Научная статья
Original article
УДК 629.78

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА ТРУБОПРОВОД СЛОЖНОЙ ФОРМЫ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

DETERMINATION OF LOADS ON THE PIPELINE OF A COMPLEX SHAPE OF THE LAUNCH VEHICLE

Глазков Игорь Евгеньевич, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королёва, Россия, г. Самара

Glazkov Igor Evgenievich, post-graduate student, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Russia, Samara

Аннотация: В данной статье рассмотрено решение задачи динамического нагружения трубопровода [1], необходимый для подачи горючего в двигатель ракеты-носителя. Описана методика расчёта динамического нагружения [2] трубопровода. В качестве исходных данных для динамического расчёта нагрузок были заданы ускорения узлов крепления двигательной установки и трубопровода, полученные из решения общей динамической задачи для оценки гидродинамической силы для ракеты-носителя. При расчёте нагрузок на трубопровод использовался нелинейный динамический анализ[3]. В результате расчёта были получены усилия в узлах крепления рассматриваемой конструкции, а также усилия распределенных по длине трубопровода. Нагрузки на трубопроводы складываются из квазистатических составляющих, в которые обычно включают траекторные перегрузки и низкочастотные динамические составляющие[4] от переходных

процессов типа старта, а также дополнительных нагрузок от вибрационных и акустических воздействий. Квазистатические и низкочастотные динамические составляющие в нагрузках[5] обычно имеют достаточно высокую степень определенности и, как правило, оценивается расчетным путем с использованием соответствующих моделей РКН и навесного оборудования.

Annotation: This article considers the solution of the problem of dynamic loading of the pipeline[1], which is necessary to supply fuel to the booster engine. The method of calculating the dynamic loading[2] of the pipeline is described. The accelerations of the propulsion system and pipeline attachment points obtained from solving a general dynamic problem for estimating the hydrodynamic force for a launch vehicle were set as initial data for dynamic load calculation. Nonlinear dynamic analysis was used to calculate pipeline loads[3]. As a result of the calculation, the forces in the attachment points of the structure under consideration, as well as the forces distributed along the length of the pipeline, were obtained. Pipeline loads consist of quasi-static components, which usually include trajectory overloads and low-frequency dynamic components[4] from transient processes such as start-up, as well as additional loads from vibration and acoustic influences. Quasi-static and low-frequency dynamic components in loads[5] usually have a fairly high degree of certainty and, as a rule, are estimated by calculation using appropriate RCN models and attachments.

Ключевые слова: квазистатика, динамическая модель, конечно-элементная модель, перегрузки, переходный процесс, трубопровод, гидроудар, ракета-носитель.

Keywords: quasistatics, dynamic model, finite element model, overload, transient, pipeline, water hammer, launch vehicle.

Введение

Дополнительные нагрузки на трубопровод создают виброакустические воздействия. Учитывая, что вибрации в значительной мере создаются акустическими пульсациями внешнего давления, а также пульсациями тяги

двигателей, при расчете дополнительных нагрузок на трубопровод достаточно рассмотреть в качестве входных воздействий случайные вибрационные воздействия, задаваемые в виде кинематических возмущений в узлах крепления трубопровода к днищу бака, двигательной установке и корпусу ракеты-носителя (РН).

В работах авторов [6-12] проведены исследования по выявлению нелинейного динамического поведения.

Проблема решения задачи динамического нагружения данного типа трубопровода остается открытой. В связи сложной конструкционной формы трубопровода (сильные изгибы) следует учитывать гидроудар при начале полета РН не только на выходе и на входе трубопровода, но также в этих изгибах.

Расчёт нагрузок

Рассматривались различные подходы к анализу гидроударов в трубопроводе с использованием программного комплекса MSC.NASTRAN и анализировались различные варианты физической постановки задач о гидроударе. В первой постановке предполагается, что жидкость в трубе покоится (имеет нулевую скорость), а в качестве внешнего воздействия задается быстро нарастающая скорость в крайнем узле (в задвижке) до некоторой постоянной величины. Во второй постановке – жидкость в трубе течет с постоянной скоростью и в крайнем узле закрывается задвижка, то есть, скорость с постоянной величины достаточно быстро снижается до нуля.

В данной статье рассмотрим первый вариант задачи, который моделирует случай запуска двигательной установки и отрыв РН от стартового стола. Моделирование и анализ трубопровода произведем с помощью программ Femap и MSC.NASTRAN[13]. Данный подход предполагает моделирование столба жидкости в трубопроводе с помощью балочных элементов с приведенными жесткостными и инерционными характеристиками. Так же следует отметить, что рассматривался вариант с

абсолютно жесткими стенками, который предполагает только сжатие жидкости.

В результате расчета динамики РКН определяются ускорения во всех сечениях связи соответствующего трубопровода с корпусом РН, днищами баков и двигательной установкой. Определенные таким образом временные зависимости ускорений задаются в качестве кинематических воздействий на динамическую модель трубопровода при автономном расчете нагрузок на трубопроводе.

В качестве исходных данных для динамического расчёта нагрузок задаются ускорения узлов крепления и ускорения осцилляторов, моделирующих колебания двигательной установки, полученные из решения общей динамической задачи для оценки динамической силы для РН. Также необходимо задать давление в трубопроводе. Гидроудар моделировался следующим способом: проведение расчета с нулевыми начальными условиями (жидкость в трубопроводе находится в состоянии покоя), а в качестве внешнего воздействия задать расчетное давление в местах изгиба с учетом гидроудара равным 83 МПа, полученный с входа в двигательную установку. При расчете на прочность трубопровода в поперечных направлениях учитывать массу компонента, заполняющего трубопровод.

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

$$m_{\text{ж}} = 0.668 V_{\text{Т}} \rho_{\text{ж}},$$

где V_T – объем трубопровода, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости.

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.

На рисунке 1 показана конечно-элементная модель трубопровода, созданная с помощью линейных (Beam) элементов. Масса топлива внутри трубопровода смоделирована с помощью массовых элементов (Mass).

Трубопровод проложен от нижнего днища бака до двигательной установки, также имеется дополнительное подкрепление. Необходимо отметить следующие особенности моделирования. Узлы, принадлежащие к элементам жидкости, имеют только одну степень свободы – давление.

Входные воздействия в узлах крепления к корпусу РН, днищам баков и двигателю задаются в виде спектральных плотностей мощности, взаимные спектральные плотности предполагаются равными нулю.

В результате расчетов получаются среднеквадратичные значения ускорений, усилий и моментов в сечении трубопровода, а также среднеквадратичные значение силовых факторов в узлах связи трубопровода с элементами РН.

На данном этапе мы рассчитаем нагрузку на трубопровод с учётом массы жидкости при случае «Старт», как одном из самых нагруженных для данной системы. При расчёте нагрузок на трубопровод использовался нелинейный динамический анализ Nonlinear Transient Response (SOL 129), в котором в качестве нагружения была приложена сила тяги в тоннах при случае «Старт» (см. рис. 2). Значения полученных перегрузок приведены на рисунке 3, а значения усилий по длине трубопровода на рисунке 4.

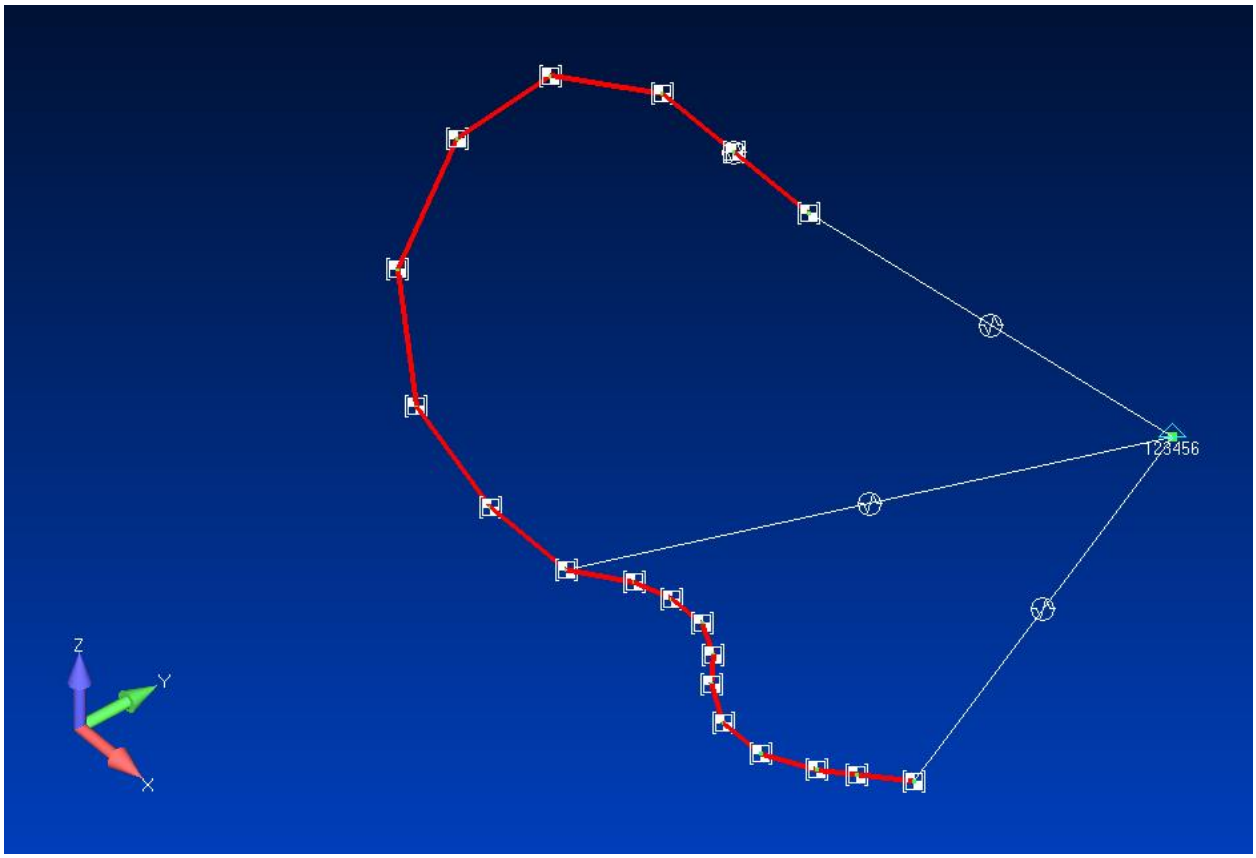


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель трубопровода

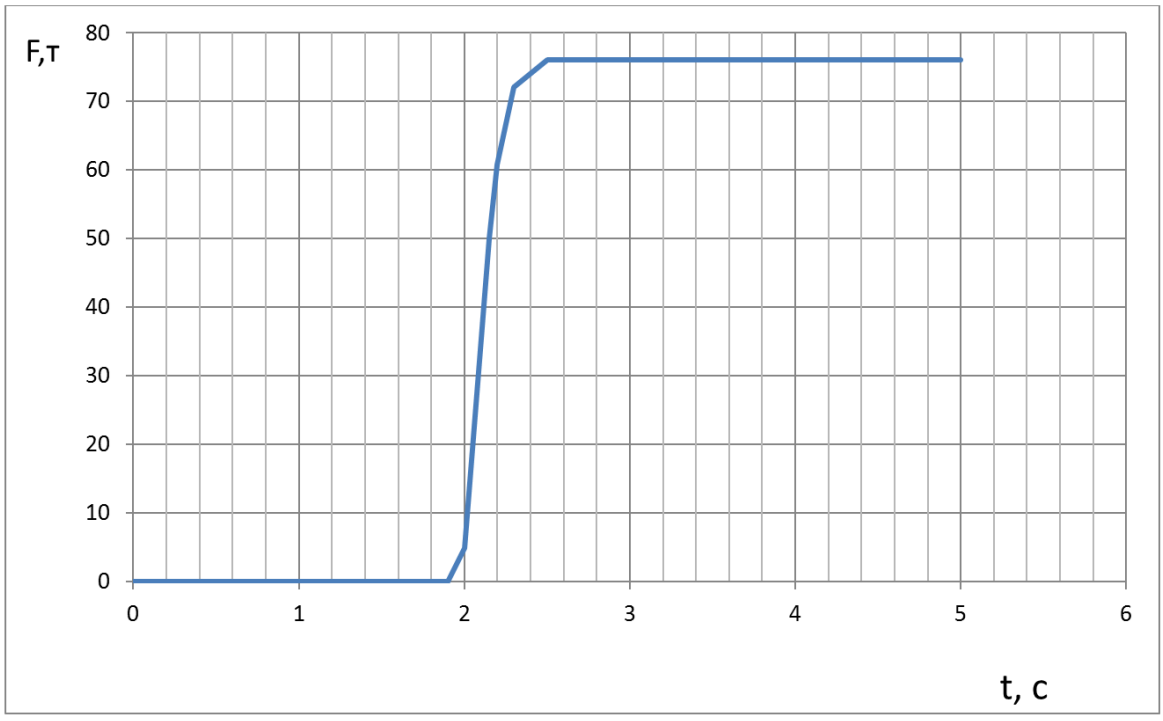


Рисунок 2 – График воздействия на бак от двигателей при случае нагружения «Старт».

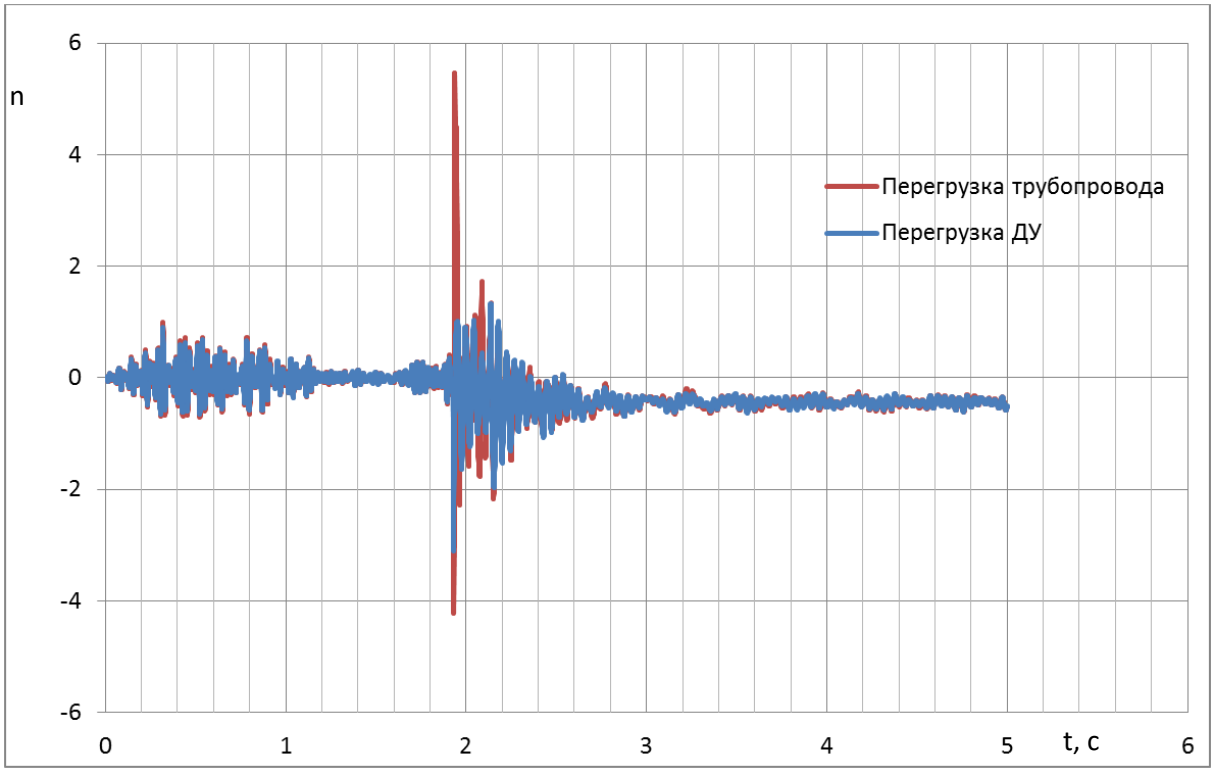


Рисунок 3 – График результатов расчета ДУ и трубопровода при случае нагружения «Старт»

На рисунке 3 изображен график результата расчета где видно, что максимальная перегрузка на трубопровод равна 5,46g. Полученные результаты приведены вдоль оси X РН, что соответствует «наихудшему» (максимальному) случаю нагружения. Для сравнения на графике также приведены результаты расчета ДУ. В данном случае гидроудар в значительной большей мере реализовался на трубопроводе, чем на двигателе.

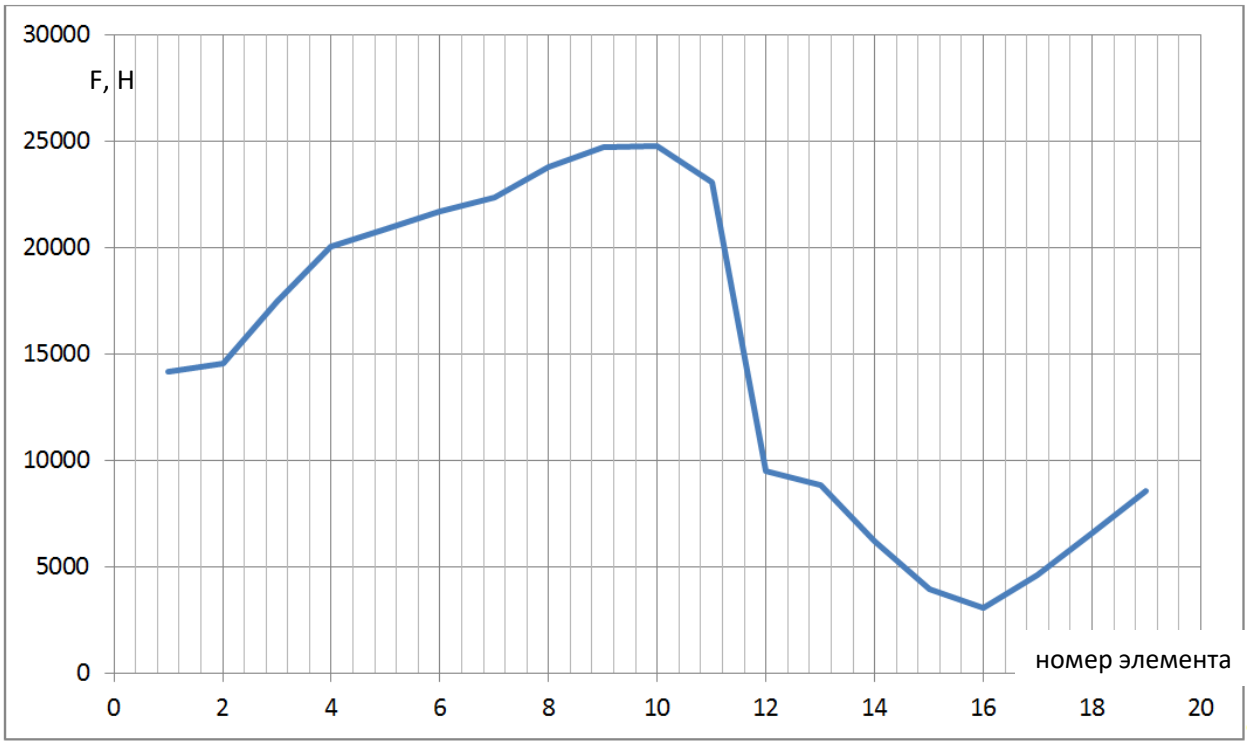


Рисунок 4 – Распределение усилий в элементах по длине трубопровода

На рисунке 4 видно, как происходит распределение усилий по длине трубопровода, резкий скачок обусловлен дополнительным подкреплением к корпусу.

Заключение

Таким образом, в настоящей статье мы определили максимальные нагрузки на трубопровод и распределенные по длине трубопровода усилия. На следующем этапе исследования необходимо провести расчёт максимального перепада давления при начале работы двигателя с главной ступени тяги при максимальном уровне топлива в баке. Результаты расчёта послужат исходными данными для расчёта суммарных нагрузок на трубопровод, подающего горючее для работы двигательной установки РН. Затем эти данные послужат для прочностного расчёта трубопровода и его стыка с двигателем.

Список литературы

1. Шмаков В.П. Об уравнениях осесимметричных колебаний цилиндрической оболочки с жидким заполнением // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. - 1964. - № 1. - С. 170 - 173.

2. Моисеев Н.Н. К теории колебаний упругих тел, имеющих жидкие полости // Прикладная математика и механика. - 1959. - Т. 23. - № 5. - С. 862 - 878.
3. Александрович Л.И., Лампер Р.Е. Собственные колебания упругого осесимметричного сосуда произвольного контура // Труды VI Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластинок, 1966. - М.: Наука, 1966. - С. 25 - 27.
4. Лампер Р.Е. К расчёту собственных колебаний баков методом Ритца с варьируемым параметром // Труды VII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластинок, 1969. - М.: Наука, 1970. - С. 351 - 354.
5. Шиманский Ю.А. Динамический расчёт судовых конструкций // гос. издат. судостроительной промышленности. Ленинград – 1963 – С. 444.
6. Прокудин, О. А. Определение динамических характеристик металлополимерного слоистого стержня / О. А. Прокудин, Л. Н. Рабинский, К. Т. Чан // Труды МАИ. – 2021. – № 120. – DOI 10.34759/trd-2021-120-06.
7. Dynamic testing of nonlinear vibrating structures using nonlinear normal modes. M. Peeters, G. Kerschen, J.C. Golinval / Journal of Sound and Vibration 330(2011) 486-509
8. Nonlinear modal analysis of the SmallSat spacecraft. L. Renson, G. Kerschen, A. Newerla / Belgium
9. Model updating of a full-scale FE model with nonlinear constraint equations and sensitivity-based cluster analysis for updating parameters. Jinwoo Jang, Andrew W. Smyth / Mechanical Systems and Signal Processing 83 (2017) 337-355
10. Gaëtan Kerschen, Keith Worden, Alexander Vakakis, Jean-Claude Golinval. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, 2006, 20 (3), pp.505-592

11. Кудинов А.Н., Катулев А.Н., Кузнецов А.Ю. Исследование устойчивости автономных нелинейных динамических систем // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: матер. XVI Междунар. симпоз. им. А.Г. Горшкова. М.: МАИ, 2010. Т. 1. С. 110-112
12. Косачев, И. М. Методология высокоточной нелинейной фильтрации случайных процессов в стохастических динамических системах с фиксированной структурой. Часть 1 / И. М. Косачев, К. Н. Чугай, К. А. Рыбаков // Труды МАИ. – 2019. – № 105. – С. 18
13. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. – М.: ДМК Пресс, 2013. – 784 с

References

1. Shmakov V.P. On the equations of axisymmetric oscillations of a cylindrical shell with liquid filling // Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Mechanics and mechanical engineering. - 1964. - No. 1. - pp. 170 - 173
2. Moiseev N.N. To the theory of vibrations of elastic bodies having liquid cavities // Applied Mathematics and Mechanics. - 1959. - T. 23. - No. 5. - P. 862 - 878.
3. L. I. Alexandrovich, Get R. E. Self-oscillations of an elastic axisymmetric vessel of arbitrary contour // proceedings of the VI all-Union conference on the theory of shells and plates, 1966. - M.: Nauka, 1966. - P. 25 - 27.
4. Lamper R.E. To the calculation of natural vibrations of tanks by the Ritz method with a variable parameter // Proceedings of the VII All-Union Conference on the theory of shells and plates, 1969. - M.: Nauka, 1970. - pp. 351 - 354
5. Shimansky Yu.A. Dynamic calculation of ship structures // State Publishing House. shipbuilding industry. Leningrad - 1963 - p. 444
6. Prokudin, O. A. Determination of dynamic characteristics of a metal-polymer layered rod / O. A. Prokudin, L. N. Rabinsky, K. T. Chan // Proceedings of MAI. - 2021. - No. 120. - DOI 10.34759/trd-2021-120-06

7. Dynamic testing of nonlinear vibrating structures using nonlinear normal modes. M. Peeters, G. Kerschen, J.C. Golinval / Journal of Sound and Vibration 330(2011) 486-509
8. Nonlinear modal analysis of the SmallSat spacecraft. L. Renson, G. Kerschen, A. Newerla / Belgium
9. Model updating of a full-scale FE model with nonlinear constraint equations and sensitivity-based cluster analysis for updating parameters. Jinwoo Jang, Andrew W. Smyth / Mechanical Systems and Signal Processing 83 (2017) pp. 337-355
10. Gaëtan Kerschen, Keith Worden, Alexander Vakakis, Jean-Claude Golinval. Past, present and future of nonlinear system identification in structural dynamics. Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, 2006, pp. 20 (3) 505-592
11. Kudinov A.N., Katulev A.N., Kuznetsov A.Yu. Stability study of autonomous nonlinear dynamic systems // Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media: mater. XVI International. A.G. Gorshkov Symposium. M.: MAI, 2010. Vol. 1. pp. 110-112
12. Kosachev, I. M. Methodology of high-precision nonlinear filtering of random processes in stochastic dynamic systems with a fixed structure. Part 1 / I. M. Kosachev, K. N. Chugai, K. A. Rybakov // Proceedings of MAI. - 2019. - No. 105. - p. 18
13. Rychkov S. P. Modeling of structures in the Femap environment with NX Nastran. - M.: DMK Press, 2013- p. 784

© Глазков И.Е., 2022 Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.

Для цитирования: Глазков И.Е., ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА ТРУБОПРОВОД СЛОЖНОЙ ФОРМЫ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ// Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet» №6/2022.