

УДК 629.064.3:534.13

## ИССЛЕДОВАНИЕ НИШЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

© 2015 В. М. Агафонов<sup>1</sup>, А. А. Пыхалов<sup>2</sup><sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет<sup>2</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения

В статье приведены результаты исследований динамического поведения сборного однопролётного трубопровода с соединением по наружному конусу под воздействием кинематического возбуждения. Рассматривались пять моделей трубопровода с различными условиями сопряжений в соединении по наружному конусу. Результаты получены с применением метода конечных элементов и решением контактной задачи механики твёрдого деформируемого тела. На первом этапе выполнено построение амплитудно-частотных характеристик для рассматриваемых моделей трубопровода. В результате показана зависимость амплитудно-частотных характеристик колебаний однопролётного трубопровода от условий сопряжений в сборном соединении трубопровода. В ходе исследования определено, что резонансная частота трубопровода изменяется при введении допускаемых зазоров в соединение по наружному конусу. Такое изменение может приводить к смещению резонансной частоты трубопровода в диапазон рабочих частот конструкции, что может привести к разрушению трубопровода. Отражено влияние внешнего динамического нагружения на распределение контактного давления в сборном соединении по наружному конусу при прохождении резонансной частоты. Данное распределение определяет герметичность соединения.

*Система гидравлическая, аппарат летательный, динамика трубопроводов, соединение по наружному конусу.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-2-20-28

Эксплуатация трубопроводных систем летательных аппаратов (ЛА) всегда сопровождается наличием динамических процессов, вызываемых вибрацией агрегатов силовых установок, неравномерным потоком жидкости, колебаниями отдельных агрегатов и панелей под действием аэродинамических сил. Спецификой работы трубопровода при его динамическом нагружении является то, что явление резонанса в нём наступает попролётно. Это позволяет рассматривать отдельный пролёт трубопровода независимо от остальной части конструкции [1]. Спектр колебаний трубопровода представляет собой сложный комплекс, где, с одной стороны, имеется широкий набор собственных частот колебаний трубопровода вследствие наличия множества пролётов; а с другой – на трубопровод действуют многообразные источники возбуждения колебаний. Таким образом, нет чётко выделенного рабочего диапазона трубопроводной системы и по-

этому высока вероятность появления резонансных явлений при совпадении вынужденных и собственных частот трубопровода.

Для определения рабочего частотного диапазона трубопроводной трассы наиболее эффективными являются экспериментальные методы. Однако их применение при проектировании налагает определённые ограничения, вызванные трудоёмкостью и дороговизной проводимых экспериментов; велика и вероятность случайной ошибки. Существующие теоретические модели для анализа динамического поведения трубопроводных систем традиционно носят упрощённый характер. В частности, при расчёте не учитываются динамические свойства конструкции, зависящие от условий сопряжений деталей в сборной конструкции трубопровода и его крепления на ЛА. Отсутствие объективной информации о комплексе представленных конструктивно-силовых и техно-

логических факторов является потенциально опасным с точки зрения появления резонансных режимов [2]. Также классические теоретические модели динамического поведения трубопроводов рассматривают их в целом, но не учитывают влияние динамического возбуждения на места соединения трубопроводной трассы. Эти места соединений, как правило, заменяются сосредоточенными массами. Такое упрощение вводит ряд ограничений на использование этих моделей в расчётной практике. В частности, нельзя определить, какое влияние оказывает трубопроводная арматура на динамические характеристики трубопроводной системы в целом, в том числе преднапряжение от усилия затяжки.

Решение такого рода проблемы возможно при использовании метода конечных элементов (МКЭ) с решением контактной задачи взаимодействия соединяемых деталей.

Рассматривается динамическое поведение однопролётного трубопровода с соединением по наружному конусу под воздействием кинематического возбуждения для оценки влияния сборного соединения на амплитудно-частотные характеристики трубопровода, в том числе с зазорами в соединении. Выбор задачи, рассматриваемой в данной работе, обусловлен следующими причинами: не установ-

лено, каким образом влияют условия сопряжения на динамические характеристики поведения трубопровода в целом; не установлено влияние технологических неточностей (например, зазоров в соединении) на изменение резонансных частот трубопровода и на герметичность соединения.

Конструктивное исполнение трубопроводной арматуры регламентировано государственными стандартами. Соединение по наружному конусу изготавливается согласно ГОСТ 13954-74. Конструктивное исполнение соединения по наружному конусу представлено на рис. 1.

Типовые разрушения соединений трубопроводов по наружному конусу представлены на рис. 2. К ним относятся разрушения в зоне развальцованной части трубопровода и разрушения трубопровода за хвостовиком ниппеля.

Для проведения анализа был разработан ряд моделей пролёта трубопровода с соединением по наружному конусу. Длина пролёта составляет 500 мм, наружный диаметр трубопровода равен 8 мм с толщиной стенки 1 мм; размеры соединения выполнены согласно ГОСТ 13955-74, ГОСТ 13956-74, ГОСТ 13957-74, ГОСТ 139587-74, ГОСТ 13954-74.

Всего было рассмотрено пять вариантов моделей однопролётного трубопровода (рис. 3).

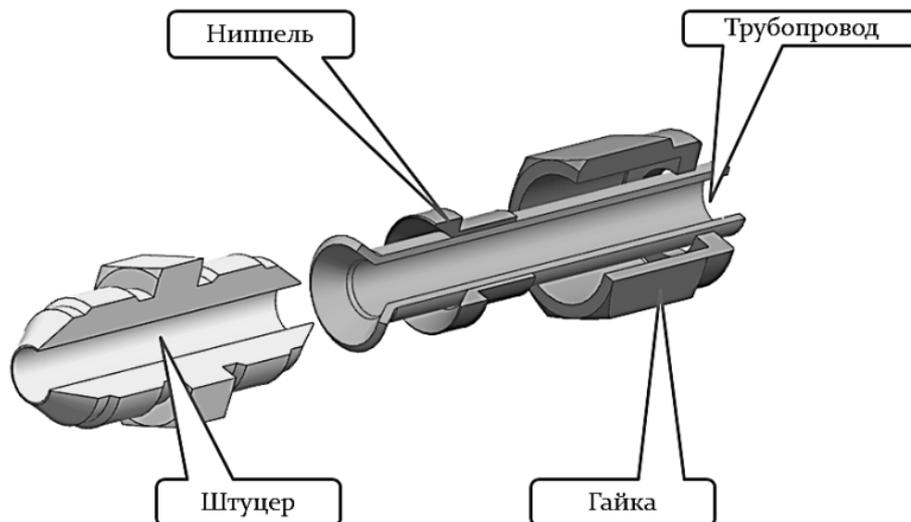


Рис. 1. Конструктивное исполнение соединения по наружному конусу

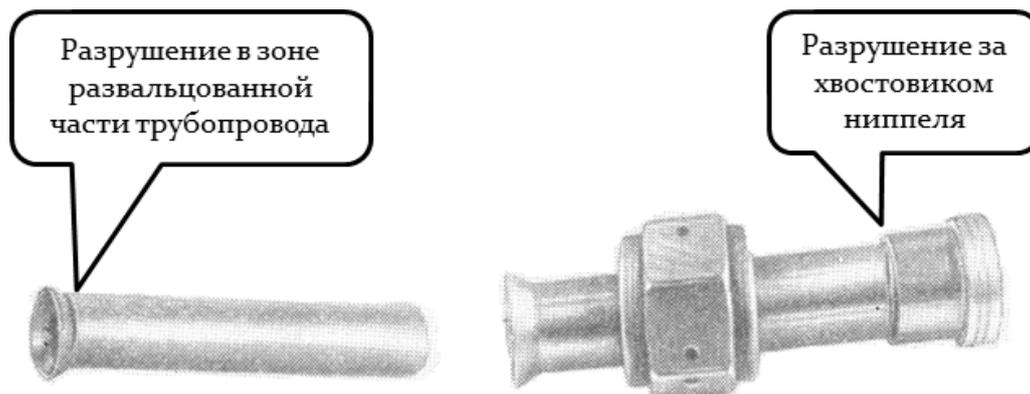


Рис. 2. Основные разрушения соединений по наружному конусу

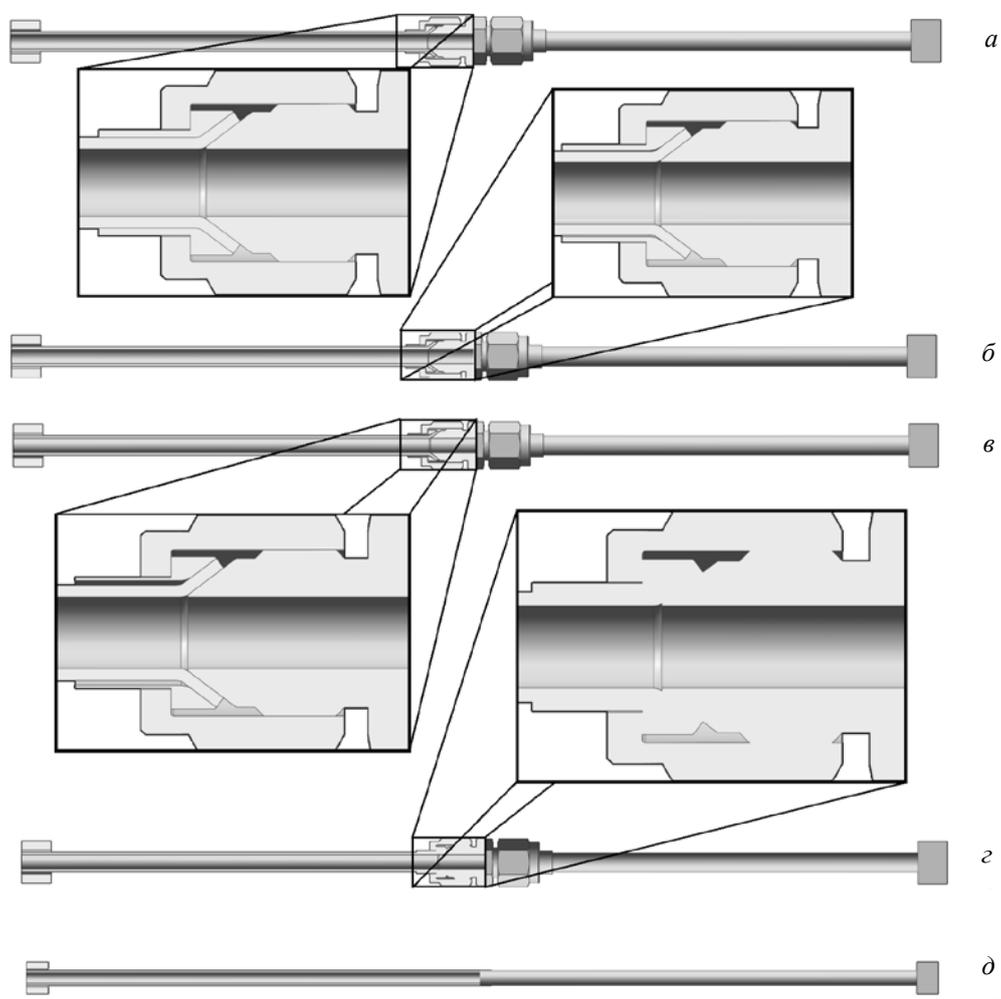


Рис. 3. Варианты рассматриваемых моделей трубопровода

На рис. 3, *а* представлена модель сборной конструкции трубопровода с соединением по наружному конусу, выполненная без зазоров (номинальные размеры соединения). На рис. 3, *б* представлена модель сборного трубопровода с соединением, выполненным с зазором 0,15 мм между ниппелем и трубопроводом. Зазор входит в допустимые предельные отклонения размеров деталей соединения по наружному конусу (ГОСТ 13977-74). На рис. 3, *в* представлена модель трубопровода с соединением, выполненным с зазором 0,4 мм между ниппелем и трубопроводом, зазор превышает допустимые предельные отклонения размеров деталей соединения по наружному конусу. На рис. 3, *г* представлена модель трубопровода с соединением, выполненным по концепции «монолитного» аналога сборной конструкции, т. е. без учёта модели контактного соединения деталей. На рис. 3, *д* представлена модель трубопровода без соединения.

Схема закрепления и нагружения рассматриваемых моделей представлена

на рис. 4. Одна опора закреплена неподвижно. К свободной опоре приложено кинематическое возбуждение, представляющее собой периодическое колебание с амплитудой в 1 мм и с изменением частоты колебания от 0 до 250 Гц за заданный период времени.

Усилие затяжки соединения, приложенное к накидным гайкам, соответствует ГОСТ 13977-74, где оно задано моментом затяжки, в модели же приложено осевым перемещением гайки по резьбе, 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 модели представлен на рис. 5. Для моделирования использовались КЭ типа «изопараметрический гексаэдр». Контактное взаимодействие моделировалось при помощи специального контактного КЭ.

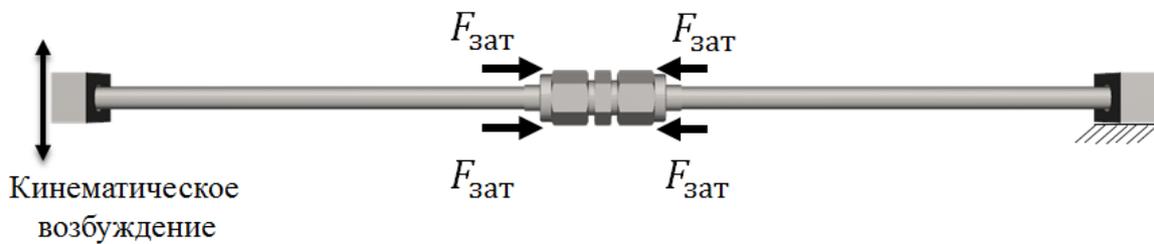


Рис. 4. Схема нагружения и закрепления

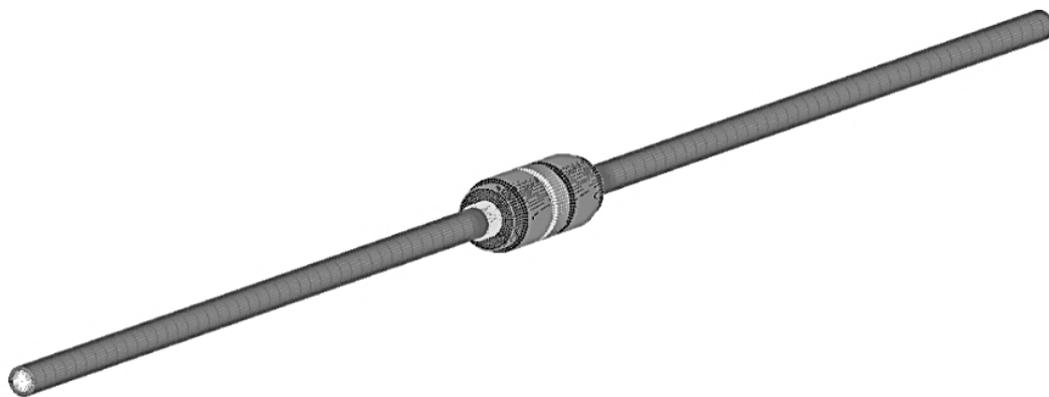


Рис. 5. Конечно-элементная модель исследуемого образца пролёта трубопровода

Контактное взаимодействие в модели учтено между всеми сопрягаемыми поверхностями. Обобщённая схема контактных поверхностей в соединении по наружному конусу представлена на рис. 6.

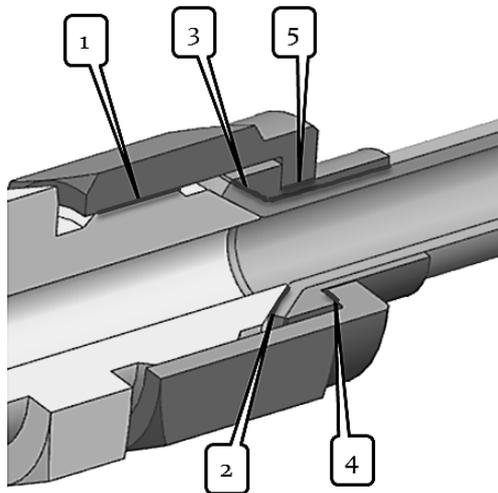


Рис. 6. Схема обобщённых контактных поверхностей в соединении по наружному конусу

Цифрами на рис. 6 обозначены сопряжения: 1 – по цилиндрическим резьбовым поверхностям; 2 – по коническим поверхностям штуцера и развальцованной части трубопровода; 3 – по внутренней части ниппеля с наружной поверхностью трубопровода; 4 – по кольцевым поверхностям стягивания гайки и ниппеля; 5 – нерабочая поверхность между хвостовиком ниппеля и гайкой (так же, как и сопряжения, требует установки контактного элемента).

В результате расчёта были получены частотные отклики для рассматриваемых трёх сборных конструкций трубопровода с соединением по наружному конусу: один для модели монолитного аналога сборной конструкции и один – для трубопровода без соединения. Графики зависимости амплитуды колебания трубопровода от частоты вынужденных колебаний рассматриваемых моделей показаны на рис. 7.

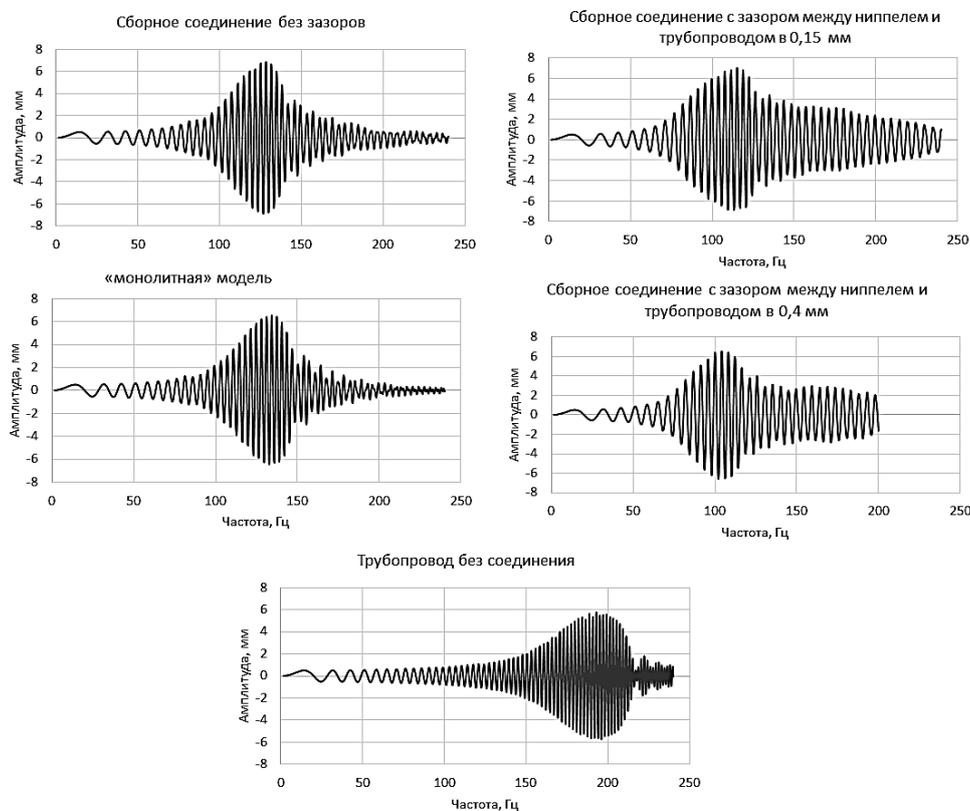


Рис. 7. Частотные отклики рассматриваемых моделей

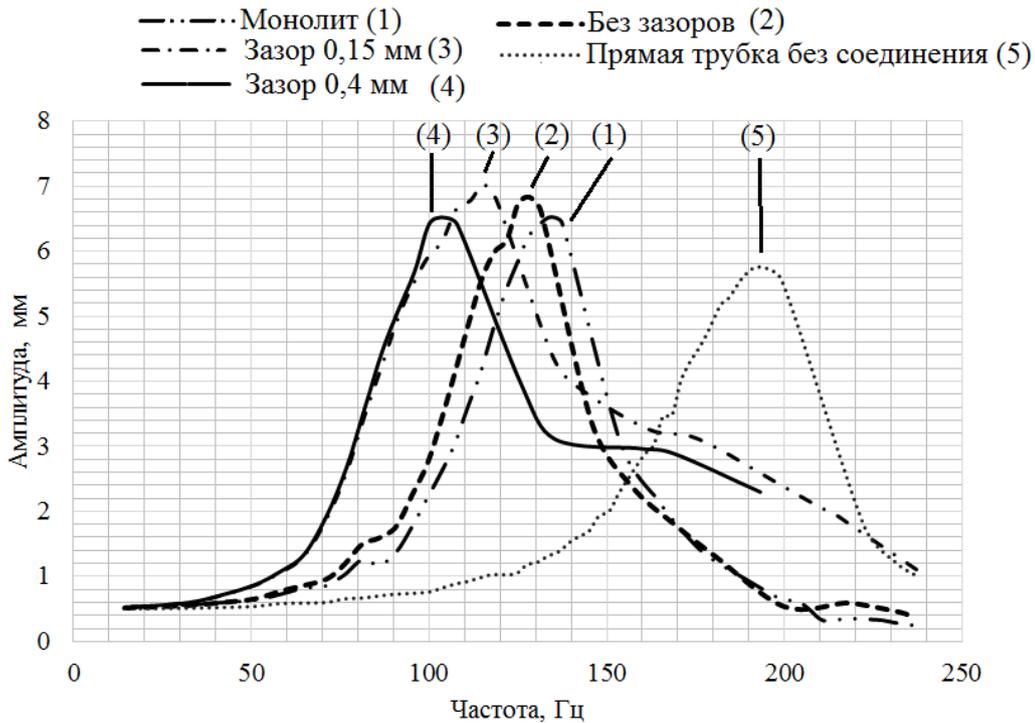


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики

Для анализа влияния условий сопряжения все амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) представлены с наложением (рис. 8).

Результаты показывают, что введение в пролёт трубопровода соединения приводит к значительному снижению резонансной частоты и увеличению её ам-

плитуды. С учётом контакта в соединении резонансная частота вычисляется более точно. Увеличение зазоров (0,15 и 0,4 мм) между ниппелем и трубопроводом приводит к снижению резонансной частоты вследствие уменьшения жёсткости конструкции.

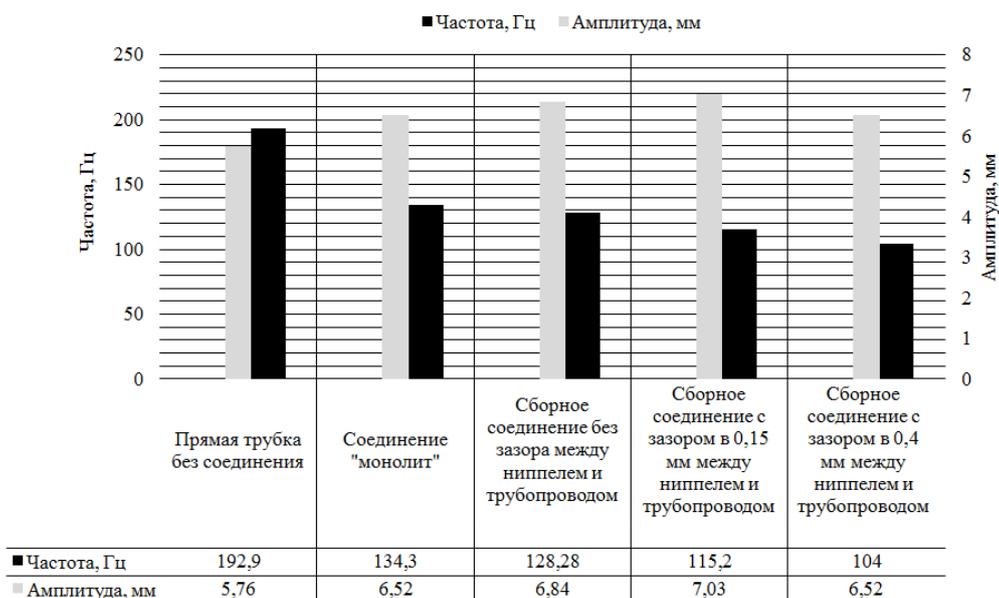


Рис. 9. Сравнение резонансных частот моделей и их амплитуд

На рис. 9 представлена сравнительная диаграмма частот и амплитуд для всех рассматриваемых образцов. Её анализ показывает следующее:

–ввод соединения в пролёт приводит к снижению резонансной частоты на 30% и увеличению амплитуды на 13%;

–учёт контактного взаимодействия приводит к изменению резонансной частоты ещё на 4%, амплитуды – на 5%;

–ввод в соединение зазора в 0,15 мм между ниппелем и трубопроводом приводит к изменению резонансной частоты относительно соединения без зазоров на 10%, амплитуды – на 3%;

–зазор между ниппелем и трубопроводом в 0,4 мм изменяет величину резонансной частоты относительно соединения без зазоров на 19%, амплитуды – на 5%.

Также видно, что при введении в соединение зазора в 0,4 мм (зазор превышает допустимые предельные отклонения размеров деталей соединения по наружному конусу) происходит снижение амплитуды колебаний. Предположительно это вызвано тем, что при одинаковом усилии затяжки соединения перемещение гайки по резьбе происходит на разную величину. Это, в свою очередь, вызывает перераспределение условий сопряжения в соединении, особенно при прохождении резонансной частоты, что приводит к снижению амплитуды. Отметим, что этот вопрос требует отдельного изучения.

Интерес представляет анализ характера распределения контактных давлений (КД) при резонансе с точки зрения обеспечения герметичности. На рис. 10 представлено распределение КД в соединении. Слева на рисунке представлено пятно КД при номинальной затяжке (величина КД приведена на шкале в МПа). Справа показано изменение пятна КД при динамическом нагружении, а точнее, в момент прохождения трубопровода через резонанс, при максимальной амплитуде. На

рис. 10, а представлено распределение КД в сборном соединении без зазоров. При динамическом нагружении пятно КД имеет очень неравномерное распределение по раструбу трубопровода, при этом размыкания пятна контакта не происходит, что говорит о сохранении герметичности соединения.

На рис. 10, б представлено распределение КД в соединении с зазором 0,15 мм между ниппелем и трубопроводом. Пятно КД также имеет неравномерное распределение, но уже происходит его размыкание. Это показывает, что соединение находится в близком к разгерметизации состоянии.

На рис. 10, в представлено распределение КД в соединении с зазором 0,4 мм между ниппелем и трубопроводом. Пятно КД распадается на две изогнутых дуги с большими зазорами между ними, что говорит о разгерметизации соединения.

Пятна КД при номинальной затяжке без внешнего динамического воздействия (рис. 10, слева) во всех рассматриваемых моделях носят равномерный и замкнутый характер, т.е. соединения являются загерметизированными.

Таким образом, получены следующие результаты:

–определены амплитудно-частотные характеристики и их изменения в зависимости от условий сопряжения и учёта зазоров в соединении;

–учёт контактного взаимодействия в соединении приводит к снижению резонансной частоты на 4%, а с учётом зазоров в соединении – до 19%. Такое изменение может привести к смещению резонансной частоты трубопровода в диапазон рабочих частот конструкции и к разрушению трубопровода;

–получены данные о влиянии динамического нагружения на распределение контактного давления в соединении, обеспечивающего его герметичность.

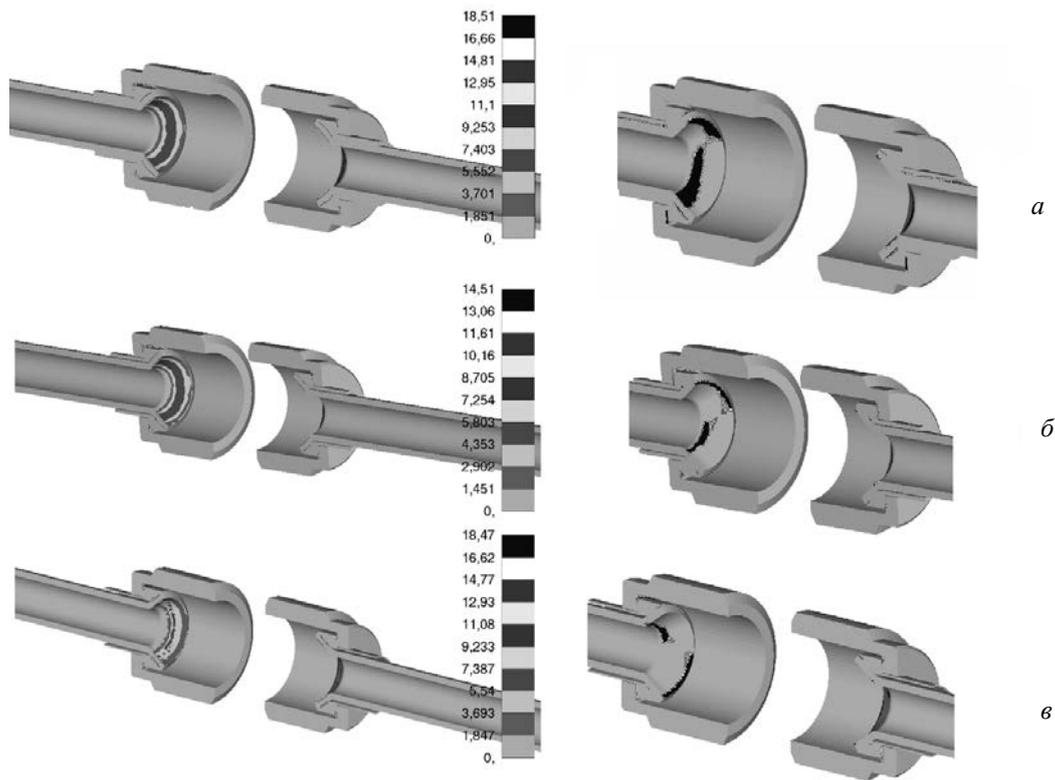


Рис. 10. Распределение контактных давлений в соединении

### Библиографический список

1. Сапожников В.М., Лагосюк Г.С. Прочность и испытания трубопроводов гидросистем самолётов и вертолётов. М.: Машиностроение, 1973. 248 с.
2. Яхненко М.С. Динамика сборных конструкций трубопроводных систем с учётом условий сопряжения. Дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2011. 168 с.

### Информация об авторах

**Агафонов Владимир Михайлович**, аспирант кафедры сопротивления материалов и строительной механики, Иркутский национальный исследовательский технический университет. E-mail: [mr\\_Agafo@mail.ru](mailto:mr_Agafo@mail.ru). Область научных интересов: моделирование динамических процессов трубопроводов методом конечных элементов с учётом контактного взаимодействия.

**Пыхалов Анатолий Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики и приборостроения, Иркутский государственный университет путей сообщения. E-mail: [pikhalov\\_aa@irgups.ru](mailto:pikhalov_aa@irgups.ru). Область научных интересов: динамика и прочность конструкций с применением метода конечных элементов и контактной задачи твёрдого деформируемого тела.

## RESEARCH OF A SLEEVE CONNECTION OF THE AIRCRAFT PIPELINE UNDER THE INFLUENCE OF DYNAMIC LOADING

© 2015 V. M. Agafonov<sup>1</sup>, A.A. Pykhalov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State Railway University, Irkutsk, Russian Federation

The article presents the results of analyzing the dynamic behavior of a prefabricated single-span pipeline with a tube connection on external cone under the influence of kinematic excitation. Five models of pipelines with different conjugation conditions in tube connection on external cone are described. The results have been obtained by using the finite element method and solving a contact problem of deformable body mechanics. At the first stage amplitude-frequency characteristics for the models of pipeline under consideration are constructed. The result shows the dependence of amplitude-frequency characteristics of the pipeline vibrations on the conjugation conditions in the collecting pipe connection. It was found in the process of research that the resonant frequency of the pipeline varies with introducing admissible gaps in the tube connection on external cone. This change may lead to a shift of the resonance frequency of the pipeline in the range of operating frequencies of the structure that may lead to the destruction of the pipeline. The article also reflects the influence of the external dynamic load on the distribution of contact pressure in the prefabricated tube connection on external cone while passing the resonance frequency. This distribution determines the tightness of connections.

*Hydraulic system, aircraft, dynamics of pipelines, tube connection on external cone.*

### References

1. Sapozhnikov V.M., Lagosyuk G.S. *Prochnost' i ispytaniya truboprovodov gidrosistem samoletov i vertoletov* [Strength and hydraulic testing of pipelines aircraft]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1973. 248 p.
2. Yakhnenko M.S. *Dinamika sbornykh konstruksiy truboprovodnykh sistem s uchetom usloviy sopryazheniya. Dis. kand. tekhn. nauk* [Dynamics of prefabricated piping systems subject to the conditions. Cand. eng. sci. diss.]. Irkutsk, 2011. 168 p.

### About the authors

**Agafonov Vladimir Mikhailovich**, postgraduate student of the Department of Strength of Materials and Structural Mechanics, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation. E-mail: [mr\\_Agafo@mail.ru](mailto:mr_Agafo@mail.ru). Area of Research: modeling of dynamic processes of pipelines by the finite element method taking into account contact interaction.

**Pykhalov Anatoliy Alexandrovich**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Professor of the Department of Mechanics and Instrument Engineering, Irkutsk State Railway University, Irkutsk, Russian Federation. E-mail: [pikhalov\\_aa@irgups.ru](mailto:pikhalov_aa@irgups.ru). Area of Research: investigation of dynamics and strength of structures using the finite element method and the contact problem of deformable solids.