

УДК 629.7.064.2

## ДИНАМИКА САР ДАВЛЕНИЯ В ГАЗОВОЙ ПОДУШКЕ ТОПЛИВНОГО БАКА ЖРД

Стадник Д. М.,  
Свербилов В. Я.

Самарский государственный  
аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королёва  
(национальный исследовательский  
университет) (СГАУ)  
443086, Россия, г. Самара,  
Московское шоссе, 34  
sdm-63@bk.ru

Дан анализ влияния осевой перегрузки на динамические характеристики САР давления в газовой подушке топливного бака ЖРД. Определены частотные характеристики системы. Указывается возможность применения разработанной модели при расчёте динамических характеристик топливной системы ЖРД.

**Ключевые слова:** регулятор давления газа непрямого действия, осевая перегрузка, динамика САР, амплитудно- и фазочастотные характеристики, расчёт.

### 1 Введение

Обеспечение требуемого давления в газовой подушке топливного бака ЖРД во многом определяет эффективную работу турбонасосного агрегата (ТНА) [1]. Нередко возникают случаи нарушения нормального функционирования системы регулирования давления, связанные с процессом самовозбуждения колебаний и вибраций подвижных элементов регулятора (автоколебания).

Разработке методик расчета динамических характеристик САР посвящено большое число работ, например, [1-3], в которых рассмотрено решение задач обеспечения устойчивости конкретных систем. В данном случае исследуемая система представляет собой регулятор непрямого действия [4], состоящего из основного клапана (ОК) и управляющего клапана (УК) (рисунок 1).

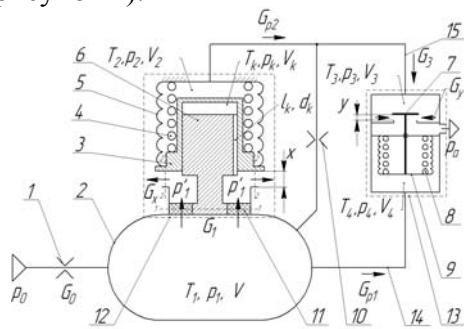


Рисунок 1. Имитация штатной работы системы наддува:

1, 10 - дроссель; 2 - ёмкость; 3 - тарель клапана; 4, 8 - пружина; 5, 9 - сильфон; 6 - направляющая; 7 - шток; 11 - пакет сетчатых элементов; 12 - ОК; 13 - УК; 14, 15 - трубопровод.

Особенностью этой системы является достаточно высокие требования по точности поддержания давления в баке в широком диапазоне расходов (0...2.0 кг/с). Кроме того, ОК имеет плоскую тарель, что приводит к появлению большой аэродинамической силы. Поэтому важным и актуальным является изучение динамических процессов, возникающих при работе САР в газовой подушке топливного бака и влияющих, в первую очередь, на обеспечение требуемого давления на входе в насос.

### 2 Коррекция математической модели

В предыдущих работах [4-6] особое внимание уделялось исследованиям, направленным на обеспечение устойчивости регулятора давления газа. При этом в модели не учитывалось влияние осевой перегрузки, действующей во время полета ракеты-носителя и меняющейся в диапазоне значений от 0 до 4g. До настоящего времени влияние осевой перегрузки на динамику САР давления газа остается малоизученным. В данной работе авторы пытаются устранить этот пробел за счет уточнения уравнения равновесия тарели ОК [6]:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + D \cdot \frac{dx}{dt} + J \cdot x + m \cdot g \cdot (1 \pm n_x) + P_0 - P_x = 0, \quad (1)$$

где  $m$  - приведенная масса тарели с пружиной и сильфоном;  $x$  - положение тарели над сед-

лом;  $D$  - вязкое демпфирование;  $J$  - суммарная жесткость пружины и сильфона ОК;  $P_{\Sigma}$  - суммарная сила нелинейного трения и аэродинамической подъемной силы;  $P_0$  - усилие предварительной затяжки пружины ОК,  $g$  - ускорение свободного падения,  $n_x$  - коэффициент осевой перегрузки.

### 3 Численное моделирование и результаты исследования

Для исследования динамических характеристик САР давления в газовой подушке топливного бака были использованы выведенные в работе [6] уравнения (1)...(20) с учетом уравнения движения тарели ОК, представленного в виде выражения (1). Исследования проводились с использованием программного пакета MATLAB/SIMULINK.

При моделировании динамических процессов в регуляторе давления использовался одношаговый явный классический метод Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка (ode 45). Во многих случаях он дает хорошие результаты.

На рисунке 2 показаны графики изменения высоты подъема тарели над седлом  $x$  и давления в емкости  $p_{над}$  по времени при ступенчатом изменении коэффициента осевой перегрузки  $n_x$ .

Как следует из рисунков резкое, изменение осевой перегрузки, связанное, например, с изменением тяги при полете РН, приводит к резкому прикрытию ОК, что сопровождается незначительным повышением давления в емкости. Причем движение тарели ОК может сопровождаться колебательными процессами, которые при недостаточном демпфировании могут приводить к поломке запорно-регулирующих элементов и как следствие к разрушению топливных баков. Поэтому важным является обеспечение требуемой величины демпфирования подвижных элементов регулятора.

Анализ графиков, приведенных выше, показывает, что требуемое демпфирование можно обеспечить путем выбора параметров канала, соединяющего глухую полость между направляющей и тарелью клапана с газовой

подушкой бака. При этом нужно учитывать активное и реактивное (инерционное) сопротивление соединительного канала [5].

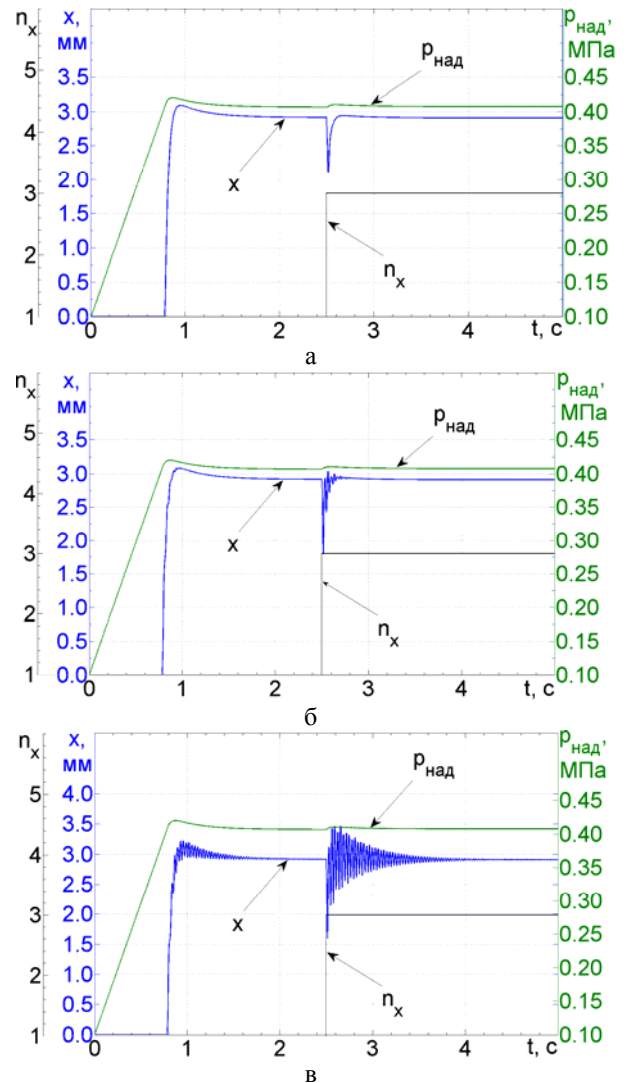


Рисунок 2. Переходные процессы изменения положения  $x$  тарели ОК и давления газа в емкости при ступенчатом изменении коэффициента осевой перегрузки  $n_x$  при различных диаметрах канала: а -  $d_k=1,2$  мм, б -  $d_k=1,6$  мм, в -  $d_k=2$  мм

Для исследования динамики системы регулирования давления газа в емкости были построены амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики (рисунок 3) с использованием метода малых отклонений при синусоидальной осевой перегрузке

$$\Delta n_x = A_{n_x} \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi_0).$$

метром являлось изменение давления газа в емкости  $\Delta p_{\text{над}}$ .

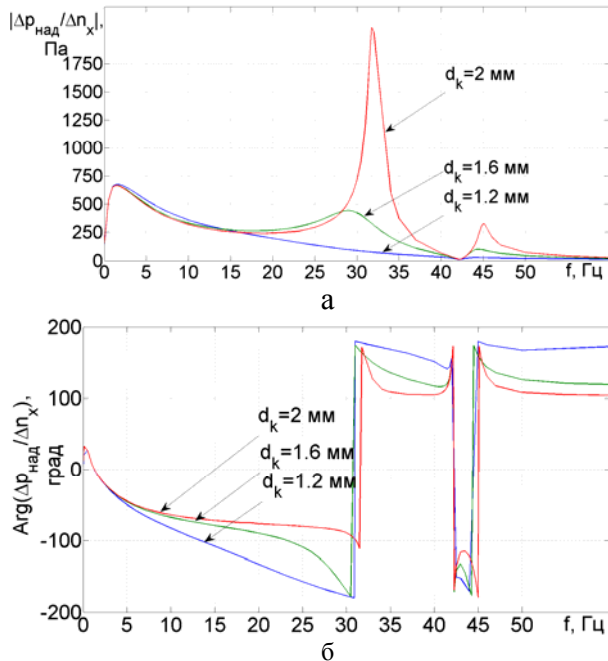


Рисунок 3. Амплитудно (а) и фазочастотная (б) характеристики системы «ёмкость – регулятор давления»

Анализ представленных выше характеристик показывает, что на низких частотах наблюдается незначительный резонансный пик. При увеличении частоты возмущающего воздействия до 30...34 Гц наблюдается резкое увеличение амплитуды изменения давления газа в емкости, связанное с резонансом пружинно-массовой системы ОК. При этом амплитуда колебания давления в емкости может превысить 2 кПа в случае некорректного подбора диаметра канала ( $d_k = 2$  мм) демпфирующего элемента ОК.

#### 4 Заключение

Учитывая соосность направляющей ОК и вектора тяги, необходимо принимать в расчет изменение давления в газовой подушке, которое строго регламентировано технической документацией и напрямую связано с обеспече-

нием требуемого давления компонента топлива на входе в ТНА.

Таким образом, учёт такого параметра как осевая перегрузка является обязательным условием для обеспечения требуемого качества динамических процессов в САР давления в газовой подушке топливного бака ЖРД. Разработанная модель позволяет существенно сократить время на экспериментальную отработку регулятора с целью реализации требуемых статических и динамических характеристик. Разработанная математическая модель может быть использована при расчете динамических характеристик топливной системы ЖРД.

Работа выполнена при государственной поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации мероприятий Программы повышения конкурентоспособности СГАУ среди ведущих научно-образовательных центров на 2013-2020 годы.

#### Список использованных источников

- [1] Ring, E. (1964) Rocket Propellant and Pressurization Systems, *Prentice Hall*.
- [2] Бугаенко, В.Ф. Пневмоавтоматика ракетно-космических систем [Текст] / В.Ф. Бугаенко. Учеб. пособие для вузов. – М.: «Машиностроение», 1979. – 168 с.
- [3] Гликман, Б.Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей [Текст] / Б.Ф. Гликман. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
- [4] Sverbilov, V., Stadnik, D., Makaryants, G. (2013) Study on dynamic behavior of a gas pressure relief valve for a big flow rate, *ASME/BATH 2013 Symposium on Fluid Power and Motion Control, FPMC*.
- [5] Свербилов, В.Я. Исследование динамических характеристик системы регулирования давления в газовой подушке топливного бака ЖРД [Текст] / В.Я. Свербилов, Д.М. Стадник // Известия СНЦ РАН. – 2011. – т. 13, №4(3). – С. 1227-1229.
- [6] Стадник, Д.М. Обеспечение устойчивости регулятора давления газа непрямого действия посредством установки дросселя на входе [Текст] / Д.М. Стадник, В.Я. Свербилов, Г.М. Макарьянц, М.В. Макарьянц // Вестник СГАУ. – 2012. – № 3-2 (34). – С. 184-192.

**DYNAMICS OF TANK PROPELLANT HEAD CONTROL SYSTEM**

**Stadnik D. M.,**

**Sverbilov V. Y.**

Samara State Aerospace University  
(SSAU)

34, Moskovskoye shosse, Samara,  
443086, Russia  
*sdm-63@bk.ru*

*In the paper the impact of the axial acceleration factor on dynamic characteristics of the pressure controls of the gas pillow of liquid-propellant rocket's fuel tank is considered. Frequency responses are defined. Possible applications of the developed model are proposed.*

**Key words:** *pilot operated gas pressure controller, axial acceleration factor, control system dynamics, gain and phase frequency responses*