суммарные потери криогенного продукта на испытательной станции составляют 36...45%. В камере сгорания энергетической установки сгорает 55...64%.

Возможные пути использования выбросов криогенного продукта при проведении испытаний: улучшение теплоизоляции трубопроводов, ёмкостей и агрегатов энергетической установки; применение установки для ожижения при больших расходах на выброс криогенного продукта; установка для дожига в газовом котле для выработки тепловой энергии; применение двигателя внутреннего сгорания для привода электрогенератора или насоса для перекачки воды в ёмкость расположенную выше уровнем для последующего использования её потенциальной энергии; установка дополнительных газовых ёмкостей для приёма выбросов с дополнительным газовым компрессором; электрохимическое сжигание горючего для получения электроэнергии (топливный элемент); использование высокого давления на наддув ёмкостей при сливах -заправках и перед началом испытания энергетической машины; использование хладоресурса криогенного продукта и химической энергии.

Минимальные удельные потери криогенной жидкости  $\Omega_{\text{мин}} = m_{\text{ж}}/m_{\text{м}}$ , где  $m_{\text{ж}}$  – масса криогенной жидкости на захолаживание

теплоизоляции и металла криогенного трубопровода или агрегата массой  $m_{\text{м}}$ .

Минимальные удельные потери криогенной жидкости на захолаживание систем подачи стенда и энергетической установки (учитывают потери теплоты на испарение и на охлаждение за счёт нагрева жидкой и газовой фазы)

$$\Omega_{\text{мин}} = \frac{\int_{T_0}^{T_{\text{к}}} (C_{\text{м}} + qF/m_{\text{м}})dT}{\int_{T_{0\text{ж}}}^{T_{\text{нас}}} C_{\text{ж}}dT + h_{\text{fg}} + \int_{T_{\text{нас}}}^{T_{\text{м}}} C_{\text{п}}dT},$$

где  $T_0$  – начальная температура металла,  $T_{0\text{ж}}$  – начальная температура криогенной жидкости,  $T_{\text{к}}$  – конечная температура металла,  $T_{\text{нас}}$  – температура насыщения криогенного продукта,  $T_{\text{м}}$  – температура металла равна температуре пара криогенного продукта,  $h_{\text{fg}} = A \cdot h_{\text{fgo}} + (1-A) \cdot h_{\text{fgп}}$  – скрытая теплота испарения криогенного продукта ( $h_{\text{fgo}}$  – ортоводород,  $h_{\text{fgп}}$  – параводород,  $A$  – доля ортоводорода в смеси),  $C_{\text{м}} = f(T_{\text{м}})$  – теплоёмкость металла в зависимости от температуры,  $C_{\text{ж}} = f(T_{\text{м}})$  – теплоёмкость жидкого криогенного продукта до линии насыщения,  $C_{\text{п}} = f(T)$  – теплоёмкость криогенного продукта в зависимости от температуры,  $q = f(\Delta T)$  – тепловой поток через теплоизоляцию,  $F$  – эквивалентная площадь теплопередачи.

На рис. 1 показана зависимость относительных потерь на испарение жидкого азота [4] на захолаживание металлов.

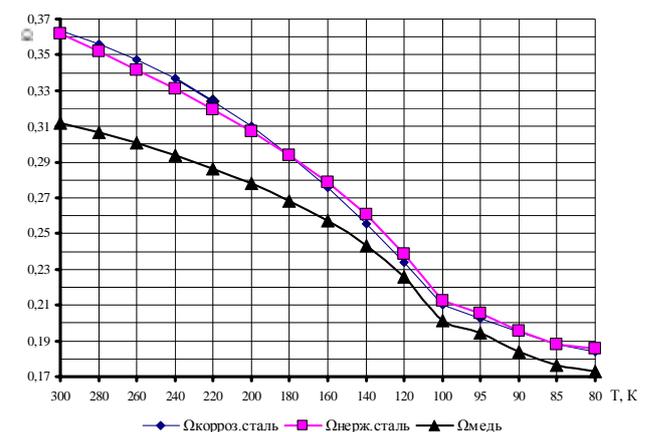


Рис. 1. Относительные потери на испарение жидкого азота при  $p=1$  бар на захолаживание коррозионной стали, нержавеющей стали X18H10T и меди

При большой скорости движения криогенного продукта максимальные удельные потери на захолаживание могут не учитывать потери теплоты за счёт нагрева газовой фазы.

## Основные выводы

Разработаны методы по снижению потерь криогенного продукта при проведении испытаний энергетических установок.

## Библиографический список

1. Гельперин И.И., Ильинский А.А., Алмазов О.А., Адугин И.А. Жидкий водород. - М.: Химия. 1980. 228с.

2. Теплопередача при низких температурах / Под ред. У. Фрост, перевод с англ. В.В. Альтова и А.А. Васильева. - М.: Мир. 1977. 392с.

3. Фастовский В.Г., Петровский Ю.В., Ровинский. - М.: Энергия. 1967. 415с.

4. Варгафтик Н.В. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. - М.: Наука. 1972. 720 с.

УДК 62-503.57

## РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО ФИЛЬТРА НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КАНАЛЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ СИЛОВОЙ ТУРБИНЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

©2016 Е.В. Чичерова

Акционерное общество «Климов», г. Санкт-Петербург

### THE DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE FILTER FOR LOW-FREQUENCY OSCILLATIONS IN THE POWER TURBINE SPEED LOOP OF THE GAS TURBINE ENGINE

Chicherova E.V. (Klimov JSC, St. Petersburg, Russian Federation)

*In the article proposes an algorithm of adaptive filtering of the input signal for power turbine speed of the low-frequency oscillations coming from the helicopter rotor system. Filtering is performed by an adaptive notch-filter. The filter reduces the gain at a given oscillation frequency, without changing it for other frequencies, and adaptation algorithm automatically adjusts notch-filter settings for filtering a specific oscillation frequency.*

При работе двигателя в составе силовой установки вертолёт в режиме поддержания частоты вращения силовой турбины возможна неустойчивая работа его системы автоматического управления. Как показал анализ данных испытаний одного из двигателей, проведённый с использованием математической модели, их источником может являться трансмиссия и несущая система вертолёт, поскольку спектр её собственных частот содержит крутильные колебания порядка 3.4 Гц, 4.8 Гц и 28.4 Гц.

Колебания частотой 3.4 и 4.8 Гц, поступающие через датчик частоты вращения силовой турбины в электронный регулятор, могут повлиять на устойчивость и качество работы системы управления двигателем. Колебания частотой 28 Гц, близкие к половине тактовой частоты электронного регулятора, могут нарушить его работу.

Одним из способов подавления низкочастотных колебаний является настройка коэффициентов усиления электронного регулятора контура управления частотой вращения

силовой турбины. В этом случае колебания частотой 3.4 Гц практически прекращаются, однако на других частотах они могут сохраниться.

Более эффективным способом обеспечения устойчивого управления двигателем в зоне крутильных колебаний является фильтрация входного сигнала частоты вращения силовой турбины. Фильтрация может быть осуществлена с помощью notch-фильтра (от англ. *notch filter* – фильтр-пробка) – узкополосного заграждающего фильтра, позволяющего уменьшить коэффициент передачи входного сигнала в узком диапазоне выбранных частот, практически не изменяя его на остальных частотах [1-5].

Для фильтрации сигнала в широком диапазоне частот может быть использован алгоритм автоматической подстройки параметров фильтра под текущую частоту колебаний входного сигнала.

Расчёты показали, что применение такого фильтра снижает амплитуду колебаний сигнала частоты вращения силовой турбины