

## ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРАЦИЙ В ТУРБОНАСОСНЫХ АГРЕГАТАХ

Кочетков Ю.М.<sup>1\*</sup>, Бузова А.Ю.<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> *Исследовательский центр им. М.В. Келдыша (Центр Келдыша),  
Онежская улица, 8, Москва, 125438, Россия*

<sup>2</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,  
Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия*

*\* e-mail: swgeorgy@gmail.com*

*\*\* e-mail: frambe@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 06.05.2021

Рассмотрены вопросы, связанные с исследованием дополнительной возможности повышения качества мощных энергодвигательных установок. Цель исследования – постановка задачи прогноза высокочастотной неустойчивости таких установок на примере турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя, определение параметров неустойчивости в этом узле и требуемого соотношения параметров турбулентного газового поля, а также формализация условия автоматического контроля вибраций цифровыми методами многоступенчатого дискретного преобразования Фурье без выполнения аппаратно затратных операций умножения. Определены параметры неустойчивости и требуемое соотношение параметров турбулентного газового поля. Описаны принципы диагностики вибраций жидкостных ракетных двигателей на примере турбонасосного агрегата цифровыми методами многоступенчатого дискретного преобразования Фурье. Приведены формулы этого преобразования разностными цифровыми фильтрами.

*Ключевые слова:* турбонасосный агрегат, высокочастотная неустойчивость, диагностика вибраций, разностная фильтрация, турбулентный поток, цифровой сигнал.

### Введение

Мощные энергодвигательные установки отличаются от прочих, как правило, наличием в своём составе элементов, узлов и конструкций, связанных с мощными турбомашинами и газогенераторами. Для выработки электричества – это турбогенераторы, для утилизации вредных отходов – это мощные плазмотроны и ракетные двигатели, для систем вентиляции – воздушно-реактивные двигатели.

Такие энергетические установки высоко нагружены как в механическом, так и в тепловом отношении. Огромные обороты валов турбин, сверхвысокие температуры, сверх-, а порой и гиперзвуковые скорости истечения. Эти условия очень жёстко воздействуют на конструкцию, испытывая ее на прочность, устойчивость и долговечность. Различные формы воздействия могут приводить к разрушению конструкции. Од-

ним из наиболее опасных видов нагружения является вибрация. Она способна ломать конструкции, разрушать сварные швы, нарушать герметичность болтовых и фланцевых соединений. Вибрация может просто разрушать материал, его кристаллическую решётку, тем самым делать конструкцию неработоспособной. Особенно опасны высокочастотные (ВЧ) вибрации.

Вибрации могут появляться в связи с различными причинами. Это может быть межлопаточная скважность в турбинах и лопаточных насосах, эксцентрики, периодически воздействующие на конструкцию, но самое опасное – возникновение ВЧ-неустойчивости внутри рабочей полости аппаратов, прокачивающих через себя рабочее тело: газ, жидкость, двухфазную субстанцию с каплями или твёрдыми частицами. ВЧ-неустойчивость может возникнуть внутри турбонасосно-

го агрегата (ТНА), внутри генераторов холода Ранка—Хилша, газогенераторов и проч.

Наиболее часто ВЧ-неустойчивость проявляется при отработке новых и перспективных ракетных двигателей. Это первая и основная проблема в жидкостном ракетном двигателе (ЖРД). В ракетном двигателе твёрдого топлива (РДТТ) такой проблемы нет в силу переменности свободного объёма камеры. Для ВЧ-устойчивости необходимо наличие постоянного свободного объёма для установления постоянного устойчивого режима турбулентности. Это актуализирует исследование дополнительной возможности установления постоянного устойчивого режима турбулентности при увеличении скорости течения жидкости или газа, когда образуются нелинейные фрактальные волны [1—4]. Для расчёта подобных течений были созданы различные программные комплексы турбулентности [5—7]. Именно турбулентность отвечает за ВЧ-неустойчивость, а значит и за возникновение вибраций. Поэтому изучение причин возникновения вибраций следует начинать с физики появления ВЧ-неустойчивости [8—11].

Аналогичная ситуация создается в ТНА. Наличие присутствие всех атрибутов появления ВЧ-неустойчивости. Это возможность превышения критерия устойчивости Филина—Зенина, определяющего появление неустойчивости и постоянство свободного объёма внутри ТНА. Косвенным признаком можно считать, что в ТНА часто возникает турбулентное течение.

Вибродиагностику мощных энергодвигательных установок можно и должно обеспечить программно-аппаратными средствами цифровой обработки сигналов с датчиков-сигнализаторов методами цифровой фильтрации и дискретного преобразования Фурье (ДПФ) таких сигналов [12—14]. Современный уровень элементной базы микроэлектроники позволяет реализовать эти методы на цифровых сигнальных процессорах и программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [15—18]. Применение ПЛИС для программно-аппаратного обеспечения вибродиагностики способствует анэрроरिकе спектрального анализа вибраций рекуррентными методами дедуктивной обработки цифровых сигналов на основе многоступенчатого ДПФ [19, 20]. Термином «анэррорика» (от лат. «errare») применительно к такой дедуктивной обработке цифровых сигналов определяется активный процесс снижения уровня ошибок цифровой обработки сигнала

при задании различных значений целочисленных разностных коэффициентов цифровых разностных фильтров, применяемых для многоступенчатого ДПФ [21]. Такая анэррорика снижает погрешность автоматического контроля вибраций при экономии вычислительного ресурса ПЛИС-реализации аппаратно-программного обеспечения вибродиагностики [13].

### Цель и методы

Цель настоящего исследования — постановка задачи прогноза ВЧ-неустойчивости мощных энергодвигательных установок на примере ТНА ЖРД, определение параметров неустойчивости этого аппарата и требуемого соотношения параметров турбулентного газового поля, а также формализация условия автоматического контроля вибраций таких двигателей цифровыми методами многоступенчатого ДПФ без выполнения аппаратно затратных операций умножения. Исследование проводилось методами программного моделирования алгоритма контроля уровня вибраций ЖРД цифровыми методами многоступенчатого ДПФ. Сущность моделирования заключается в программной реализации методов оценки уровней гармоник цифровых сигналов с датчика амплитуды колебаний путём их многоступенчатого ДПФ многополосной фильтрацией разностными цифровыми фильтрами (ЦФ).

### Постановка задачи прогноза ВЧ-неустойчивости на примере ТНА ЖРД

Основная проблема ЖРД стимулировала прогресс в ее решении [2, 3]. Было установлено, что ВЧ-неустойчивость — это автоколебательный процесс, который характеризуется балансом диссипативных и дисперсных сил в колебательной системе, а сам автоколебательный процесс представляет собой вынужденные гармонические колебания. Этот процесс нелинейный и может реализоваться только в негамильтоновых системах.

Очень серьезной ошибкой является понятие линейной неустойчивости. В работе [22] дается точное определение понятия автоколебания. «Автоколебания — это незатухающие колебания, поддерживаемые внешними источниками энергии в нелинейной диссипативной системе, вид и свойства которых определяются самой системой и не зависят от начальных условий.

В линейной системе автоколебаний быть не может, даже если в ней имеет место отрицательное затухание.

Для автоколебаний связь между источником энергии и колебательным элементом должна быть нелинейной».

Вернемся к постановке задачи о ВЧ-неустойчивости в ТНА. Она основывается на решении уравнений Навье—Стокса в полной постановке. Но не напрямую, так как эта задача на сегодняшний день неподъемная, она решается с помощью предварительных векторных преобразований [23].

Уравнение [24]

$$\frac{d\vec{v}}{d\tau} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } P + \nu \Delta \vec{v} + \frac{\nu}{3} \text{grad div } \vec{v}$$

преобразуется в главное уравнение вязкоупругого колебательного звена. В процессе преобразований используются уравнения сохранения массы и энергии. Конкретно для каждой фиксированной точки это уравнение записывается по типу [25]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \tilde{P}}{d\tau^2} + 4 \frac{\nu}{R^2} \frac{d\tilde{P}}{d\tau} + 4 \frac{\nu}{R^2} \text{км}^2 \frac{d \ln \frac{R}{\omega}}{d\tau} \tilde{P} = \\ = 4\mu\omega^2 \frac{\nu}{R^2} \text{км}^2 \frac{d \ln \frac{R}{\omega}}{d\tau}. \end{aligned}$$

Вводя безразмерные критерии, получаем:

$$\frac{d^2 \tilde{P}}{d\bar{\tau}^2} + 8\pi Be \frac{d\tilde{P}}{d\bar{\tau}} + 8\pi Be \cdot Me \cdot \tilde{P} = 8\pi R\mu \frac{\omega}{\omega_0} \frac{d \ln \frac{R}{\omega}}{d\bar{\tau}}.$$

Здесь  $\tilde{P}$  — давление в колебательном контуре;  $\omega, \omega_0$  — угловая скорость вихря и собственная частота. Справа сосредоточена в преобразованном виде внешняя энергия, поступающая из зоны горения.

После решения характеристического уравнения получаем единственное условие возникновения колебаний:

$$\frac{Me}{Be} > 2\pi,$$

где  $Be = \frac{\nu}{R^2 \omega_0}$ ;  $Me = \text{км}^2 \frac{d \ln \frac{R}{\omega}}{d\bar{\tau}}$ .

Критерий  $Be$  характеризует диссипацию, критерий  $Me$  — упругость.

Более информативным при расчетах является объединенный критерий

$$\Phi Z = \frac{\kappa \nu^3}{\nu a^2} \frac{d \frac{\nu}{\text{rot}^2 \nu}}{d\tau} > \frac{1}{4},$$

показывающий области неустойчивости и подтверждающий идею критерия Рейля.

Таким образом, для решения устойчивости требуется решение уравнения для главного колебательного звена при начальных условиях. Этими условиями могут быть условия мягкого или жесткого возбуждения:

$$P_{\tau=0} = P_0, \quad \left( \frac{dP}{d\tau} \right)_{\tau=0} = \alpha.$$

Для расчета критериев требуется газовое поле  $v(x, y, z)$ . Оно рассчитывается с помощью уравнения [26]

$$\text{rot } \vec{v} = \pm \sqrt{M^2 (1 - M^2)} \frac{1}{\mu} \vec{v} \text{ grad } p$$

при граничных условиях прилипания и сопро-вождения [27]:

$$\vec{v}_w = 0, \quad \frac{d\vec{v}_{\text{осн}}}{dy} = 0.$$

Первое и второе уравнения с соответствующими начальными граничными условиями являются математической постановкой задачи о ВЧ-устойчивости.

Вопрос о механизме неустойчивости в литературе изложен весьма примитивно. Понятно, что это переход от условий равновесия к колебаниям вязкоупругой среды внутри камеры сгорания. Если конструкция спроектирована правильно с точки зрения ВЧ, то работать она будет устойчиво; если неправильно — возникнут автоколебания, такие незатухающие колебания, при которых устанавливается баланс диссипативных и дисперсных сил.

В литературе называется двадцать причин возникновения неустойчивости в ЖРД (в [28] дан их обзор), это говорит о том, что каждая неудача по причине ВЧ оригинальна и ничего невозможно предсказать. Все эти причины так или иначе формируют турбулентное газовое поле, и

нужно найти лишь соотношение между параметрами этого поля и объединить их в критерий неустойчивости:

$$\Phi Z \geq \frac{1}{4}.$$

Но для этого нужно правильно посчитать турбулентное газовое поле, чего сегодня не может ни одна современная программа.

**Параметры неустойчивости.**

**Собственная частота и декремент затухания**

Из уравнения главного колебательного звена следует, что в случае возникновения автоколебаний это уравнение будет записано в виде, похожем на уравнение для линейного осциллятора:

$$\frac{d^2 \tilde{P}}{d\tau^2} + 4\nu \frac{\text{км}^2}{R^2} \frac{d \ln \frac{R}{\omega}}{d\tau} \tilde{P} = 0.$$

При этом коэффициент перед давлением  $\tilde{P}$  есть квадрат частоты собственных колебаний системы:

$$\omega_0^2 = 4\nu \frac{\text{км}^3}{a^2 R^4} \frac{dV}{d\tau}.$$

Из последней формулы следует, что эта частота напрямую связана с угловой скоростью вихревого движения.

Используя достаточное условие  $\omega = \text{const}$  и вынося  $\omega^2$  за знак дифференциала, получим

$$\left( \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \frac{4\nu}{a^2} \frac{d \ln V}{d\tau}.$$

Теперь наглядно видна зависимость  $\omega_0$  от  $\omega$ , причем в качестве коэффициентов перед угловой скоростью стоят параметры вязкости  $\nu$  и сжимаемости  $a^2$  среды.

Интерпретировать этот результат можно таким образом, что пространственная циклика в виде угловой скорости вихря при определенных условиях переходит во временную  $\omega_0$ , а природа собственных колебаний среды зависит строго от турбулентных конфигураций.

Известно, что решением дифференциального гармонического уравнения является синус. Именно синус — единственная функция, которая может описывать колебательный процесс.

Уравнение главного колебательного звена, записанное без правой части, описывает затуха-

ющий колебательный процесс. Это — свободные колебания, они могут быть описаны уравнением:

$$\frac{d^2 \tilde{P}}{d\tau^2} + 8\pi Ve \frac{d\tilde{P}}{d\tau} + 8\pi Ve \cdot Me \cdot \tilde{P} = 0$$

или

$$\frac{d^2 \tilde{P}}{d\tau^2} + 4 \frac{\nu}{R^2} \frac{d\tilde{P}}{d\tau} + 4 \frac{\nu}{R^2} \text{км}^2 \frac{d \ln \frac{R}{\omega}}{d\tau} \tilde{P} = 0.$$

Тогда, вводя принятые в литературе обозначения, запишем:

$$\frac{d^2 \tilde{P}}{d\tau^2} + 2\delta \frac{d\tilde{P}}{d\tau} + \omega_0^2 \tilde{P} = 0.$$

Решением такого уравнения будет

$$\tilde{P} = \tilde{P}_{\text{max}} \cdot e^{-\delta\tau} \sin(\omega_0\tau + \varphi_0).$$

Здесь  $\delta$  — логарифмический декремент затухания — мера уменьшения амплитуды колебаний за период  $T$ :

$$\delta T = \ln \frac{\tilde{P}(\tau)}{\tilde{P}(\tau + T)}.$$

Исходя из главного уравнения колебательного звена, получим

$$\delta = 2 \frac{\nu}{R^2} \quad \text{или} \quad \delta T = 2 \frac{\nu}{R^2} T.$$

Так как  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$ , имеем:

$$\delta T = \frac{2\nu}{R^2} \frac{2\pi}{\omega_0} = 4\pi \frac{\nu}{R^2 \omega_0} = 4\pi Ve.$$

**Турбулентность — причина вибраций ТНА**

Возникающая ВЧ-неустойчивость процесса, сопровождающаяся колебанием частиц рабочего тела внутри энергетической установки (ТНА), воздействует на стенки аппарата, ограничивающего рабочий объем. Стенки этого аппарата начинают реагировать на силовые воздействия газа и естественно препятствовать ему, порождая вибрации конструкции. Воздействие на систему происходит как воздействие вынужденной силы в виде гармонической составляющей, идущей от газа. Уравнение колебательного звена, теперь уже для конструкции, будет выглядеть как дифференциальное уравнение второго порядка относительно перемещений стенок:

$$\ddot{x} + 2\delta_S \dot{x} + \omega_{0S} x = \tilde{P}_{\text{max}} e^{-\delta\tau} \sin(\omega_0\tau + f_0).$$

Здесь  $\delta$  и  $\omega_0$  – декремент затухания и собственная частота; индекс «s» — принадлежность к конструкции.

В данной ситуации количественное значение  $\omega_{0s}$  может быть определено как свойство твёрдого тела, обладающего своей скоростью звука, модулем упругости и зависящее от жёсткости и массы конструкции. Так, например, если рассматривать камеру сгорания как короткий цилиндр с двумя заделками слева и справа, то приближённо можно написать:

$$\omega_{0s} = A \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{E j}{\rho F}} = A \sqrt{\frac{E j}{L^3 M}},$$

где  $A$  – постоянный коэффициент, зависящий от вида закрепления; под корнем жёсткость и масса конструкции; величина  $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$  – скорость звука в материале конструкции ( $a_s$ ).

Для случая цилиндрической оболочки, когда

$$\frac{j}{F} = \frac{2\pi(D^2 - d^2)(D^2 + d^2)}{4\pi(D^2 - d^2)} = \frac{D^2 + d^2}{2},$$

собственная частота может быть рассчитана по формуле:

$$\omega_{0s} \approx a_s \sqrt{\frac{D^2 + d^2}{2L^4}},$$

где  $D, d, L$  – внешний, внутренний диаметр и длина трубы (камера сгорания) соответственно.

Определившись с параметрами колебательных процессов, поймём, когда наступают их критические ситуации.

Первая из них – это совпадение частот вынужденных колебаний (воздействие газа на стенку) и собственных частот конструкций, т. е. ситуация возникновения резонанса  $\omega_{0s} = \omega_0$ . Этот случай, по-видимому, малореализуем в силу большого различия звуковых скоростей. Второй случай автоколебаний будет наиболее вероятным и приведёт к вибрациям конструкции. Это – случай, когда диссипативный член в уравнении  $2\delta_s \dot{x}$  равен правой части уравнения – случай автоколебаний.

### Диагностика вибраций цифровыми методами преобразования Фурье

Вибрации узлов ЖРД, в частности ТНА, снижают надёжность двигательных установок [13, 29]. Возникновение вибраций ЖРД в полёте приводит к усугублению прочностного состояния конструкции двигательных установок и, следовательно, к разрушению самих установок и деталей корпусов ракет, так как с повышением уровня вибраций ЖРД ухудшается тепловое состояние с последующими прогарам стенок узлов ТНА, камер сгорания и сопел ЖРД. Это обуславливает актуальность повышения качества диагностики вибраций ЖРД и увеличения информативности используемых методов контроля уровня этих вибраций.

Такой контроль можно обеспечить цифровыми методами многоступенчатого ДПФ. Методы такого ДПФ на основе алгоритмов разностной цифровой фильтрации и CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) успешно реализуются на ПЛИС и были верифицированы и апробированы в радиотехнических системах [19]. Эти методы предлагается использовать для решения задач контроля уровня вибраций ЖРД, поскольку такие вибрации являются сложными колебаниями, которые могут быть представлены суммой гармонических колебаний (гармоник).

На базе ПЛИС был разработан и исследован модифицированный алгоритм многоступенчатого ДПФ, в основу которого положен анализ замеров параметров амплитудно-частотных характеристик вибраций в процессе работы двигательной установки. При этом анализируются показания датчика.

Результаты исследования подтвердили возможность использования методов многоступенчатого ДПФ цифрового сигнала с датчика-сигнализатора  $x(nT)$  с периодом дискретизации  $T$  методом его  $L$ -полосной фильтрации разностными цифровыми фильтрами  $K+M$ -го порядка с  $k_M$ -ми разностными коэффициентами  $M$ -го порядка разности  $h_p(M, k_M, l)$  для расчёта статистик (оценок)  $y_l(nT)$  уровней  $l$ -х гармоник этого сигнала при  $k_M = 0, 1, 2, \dots, K+M-1; l = 1, 2, 3, \dots, L; m = 1, 2, 3, \dots, M; n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ :

$$y_l(nT) = \sum_{k=0}^{K+M-1} \sum_{k_0=0}^k \sum_{k_1=0}^{k_0} \dots \sum_{k_{m-1}=0}^{k_{m-2}} \dots \sum_{k_{M-1}=0}^{k_{M-2}} \sum_{k_M=0}^{k_{M-1}} h_p(M, k_M, l)x(nT).$$

Причём  $k$ -е коэффициенты  $l$ -й полосовой фильтрации  $h(k, l)$  при  $k = 0, 1, 2, \dots, K-1$  и  $l = 1, 2, 3, \dots, L$  формируются на основе  $k_m$ -х разностных коэффициентов  $m$ -х порядков разности  $h_p(m, k_m, l)$  при  $k_m = 0, 1, 2, \dots, K+m-1$  и  $m = 1, 2, 3, \dots, M$  [18]:

$$h(k, l) = \sum_{k_0=0}^k \sum_{k_1=0}^{k_0} \dots \sum_{k_{m-1}=0}^{k_{m-2}} \dots \sum_{k_{M-1}=0}^{k_{M-2}} \sum_{k_M=0}^{k_{M-1}} h_p(M, k_M, l).$$

Поэтому условием выполнения многоступенчатого ДПФ такого сигнала только сложениями его временных отсчётов является тривиальность разностных коэффициентов  $h_p(M, k_M, l)$ , поскольку при  $l = 1, 2, 3, \dots, L$ :

$$h_p(M, k_M, l) \cdot x(nT) = \begin{cases} x(nT) & \text{при } h_p(M, k_M, l) = 1; \\ 0 & \text{при } h_p(M, k_M, l) = 0; \\ -x(nT) & \text{при } h_p(M, k_M, l) = -1. \end{cases}$$

Такая формализация условия автоматического контроля вибраций ЖРД цифровыми методами многоступенчатого ДПФ без выполнения операций умножения позволяет снижать аппаратные затраты на ПЛИС-реализацию вычислительных алгоритмов такого контроля [16].

Постепенное ужесточение требований к надёжности ЖРД способствует актуализации проблемы диагностики вибраций таких двигателей в условиях их серийного производства [13].

## Выводы

1. Аналитическими методами доказана газодинамическая причина возникновения ВЧ-неустойчивости в ТНА ЖРД и, как следствие, вибраций стенок его конструкции.

2. Исследованы причины и возможности диагностики вибраций в ТНА ЖРД, что позволило определить зависимость собственной частоты автоколебаний (ВЧ-неустойчивости) от характеристик турбулентного потока и показать, что в ламинарных потоках автоколебания возникнуть не могут.

3. Получены соотношения основных параметров колебаний в вязкоупругом контуре внутри ТНА ЖРД в зависимости от газодинамических параметров (собственная частота и декремент затухания).

4. Анализ полученных соотношений обеспечил возможность оценки уровня вибраций ЖРД цифровыми методами многоступенчатого ДПФ с помощью разностных цифровых фильтров.

## Библиографический список

1. *Hersch M.* Experimental Method of Measuring Intensity of Turbulence in a Rocket Chamber // *ARS Journal*. 1961. Vol. 31. No. 1, pp. 39-45. DOI: 10.2514/8.5379
2. *Kochetkov Yu.M., Kravchik T.N., Podymova O.A.* Five Theorems of Turbulence and Their Practical Application // *Russian Engineering Research*. 2019. Vol. 39. No. 10, pp. 855-861. DOI: 10.3103/S1068798X19100149
3. *Kochetkov Yu., Borovik I., Podymova O., Protopopov A.* Variety of gas-dynamic turbulent configurations at internal flow in channels of structurally complex bodies // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 779. No. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/779/1/012030
4. *Зуев А.А., Арнольд А.А., Назаров В.П.* Участки динамически нестабилизированных течений в характерных каналах проточных частей турбонасосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 3. С. 167-185. DOI: 10.34759/vst-2020-3-167-185
5. *Birgersson F., Finnveden S., Robert G.* Modelling turbulence-induced vibration of pipes with a spectral finite element method // *Journal of Sound and Vibration*. 2004. Vol. 278. No. 4-5, pp. 749-772. DOI: 10.1016/j.jsv.2003.10.024
6. *Eames I., Flor J.B.* New developments in understanding interfacial processes in turbulent flows // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2011. Vol. 369. No. 1937, pp. 702-705. DOI: 10.1098/rsta.2010.0332
7. *Соцков И.А.* Разработка математической модели турбулентного трехмерного течения продуктов сгорания в ракетных двигателях твердого топлива // *Вестник Московского авиационного института*. 2021. Т. 28. № 1. С. 107-114. DOI: 10.34759/vst-2021-1-107-114
8. *Золотов А.А., Нуруллаев Э.Д.* Методы повышения эффективности контроля агрегатов изделий ракетно-космической техники // *Вестник Московского авиационного института*. 2015. Т. 22. № 4. С. 46-52.
9. *Краев В.М.* Современное состояние исследований нестационарных турбулентных течений // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23. № 4. С. 61-67.
10. *Лёвочкин П.С., Мартиросов Д.С., Каменский С.С.* и др. Система функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей в режиме реального времени // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. Т. 26. № 2. С. 147-154.
11. *Асланов А.Р., Разносчиков В.В., Стольников А.М.* Исследования параметров авиационного криогенного турбонасосного агрегата по циклу полета летательного аппарата // *Вестник Московского авиационного института*. 2020. Т. 27. № 4. С. 124-132. DOI: 10.34759/vst-2020-4-124-132

12. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. — М.: Наука, 1989. — 493 с.
13. Бузова А.Ю., Кочетков Ю.М. Контроль уровня вибраций цифровыми методами многоступенчатого преобразования Фурье при работе ракетного двигателя // Двигатель. 2019. № 6(126). С. 19.
14. Burova A.Yu., Usatenko T.O. Digital Algorithms for the Discrete Frequency Selection of Signals that Do Not Use Algorithmic Multiplication Operations // TEM Journal. 2020. Vol. 9. No. 2, pp. 501-506. DOI: 10.18421/TEM92-11
15. Витязев В.В., Витязев С.В. Цифровые процессоры обработки сигналов TMS320C67x компании Texas Instruments: Учебное пособие. — Рязань: РГРТУ, 2007. — 112 с.
16. Стешенко В.Б. ПЛИС фирмы ALTERA: Элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры. — М.: ДМК Пресс, 2016. — 576 с.
17. Burova A.Yu., Ryapukhin A.V., Muntyan A.R. Reduced hardware costs with software and hardware implementation of digital methods multistage discrete Fourier transform on programmable logic devices // Amazonia Investiga. 2020. Vol. 9. No. 27, pp. 227-233. DOI: 10.34069/AI/2020.27.03.24
18. Сперанский В.С., Косичкина Т.П. Сигнальные микропроцессоры и их применение в системах коммуникаций и электроники. — М.: Горячая Линия — Телеком, 2021. — 400 с.
19. Burova A.Yu. Digital signal processing without performing arithmetic multiplication operations // Amazonia Investiga. 2020. Vol. 9. No. 25, pp. 200-205.
20. Burova A.Yu. Reducing the Error of Digital Algorithms for Deductive Signal Processing Based on Their Multi-Stage Discrete Fourier Transform by the Difference Digital Filters // 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications – DSPA (25-27 March 2020; Moscow, Russia). DOI: 10.1109/DSPA48919.2020.9213275
21. Burova A.Yu., Kabakov V.V. «Unerroric» of multistage discrete Fourier transform of digital signal without arithmetic operations of multiplication // Amazonia Investiga. 2020. Vol. 9. No. 25, pp. 429-437.
22. Трубецков Д.И. Введение в синергетику. Колебания и волны. — Изд. 4-е. — М.: URSS: Книжный дом «Либроком», 2011. — 220 с.
23. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Неустойчивость при работе тепловых турбомашин // Двигатель. 2018. № 2(116). С. 10-13.
24. Струминский В.В. Основные направления теоретических исследований проблемы турбулентности // Механика турбулентных потоков: Сборник. — М.: Наука, 1980. С. 28-43.
25. Кочетков Ю.М. Турбулентность. Возникновение неустойчивости в ЖРД // Двигатель. 2012. № 2(80). С. 30-32.
26. Кочетков Ю.М. Турбулентность и математическое доказательство ее невозможности в сверхзвуковом потоке // Двигатель. 2018. № 3(117). С. 12-15.
27. Кочетков Ю.М. Фундаментальное граничное условие сопровождения и новая постановка краевой задачи вязкой газовой динамики // Двигатель. 2015. № 5(101). С. 30-32.
28. Гладышев В.Н. Автоколебания при горении и термоядерных взаимодействиях. — Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1999. — 134 с.
29. Перфильев А.С., Султанов А.Э., Герасименко С.Ю. Условия возникновения высокоамплитудных низкочастотных колебаний корпуса ракеты-носителя, снижающих надёжность агрегатов двигательных установок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 7. С. 391-400.

## GAS-DYNAMIC REASONS FOR VIBRATIONS ORIGINATION IN TURBOPUMP UNITS

Kochetkov Yu.M.<sup>1\*</sup>, Burova A.Yu.<sup>2\*\*</sup>

<sup>1</sup> Keldysh Research Center (Keldysh Center),  
8, Onezhskaya str., Moscow, 125438, Russia

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,  
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia

\* e-mail: swgeorgy@gmail.com

\*\* e-mail: frambe@mail.ru

### Abstract

Powerful energy-propulsion units differ from the others by the elements, subassemblies and structures associated with powerful turbo-machines and gas generators as a part of them. The high rpm of the turbines shafts rigidly affects the structure, which may lead to its destruction. High-frequency vibrations, which occurrence is possible in the turbopump units of liquid propellant rocket engines, are of especial danger.

The purpose of the study consists in the following:

- the problem setting of high-frequency instability prediction in powerful energy propulsion units on the example of the turbopump unit of a liquid propellant rocket engine, determining instability parameters in this subassembly and required ratio of the turbulent gas field parameters;

- formalization of vibrations automatic monitoring condition by the digital methods of multi-step discrete Fourier transform without performing hardware-consuming multiplication operators.

The presence of constant free volume is necessary for setting constant stable turbulence mode for the high frequency stability ensuring. This fact actualizes the study of the additional possibility of setting constant stable turbulence mode with the gas or liquid flow velocity increase. Namely turbulence is in charge of high-frequency instability, and, hence, vibrations occurrence. Turbulent flow originates practically always in turbopump units.

The occurring high-frequency instability of the process, accompanied by the oscillation of the working fluid particles inside the turbopump unit, impacts the walls of the apparatus that restrains the working volume. The walls of this apparatus begin reacting to the force impacts of the gas and naturally impede it, generating vibrations of the structure. The effect on the system occurs as the impact of a compelled force in the form of a harmonic component coming from the gas. The equation of the oscillating link for the structure will look like a

second-order differential equation with respect to the walls displacements.

The study employed the principles of vibrations diagnostics of liquid propellant rocket engines on the example of a turbopump unit by digital methods of a multi-stage discrete Fourier transform.

An increase in the vibration level of liquid propellant rocket engines may lead to the increased thermal loads with subsequent possible burnouts of the walls of the turbopump assembly units. This requires quality improving of the vibrations diagnostics of liquid propellant rocket engines and increasing the information content of methods employed for the level control of these vibrations.

Vibration diagnostics may and should be ensured with the software and hardware for digital signal processing from signaling sensors using digital filtering and discrete Fourier transform of such signals. The term “unerroric” (from the Latin “errare”) in relation to such digital signals deductive processing defines an active process of the errors level reducing in digital signal processing when setting various values of integer difference coefficients of digital difference filters applied for multi-stage discrete Fourier transform. Such unerroric reduces the error of automatic vibration control.

Gradual tightening of the requirements for the liquid rocket propellant engines reliability contributes to the problem actualization of such engines vibrations diagnosing under conditions of their mass production.

**Keywords:** turbopump unit, high-frequency instability, vibration diagnostics, difference filtering, turbulent flow, digital signal.

### References

1. Hersch M. Experimental Method of Measuring Intensity of Turbulence in a Rocket Chamber. *ARS Journal*, 1961, vol. 31, no. 1, pp. 39-45. DOI: 10.2514/8.5379



2. Kochetkov Yu.M., Kravchik T.N., Podymova O.A. Five Theorems of Turbulence and Their Practical Application. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, no. 10, pp. 855-861. DOI: 10.3103/S1068798X19100149
3. Kochetkov Yu., Borovik I., Podymova O., Protopopov A. Variety of gas-dynamic turbulent configurations at internal flow in channels of structurally complex bodies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 779, no. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/779/1/012030
4. Zuev A.A., Arngol'd A.A., Nazarov V.P. Sections of dynamically non-stabilized flows in characteristic channels of the air-gas channels of liquid rocket engines turbopump units. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 3, pp. 167-185. DOI: 10.34759/vst-2020-3-167-185
5. Birgersson F., Finnveden S., Robert G. Modelling turbulence-induced vibration of pipes with a spectral finite element method. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, vol. 278, no. 4-5, pp. 749-772. DOI: 10.1016/j.jsv.2003.10.024
6. Eames I., Flor J.B. New developments in understanding interfacial processes in turbulent flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2011, vol. 369, no. 1937, pp. 702-705. DOI: 10.1098/rsta.2010.0332
7. Sotskov I.A. Developing mathematical model of the 3d turbulent flow of combustion products in solid propellant rocket engines. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 107-114. DOI: 10.34759/vst-2021-1-107-114
8. Zolotov A.A., Nurullaev E.D. Efficiency upgrading techniques for assembly products of space-rocket equipment. *Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 4, pp. 46-52.
9. Kraev V.M. Present condition of unsteady turbulent flows study. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 61-67.
10. Levochkin P.S., Martirosov D.S., Kamenskii S.S. et al. Liquid rocket engines functional diagnostics system in real-time mode. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 147-154.
11. Aslanov A.R., Raznoschikov V.V., Stol'nikov A.M. Studying parameters of aircraft cryogenic turbo-pump unit by the aircraft flight cycle. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 124-132. DOI: 10.34759/vst-2020-4-124-132
12. Zalmanzon L.A. *Preobrazovaniya Fur'e, Uolsha, Khaara i ikh primeneniye v upravlenii, svyazi i drugikh oblastyakh* (Fourier, Walsh, and Haar transforms and their application in management, communication, and other fields), Moscow, Nauka, 1989, 493 p.
13. Burova A.Yu., Kochetkov Yu.M. *Dvigatel'*, 2019, no. 6(126), p. 19.
14. Burova A.Yu., Usatenko T.O. Digital Algorithms for the Discrete Frequency Selection of Signals that Do Not Use Algorithmic Multiplication Operations. *TEM Journal*, 2020, vol. 9, no. 2, pp. 501-506. DOI: 10.18421/TEM92-11
15. Vityazev V.V., Vityazev S.V. *Tsifrovyye protsessory obrabotki signalov TMS320C67x kompanii Texas Instruments* (Digital processors of processing signal TMS320C67x of Company Texas Instruments), Ryazan, RGRTU, 2007, 112 p.
16. Steshenko V.B. *PLIS firmy ALTERA: Elementnaya baza, sistema proektirovaniya i yazyki opisaniya apparatury* (ALTERA FPGA: Element base, design system and hardware description languages), Moscow, DMK Press, 2016, 576 p.
17. Burova A.Yu., Ryapukhin A.V., Muntyan A.R. Reduced hardware costs with software and hardware implementation of digital methods multistage discrete Fourier transform on programmable logic devices. *Amazonia Investiga*, 2020, vol. 9, no. 27, pp. 227-233. DOI: 10.34069/AI/2020.27.03.24
18. Speranskii V.S., Kosichkina T.P. *Signal'nye mikroprotsessory i ikh primeneniye v sistemakh kommunikatsii i elektroniki* (Signal microprocessors and their application in communication and electronics systems), Moscow, Goryachaya Liniya - Telekom, 2021, 400 p.
19. Burova A.Yu. Digital signal processing without performing arithmetic multiplication operations. *Amazonia Investiga*, 2020, vol. 9, no. 25, pp. 200-205.
20. Burova A.Yu. Reducing the Error of Digital Algorithms for Deductive Signal Processing Based on Their Multi-Stage Discrete Fourier Transform by the Difference Digital Filters. *22<sup>nd</sup> International Conference on Digital Signal Processing and its Applications – DSPA (25-27 March 2020; Moscow, Russia)*. DOI: 10.1109/DSPA48919.2020.9213275
21. Burova A.Yu., Kabakov V.V. "Unerroric" of multistage discrete Fourier transform of digital signal without arithmetic operations of multiplication. *Amazonia Investiga*, 2020, vol. 9, no. 25, pp. 429-437.
22. Trubetskov D.I. *Vvedeniye v sinergetiku. Kolebaniya i volny* (Introduction to synergetics. Vibrations and waves), Moscow, URSS, Knizhnyi dom "Librokom", 2011, 220 p.
23. Kochetkov Yu.M. *Dvigatel'*, 2018, no. 2(116), pp. 10-13.
24. Struminskii V.V. *Mekhanika turbulentnykh potokov* (Turbulent flows mechanics: collection), Moscow, Nauka, 1980, pp. 28-43.
25. Kochetkov Yu.M. *Dvigatel'*, 2012, no. 2(80), pp. 30-32.
26. Kochetkov Yu.M. *Dvigatel'*, 2018, no. 3(117), pp. 12-15.
27. Kochetkov Yu.M. *Dvigatel'*, 2015, no. 5(101), pp. 30-32.
28. Gladyshev V.N. *Avtokolebaniya pri gorenii i termoyadernykh vzaimodeistviyakh* (Self-oscillations at burning and thermonuclear interactions), Novosibirsk, NITs OIGGM SO RAN, 1999, 134 p.
29. Perfil'ev A.S., Sultanov A.E., Gerasimenko S.Yu. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, no. 7, pp. 391-400.