

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА ПЕРФОРИРОВАННУЮ ПЕРЕГОРОДКУ БАКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

© 2020

А. Г. Филипов инженер; АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара; аспирант; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; iskander-filipov@yandex.ru

И. Е. Глазков инженер; АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара; аспирант; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва; reiser733@yandex.ru

Рассмотрено решение задачи динамического нагружения перфорированной перегородки, находящейся в баке с топливом ракеты-носителя. Описана методика расчёта динамического нагружения перегородки. Разложено её уравнение движения на составляющие и проведён расчёт нагрузок при гармонических колебаниях ракеты-носителя. В качестве исходных данных для динамического расчёта нагрузок были заданы ускорения узлов крепления и ускорения осцилляторов, моделирующих колебания топливного бака, полученные из решения общей динамической задачи для оценки гидродинамической силы для ракеты-носителя. На этом этапе была рассчитана нагрузка на перегородку с учётом присоединённой массы жидкости в случае аварийного выключения двигательной установки, как одном из самых нагруженных для данной системы. При расчёте нагрузок на перфорированную перегородку использовался нелинейный динамический анализ. В результате расчёта были получены усилия в узлах крепления рассматриваемого элемента.

Переходный процесс; ракета-носитель; динамическая модель; конечно-элементная модель; перегрузки; амплитудно-частотная характеристика; квазистатика

Цитирование: Филипов А.Г., Глазков И.Е. Определение нагрузок на перфорированную перегородку бака ракеты-носителя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 4. С. 80-86. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-4-80-86

Введение

Добавление гидроупругого звена в сложную систему упругих конструкций существенно усложняет задачу исследования динамических характеристик данной системы. Такие конструкции часто представляют собой тонкостенные сосуды, содержащие жидкость.

В отечественной и зарубежной практике решения подобных задач связаны с исследованиями таких учёных как Рабинович Б.И. [1], Шмаков В.П. [2], Моисеев Н.Н. [3], Григолюк Э.И., Горшков А.Г., Лампер Р.Е. [4; 5], Kana D.D., Bauer H.F., Lindholm U.S. и другие.

Первые работы в области динамики колебаний упругих оболочек с жидкостью принадлежат таким исследователям как Рэлей, Жуковский Н.Е. и другие. Развитие космонавтики середины 21 века ускорило разработки вышеуказанной проблемы.

Следует отметить, что в основном все решения задач данной системы связаны с оболочками определённой формы (конические, плоские, сферические). Однако проблема решения задачи динамического нагружения перфорированной оболочки обтекаемой жидкостью остаётся открытой. Здесь решение усложняется тем, что жидкость

протекает сквозь оболочку через отверстия. Такие перегородки устанавливаются на днище внутри баков ракет-носителей (РН). Схема бака с перфорированной перегородкой приведена на рис. 1. Самые «худшие» режимы перегрузок для таких перегородок наступают при переходных процессах, максимальной продольной перегрузке, аварийном выключении двигателей при старте и на участке полёта.

Расчёт нагрузок

В качестве действующих силовых факторов в данной задаче можно определить: весовую составляющую с учётом квазистатических и динамических перегрузок, инерционную гидродинамическую силу, равную произведению присоединённой массы жидкости к соответствующему навесному элементу на относительное ускорение этого элемента (относительно жидкости).

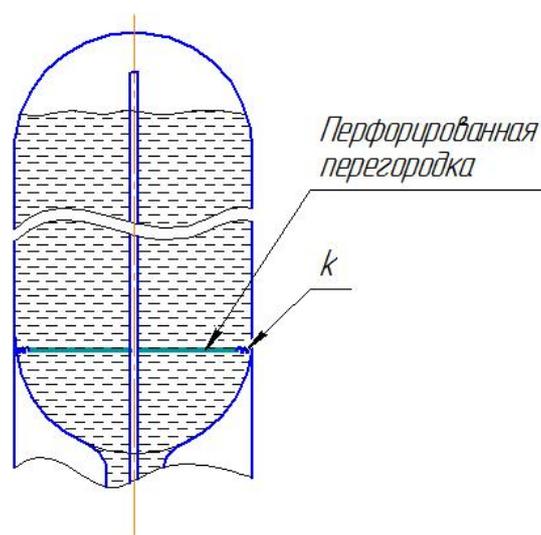


Рис. 1. Схема бака РН с перфорированной перегородкой

При определении усилия в узлах крепления элемента учитывается вся совокупность внешних факторов – квазистатические и динамические ускорения, гидродинамические силы.

В качестве исходных данных для динамического расчёта нагрузок задаются ускорения узлов крепления и ускорения осцилляторов, моделирующих колебания топливного бака, полученные из решения общей динамической задачи для оценки гидродинамической силы для РН.

При построении уравнения движения перегородки считаются заданными масса перегородки, погруженной в жидкость m_0 , жёсткость узлов крепления k (жёсткость крепления перегородки к стенкам топливного бака), масса присоединённой жидкости к перегородке $m_{ж}$, соприкасающейся с жидкостью обеими сторонами [6].

$$\bar{m}_0 = 0,668 \frac{\gamma_1}{g} R, \quad (1)$$

где \bar{m}_0 – присоединённая масса жидкости, отнесённая к единице площади пластины, для жёстко заделанной по контуру круглой пластины, соприкасающейся с жидкостью обеими сторонами; γ_1 – удельный вес жидкости.

Зная, что удельный вес жидкости есть произведение её плотности ρ и ускорения свободного падения g , мы получим:

$$m_{\text{ж}} = 0,668 S_{\text{п}} R_{\text{п}} \rho_{\text{ж}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{п}}$ – радиус перегородки; $S_{\text{п}}$ – площадь перегородки.

Предварительно была построена динамическая конечно-элементная модель топливного бака и РН в целом. Далее необходимо провести расчёты динамического нагружения РКН от соответствующих продольных воздействий при различных случаях нагружения РН. То есть, при расчёте нагрузок на перегородку известны законы продольных перемещений узлов подвеса перегородки $u_0(t)$ и перемещения топлива в баке $u_{\text{ж}}(t)$ относительно системы координат, связанной с РН.

В связи с этим уравнение движения перегородки будет иметь следующий вид:

$$m_0 \ddot{u} = -k(\tilde{u} - u_0) - m_{\text{ж}}(\ddot{u} - \ddot{u}_{\text{ж}}) - a(\dot{u} - \dot{u}_0) + (ng + \ddot{u}_{\text{ж}})0,668 S_{\text{п}} R_{\text{п}} \rho_{\text{ж}} - m_0 ng, \quad (3)$$

где \tilde{u} – перемещение перегородки в системе координат, связанной с РН, состоящее из квазистатической составляющей $u_{\text{ст}}$ и динамической $u(t)$; a – диссипативная характеристика.

$$\tilde{u}(t) = u(t) + u_{\text{ст}}. \quad (4)$$

В уравнении (3) предпоследнее слагаемое является выталкивающей силой с учётом продольной квазистатической перегрузки n и последнее слагаемое – инерционной силой, действующими на массу перегородки m_0 от квазистатического ускорения системы координат ng .

Подставив (4) в уравнение (3), для квазистатической составляющей получим равенство

$$-ku_{\text{ст}} + ng 0,668 S_{\text{п}} R_{\text{п}} \rho_{\text{ж}} - m_0 ng = 0, \quad (5)$$

откуда

$$u_{\text{ст}} = \frac{ng}{k} (0,668 S_{\text{п}} R_{\text{п}} \rho_{\text{ж}} - m_0). \quad (6)$$

При этом динамическая составляющая будет удовлетворять уравнению

$$m_0 \ddot{u} = -k(u - u_0) - m_{\text{ж}}(\ddot{u} - \ddot{u}_{\text{ж}}) - a(\dot{u} - \dot{u}_0) + \ddot{u}_{\text{ж}} 0,668 S_{\text{п}} R_{\text{п}} \rho_{\text{ж}}. \quad (7)$$

С учётом равенства $0,668 S_{\text{п}} R_{\text{п}} \rho_{\text{ж}} = 2m_{\text{ж}}$ для перегородки приведём уравнение (7) к виду

$$(m_0 + m_{\text{ж}})\ddot{u} + a\dot{u} + ku = ku_0 + 3m_{\text{ж}}\ddot{u}_{\text{ж}} + a\dot{u}_0. \quad (8)$$

Интегрирование уравнения (8) ведётся в силу равенства (4) и отсутствия импульсных воздействий на перегородку с нулевыми начальными данными $u(0) = \dot{u}(0) = 0$.

После определения $u(t)$ из уравнения (8) усилие в узлах крепления перегородки находится из соотношения $F(t) = k(u(t) + u_{ст} - u_0(t))$.

Выталкивающую силу мы в нашей задаче не будем учитывать ввиду незначительных её величин.

На данном этапе мы рассчитаем нагрузку на перегородку с учётом присоединённой массы жидкости при случае «Старт-АВДУ» (аварийное выключение двигательной установки), как одном из самых нагруженных для данной системы. При расчёте нагрузок на перфорированную перегородку использовался нелинейный динамический анализ Nonlinear Transient Response (SOL 129) [7], в котором в качестве нагружения было приложено воздействие на топливный бак от двигателей при случае «Старт-АВДУ» (рис. 2).

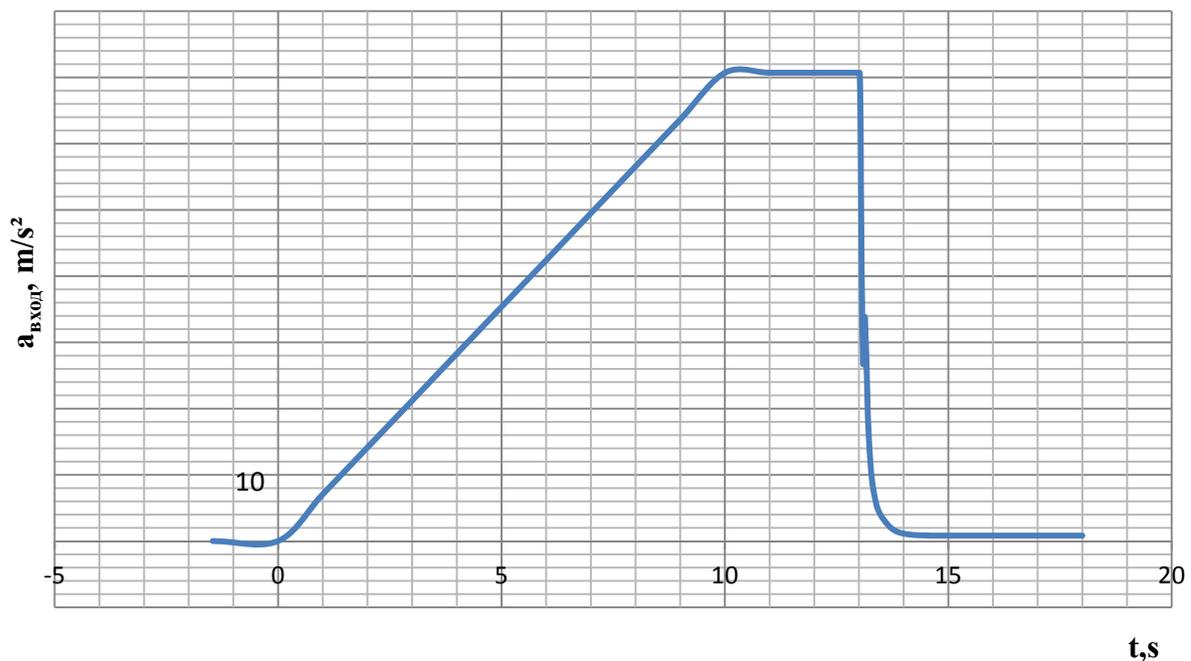


Рис. 2. График воздействия на бак от двигателей при случае нагружения «Старт-АВДУ»

Результаты расчётов

Определили нагрузку на перегородку или усилие в пружинах k при гармонических колебаниях РН при случае «Старт-АВДУ» (от пульсаций тяги двигателя).

На рис. 3 изображён график результата расчёта, где видно, что максимальная перегрузка на перфорированную перегородку в данном случае нагружения имеет значение $\sim 0,5g$. Полученные результаты приведены вдоль оси X РН, что соответствует «наихудшему» (максимальному) случаю нагружения для узлов подвеса перегородки. По другим осям (Y и Z) результаты расчёта значительно меньше.

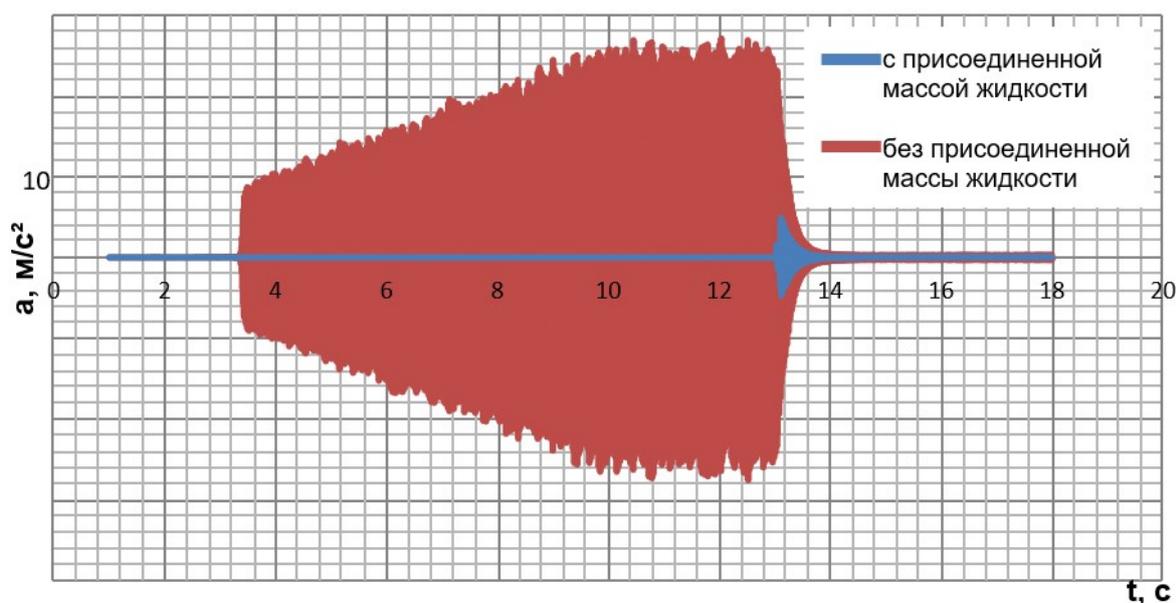


Рис. 3. График результатов расчёта от воздействия на перегородку с присоединённой массой жидкости и без при случае нагружения «Старт-АВДУ»

Для сравнения на рис. 3 приведены результаты расчёта той же перегородки и при том же случае, но без учёта присоединённой массы жидкости ($\sim 2,8\text{ г}$). В данной системе жидкость в баке РН сыграла роль демпфера для возмущающего воздействия, но ещё большую роль сыграло «увеличение» массы перегородки за счёт присоединённой массы жидкости.

Заключение

Таким образом, в настоящей статье мы определили нагрузки на узлы крепления перегородки, погруженной в жидкость. На следующем этапе исследования необходимо провести расчёты инерционной гидродинамической силы, распределённого гидроудара по поверхности перегородки, а также расчёт максимального перепада давления (разница давлений, приложенных к верхней и нижней поверхности) на перегородке при начале работы двигателя и его аварийном выключении с главной ступени тяги при максимальном уровне топлива в баке. Результаты расчёта послужат исходными данными для расчёта суммарных нагрузок на перфорированную перегородку топливного бака РН. Затем эти данные послужат для прочностного расчёта перегородки.

Библиографический список

1. Рабинович Б.И. Об уравнениях упругих колебаний тонкостенных стержней с жидким заполнением при наличии свободной поверхности // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. 1959. № 4. С. 63-68.
2. Шмаков В.П. Об уравнениях осесимметричных колебаний цилиндрической оболочки с жидким заполнением // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. 1964. № 1. С. 170-173.
3. Моисеев Н.Н. К теории колебаний упругих тел, имеющих жидкие полости // Прикладная математика и механика. 1959. Т. 23, № 5. С. 862-878.
4. Александрович Л.И., Лампер Р.Е. Собственные колебания упругого осесимметричного сосуда произвольного контура // Труды VI Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластинок. М.: Наука, 1966. С. 25-27.

5. Лампер Р.Е. К расчёту собственных колебаний баков методом Ритца с варьируемым параметром // Труды VII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластинок. М.: Наука, 1970. С. 351-354.

6. Шиманский Ю.А. Динамический расчёт судовых конструкций. Ленинград: Судпромгиз, 1963. 444 с.

7. Рычков С.П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК Пресс, 2013. 784 с.

DETERMINATION OF LOADS ON PERFORATED TANK PARTITION

© 2020

A. G. Filipov Engineer; Joint Stock Company “Space Rocket Centre Progress”, Samara, Russian Federation;

Postgraduate Student; Samara National Research University, Samara, Russian Federation;

iskander-filipov@yandex.ru

I. E. Glazkov Engineer; Joint Stock Company “Space Rocket Centre Progress”, Samara, Russian Federation;

Postgraduate Student; Samara National Research University, Samara, Russian Federation;

reiser733@yandex.ru

The article presents a solution to the problem of dynamic loading of a perforated partition located in the fuel tank of a launch vehicle. A technique for calculating the dynamic loading of the partition is described. Its equation of motion was decomposed into components and the loads at harmonic oscillations of the launch vehicle were calculated. The acceleration of the attachment points and the acceleration of the oscillators simulating the oscillations of the fuel tank, obtained from the solution of the general dynamic problem for assessing the hydrodynamic force for the launch vehicle, were given as the initial data for the dynamic calculation of loads. At this stage, the load on the partition was calculated, taking into account the added mass of the liquid in the event of an emergency shutdown of the propulsion system, as one of the most heavily loaded for the system under discussion. Non-linear dynamic analysis was used to calculate the loads on the perforated partition. As a result of the calculation, forces were obtained in the attachment points of the element in question.

Transient process; launch vehicle; dynamic model; finite element model; overloads; frequency response; quasi-static

Citation: Filipov A.G., Glazkov I.E. Determination of loads on perforated tank partition. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2020. V. 19, no. 4. P. 80-86. DOI: 10.18287/2541-7533-2020-19-4-80-86

References

1. Rabinovich B.I. On the equations of elastic vibrations of thin-walled rods with liquid filling in the presence of a free surface. *Izvestiya AN SSSR. Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk*. 1959. No. 4. P. 63-68. (In Russ.)

2. Shmakov V.P. On the equations of axisymmetric vibrations of a cylindrical shell with liquid filling. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika i Mashinostroenie*. 1964. No. 1. P. 170-173. (In Russ.)

3. Moiseev N.N. On the theory of vibrations of elastic bodies with liquid cavities. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 1959. V. 23, Iss. 5. P. 1233-1254. DOI: 10.1016/0021-8928(59)90127-3

4. Aleksandrovich L.I., Lamper R.E. *Sobstvennye kolebaniya uprugogo osesimmetrichnogo sosuda proizvol'nogo kontura. Trudy VI Vsesoyuznoy konferentsii po teorii obolochek i plastinok.* Moscow: Nauka Publ., 1966. P. 25-27. (In Russ.)

5. Lamper R.E. *K raschetu sobstvennykh kolebaniy bakov metodom Rittsa s var'iruемым параметром. Trudy VII Vsesoyuznoy konferentsii po teorii obolochek i plastinok.* Moscow: Nauka Publ., 1970. P. 351-354. (In Russ.)

6. Shimanskiy Yu.A. *Dinamicheskiy raschet sudovykh konstruktsiy* [Dynamic calculation of ship structures]. Leningrad: Sudpromgiz Publ., 1963. 444 p.

7. Rychkov S.P. *Modelirovanie konstruktsiy v srede Femap with NX Nastran* [Simulation of structures in Femapwith NX Nastran]. Moscow: DMK Press Publ., 2013. 784 p.