

В. В. ГОРБУНЦОВ, А. Н. ЗАВОЛОКА, Н. Ф. СВИРИДЕНКО

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКОЙ В ТОПЛИВНЫХ БАКАХ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ

Разработан методический подход к формированию в процессе полета ракеты-носителя (РН) активного управления гидродинамической обстановкой (ГДО) в её топливных баках (ТБ) по параметру содержания свободных газовых включений (СГВ) на входе в топливные магистрали двигателя, основанный на использовании данных о текущем состоянии РН. Ввиду непригодности существующих методов и инструментальных средств измерения содержания СГВ и параметров их движения в баках, для получения текущих оценок этих параметров предложены простые, но содержательные, с точки зрения задачи управления, модели основных процессов, оказывающих влияние на формирование и движение СГВ в столбах компонентов топлива (КТ), подвергающихся полетным нагрузкам. Сформирована модель ГДО как объекта управления, позволяющая, измеряя параметры реального поля давления в КТ, прогнозировать возможность возникновения ситуаций, критических по содержанию СГВ на входе в топливные магистрали. Предложена рациональная стратегия управления, предполагающая использование – в качестве управляющего воздействия, обеспечивающего необходимый уровень управляемости – давления в свободном газовой объеме ТБ и способ его изменения путем регулирования расхода газа, подаваемого на наддув ТБ. Выбранная стратегия предопределяет возможность формирования системы активного управления ГДО на основе простого алгоритма управления с полноразмерной обратной связью и имеющихся на РН средств и ресурсов, обеспечивающих возможность расширения диапазона условий безаварийной эксплуатации РН по сравнению с пассивными средствами управления ГДО.

Розроблено методичний підхід до формування в процесі польоту ракети-носія (РН) активного керування гідродинамічною обстановкою (ГДО) в її паливних баках (ПБ) по параметру вмісту вільних газових включень (ВГВ) на вході в паливні магистралі двигуна, заснований на використанні даних про поточний стан РН. Через непридатність існуючих методів та інструментальних засобів виміру вмісту ВГВ і параметрів їхнього руху в баках, для одержання поточних оцінок цих параметрів запропоновано прості, але змістовні, з погляду завдання керування, моделі основних процесів, що впливають на формування й рух ВГВ у стовпах компонентів палива (КП), що зазнають польотні навантаження. Сформовано модель ГДО як об'єкта керування, яка дозволяє, вимірюючи параметри реального поля тиску в КП, прогнозувати можливість виникнення ситуацій, критичних щодо вмісту ВГВ на вході в паливні магистралі. Запропоновано раціональну стратегію управління, що припускає використання – як управляючої дії, що забезпечує необхідний рівень керованості – тиску у вільному газовому об'ємі ПБ і спосіб його зміни шляхом регулювання витрати газу, що подається на наддув ПБ. Вибрана стратегія зумовлює можливість формування системи активного управління ГДО на основі простого алгоритму управління з повнорозмірним зворотним зв'язком та засобів і ресурсів, що є на РН, які забезпечують можливість розширення діапазону умов безаварійної експлуатації РН порівняно з пасивними засобами управління ГДО.

A methodical approach to formation of an active control of hydrodynamic conditions (HDC) in fuel tanks (FT) of a launch vehicle (LV) during the flight is developed using the parameter of the free gas inclusion (FGI) in the entrance of the jet engine fuel lines, based on information about the LV current state.

Because of inadequacy of existent methods and tools for measuring the FGI concentration and parameters of their motion in FT, models of the basic processes influencing the FGI formation and motion in the fuel components (FC) spouts exposed to the flight loadings are proposed for the current estimations of these parameters. These models are simple but substantial as regards the control problem.

The HDC model as a control object is formed to forecast the possibility of emerging the critical situations with the FGI concentration in the entrance of the fuel lines, measuring parameters of the CF real pressure field.

A rational control strategy assuming the use of the pressure in the FT free gas volume as a control action providing the necessary controllability and the technique of its change by controlling the gas flow for FT pressurization are proposed.

The chosen strategy predetermines the possibility of forming the HDC active control system on the basis of a simple control algorithm with the full dimensional feed-back and existing facilities and resources of a launch vehicle for a wider range of the LV trouble-free operation in comparison with passive facilities of the HDC control.

Ключевые слова: *Ракета-носитель, система питания, топливный бак, активное управление, модель, гидродинамическая обстановка, свободные газовые включения, поле давления, выпрямленная газовая диффузия.*

© Горбунцов В. В., Заволока А. Н., Свириденко Н. Ф., 2015

Рассмотрение задач и перспектив технической реализации активного управления возмущённым движением ракеты-носителя (РН) на активном участке полета на основе данных мониторинга текущего состояния (МТС) её систем в условиях действия возмущающих факторов различной природы позволило сделать заключение об актуальности разработки достаточно простого методического подхода к информационному обеспечению модели гидродинамической обстановки (ГДО) в топливных баках (ТБ) как объекта управления и комплекса математических моделей, учитывающих специфику решаемой задачи управления [1].

В данной статье развивается методический подход к формированию активного управления ГДО в топливных баках РН на основе данных мониторинга её текущего состояния, с учётом особенностей рабочих процессов в системах, подлежащих МТС, в условиях возмущённого движения РН. ТБ являются составной частью системы питания (СП) РН, назначение которой заключается в размещении на борту жидких компонентов топлива (КТ) и их подачи на вход в топливные магистрали двигателя с параметрами, обеспечивающими его устойчивую работу во время полета [2].

Одним из основных параметров рабочего процесса СП, наряду с расходом КТ и их давлением на входе в топливные магистрали двигателя, является объемное содержание в них свободных газовых включений (СГВ) – газосодержание КТ. В этой связи достаточно отметить, что наличие в жидких КТ $\sim 1\%$ об. СГВ сопровождается снижением коэффициента быстроходности центробежных насосов двигателя на $\sim 13\%$, а увеличение их содержания до $3\text{--}5\%$ приводит к срыву их устойчивой работы [3, 4]. Кроме того, наличие СГВ в КТ обуславливает также снижение собственной частоты колебаний жидкости, находящейся в топливных магистралях, что, в свою очередь, может привести к опасному ее сближению с собственной частотой продольных колебаний корпуса РН и развитию опасных автоколебательных режимов [5, 6].

СГВ в жидких КТ формируются как следствие существенно нелинейных явлений, которые инициируются различного вида колебательными процессами, обусловленными действием на ТБ полетных нагрузок преимущественно вибрационного характера; к наиболее значимым, в этом плане, можно отнести [7–10]:

- возбуждение низкочастотных колебаний КТ, сопровождающихся разрушением их поверхности в процессе взаимодействия с обечайками ТБ;
- генерирование капельных потоков, фонтанирующих с поверхности КТ при колебаниях ТБ;
- возникновение и развитие сорбционных процессов в КТ при отклонении системы «жидкость – растворенный газ» от равновесного состояния.

При периодическом продольном возмущении ТБ с частотой $f = 4 \dots 6$ Гц и малой амплитудой жидкость, находящаяся в нем, синхронно и устойчиво колеблется по гармоническому закону. С увеличением амплитуды возмущения уровень колебаний нарастает, и реализуется режим, при котором на свободной поверхности жидкости возникают субгармонические колебания преимущественно первого осесимметричного тона половинного порядка (плескания), частота которых примерно вдвое меньше частоты возмущения [7]. Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний приводит к опрокидыванию поверхностных волн при взаимодействии их со стенками ТБ и затягиванию газа из свободного газового объема (СГО) бака в КТ, т. е. к формированию приповерхностного слоя барботирующих СГВ.

Увеличение частоты возмущения сопровождается разрушением гребней волн и генерированием фонтанирующего потока капель диаметром от 5 до 8 мм. Это происходит при частоте возмущающего воздействия $f > (20 \dots 25)$ Гц и амплитуде виброперегрузки $A_g \geq (0,5 \dots 1,0)$ [8, 9]. Процесс последующего падения капель на поверхность жидкости и их проникания сквозь нее сопровождается формированием приповерхностного слоя из барботирующих в поле массовых сил СГВ диаметром около 2,5 мм (приповерхностный барботажный слой) [9].

Периодические продольные нагрузки, действующие на ТБ, оказывают также существенное влияние на характер и интенсивность сорбционных процессов в КТ, содержащих растворенные газы. При колебаниях ТБ, генерирующих переменное поле давлений в жидких КТ, содержащих растворенные газы, могут формироваться зоны, в которых нарушается динамическое равновесие в системе «растворенный газ – жидкость». В этих зонах происходит выделение растворенного газа в виде значительного количества мелких СГВ диаметром от 50 до 80 мкм.

При превышении амплитудой пульсаций давления уровня, соответствующего началу процесса «выпрямленной газовой диффузии» [10], происходит рост объема СГВ в процессе их колебаний вплоть до достижения максимального размера, определяемого условием устойчивости сферического пузыря [11].

Следует также иметь в виду, что на ряде успешно эксплуатируемых в настоящее время РН, использующих криогенные КТ, применяются газобаллонные системы наддува ТБ. В таких системах газ наддува (как правило, гелий) находится в баллонах, установленных в нижнем ТБ с криогенным КТ, и используется как для наддува СГО бака, так и для захлаживания прогревающегося в полете поверхностного слоя КТ путем подачи этого газа в виде всплывающих в КТ и барботирующих его пузырей (СГВ) [12].

В большинстве случаев скорость опускного движения КТ в баках РН при работе СП меньше, чем скорость всплытия СГВ в поле массовых (архимедовых) сил; поэтому СГВ всплывают к поверхности КТ и выходят в СГО бака.

Однако, при определенном сочетании параметров продольных вибронгрузок, действующих на ТБ, и параметров гидродинамической обстановки (ГДО) во внутрибаковом пространстве СГВ, находящиеся в КТ, могут совершать движение в направлении, противоположном действию массовых сил, с возможностью последующего проникания в топливные магистрали двигателя [9].

В настоящее время основное внимание при выборе методов управления содержанием СГО в КТ на входе в топливные магистрали двигателя уделяется реализации мероприятий преимущественно конструктивного характера, обеспечивающих возможность демпфирования колебаний КТ, рассеивания их энергии и, как следствие, снижения интенсивности генерирования СГВ. В этом плане широкое распространение получили различного вида рёбра и перегородки, а также различного рода устройства, в состав которых входят элементы, обладающие высокой податливостью (газовые объемы, пружины и т. п.), размещаемые во внутрибаковых пространствах [5, 6].

Наряду с перечисленными мероприятиями, для противодействия прониканию СГВ в топливные магистрали двигателя топливные баки оснащаются внутрибаковыми заборными устройствами в виде профилированных тарелей, устанавливаемых над входом в топливные магистрали. Этим достигается уменьшение критической высоты уровня КТ, при которой происходит массовый прорыв СГВ в магистрали [13]; кроме того, в отдельных случаях могут использоваться

специальные сепараторы на входе в насосы двигателя, отделяющие СГВ от жидких КТ и выводящие образующий их газ за пределы топливной магистрали [4].

В целом, все перечисленные выше наиболее часто применяемые методы и средства обеспечения штатных условий по параметру содержания СГВ на входе в топливные магистрали и насосы двигателя РН не гарантируют возможности их поддержания при изменении условий эксплуатации РН. Причиной этого является преимущественно пассивный характер оказываемого ими влияния на ГДО в ТБ; отличительным признаком такого влияния является отсутствие цепи обратной связи как звена, принципиально необходимого для осуществления эффективного воздействия на процессы формирования и движения СГВ в соответствии с ГДО в ТБ, изменяющейся в процессе полета.

Указанные обстоятельства, наряду с необходимостью максимально полного использования располагаемых бортовых запасов КТ, обуславливают актуальность задачи организации активного управления гидродинамической обстановкой (АУ ГДО), изменяющейся в ТБ в процессе полета, с целью обеспечения устойчивой работы двигателя РН в широком диапазоне изменения полетных нагрузок и параметров СП (давления наддува, уровня КТ в баках и т. п.). Решение задачи АУ ГДО предполагает:

- построение наблюдаемой бортовыми измерительными средствами объективной модели ГДО как объекта управления в виде набора соотношений, описывающих связь параметров полетных вибрационных нагрузок и параметров формирующихся в КТ газожидкостных сред;

- выбор входного управляющего воздействия и способа его изменения, обеспечивающих достижение цели управления на основе доступных данных о текущем состоянии объекта управления;

- выбор вида и состава средств, реализующих способ изменения во времени входного управляющего воздействия, при котором достигаются поставленные цели управления.

Аналитический обзор существующих инструментальных методов получения количественных данных о содержании СГВ в больших объемах различных жидкостей [14, 15] показал, что перечень таких методов, представляющих интерес в плане рассматриваемой задачи, весьма ограничен. Так, например, наиболее часто используемые на практике оптический, электрический, лазерный методы и их комбинации позволяют определять содержание СГВ в жидкости, текущей по трубопроводам относительно небольшого диаметра [16], т. е. практически на входе в двигатель (когда задача организации управления этим параметром в условиях полета теряет смысл), но не в емкостях большого объема.

Из других реализованных на практике способов оперативного измерения концентрации СГВ могут представлять интерес акустические методы экспресс-анализа газосодержания, в основу которых положена зависимость фазовой скорости распространения акустического сигнала в жидкости со СГВ от частоты сигнала и концентрации свободного газа в жидкости. Развитием этого метода является использование двухчастотного акустического сигнала, позволяющего повысить оперативность и точность определения малых концентраций свободного газа в гидродинамических системах с быстро меняющимися параметрами среды на различных глубинах [17].

Кроме того, оценивая перспективы использования акустических методов для измерения содержания СГВ в ТБ, необходимо иметь в виду, что их реа-

лизация сопряжена с необходимостью размещения на РН громоздкого оборудования для обеспечения сложной методики проведения измерений и обработки их результатов в условиях полета.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время отсутствуют эффективные методы и технические средства, позволяющие получать объективные данные о содержании и движении СГВ в КТ, находящихся в баках РН, путем проведения непосредственных инструментальных измерений на борту РН в процессе полета.

В связи с этим, для получения объективных количественных данных о текущем содержании СГВ и их распределении по высоте столба КТ в ТБ целесообразно использовать достаточно простые и содержательные, в плане задачи АУ ГДО, модели указанных существенно нелинейных процессов, полученные на основании экспериментальных данных [8–10]. Эти модели, определяющие параметры и особенности движения СГВ, формирующихся в приповерхностном барботажном слое и зонах развития сорбционных процессов под влиянием полетных нагрузок, приведены ниже.

Аналитическое выражение, определяющее с приемлемой для практических расчетов точностью толщину $H_{\text{БС}}$ приповерхностного барботажного слоя в зависимости от параметров вибронагружения (виброперегрузки A_g и частоты f), имеет вид

$$H_{\text{БС}} \cong 12 \frac{A_g}{f^2}, \quad (1)$$

где $A_g \geq 0,05f$, $f \geq 20$ Гц.

Максимальный диаметр $d_{\text{п}}^{\text{max}}$ свободных газовых включений, барботирующих в приповерхностном слое, составляет [11]

$$d_{\text{п}}^{\text{max}} = d_{\text{кр}} \cong \left(\frac{24}{C_f} \right)^{1/3} \frac{\sigma}{v_{\text{п}}^2 (\rho_{\text{ж}}^2 \rho_{\text{г}})^{1/3}}, \quad (2)$$

где C_f – коэффициент сопротивления движению [11]; σ – коэффициент поверхностного натяжения; $v_{\text{п}}$ – скорость обтекания СГВ жидкостью в процессе всплытия; $\rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{г}}$ – плотности жидкости и газа в СГВ, соответственно, а распределение СГВ по размерам близко к нормальному закону; при этом их средний диаметр $d_{\text{ср}} \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ м [10].

Коллективная (групповая) скорость всплытия СГВ в поле массовых сил определяется соотношением [18]

$$v = 1,5 \cdot 4 \sqrt{\frac{\sigma n_z g}{\rho_{\text{ж}}}} \psi, \quad (3)$$

где n_z – осевая перегрузка; g – ускорение свободного падения на поверхности Земли; ψ – фактор взаимодействия СГВ, который в области изменения их объемного содержания в КТ от 0,05 до 0,7 не зависит от расхода фаз и определяется формулой [18]

$$\psi = 1,4 \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{г}}} \right)^{0,2} \left(1 - \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^5. \quad (4)$$

С учетом этого, скорость обтекания СГВ в процессе их всплытия в столбе КТ составит

$$v_{\text{п}} = v_{\text{кт}} - v, \quad (5)$$

где $v_{\text{кт}}$ – скорость опускающего движения КТ в топливном баке.

Объемное содержание СГВ в приповерхностном барботажном слое ТБ описывается полученной в [19] на основании анализа и обработки многочисленных экспериментальных данных зависимостью, которая с учетом характерных геометрических характеристик баков РН приводится к выражению:

$$\varphi = \text{th} \left[\frac{0,524}{v^{0,075} (n_z H_{\text{БС}})^{0,126}} \right]. \quad (6)$$

Полетные вибрации ТБ, обусловленные работой двигателей РН, инициируют возникновение и развитие в КТ сорбционных процессов, особенно при использовании КТ, которые, с целью удаления из них растворенных балластных газов, негативно влияющих на энергетические и эксплуатационные характеристики топлива, насыщены замещающим газом (гелием) [20].

При снижении давления в газонасыщенных КТ до уровня давления насыщения $P_{\text{Н}}$ создаются условия для десорбции (выделения) газа из раствора в свободное состояние. Центрами газовыделения являются находящиеся в компонентах топлива нерастворенные газовые пузырьки, механические примеси и т. п.

Под воздействием полетных вибраций в поле переменного давления КТ происходит периодическое сжатие и расширение газового пузыря. Так как количество диффундирующего в пузырь газа пропорционально его поверхности, то за каждый цикл пульсаций масса газа в СГВ увеличивается. Это приводит (в среднем) к его росту во времени, т. е. «выпрямлению» знакопеременного диффузионного потока газа через изменяющуюся поверхность в условиях, весьма близких к равновесному состоянию с окружающей жидкостью [10].

Амплитуда пульсаций давления $A_{\text{р}}^{\text{вд}}$, при превышении которой начинается рост СГВ диаметром $d_{\text{п}}$, обусловленный процессом «выпрямленной газовой диффузии», определяется зависимостью:

$$A_{\text{р}}^{\text{вд}} = \sqrt{\frac{6\sigma P_{\text{Н}}}{d_{\text{п}}}}. \quad (7)$$

С учетом того, что скорость сорбционных процессов при каждом отклонении от равновесного состояния пропорциональна степени пересыщенности раствора и текущему значению площади поверхности раздела фаз «газ – жидкость» (в конце такого отклонения система «газ – жидкость» приходит в равновесное состояние), в [10] получено соотношение для определения скорости «выпрямленной газовой диффузии» \dot{V} в объеме $\Delta V_{\text{ж}}$, где амплитуда пульсаций давления с частотой f соответствует условию (7):

$$\dot{V} = f S \Delta V_{\text{ж}} \left[\left(\frac{P_{\text{H}} + \bar{A}_{\text{p}}}{P_{\text{ст}}} - 1 \right) + \left(\frac{P_{\text{H}} - \bar{A}_{\text{p}}}{P_{\text{ст}}} - 1 \right) \left(\frac{P_{\text{ст}} - \bar{A}_{\text{p}}}{P_{\text{ст}} + \bar{A}_{\text{p}}} \right)^{\frac{2}{3n}} \right] \cdot \left[1 - \exp \left(- \frac{0,346}{f T_{0,5}} \right) \right] \cdot f, \quad (8)$$

где $\bar{A}_{\text{p}} = \frac{2}{\pi} A_{\text{p}}^{\text{max}}$ – среднее значение амплитуды колебаний давления в насыщенной газом жидкости; $A_{\text{p}}^{\text{max}}$ – амплитуда гармонического колебания давления в жидкости относительно уровня статического давления $P_{\text{ст}}$ в месте расположения объема $\Delta V_{\text{ж}}$; $T_{0,5}$ – период полувыделения, т. е. время выделения половины от общего количества растворенного в жидкости газа; S – постоянная растворимости газа, равная отношению объема, который бы занял газ в нерастворенном состоянии при текущих значениях давления $P_{\text{ст}}$ и температуры T , к объему жидкости, в которой он был растворен, определяемая по формуле [21]:

$$S = \chi(T) \frac{M_{\text{г}} \rho_{\text{ж}}}{M_{\text{ж}} \rho_{\text{г}_0}} P_{\text{ст}} \frac{T}{273}, \quad (9)$$

где $\chi(T)$ – коэффициент Генри; $M_{\text{г}}, M_{\text{ж}}$ – молекулярная масса газа и жидкости соответственно; $\rho_{\text{г}_0}, \rho_{\text{ж}}$ – плотности газа и жидкости при нормальных условиях ($P_0 = 10^5 \text{ Па}$, $T_0 = 273^\circ \text{ К}$).

Образующаяся в процессе десорбции газожидкостная среда представляет собой «рой» СГВ, растущих вследствие «выпрямленной газовой диффузии» при пульсациях в поле переменного давления в жидкости. Изменение среднего диаметра отдельных СГВ во времени определяется соотношением:

$$d_{\text{п}}(\tau_{\text{к}}) = 0,046 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_{\text{ст}}}{P_{\text{ст}} - \bar{A}_{\text{p}}}} \cdot \left[\left(\frac{P_{\text{H}} + \bar{A}_{\text{p}}}{P_{\text{ст}} - \bar{A}_{\text{p}}} - 1 \right) + \left(\frac{P_{\text{H}} - \bar{A}_{\text{p}}}{P_{\text{ст}}} - 1 \right) \left(\frac{P_{\text{ст}} - \bar{A}_{\text{p}}}{P_{\text{ст}} + \bar{A}_{\text{p}}} \right)^{\frac{2}{3n}} \right] \cdot f \tau \leq d_{\text{п}}^{\text{max}}, \quad (10)$$

где τ – продолжительность колебательного процесса, с.

Объем газа, выделившийся в зоне ТБ высотой H_3 , где выполняется условие $P_{\text{ст}} - \bar{A}_{\text{p}} < P_{\text{H}}$, определяется соотношением:

$$V_3 = H_3 \frac{\pi D_{\text{Б}}^2}{4}, \quad (11)$$

где $D_{\text{Б}}$ – диаметр ТБ, а объемное содержание СГВ в этой зоне составит

$$\varphi = \frac{4 \dot{V} \tau}{\pi H_3 D_{\text{Б}}^2} = \frac{4 \dot{V}}{\pi \nu D_{\text{Б}}^2}, \quad (12)$$

где ν – групповая скорость всплывания СГВ – см. (3), (4).

Соотношения (1) – (12) позволяют получать количественные оценки текущих значений объемного содержания СГВ в жидких КТ, находящихся в

ТБ, подвергающихся воздействию полетных нагрузок. Для формирования содержательной, в плане организации рациональной стратегии АУ, модели ГДО в ТБ по параметру содержания СГВ на входе в топливные магистрали, эти соотношения должны быть дополнены выражениями, определяющими влияние полетных нагрузок на движение СГВ в жидких КТ.

Значимость задачи установления характера движения СГВ в КТ объясняется тем, что СГВ, находящиеся в поле массовых сил в жидкостном столбе, при его виброн нагружении и определенных соотношениях между характерными параметрами вибраций не всплывают к свободной поверхности, а остаются во взвешенном состоянии или даже мигрируют в направлении, противоположном действию массовых (архимедовых) сил [9, 22]. Причиной этого является наложение пульсаций объема СГВ на их движение в жидкости. Изменение размеров СГВ определяется изменением давления в окружающей среде; при этом приращения объема СГВ и давления в жидкости имеют разные знаки, что, в конечном итоге, и определяет мгновенную вертикальную составляющую скорости движения этого объема.

Пульсации давления в КТ, соответствующие началу опускного движения СГВ, определяются условиями их равновесия на заданной глубине. Эти значения называются критическими (A_p^{kp}) и определяются амплитудой пульсаций

$A_p(z)$ и ее градиентом $\frac{dA_p}{dz}$ в «точке», занимаемой СГВ.

Аналитические выражения для расчета A_p^{kp} , инвариантные относительно распределения давления по высоте столба жидкости $P(z,t)$ в «точке», занимаемой СГВ на глубине $z = h$, имеют вид [22]:

- для нелинейной формы колебаний давления

$$A_p^{kp}|_{z=h} = \frac{2nn_z\rho_j g(P_a + \rho_j gn_z h) \frac{dA_p}{dz}|_{z=h}}{(\rho_j gn_z)^2 + \left(\frac{dA_p}{dz}|_{z=h}\right)^2}; \quad (13)$$

- для линейной формы колебаний (при частоте вибраций менее $0,7f_{1p}$, где f_{1p} – первая резонансная частота ТБ с КТ [22, 23])

$$A_p^{kp}|_{z=h} = \sqrt{2nn_z\rho_j gh(P_a + \rho_j gn_z h)}, \quad (14)$$

где P_a – давление наддува; n – показатель политропы газа в СГВ, n_z – осевая перегрузка.

Условие начала опускного движения СГВ имеет вид:

$$A_p^d|_{z=h} > A_p^{kp}|_{z=h}, \quad (15)$$

где $A_p^d|_{z=h}$ – амплитуда действующих на глубине $z = h$ пульсаций давления в жидкости, обусловленных виброн нагружением ТБ.

Аналитическое выражение для оценки скорости опускного движения СГВ, полученное решением уравнения сохранения среднего за период коле-

баний количества движения СГВ в пренебрежении его массой и ускорением, приведено в [9]. Выполненные с его использованием оценки для характерных параметров вибронагружения РН и $A_p > A_p^{кр}$ [23] показывают, что скорость опускного движения СГВ растет с увеличением глубины, изменяясь от $\sim (0,05 \dots 0,10)$ м/с у поверхности до $\sim (0,5 \dots 1,0)$ м/с у днища ТБ, что согласуется с экспериментальными данными [24].

Таким образом, соотношения (1) – (15) составляют основу математической модели ГДО в КТ как объекта АУ содержанием СГВ на входе в топливные магистрали двигателя, представленной в виде связей между параметрами нагрузок и параметрами формирующихся в КТ газожидкостных структур. Модель отражает единообразие факторов, оказывающих определяющее влияние на характер и динамику протекания основных процессов, ответственных за формирование и движение СГВ. Такими факторами являются виброперегрузка A_g и параметры обусловленного ею переменного по высоте z столба КТ поля давления: амплитуда его пульсаций $A_p(z)$ и градиент ее изменения $\frac{dA_p}{dz}(z)$, которые определяются формой колебаний давления. В общем случае форма колебаний давления в КТ нелинейна по высоте z столба КТ, что обусловлено нелинейным характером явлений и процессов, возникающих и развивающихся при колебаниях жидких КТ в тонкостенных баках [5 – 8].

Отсутствие удовлетворительной теории указанных эффектов не позволяет рассчитывать амплитуды колебаний жидкости в ТБ. Даже при использовании наиболее эффективного на сегодняшний день метода конечных элементов [25] удастся получать лишь общие оценки характера движения жидкости в сложной гидромеханической системе «ТБ – жидкий КТ», определяемого взаимосвязанными колебательными движениями жидкой среды и тонкостенной конструкции бака.

В связи с этим, задачу мониторинга текущих параметров переменного поля давления в КТ в баках РН целесообразно решать как задачу восстановления формы его колебаний путем аппроксимации результатов измерения доступными методами и средствами параметров реального поля давления, формирующегося с учетом всех случайных факторов и нелинейностей, и последующей идентификации на этой основе ГДО в КТ как объекта АУ содержанием СГВ в КТ на входе в топливные магистрали. При этом в качестве средства измерения целесообразно использовать тензометрические датчики, устанавливаемые на внутрибаковых конструктивных элементах на различной высоте вдоль продольной оси ТБ [26]. Датчики этого типа характеризуются безынерционностью, отсутствием гистерезиса, широким диапазоном измерений по частоте и интенсивности усилий, воспринимаемых одним датчиком, малыми габаритами и массой, конструктивной простотой и надежностью. Они широко применяются для измерения пульсаций давления в широком частотном спектре.

Отметим также, что тонкостенные днища ТБ ввиду значительной податливости являются эффективными фильтрами, препятствующими передаче в жидкость высокочастотных компонент действующей на ТБ вибронагрузки. Этим обусловлена близость формы колебаний давления по высоте столба КТ к линейной [23] и, как следствие, возможность ее восстановления с достаточной для решения рассматриваемой задачи формирования АУ ГДО в ТБ точностью, используя показания только одного датчика, находящегося в КТ в

непосредственной близости к нижнему днищу ТБ.

Как отмечалось выше, решение задачи АУ, наряду с построением модели объекта управления, включает выбор управляющего воздействия с указанием способа его применения, при котором выходной процесс будет обеспечивать выполнение поставленной цели управления.

Ввиду принципиальной невозможности осуществить целенаправленное изменение в процессе полета действующих на ТБ вибрационных нагрузок, управление процессом формирования и движения СГВ целесообразно осуществлять путем воздействия на уровень действующих в КТ пульсаций давления. Снижение амплитуд пульсаций давления может быть осуществлено, например, путем их суперпозиции с колебаниями давления, генерируемыми в противоположной фазе [26], или путем подачи в КТ узкополосного высокочастотного сигнала с последующей «перекачкой» в него энергии действующих пульсаций давления [27]. Реализация этих и подобных им управлений предполагает необходимость установки на борту РН специальных генераторов, преобразователей и согласующих устройств для передачи соответствующих сигналов в жидкость с обеспечением возможности их надежного функционирования в изменяющихся условиях полета, что может негативно сказаться на эксплуатационных характеристиках СП.

В связи с изложенным, а также учитывая, что целью АУ ГДО является обеспечение устойчивой работы двигателя РН в полете путем недопущения проникания СГВ в его топливные магистрали в количествах, которые могут привести к срыву рабочего процесса насосов, целесообразно использовать подход, реализующий управление значениями критических – по условию начала опускного движения СГВ – уровней пульсаций давления $A_p^{кр}$, обеспечивая в течение всего активного участка траектории полета их превышение над действующими уровнями пульсаций давления по всей высоте столба КТ в баке. В этом случае наличие зависимости $A_p^{кр}$ от давления P_a в СГО бака, т. е. от давления наддува, предопределяет возможность осуществления достаточно простого способа управления величиной $A_p^{кр}$ путем изменения расхода газа наддува в режиме функционирования объекта управления, используя измеряемые в процессе полета бортовыми средствами текущие значения (см. (14)):

- осевой перегрузки;
- давления газа в СГО;
- амплитуды пульсаций давления в КТ у нижнего днища ТБ;
- высоты столба КТ в ТБ.

Такой подход позволяет сформировать систему АУ ГДО в ТБ по параметру объемного содержания СГВ на входе в топливные магистрали двигателя с возможностью организации полноразмерной обратной связи [28] и достаточно простым алгоритмом управления, который предполагает:

- измерение текущих значений осевой перегрузки, давления газа в СГО, высоты столба КТ в ТБ и амплитуды пульсаций давления у днища ТБ;
- определение критических значений амплитуд пульсации давления по высоте столба КТ;
- выработку управляющего сигнала на привод регулятора расхода газа наддува и установление такого давления в СГО бака, при котором выполняется условие

$$A_p^{вд} > A_p(z) < kA_p^{кр}(z),$$

где k – коэффициент запаса.

Таким образом, предложен подход к выбору рациональной стратегии АУ ГДО в ТБ при полете РН по параметру содержания СГВ на входе в топливные магистрали двигателя, основанный на использовании для получения текущих оценок о состоянии объекта управления простых, но содержательных моделей формирования и движения СГВ в вибронгруженных столбах жидкостей. Предлагаемый подход позволяет решить задачу построения эффективной системы управления с полноразмерной обратной связью на базе имеющихся на борту РН средств и ресурсов и построить эффективный алгоритм управления.

1. Горбунцов В. В. Активное управление возмущённым движением ракеты-носителя на основе данных мониторинга текущего состояния её систем: задачи и перспективы / В. В. Горбунцов, А. Н. Заволока, Н. Ф. Свириденко // Техническая механика. – 2012. – № 1. – С. 72 – 81.
2. Пути повышения надежности и безопасности эксплуатации ракетных комплексов / Ю. А. Митков, В. А. Антонова, М. Л. Волошин, А. И. Логвиненко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 3 (90). – С. 30 – 36.
3. Чебаевский В. Ф. Кавитационные характеристики высокооборотных шнеко-центробежных насосов / В. Ф. Чебаевский, В. И. Петров. – М.: Машиностроение, 1973. – 192 с.
4. Васильев Ю. Н. Устройства для дегазации жидкого топлива перед насосами ракетного двигателя / Ю. Н. Васильев, В. И. Тихомиров // Известия РАН. Энергетика. – 2003. – № 4. – С. 51 – 57.
5. Рабинович Б. И. Неустойчивость жидкостных ракет и космических аппаратов и некоторые фрагменты борьбы с ней / Б. И. Рабинович. – М.: ИКИ РАН, 2006. – 40 с. (Препринт / РАН, ИКИ; Н/8977 / Пр. – 2123.)
6. Натанзон М. С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты / М. С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
7. Додж Ф. Т. Колебания поверхности жидкости в жёстких и цилиндрических баках, совершающих продольные колебания / Ф. Т. Додж, Д. Д. Кона, Н. Абрамсон // Ракетная техника и космонавтика. – 1965. – Т. 3, № 4. – С. 139 – 153.
8. Венедиктов Б. Л. Самовозбуждение низкочастотных колебаний жидкости при высокочастотных колебаниях сосуда / Б. Л. Венедиктов, Р. А. Шибанов // Динамика КА и исследование космического пространства. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 215 – 227.
9. Хасимото Х. Разрушение поверхности и образование пузырьков в столбе жидкости при вертикальных колебаниях / Х. Хасимото, С. Судо // Ракетная техника и космонавтика. – 1980. – Т. 18, № 5. – С. 116 – 124.
10. Сплошность газонасыщенных компонентов топлива при полётных вибрациях жидкостной ракеты-носителя / О. В. Пилипенко, А. Н. Заволока, А. Д. Николаев, Н. Ф. Свириденко, А. Н. Мащенко, В. Н. Бичай // Техническая механика. – 2009. – № 4. – С. 3 – 16.
11. Гройс Л. В. К вопросу о растворении газовых пузырьков в жидкости / Л. В. Гройс, Н. Е. Кванталиани // ИФЖ. – 1978. – Т. 34, № 2. – С. 292 – 300.
12. Жовтоног В. М. Современные системы наддува верхних ступеней ракет-носителей на криогенных компонентах топлива / В. М. Жовтоног, А. И. Логвиненко, С. Д. Солод // Космическая техника. Ракетное вооружение. – 2007. – Вып. 2. – С. 37 – 42.
13. Беляев Н. М. Расчет пневмогидравлических схем ракет / Н. М. Беляев. – М.: Машиностроение, 1989. – 219 с.
14. Гаврилов Л. Р. Содержание свободного газа в жидкостях и методы его измерения / Л. Р. Гаврилов // Физические основы ультразвуковой технологии. – М.: Наука, 1970. – С. 395 – 426.
15. Фуколова С. А. Оценка концентрации свободного воздуха оптическим методом / С. А. Фуколова, Т. В. Макарова, Е. Р. Губанова // Акустика и ультразвуковая техника. – Вып. 20. – К.: Техника, 1985. – С. 13 – 17.
16. Автономная экспериментальная отработка агрегатов и систем пневмогидросистемы подач ЖРДУ / В. Г. Василина, Г. И. Ильин, В. Ф. Несвид, В. И. Перлик. – Харьков, ХАИ, 2005. – 131 с.
17. Потехин Ю. Г. Акустический метод экспресс-анализа концентрации свободного газа в жидкости / Ю. Г. Потехин, Е. С. Чистяков // Акустический журнал. – 1978. – Т. XXIV, вып. 2. – С. 243 – 248.
18. Лабунцов Д. А. Паросодержание двухфазного адиабатного потока в вертикальных панелях / Д. А. Лабунцов, И. П. Корнюхин, Э. А. Захарова // Теплоэнергетика. – 1968. – № 4. – С. 63 – 67.
19. Ефремов Г. И. Исследование гидродинамики барботажного слоя / Г. И. Ефремов, И. А. Вахрушев // Химия и технология топлив и масел. – 1969. – № 4. – С. 34 – 38.
20. Метод повышения эксплуатационных характеристик топлива для ЖРД космической ступени / В. Н. Ошанин, Г. М. Иваницкий, А. В. Костюк, М. П. Сало // Космическая техника. Ракетное вооружение. – 2007. – Вып. 2. – С. 51 – 57.
21. Ермашкевич В. Н. Гидро- и термодинамика насосных систем энергоустановок на четырехокиси азота / В. Н. Ермашкевич. – Минск: Наука и техника, 1987. – 287 с.
22. Кузнецов В. И. Обобщенные условия равновесия газовых пузырей в жидкости / В. И. Кузнецов, Н. Ф. Свириденко // Многофазные потоки в энергоустановках. – Харьков: ХАИ, 1988. – С. 10 – 16.

23. Экспериментальные исследования влияния вибраций на работоспособность барботажных систем / В. С. Будник, Н. Ф. Свириденко, Б. В. Свердличенко, В. И. Кузнецов // Гидродинамика технических систем. – К. : Наук. думка, 1985. – С. 102 – 108.
24. Кана Д. Д. Поведение пузырей газа в баках с жидкостью, подвергающихся продольным вибрациям / Д. Д. Кана, Ф. Т. Додж // Вопросы ракетной техники. – 1966. – № 1. – С. 36 – 41.
25. Башлий И. Д. Влияние полетных вибраций верхних ступеней ракет-носителей на характеристики сорбционных процессов в жидком газонасыщенном топливе в баках сложной пространственной конфигурации / И. Д. Башлий, А. Д. Николаев, Н. Ф. Свириденко // Техническая механика. – 2011. – № 2. – С. 13 – 22.
26. Могендович Е. М. Гидравлические импульсные системы / Е. М. Могендович. – Л. : Машиностроение, 1977. – 216 с.
27. Руденко О. В. Теоретические основы нелинейной акустики / О. В. Руденко, С. И. Солуян. – М. : Наука, 1975. – 288 с.
28. Патент на винахід 104481 Україна, МПК F 02 K 9/42. Спосіб і пристрій забезпечення стійкості роботи двигуна ракети-носія на рідких газонасичених компонентах палива / Горбунцов В. В., Заволока О. М., Свириденко М. Ф.; заявник і патентоволодар Інститут технічної механіки НАН України і ДКА України. – U201209694 : заявл. 10.08.2012; опубл. 11.03.2014, Бюл. № 6.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепропетровск

Получено 22.01.15,
в окончательном варианте 23.02.15