

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ НИППЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В.М. Агафонов, А.А. Пыхалов, Е.С. Долгих

В статье приведены результаты исследований динамического поведения сборного однопролетного трубопровода с ниппельным соединением под воздействием внешнего кинематического возбуждения. Рассмотрены два варианта сборного соединения: с соединением по наружному конусу и соединением по внутреннему конусу. Результаты получены решением контактной задачи механики твердого деформируемого тела с применением метода конечных элементов. Для рассматриваемых моделей трубопровода построены амплитудно-частотные характеристики и проведен их сравнительный анализ. Исследования показали, что низшая резонансная частота пролета трубопровода одного типоразмера с двумя вариантами соединения имеет близкие значения. В статье также рассмотрена способность ниппельного соединения сохранять герметичность при динамическом воздействии. Проведенное исследование позволило прийти к выводу: при приближении колебаний трубопровода к резонансной области в соединении по наружному конусу происходит сильное изменение распределения контактного давления, которое может привести к нарушению герметизации соединения, в то время как для соединения по внутреннему конусу такого эффекта не наблюдается.

Ключевые слова: гидравлическая система, летательный аппарат, динамика трубопроводов, соединение по наружному конусу, соединение по внутреннему конусу, метод конечных элементов, контактная задача теории упругости, частотный отклик, конечно-элементная модель.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF DYNAMIC RESPONSE OF THE AIRCRAFT PIPE NIPPLE CONNECTION

V.M. Agafonov, A.A. Pykhalov, E.S. Dolgikh

The article presents the results of analyzing the dynamic response of a prefabricated single-span pipeline with nipple tube connection under of kinematic excitation. Two versions of the prefabricated tube connection were studied: the tube connections on external and internal cones. The results have been obtained by solving the contact problem of the deformable solid mechanics using the finite element method. The amplitude-frequency characteristics for the considered models of the pipeline were constructed and their comparative analysis was conducted. During research it was found that the lowest resonance frequency of the span pipeline of the same size with the two tube connection options has very closed values. The article describes the ability of a nipple tube connection to keep the sealing capability under dynamic impact. The research led to the conclusion: at approximation of the pipeline oscillations to the resonance region for the tube connection on external cone, strong change in the distribution of the contact pressure takes place, that can lead to the seal failure of the tube connection; at the same time there is no such effect in case of the tube connection on internal cone.

Keywords: the hydraulic system, aircrafts, dynamics of pipelines, tube connection on external cone, tube connection on internal cone, finite element method, the contact problem of elasticity theory, frequency response, finite element model.

Введение

Сложные технические объекты, например, летательный аппарат (ЛА), имеют в составе конструкции пневмо- и гидросистемы различного назначения, основными элементами которых являются трубопроводы.

Вопросам динамического поведения трубопроводов посвящено большое количество работ. основополагающими в области расчетов трубопроводов ЛА являются работы таких исследователей, как Башта Т.М., Сапожников В.М., Комаров А.А., Гуревич Д.Ф. [1–5]. Их методики динамического расчета берут начало в работах Тимошенко С.П. [6], где расчет трубопроводов осуществлялся теоретическими методами, в частности, методом Релея, и с рядом упрощений.

Вследствие сложного пространственного исполнения трубопроводных трасс и многообразия действующих нагрузок наиболее предпочтительным методом решения задач расчета трубопроводов стал метод конечных элементов (МКЭ) [7–10]. Данный метод имеет высокую степень информативности и является высокоэффективным средством оптимизации конструкции трубопроводных систем для обеспечения надежности и долговечности их работы.

В вышеописанных работах, как правило, объектом рассмотрения являлся трубопровод в целом. То есть соединения практически не учитывались или были обозначены как концевые опоры трубопровода, чья жесткость не всегда принималась в расчет [11]. Тем самым не учитывалось влияние на динамические характеристики трубопровода соединений,

которые являются важнейшей составляющей, обеспечивающей компоновку трубопровода в единое целое. Следовательно, анализ функционирования соединений под воздействием динамического нагружения остается актуальной задачей.

Целью работы является изучение динамического поведения однопролетного трубопровода с двумя типами ниппельного соединения (по наружному и по внутреннему конусам) под воздействием кинематического возбуждения.

Постановка задачи

Соединения трубопроводов ЛА можно разделить на разъемные и неразъемные (рис. 1). К неразъемным относятся сварные, паяные и клееные; к разъемным – подвижные и неподвижные. В частности, интерес представляют неподвижные беспрокладочные соединения по наружному и внутреннему конусам, так как данные соединения широко применяются в конструкциях трубопроводных систем ЛА. Их большое распространение вызвано рядом преимуществ: простота конструкции; способность выдерживать большое количество переборок; отсутствие упругих элементов, способствующее увеличению вибростойкости. Вибростойкость представленных соединений является важной характеристикой соединения, так как эксплуатация трубопроводных систем ЛА всегда сопровождается наличием динамических процессов, вызываемых вибрацией агрегатов силовых установок, неравномерным потоком жидкости, колебаниями отдельных агрегатов и панелей ЛА под действием аэродинамических сил.

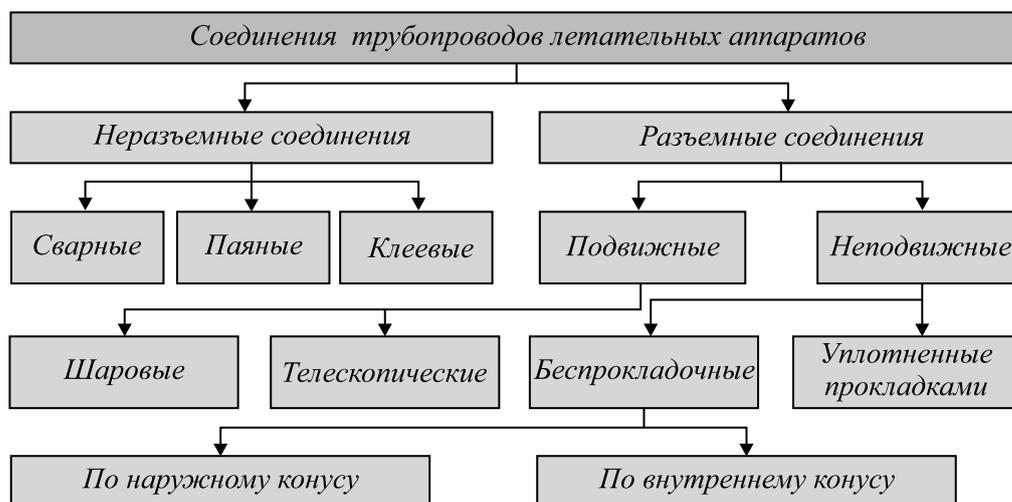


Рис. 1. Классы соединений трубопроводов летательного аппарата

Данная статья является продолжением исследования работы ниппельного соединения при динамическом нагружении [12]. Выбор задачи обусловлен следующими проблемами: не установлено, каким образом влияют условия сопряжения различных соединений на динамические характеристики поведения трубопровода; не определено влияние на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) трубопровода двух видов разъемных соединений.

Решение представленной задачи возможно с использованием математического моделирования с применением МКЭ при анализе динамического поведения сборного трубопровода с учетом контактного взаимодействия деталей. Учет контактного взаимодействия между сопрягаемыми деталями является немаловажным условием, так как в сборном соединении большое количество контактирующих поверхностей, которые при динамическом нагружении изменяют положения своих пятен контакта.

Расчетные модели пролета трубопровода с ниппельным соединением

Конструктивное исполнение трубопроводной арматуры регламентировано государственными стандартами. Соединение по наружному конусу изготавливается согласно ГОСТ 13977-74 (рис. 2, а); соединение по внутреннему конусу – согласно ГОСТ 16078-70 (рис. 2, б).

Типовые разрушения ниппельных соединений трубопроводов представлены на рис. 3. Для соединений по наружному конусу характерны разрушения в зоне развальцованной части трубопровода и за хвостовиком ниппеля; для соединений по внутреннему конусу – разрушение в зоне пайки или сварки трубопровода и ниппеля.

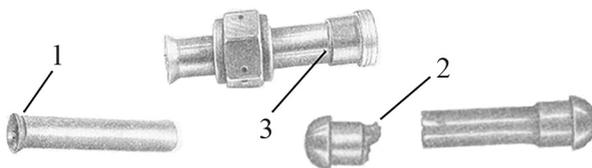


Рис. 3. Типовые разрушения ниппельных соединений трубопроводов:

- 1 – разрушение в зоне развальцованной части трубопровода;
- 2 – разрушение в зоне пайки или сварки трубопровода и ниппеля;
- 3 – разрушение за хвостовиком ниппеля

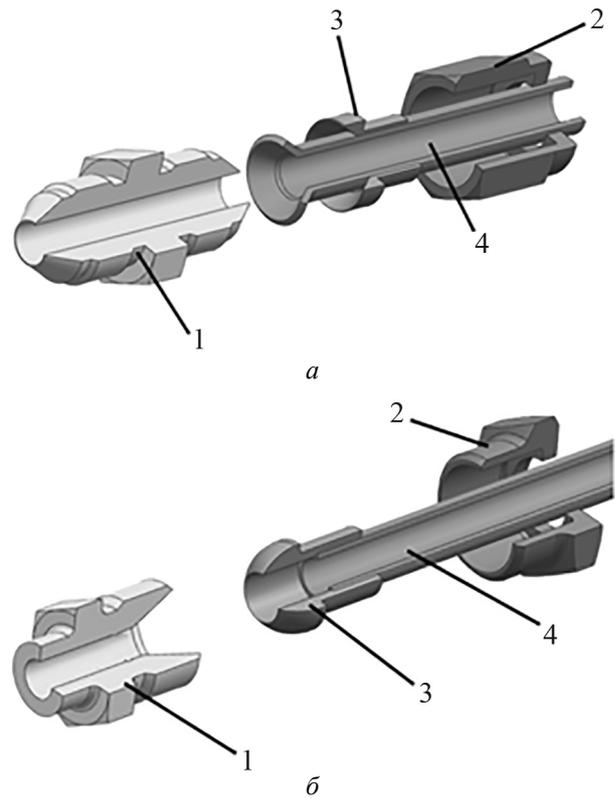


Рис. 2. Конструктивное исполнение соединений трубопроводов по наружному (а) и внутреннему (б) конусам:

1 – штуцер; 2 – гайка; 3 – ниппель; 4 – трубопровод

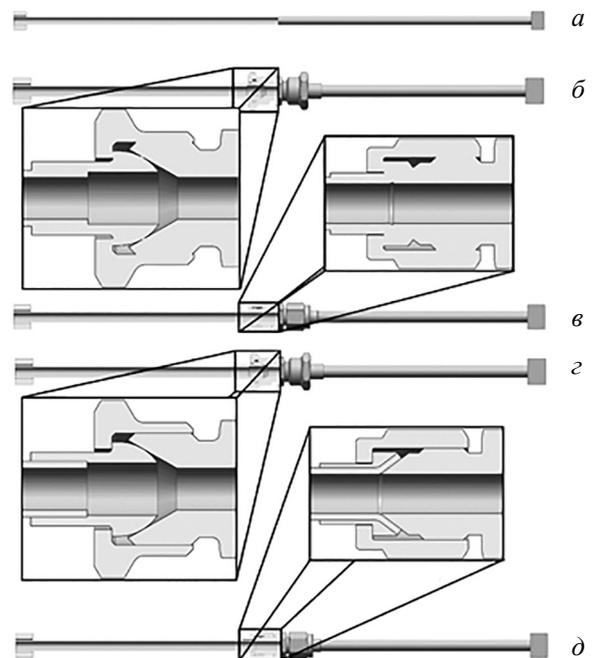


Рис. 4. Рассматриваемые модели трубопровода: а – без соединения; б, в – «монолитная» с соединением по внутреннему и наружному конусу, соответственно; г, д – с соединением по внутреннему и наружному конусу, соответственно, с учетом контактного взаимодействия

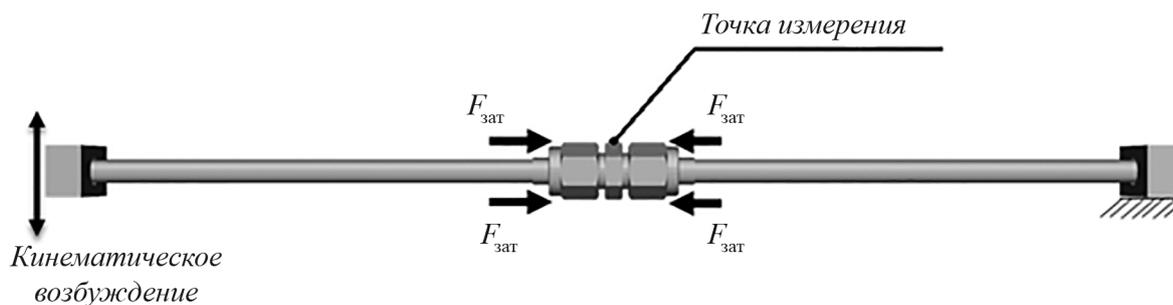


Рис. 5. Схема закрепления и нагружения моделей

Для проведения численного эксперимента был разработан ряд моделей пролета трубопровода с соединением по наружному и внутреннему конусам. Длина пролета составляет 500 мм, наружный диаметр трубопровода равен 8 мм с толщиной стенки 1 мм; все размеры соединения выполнены согласно государственным стандартам.

Для проведения сравнительного анализа динамических характеристик соединений рассматривалось пять вариантов моделей однопролетного трубопровода (рис. 4), как с учетом контактного взаимодействия в соединении (см. рис. 4, *г* и *д*), так и выполненным по концепции «монолитного» аналога сборной конструкции (см. рис. 4, *б* и *в*), то есть без учета контактного взаимодействия деталей.

Нагружение и закрепление рассматриваемых моделей производилось по схеме, представленной на рис. 5. Одна опора закреплялась неподвижно, к свободной опоре прилагалось кинематическое возбуждение, представляющее собой периодическое колебание с амплитудой в 1 мм и изменением частоты колебания от 0 до 250 Гц за заданный период времени.

Усилие затяжки соединений, приложенное к накидным гайкам, соответствует ГОСТ, где оно задано моментом затяжки (30 Н·м), в модели же оно приложено осевым усилием в 230 Н, возникающим в результате приложения момента к накидным гайкам.

Для анализа представленных конструкций были созданы конечно-элементные (КЭ) модели трубопровода для всех рассматриваемых вариантов. Общий вид КЭ-моделей соединений по наружному и внутреннему конусам представлен на рис. 6. Построение КЭ-моделей проводилось в препроцессоре программного комплекса *Femap*.

Для моделирования применялись КЭ типа изопараметрический гексаэдр первого поряд-

ка аппроксимации с использованием несовместных функций формы [13]. Контактное взаимодействие моделировалось при помощи специального контактного КЭ типа «узел-поверхность». Данный тип контакта позволяет использовать несогласованную КЭ-сетку сопрягаемых деталей, что приводит к снижению затрат на подготовку КЭ-моделей.

Контакт типа «узел-поверхность» основан на принципе наложения кинематических связей на контактирующие поверхности, препятствующих проникновению тел друг в друга. При численном решении контактные условия учитываются с помощью метода множителей Лагранжа [14]. Контакт происходит при двух условиях: непроникновение одного тела в другое (кинематическое условие на перемещение узлов КЭ-сетки контактирующих тел) и равное силовое воздействие каждого из контактирующих тел на другое тело (условие равенства на поверхности контактирующих тел нормальных напряжений).

Общий алгоритм решения контактной задачи (рис. 7) можно разделить на три этапа. На первом этапе производится ввод данных по расположению контактирующих тел друг относительно друга, а также данных по нагрузкам и закреплениям на расчетном шаге. Второй

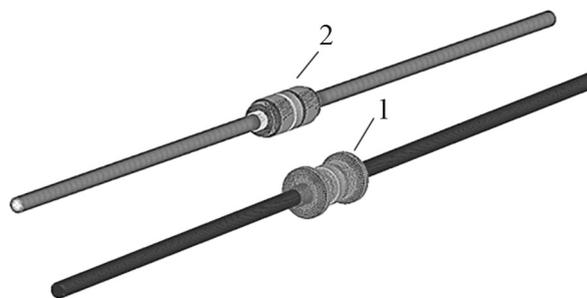


Рис. 6. Общий вид конечно-элементных моделей соединений трубопроводов по внутреннему (1) и наружному конусу (2)

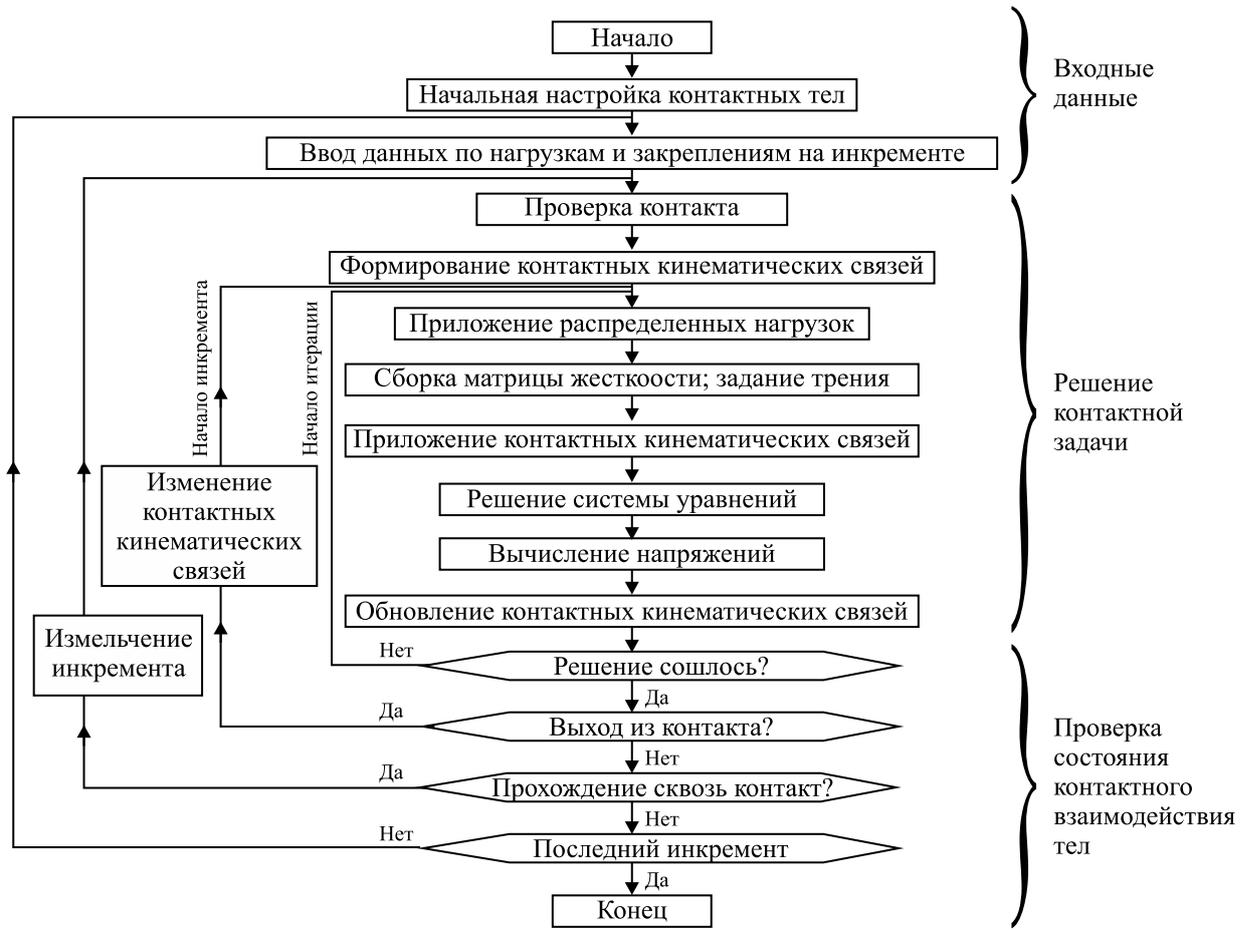


Рис. 7. Блок-схема решения контактной задачи

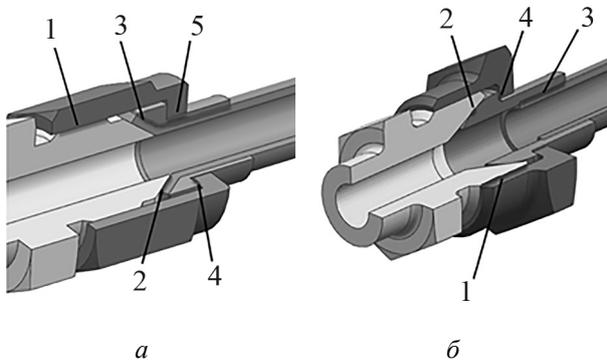


Рис. 8. Расположение контактных поверхностей в соединении по наружному (а) и по внутреннему (б) конусу:

- 1 – сопряжение по цилиндрическим резьбовым поверхностям; 2 – сопряжение по коническим поверхностям штуцера и развальцованной части трубопровода (а) / полусферической части ниппеля (б); 3 – сопряжение внутренней части ниппеля с наружной поверхностью трубопровода (а) / зона сварки (б); 4 – сопряжение по кольцевым поверхностям стягивания гайки и ниппеля;
- 5 – нерабочая поверхность между хвостовиком ниппеля и гайкой

этап – непосредственное решение контактной задачи. В ходе решения вычисляются параметры напряженно-деформированного состояния в зоне контактной поверхности взаимодействующих тел. На заключительном этапе проводится проверка состояния контактирующих тел, т. е. наблюдался ли выход из контакта (размыкание контактных поверхностей) или же появление новых контактных взаимодействий тел (появление новых соприкосновений тел). Если произошел выход из контакта, то производится изменение контактных кинематических связей, и контактная задача решается вновь с измененными входными данными. Этот процесс повторяется до тех пор, пока сходимость решения на данном шаге не будет превышать заданной погрешности.

Контактное взаимодействие учитывалось между всеми сопрягаемыми поверхностями, входящими в соединения (рис. 8).

Результаты численного анализа

В результате проведения численного эксперимента получены АЧХ для рассматриваемых конструкций соединений трубопроводов (см. рис. 4). Для более наглядной демонстрации влияния условий сопряжения на динамические характеристики соединений на рис. 9 все АЧХ представлены с наложением.

Анализ АЧХ показывает (см. рис. 9), что введение в пролет трубопровода nipple-соединения приводит к увеличению его массы и, соответственно, к снижению резонансной частоты $f_{рез}$ приблизительно на 60 Гц, а также к увеличению амплитуды $A_{рез}$ колебаний трубопровода. По сравнению с монолитным аналогом конструкции, учет условий сопряжения в соединениях приводит к более точному вычислению резонансной частоты $f_{рез}$.

На рисунке 10 представлена сравнительная диаграмма частот и амплитуд для всех рассматриваемых образцов (см. рис. 4). Из диаграммы следует:

- происходит снижение частоты $f_{рез}$ колебания трубопровода при переходе соединения от «монолитной» концепции к сборной: для соединения по наружному конусу на 5%; для соединения по внутреннему конусу на 2%;
- увеличивается амплитуда $A_{рез}$ колебаний трубопровода при переходе соединения от «монолитной» концепции к сборной: для соединения по наружному конусу на 7%; для соединения по внутреннему конусу на 1,5%;

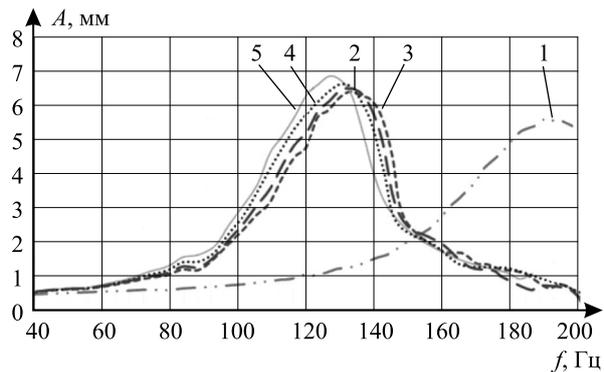


Рис. 9. Амплитудно-частотные характеристики:
1 – прямая трубка без соединения; 2 – монолитная модель с соединением по внутреннему конусу;
3 – монолитная модель с соединением по наружному конусу; 4 – сборное соединение с соединением по внутреннему конусу; 5 – сборное соединение с соединением по наружному конусу

– наблюдается различие в величине резонансной частоты $f_{рез}$ в 2,3% между двумя вариантами соединений с учетом контактного взаимодействия.

В отличие от соединения по наружному конусу, у соединения по внутреннему конусу при переходе от «монолитной» конструкции к сборной наблюдается незначительное изменение резонансной частоты $f_{рез}$. Это вызвано тем, что в соединении по внутреннему конусу количество контактных поверхностей меньше, площадь их соприкосновения также меньше, кроме того перемещения в соединении стесне-

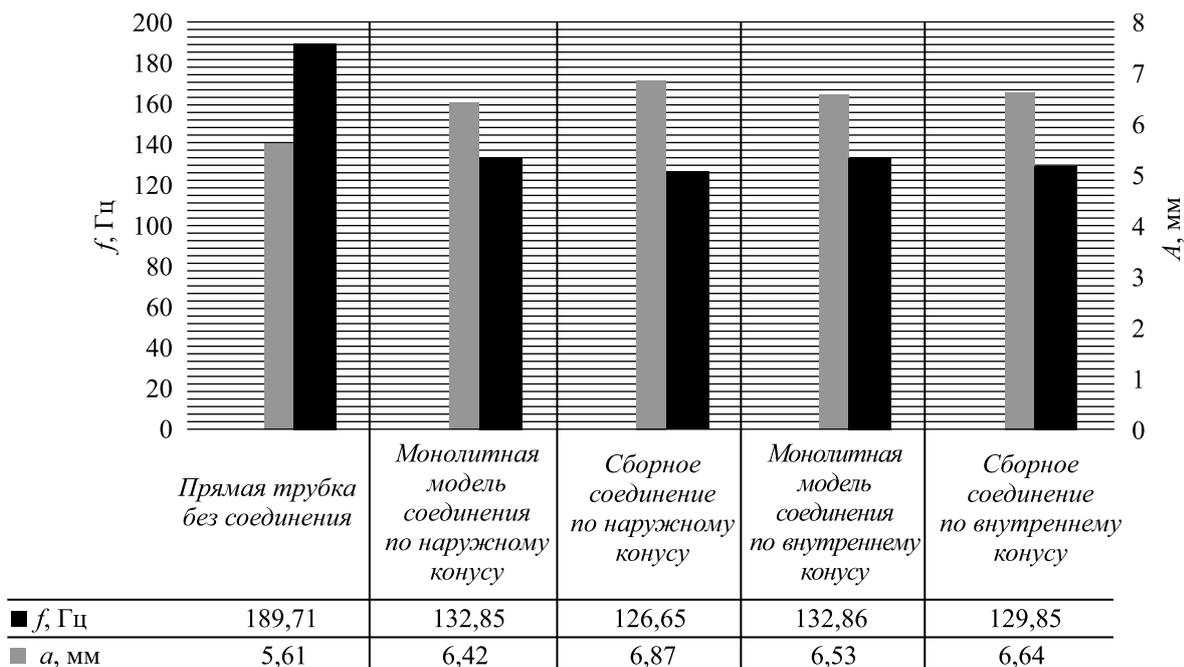


Рис. 10. Сравнительная диаграмма резонансных частот и их амплитуд для рассматриваемых моделей

ны вследствие затяжки соединения. Следовательно, влияние контактного взаимодействия на динамическое поведение трубопровода с соединением снижено.

Различие в резонансных частотах $f_{рез}$ сборного пролета трубопровода с соединением по внутреннему и наружным конусам незначительное. Можно считать, что представленные соединения имеют подобные АЧХ, а это говорит о равном влиянии соединений на величину резонансной частоты $f_{рез}$ пролета трубопровода.

Важным аспектом сравнения двух типов ниппельных соединений является распределение контактных давлений (КД) при резонансе в местах сопряжения деталей соединения, обеспечивающих его герметизацию. На рисунке 11 представлено распределение КД в соединениях. Слева на рисунке представлены пятна КД при номинальной затяжке соединений без внешнего динамического воздействия (на шкале величина КД приведена в МПа). Пятна КД в данном случае носят равномерный и замкнутый характер, т.е. оба варианта соединения трубопроводов являются загерметизированными. Справа на рис. 11 показано изменение пятна КД при прохождении трубопровода через резонансные частоты (при динамическом нагружении).

В сборном соединении по наружному конусу (см. рис. 11, а) при динамическом нагружении пятно КД имеет очень неравномерное распределение по раструбу трубопровода, при этом размыкания пятна контакта не происходит.

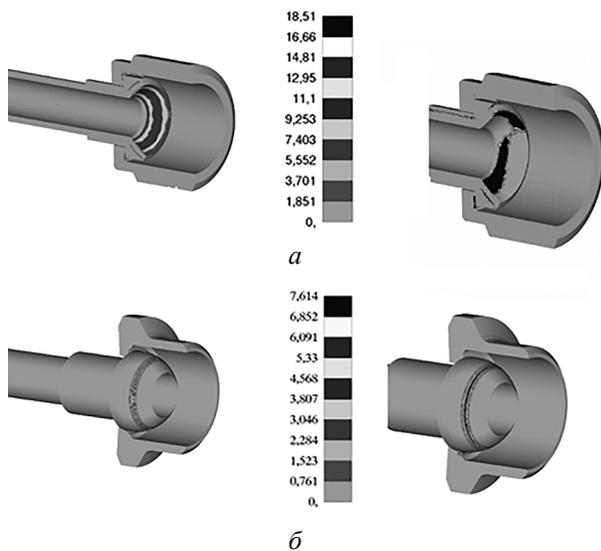


Рис. 11. Распределение контактного давления (МПа) в соединениях (условно штуцер не показан): а – сборное соединение по наружному конусу; б – соединение по внутреннему конусу

Из-за слишком неравномерного распределения КД высока вероятность нарушения герметизации соединения.

В соединении по внутреннему конусу (см. рис. 11, б) пятно КД практически не изменяет своего положения под воздействием динамического нагружения. Это говорит о том, что, с точки зрения сохранения герметичности, соединение менее восприимчиво к внешнему динамическому воздействию. Это связано с уменьшенной площадкой контакта полусферического ниппеля с внутренним конусом штуцера, обеспечивающей герметизацию соединения. Благодаря полусферическому ниппелю при изменении углового положения ниппеля относительно штуцера в момент прохождения через резонанс пятно КД не размыкается, а лишь немного изменяет свое положение.

Сравнительный анализ динамического поведения ниппельных соединений трубопроводов ЛА позволяет сформулировать следующие выводы:

- на изменение АЧХ пролета трубопровода, кроме массовых характеристик, влияют и условия сопряжения деталей в соединении, учет которых приводит к более точному вычислению величины резонансной частоты;
- для низшей резонансной частоты амплитудно-частотные характеристики пролетов трубопровода с соединением по внутреннему конусу и соединением по наружному конусу являются почти идентичными, что свидетельствует об одинаковом влиянии соединений на изменение резонансной частоты пролета трубопровода;
- с точки зрения обеспечения герметичности, под воздействием динамического нагружения предпочтительным является соединение по внутреннему конусу, так как при прохождении пролета трубопровода через резонанс это соединение остается полностью загерметизированным.

Заключение

Исследование работы конструкций трубопроводных систем является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение для многих отраслей промышленности. Рассмотренная задача об анализе работы ниппельного соединения под воздействием динамического нагружения с применением МКЭ показала необходимость учета условий сопряжения деталей конструкции для получения более точной АЧХ проектируемой конструкции. Решение задач методом конечных элементов с учетом контактного взаимодействия позволяет произвести отстройку

трубопроводной системы от резонансных режимов еще на этапах проектирования и уменьшить тем самым затраты на натурные испытания.

Список литературы

1. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник / Т. М. Баумта [и др.]: 2-е изд., перераб. М.: Альянс, 2013. – 423 с.
2. Сапожников В.М., Лагосюк Г.С. Прочность и испытания трубопроводов гидросистем самолетов и вертолетов: монография. М.: Машиностроение, 1973. – 248 с.
3. Баумта Т.М. Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств: изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Оборонгиз, 1961. – 475 с.
4. Комаров А.А., Сапожников В.М. Трубопроводы и соединения гидросистем. М.: Машиностроение, 1967. – 234 с.
5. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры: Расчет трубопроводной арматуры: изд. 5-е. М.: ЛКИ, 2008. – 480 с.
6. Тимошенко С.П., Янг Д.Х. Колебания в инженерном деле. М.: Наука, 1967. – 244 с.
7. Безбородов С.А., Уланов А.М. Методика расчета колебаний трубопровода с демпфирующими опорами из материала МР // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2014. № 1(43). С. 91–97.
8. Миронова Т.Б. Конечноэлементная математическая модель динамики криволинейного трубопровода с пульсирующим потоком рабочей жидкости // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 5. С. 131–137.
9. Швецов А.В. Моделирование динамики трубопроводов авиационного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. № 5–2(36). С. 219–223.
10. Блинов А.В., Максимов П.В. Разработка и верификация нестационарной конечно-элементной модели для исследования волновых процессов в трубопроводе [электронный документ] // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. – URL: www.science-education.ru/ru/article/view?id=17097 (дата обращения: 10.06.2016).
11. Zhang K., Li Y., Han B., Wang Zh. Numerical simulation on spanning pipeline's vibration characteristics and safety in flood // International Conference on Pipelines and Trenchless Technology. 2013. P. 986–996.
12. Агафонов В.М., Пыхалов А.А. Исследование ниппельного соединения трубопровода летательного аппарата под воздействием динамического нагружения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2015. Т. 14. № 2. С. 20–28.
13. Пыхалов А.А. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: дисс. ... д.т.н. Москва, 2006. – 428 с.
14. NX Nastran Advanced Nonlinear Theory and Modeling Guide. Siemens PLM Software Publ., 2014. – 488 p.

Материал поступил в редакцию 19.06.2016

АГАФОНОВ Владимир Михайлович E-mail: mr_Agafo@mail.ru Тел.: (3952) 405-144	Аспирант кафедры сопротивления материалов и строительной механики Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНТУ). Сфера научных интересов: динамика трубопроводных систем, численное моделирование динамических процессов. Автор девяти научных статей.
ПЫХАЛОВ Анатолий Александрович E-mail: pikhalov_aa@irgups.ru Тел.: (3952) 638-368	Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики, механики и приборостроения Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС). Сфера научных интересов: динамика и прочность конструкций с применением метода конечных элементов, контактные задачи твердого деформируемого тела. Автор одной монографии и более 110 научных статей.
ДОЛГИХ Евгений Сергеевич E-mail: dolgih.es@istu.edu Тел.: (3952) 405-069	Кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и электромеханических систем Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНТУ). Сфера научных интересов: обеспечение надежности металлоконструкций в суровых климатических условиях. Автор восьми научных статей.