

Совершенствование всасывающих линий гидросистем с учетом кавитации

Бобарика И.О.*, Демидов А.И.**

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул.

Лермонтова, 83, Иркутск, 664074, Россия

**e-mail: Bobarika_io@istu.edu*

***e-mail: demidov-ai@yandex.ru*

Аннотация

Целью работы являлась разработка и проверка методики поиска кавитации в сборных конструкциях трубопроводов всасывающих магистралей на различных режимах, в том числе и переходных. Выполнен поиск возможных стационарных и нестационарных режимов работы гидросистемы, при которых возможно возникновение кавитации в исследуемых элементах конструкции, описаны режимы работы гидросистемы. Использована стационарная, нестационарная и квазистационарная постановка задачи. Получена информация о наиболее вероятных местах возникновения кавитации, коррелирующие с реальной картиной. Подтверждена возможность использования разработанной методики поиска кавитации в сборных конструкциях трубопроводов всасывающих магистралей на различных режимах для анализа возможных модернизаций гидросистем на основании рассмотрения опытного участка гидросистемы.

Ключевые слова: гидросистема, трубопровод, кавитация, вибрация, резонанс.

Работа направлена на решение задачи проектирования и модернизации сборных конструкций трубопроводов гидросистем для повышения их ресурса с применением систем инженерного анализа

Цель работы – разработка и проверка методики поиска и устранения кавитации в трубопроводах всасывающих магистралей на различных режимах, в том числе и переходных.

Всасывающие магистрали разрабатываются таким образом, чтобы на номинальных режимах статическое давление не приближалось значению давления насыщенных паров рабочей жидкости. Однако гидросистема обычно работает в условиях частой смены режимов. Именно на переходных режимах во время кратковременного падения давления могут сформироваться условия для возникновения кавитации. В этом случае кавитация возникает только в какой-то определенный момент переходного процесса и каверна не развивается длительное время в одном месте.

Современные программные продукты для решения задач гидрогазодинамики с учётом кавитации позволяют рассматривать только развивающуюся стационарную кавитационную каверну, возникающую в результате гидродинамической кавитации. Однако, ввиду высокой вибронагруженности трубопроводов гидросистемы необходимо учитывать и возможное возникновение вибрационной кавитации.

В данной работе предложена методика решения подобных задач. Методика состоит из нескольких основных шагов.

1. Гидродинамический анализ конструкции для поиска гидродинамической кавитации и определения гидравлических сопротивлений трубопроводов линии всасывания гидросистемы;
2. Анализ собственных частот и форм колебаний сборной конструкции трубопроводов гидросистемы;
3. Модернизация конструкции путём изменения пространственной конфигурации трубопроводов (для уменьшения гидравлического сопротивления и исключения гидродинамической кавитации) с частотной отстройкой от резонансных частот (для исключения вибрационной кавитации).

Гидродинамический анализ, в свою очередь, состоит из следующих шагов:

- 1) Анализ условий работы всасывающей линии гидросистемы для выявления наиболее опасных режимов работы (переходный процесс насоса нагнетания с минимальной производительности на максимальную, минимальное обеспечиваемое давление в линии всасывания, температурные условия);
- 2) Гидродинамический анализ в нестационарной постановке на опасном переходном режиме для выявления момента критического падения давления — наихудшего момента переходного режима;

3) Гидродинамический анализ в статической постановке с учетом кавитации с граничными условиями, отражающими наихудший момент переходного режима.

Апробация методики была произведена на примере участка всасывающей линии гидросистемы современного самолета, с заведомо известными данными о возможности возникновения кавитации.

В качестве граничных условий были приняты: минимальное обеспечиваемое давление на входе во всасывающую линию, минимальная и максимальная производительности гидронасоса, температура.

Рабочая жидкость, используемая в системе – распространенное гидравлическое масло АМГ-10. График зависимости давления насыщенных паров от температуры представлен на рисунке 1.

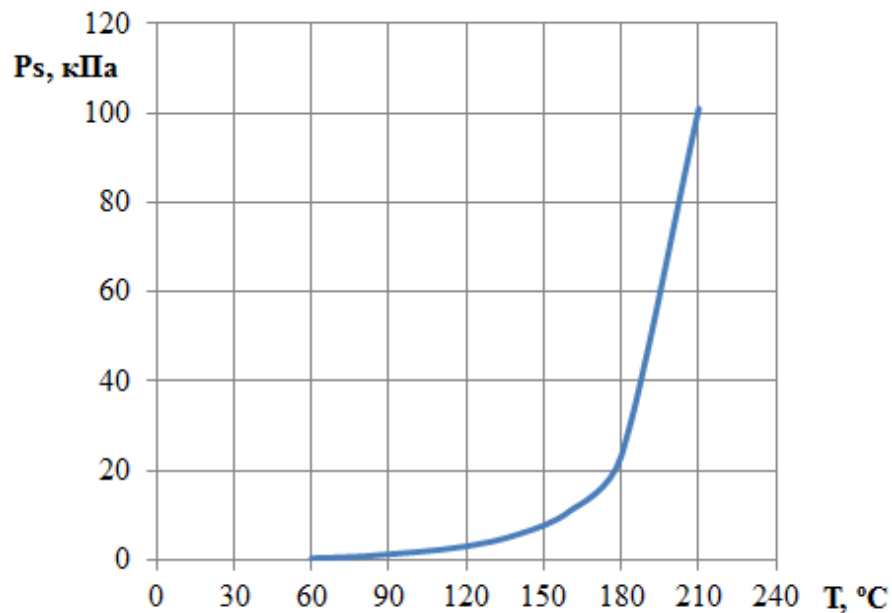


Рисунок 1 – Зависимость давления насыщенных паров в АМГ-10 от температуры

Моделирование проводилось на основе программного продукта FloEFD. Программный продукт FloEFD позволяет производить расчеты непосредственно в CAD-системах. В частности, он встраивается непосредственно в систему Siemens NX 7.5 в качестве дополнительного модуля. При этом построение расчётной модели рассматриваемой области течения не требует дополнительных геометрических построений и преобразований и реализуется непосредственно на базе исходной модели в CAD- системе.

Геометрическая модель конструкции всасывающей линии гидросистемы показана на рисунке 2.

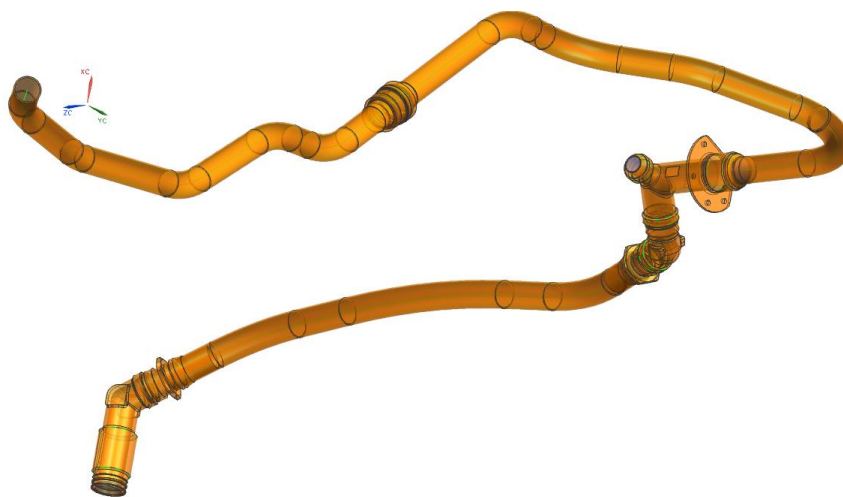


Рисунок 2 – Геометрическая модель трубопровода

В рамках нестационарной постановки задачи рассмотрен переходной процесс с режима минимальной производительности на режим максимальной производительности. Время перехода составило 0,2 секунды. График изменения расхода жидкости по времени для переходного процесса представлен на рисунке 3.

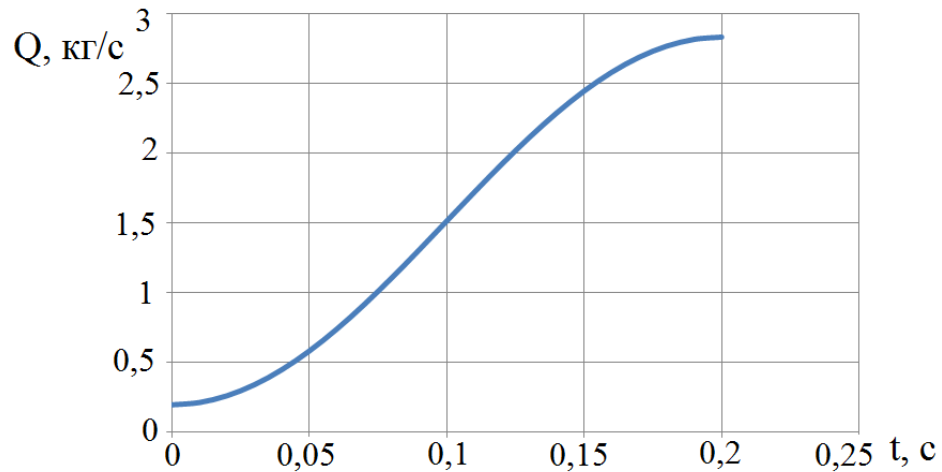


Рисунок 3 – Изменение расхода жидкости по времени

В результате расчета найден момент времени, в который наблюдаются наибольшее падение давления в трубопроводе. Однако, кавитацию в рамках нестационарной постановки задачи выявить не представляется возможным, поэтому был выполнен гидродинамический анализ в квазистационарной постановке с граничными условиями, которые соответствуют моменту времени наибольшего падения давления.

В результате обнаружены зоны развития кавитационной области (рисунок 4). Место возникновения кавитации определено по объёмной концентрации паров газа в жидкости (безразмерная величина). Вне кавитационной зоны объёмная концентрация пара условно равна нулю (так как массовая концентрация растворённого газа в жидкости не превышает 0,0001). В зоне кавитации объёмная концентрация пара имеет отличные от нуля значения. Возможное развитие кавитации во фланцевом тройнике показано на рисунке 5.

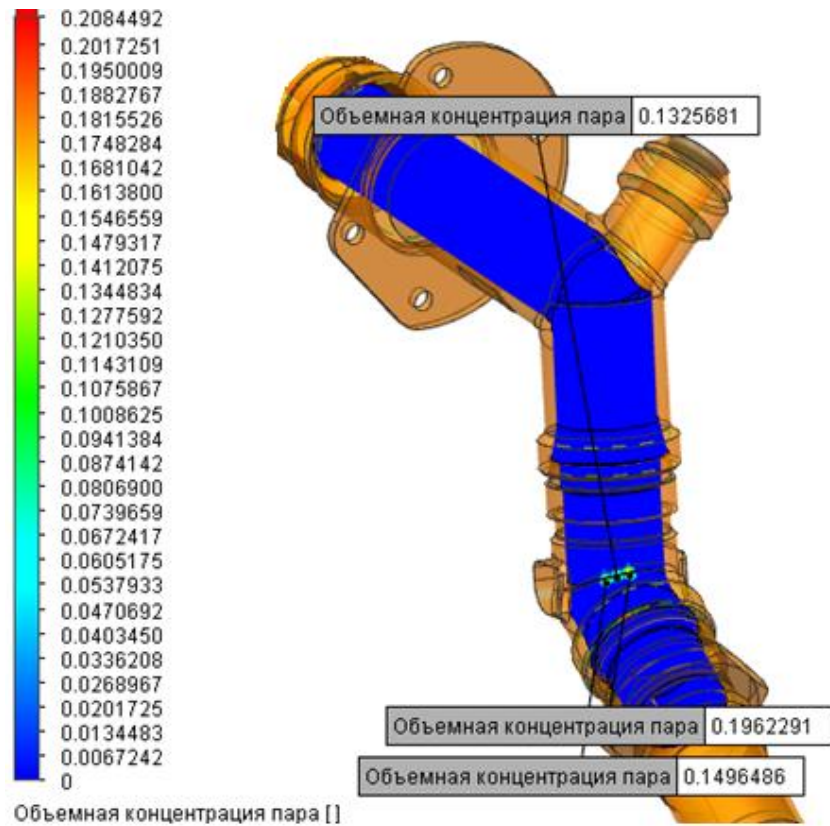


Рисунок 4 – Источник кавитации во фланцевом тройнике

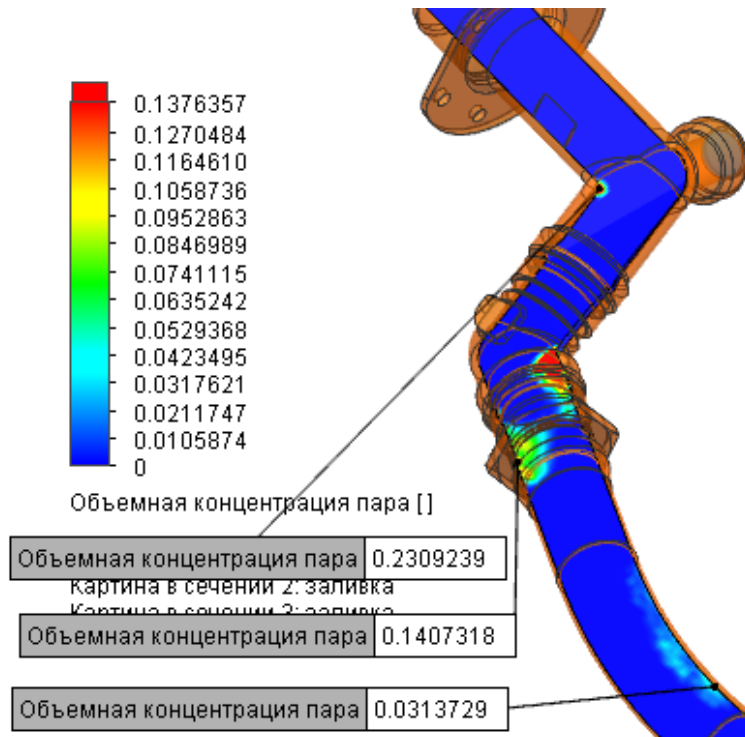


Рисунок 5 – Картина развития кавитационной области во фланцевом тройнике

Кроме гидродинамической кавитации была рассмотрена возможность возникновения вибрационной кавитации. Вибрационная кавитация имеет место вблизи вибрирующих твердых поверхностей, если амплитуда пульсаций достигает некоторого порогового значения. При колебании твердого тела относительно жидкости или жидкости относительно твердого тела давление в жидкости на границе раздела жидкости и твердого тела может упасть и вызвать образование кавитационных пузырей. Из этого следует, что там, где по гидродинамическим условиям не может быть кавитации, при наличии вибрационного поля кавитация развивается так же, как при определенных гидродинамических условиях. В подобных условиях интенсивность гидроэрозии металла увеличивается с ростом скорости движения жидкости или величины вибрации либо с одновременным увеличением обоих факторов.

Наибольшая амплитуда колебания возникает на режиме резонанса, поэтому были определены собственные частоты колебаний участка гидросистемы (Таблица 1). Модальный анализ проводился на основе программного продукта ANSYS.

Таблица 1

Результаты модального анализа исходной конструкции

| № п/п | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------|-------|-------|-------|--------|------|--------|--------|------|
| Частота, Гц | 232,9 | 341,6 | 635,9 | 1657,8 | 1867 | 2754,7 | 3088,8 | 3627 |

Первые три моды соответствуют протяженному участку, не имеющему точек крепления, перед тройником. Таким образом, с помощью методики был определен проблемный участок (рисунок 6).

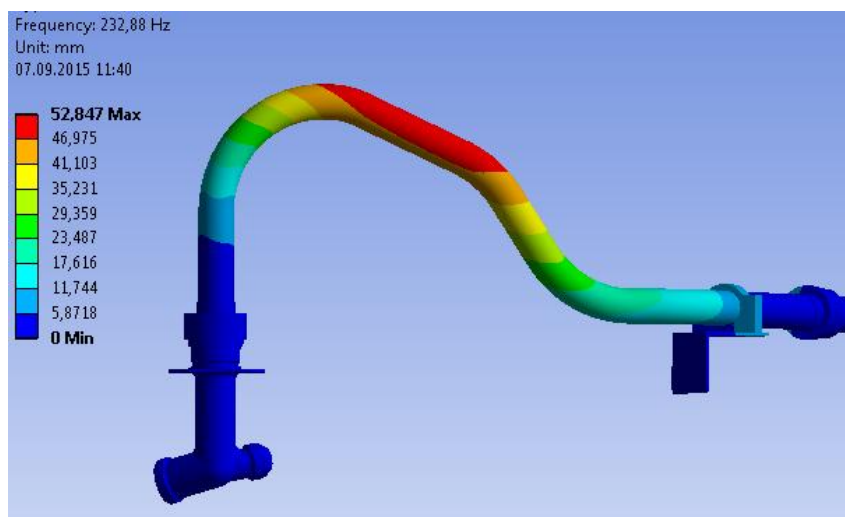


Рисунок 6 – Проблемный участок магистрали

В качестве модернизированной конструкции были рассмотрены два варианта. Конструкция 1 с прямым трубопроводом и с дополнительным угольником на 90° перед тройником (рисунок 7) и конструкция 2 с меньшим изгибом трубопровода и дополнительным угольником на 45° на входе в тройник (рисунок 8), а так же в конструкции 2 изменен угол тройника для спрямления траектории потока рабочей жидкости (рисунок 9).



Рисунок 7 – Конструкция 1

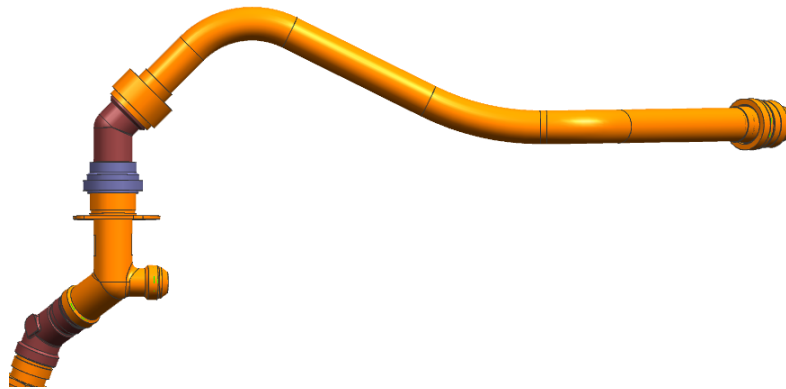


Рисунок 8 – Конструкция 2

Конструкция 1 обладает большей жесткостью по результатам модального анализа (таблица 2). Но при этом резкий поворот потока на 90° создает высокое местное сопротивление, что приводит к более интенсивному развитию кавитации, чем в исходной конструкции (рисунок 9).

Таблица 2

Результаты модального анализа конструкции 1

| № п/п | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------|-------|-------|--------|------|--------|--------|--------|------|
| Частота, Гц | 534,5 | 583,7 | 1211,5 | 2380 | 2882,7 | 3054,8 | 3836,3 | 3968 |

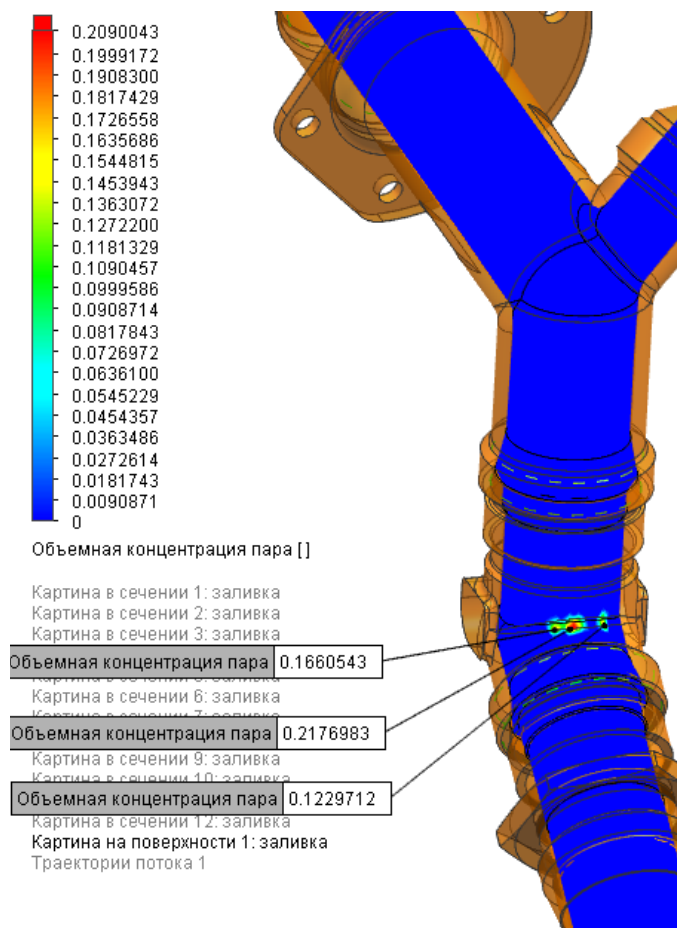


Рисунок 10 – Объемная концентрация пара в тройнике образца 1

Конструкция 2 по результатам модального анализа обладает лучшими частотными характеристиками с в сравнении с исходной конструкцией (таблица 3).

Таблица 3

Результаты модального анализа конструкции 2

| № п/п | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Частота, Гц | 396,6 | 514,5 | 871,45 | 1503,6 | 1771,8 | 2773,2 | 2847,1 |

По результатам гидродинамического анализа с учетом кавитации объемная концентрация пара в тройнике образца 2 равна 0. Соответственно кавитация отсутствует.

Отмечено, что кавитация в трубопроводе перед фланцевым тройником может возникать как из-за падения давления в магистрали, так и по причине вибронгруженности трубопровода. Одна из собственных частот (635,9Гц) практически совпадает с частотой пульсаций гидравлической жидкости (630Гц) при номинальной частоте вращения, в результате чего может возникать резонанс.

Конструкции 1 и 2 позволяют избежать резонанса на частоте пульсаций гидронасоса и реализуют частотную отстройку вверх от частот 200 – 300 Гц, тем самым устраняется кавитация в трубопроводе перед фланцевым тройником, вызванная вибронгруженностью трубопровода. Однако, по результатам дополнительных гидравлических анализов конструкция 1 является гидравлически наименее совершенной, ввиду наличия наибольших местных сопротивлений и увеличивает гидродинамическую кавитацию в переходных режимах работы гидронасоса. Конструкция 2 является наилучшим решением из предложенных и проанализированных, т.к. кроме частотной отстройки конструкция 2 обладает наименьшими гидравлическими сопротивлениями, что уменьшает гидродинамическую кавитацию в переходных режимах работы гидронасоса.

В настоящей статье в обобщённом виде представлена методика постановки задач гидродинамического анализа сборной конструкции трубопровода всасывающей линии гидросистемы, работающей в кавитационном режиме.

При выполнении данной работы для примера был выполнен анализ сборной конструкции трубопровода всасывающей линии гидравлической системы, работающей в кавитационном режиме. Для этой системы получены картины распределения давлений, скоростей потока, объёмной концентрации паров газа, растворённого в жидкости, и значения собственных частот колебаний. Полученные результаты позволили оценить совершенство конструкции и гидравлические нагрузки на трубопровод при различных режимах его работы.

Отмечено возникновение кавитации во время переходного процесса при изменении режима минимальной производительности на режим максимальной производительности гидронасоса. В рамках решения квазистационарной задачи для определённого момента времени определены источники и места возникновения кавитации, определены значения объёмной концентрации паров газа, растворённого в жидкости. Также в статье отмечено, что квазистационарная постановка задачи является вынужденной ввиду ограниченности функционала программного обеспечения и при расширении функционала результаты могут быть уточнены.

Разработанная методика позволила выделить участок трубопровода, включающий в себя одновременно места опасные с точки зрения гидродинамической кавитации и места опасные с точки зрения вибрационной кавитации. Предложены два

варианта модернизации, которые были рассмотрены с применением описанной методики. По итогам оценки изменений была подтверждена эффективность одного из образцов. При этом полученные в результате моделирования данные отражают реальную картину происходящего в трубопроводе, что подтверждает справедливость и состоятельность предложенной методики.

Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (Министерство образования и науки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета» согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Библиографический список

1. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. - М.: Недра, 1982. - 224 с.
2. Башта Т.М. Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств. - М.: Изд-во Оборонгиз, 1961. - 97 с.
3. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971. 672 с.

4. Комаров А.А. Трубопроводы и соединения для гидросистем. – М.: Машиностроение, 1967. – 232 с.

5. Одельский Э.Х. Гидравлический расчёт трубопроводов разного назначения: Учебное пособие. – Минск: Высшая школа, 1967. - 103 с

6. Сапожников В.М., Лагосюк Г.С. Прочность и испытания трубопроводов гидросистем самолетов и вертолетов. - М.: Машиностроение, 1973. - 248 с.

7. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. – М.: Энергоиздат, 1981. -248 с.

8. Яхненко М.С. Исследование зависимости частот собственных колебаний и напряженно-деформированного состояния трубопроводных систем от особенностей их конструкции // Материалы 15 Международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А.Г. Горшкова. Москва, 2009. С. 167-168.

9. Бобарика И.О. Методика решения задачи поиска частотного отклика сборной конструкции трубопровода с применением метода конечных элементов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. 2014. Выпуск 2(54). С. 16 – 20.