

## Литература

1. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 756 с.
2. Genick, B. M. Basic of Fluid Mechanics [Text] / B. M. Genick. – Chicago, 2013. – 604 p.
3. Козлов, В. В. Общая теория вихрей [Текст] / В. В. Козлов. – Ижевск, изд. Дом «Удмуртский университет», 1998. – 238 с.
4. Aboelkassem, Y. New model for compressible vortices [Text] / Y. Aboelkassem, G. H. Vatistas // Journal of Fluids Engineering. – 2007. – Vol. 129, Issue 8. – P. 1073. doi: 10.1115/1.2746897
5. Алексеенко, С. В. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) [Текст] / С. В. Алексеенко, В. Л. Окулов // Теплофизика и аэромеханика. – 1996. – Т. 3, № 2. – С. 101–138.
6. Fluid vortices. Vol. 30 [Text] / S. I. Green (Ed.). – Springer, 1995. doi: 10.1007/978-94-011-0249-0
7. Smets, D., Schaftingen, J. V. Desingularization of vortices for the Euler equation [Text] / D. Smets, J. V. Schaftingen // Archive for Rational Mechanics and Analysis. – 2010. – Vol. 198, Issue 3. – P. 869–925. doi: 10.1007/s00205-010-0293-y
8. Гольдштик, М. А. Вихревые потоки [Текст] / М. А. Гольдштик. – Новосибирск, Наука, 1981. – 366 с.
9. Фабрикант, Н. Я. Аэродинамика [Текст] / Н. Я. Фабрикант. – М.: Наука, 1964. – 816 с.
10. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов [Текст] / В. И. Феодосьев. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с.
11. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст] / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
12. Бударин, В. А. Преобразование уравнения движения в напряжениях для несжимаемой жидкости [Текст] / В. А. Бударин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, № 7 (74). – С. 38–41. doi: 10.15587/1729-4061.2015.39886
13. Гуцол, А. Ф. Возвратно-вихревая термоизоляция плазмы и газового пламени [Текст] / А. Ф. Гуцол, В. Т. Калинин // Теплофизика высоких температур. – 1999. – Т. 37, Вып. 2. – С. 194–201.
14. Вихревая термоизоляция плазмы / под ред. М. А. Гольдштика. – Новосибирск. Ин-т теплофизики, 1979. – 226 с.

*Розглянуті головні результати дослідження процесу обтікання гнучкого трубопроводу необмеженим потоком ньютонівської рідини. Дано опис головних особливостей такого процесу при довільних та примусових динамічних коливаннях гнучкого трубопроводу. Показано, що зростання швидкості потоку завжди приводить до нестійких режимів експлуатації трубопроводу*

*Ключові слова: гнучкий трубопровід, частота коливань, швидкість потоку, відрив вихорів, захват частоти*

*Рассмотрены основные результаты исследования процесса обтекания гибкого трубопровода неограниченным потоком ньютоновской жидкости. Дано описание основных особенностей такого процесса при произвольных и вынужденных динамических колебаниях гибкого трубопровода. Показано, что увеличение скорости потока всегда приводит к неустойчивым режимам эксплуатации трубопровода*

*Ключевые слова: гибкий трубопровод, частота колебаний, скорость потока, отрыв вихрей, захват частоты*

УДК 629.123

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.50249

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕОГРАНИЧЕННОГО ПОТОКА С ГИБКИМ ТРУБОПРОВОДОМ

Ф. А. Бендеберя

Аспирант

Кафедра теории и проектирования

корабля им. проф. Ю. Л. Воробьева

Одесский национальный морской университет

ул. Мечникова, 34, г. Одесса, Украина, 65000

E-mail: bendeberyafedor@mail.ru

### 1. Введение

Развитие технологических процессов при работе судов, обслуживающих нефтяные платформы, напрямую связано с использованием различных типов гибких трубопроводов и тросов. Они используются в широких пределах судовых технологий – от подачи рабочих жидкостей и топлива до буксировки различных надводных и подводных аппаратов.

В некоторых случаях, связанных в основном с волнением морской поверхности, скорости набегающего потока могут быть очень большими и приводят к опасным вынужденным колебаниям используемого трубопровода или троса.

Вопрос о выборе длины троса или трубопровода, уходящего в подводную часть, является одним из определяющих. Возможны случаи, когда неправильно выбранные и назначенные режимы эксплуатации бу-

дут приводить к авариям из-за возникающих больших колебаний. Предотвращение таких колебаний возможно только в том случае, когда известна зависимость их частотного спектра от силовых или кинематических нагрузок со стороны набегающего потока [1].

Актуальность решения проблемы правильного проектирования и эксплуатации гибких трубопроводов хорошо характеризуется статистическим анализом отказов, связанных с нарушением нормальной работы в системе питания двигателей. Около 25 % отказов связано с нарушениями герметичности или выходом из строя шлангов в топливной, воздушной или гидравлической системах [1–3]. Повышение мощности судовых двигателей напрямую связано с ростом кинематических характеристик рабочих жидкостей в жестких и гибких трубопроводах, а следовательно требует при расчетах на прочность и жесткость учета всех параметров физического взаимодействия потока жидкости со стенками трубопровода.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В ходе эксплуатации гибких трубопроводов на судовых гидравлических системах они выполняют двойное назначение. Помимо их использования для транспортирования различных сред эти трубопроводы за счет поглощения вибрации являются демпфирующими устройствами или компенсаторами, продлевающими срок службы судовых жестких трубопроводов, фитингов, муфт и арматуры [4–5].

Также гибкие трубопроводы при работе в тандеме судов нефтедобывающего флота в большинстве случаев компенсируют взаимные перемещения судов или гидроагрегатов в гидросистемах. При этом их основные рабочие характеристики при работе судов на волнении до сих пор так и остаются не исследованными [6].

В большинстве случаев эксплуатации судна, по технологическим условиям использования, сопоставимыми с тросами являются гибкие трубопроводы. При проведении научно-исследовательских работ под гибким трубопроводом в соответствии с классификацией работы [1] подразумевался пустотелый стержень с подвижными стенками. Этот стержень также вдоль своей осевой линии может быть охарактеризован различной формой поперечного сечения.

В случае эксплуатации гибкого трубопровода под водой за счет нелинейного взаимодействия неограниченного потока окружающей жидкости с его поверхностью, в соответствии с данными работы [7], начиная с определенных значений скорости, неизменно будет иметь место образование и срыв с поверхности дискретных вихрей или вихревой пелены. При таком обтекании, как следствие, будет обязательно возникать вибрация, приводящая впоследствии к режиму незатухающих автоколебаний [8]. Именно отрывные течения должны рассматриваться как базовые при изучении взаимодействия потока с тросом или гибким трубопроводом [9]. Главным результатом отрыва потока от обтекаемой поверхности стержня или гибкой трубы является возникновение в достаточно большом пространстве локально нестационарных полей скорости и давления.

Основной задачей при использовании тросов и гибких трубопроводов является определение их рав-

новесной пространственной формы в потоке. Такая форма осевой линии стержня в большинстве случаев является пространственной кривой, которая при больших скоростях набегающего потока в сильной степени отличается от равновесной формы в неподвижном неограниченном потоке [1].

Форма троса или гибкого трубопровода также имеет особое значение. На рис. 1, взятом из работы [1], показаны четыре, наиболее часто встречающихся на практике, характерных сечения – эллиптическое, круглое, квадратное и треугольное.

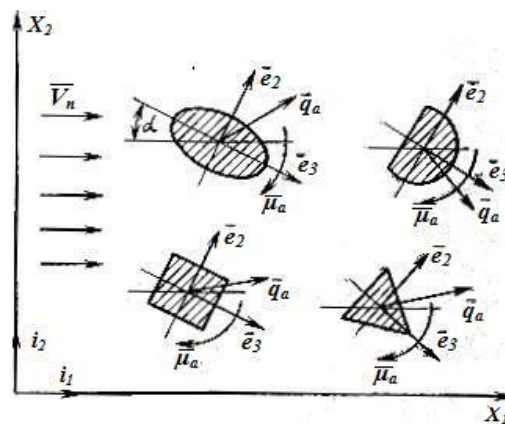


Рис. 1. Влияние формы стержня на характер взаимодействия с потоком [1]

На приведенных схемах видно, что только в случае цилиндрического поперечного сечения не возникает крутящий гидродинамический момент. Во всех остальных случаях при произвольной ориентации одной из главной оси инерции поперечного сечения гибкого трубопровода или троса относительно направления вектора скорости набегающего потока возникают крутящие гидродинамические моменты. В общей форме записи вектор крутящего гидродинамического момента может быть представлен в следующем виде:

$$\vec{M} = \vec{M}_{вр} \vec{e}_1 = \frac{1}{2} C_m \rho d v_n^2 \vec{e}_1, \quad (1)$$

где  $\vec{M}_{вр}$  – крутящий момент;  $C_m$  – гидродинамический коэффициент, определяемый углом атаки потока.

## 3. Цель и задачи исследования

Цель проведенных исследований заключалась в научном решении проблемы получения оценочных характеристик судовых гибких трубопроводов и назначении режимов их эксплуатации, при которых не будут возникать аварии из-за возникающих больших колебаний.

Основная задача исследований заключалась в устранении аварийных ситуаций при эксплуатации гибких трубопроводов на судах путем разработки универсального метода оценки влияния колебаний на технологические эксплуатационные характеристики гибкого трубопровода и троса.

Для решения основной задачи был сформулирован ряд вспомогательных задач. К ним относятся:

– проведение серии экспериментальных исследований направленных на изучение воздействия частоты

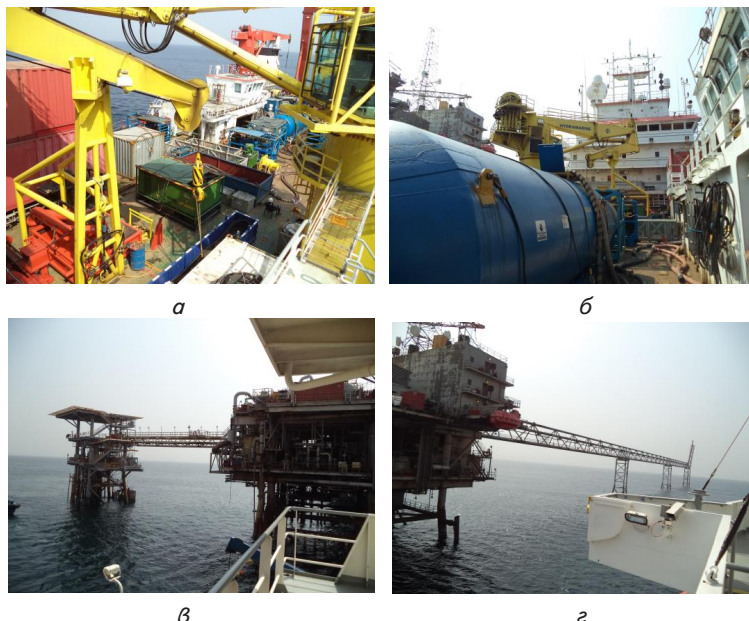
отрыва потока на частоту колебаний гибкого трубопровода или троса;

- установление зависимости, каким образом связаны автомодельные колебания гибкого трубопровода с его геометрическими характеристиками;

- определение степени влияния скорости набегающего потока на частоту и амплитуду колебаний гибкого трубопровода;

- нахождение экспериментальным путем связи между частотами вынужденных колебаний трубопровода и режимом захвата срыва вихрей с поверхности трубы.

На входе в канал равномерность раздачи потока реализовывалась за счет использования подключения по типу гребенки.



**4. Материалы и методы исследований процесса обтекания гибкого трубопровода при произвольных и вынужденных динамических колебаниях**

Перед началом проведения натурных исследований была составлена методика проведения экспериментов. Ее основное положение заключается в проведении замеров при использовании реальных условий эксплуатации гибких трубопроводов.

Все экспериментальные научно-исследовательские работы проводились на судне Viking Forcados, Barbados. Это судно в морской практике проведения нефте- или газодобывающих работ принято называть многофункциональным судном поддержки. Оно всегда используется в комбинации с работающей нефте- или газодобывающей платформой. На рис. 2, а, б показаны отдельные элементы судна, а на рис. 2, в, г показана нефтедобывающая платформа, которую оно обслуживает.

Общая технологическая схема совместной работы двух судов (обслуживающего судна и нефте-газодобывающей платформы) следующая: при проведении регламентных технических работ нагнетательное гидро- и пневмооборудование и комплекс палубных танков на обслуживающем судне подключаются к нефтяной платформе посредством большого числа гибких трубопроводов.

Для изучения воздействия отрывных эффектов на колебание гибкого трубопровода или троса был разработан научно-исследовательский стенд. Его общая схема показана на рис. 3. Верхняя часть рисунка соответствует торцевой части стенда, а нижняя – его продольной проекции.

Гибкий трубопровод 1 приводится в движение колебательной струной 2, которая жестко закреплена в средней части трубопровода. Вынужденное колебание гибкого трубопровода происходило за счет равномерного поворота колебательного барабана 3. Частота его вращения при наматывании или разматывании струны 3 задавала необходимую частоту и периодичность вынужденных колебаний. Гибкий трубопровод с двух сторон был присоединен к корпусу канала 4. При проведении экспериментов канал 4 был заполнен водой, которая приводилась в движение по замкнутому гидравлическому контуру.

Рис. 2. Многофункциональное судно поддержки Viking Forcados, Barbados в комбинации с нефтедобывающей платформой: а – подъемное оборудование судна в комбинации с элементами системы химической промывки гидравлических линий нефтедобывающей платформы; б – палубный танк сбора химических реагентов после промывки гидравлических линий нефтедобывающей платформы; в – нефтедобывающая платформа; г – линия отвода и сжигания газа из скважины

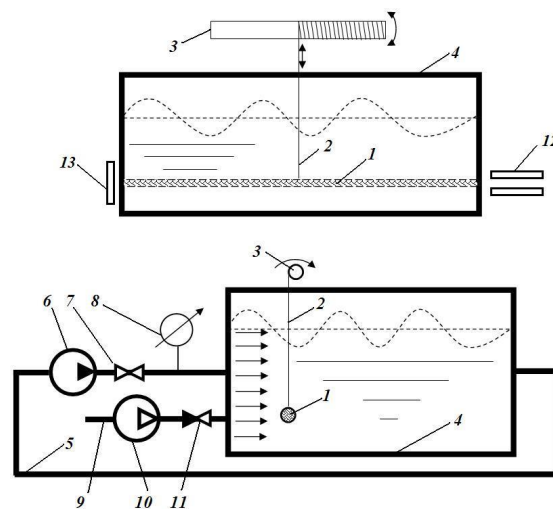


Рис. 3. Научно-исследовательский стенд: 1 – гибкий трубопровод, 2 – колебательная струна, 3 – колебательный барабан, 4 – корпус канала, 5 – контурный трубопровод, 6 – центробежный насос, 7 – вентиль, 8 – расходомер, 9 – воздушный трубопровод, 10 – компрессор, 11 – невозвратный клапан, 12 – сфокусированный красный лазер, 13 – фотоэлемент

Движение моделируемого потока при набегающем на гибкий трубопровод осуществлялось в рабочем канале

4 и контурном трубопроводе 5. Кинетическую энергию поток воды получал от центробежного насоса 6. За насосом был установлен вентиль 7 и расходомер 8. По получаемому значению расхода в ходе экспериментов всегда контролировалась скорость моделируемого потока жидкости и в случае необходимости именно при помощи вентилей 7 производилась ее регулировка.

Для визуального контроля колебаний гибкого трубопровода и контроля ближнего следа, состоящего из индуцируемых отрывом потока вихревых сгустков от стенок его поверхности, использовался воздушный поток. Он подавался по воздушному трубопроводу 9 за счет работы компрессора 10. Герметичность воздушной линии обеспечивалась невозвратным клапаном 11.

Частота колебаний гибкого трубопровода относительного его равновесного состояния контролировалась при помощи оптической системы. С одной стороны канала на уровне самой верхней и нижней частей гибкого трубопровода был закреплен источник света, представляющий собой сфокусированный красный лазер 12, а с другой стороны фотоэлемент 13. При колебательном движении трубопровода верхний или нижний световой лазерный луч перекрывался и фотоэлемент в момент срабатывания подавал сигнал на ЭВМ, где производился подсчет частоты.

**5. Результаты исследований процесса обтекания гибкого трубопровода при произвольных и вынужденных динамических колебаниях**

Одним из самых важных вопросов при эксплуатации судового гибкого трубопровода или троса является зависимость его частоты колебаний от частоты схода крупных вихревых образований с его поверхности. Эта зависимость была найдена экспериментальным путем и полученные данные отображены на рис. 4.

В качестве сравнительных данных на графике приведены результаты измерений, взятые из работ [7, 10]. Анализ приведенной зависимости позволяет сделать вывод, что влияние отрыва вихрей отчетливо сказывается, начиная с частоты отрыва вихрей, соответствующей  $Sh_2=0,1$ . Измерения проводились с использованием трех диаметров гибкого трубопровода – 50, 150 и 200 мм. Следует отметить, что рост диаметра трубы приводил к более раннему наступлению автоколебаний. В частности, частота колебаний трубопровода диаметром 200 мм начинала совпадать с частотой отрыва вихревой зоны при числах Струхала  $Sh_1=0,11$ . В случае трубопровода с диаметром 50 мм эта величина была равна  $Sh_1=0,19$ .

При проведении экспериментов на измерительном стенде, показанном на рис. 3, была измерена частота колебаний гибкого трубопровода при динамических (возникающих только за счет отрыва вихревой пелены от поверхности трубы) и вынужденных колебаниях. Полученные результаты показаны на рис. 5–7.

На рис. 5 показана графическая зависимость частоты естественных колебаний  $f$ , возникающих при отрыве потока от стенок трубы с наружным диаметром 50 мм, от скорости самого потока  $V$ . Приведенные на вертикальной оси численные значения измеренных частот соответствуют интервалу времени измерения равному 10 секунд. На графике видно, что рост ско-

рости приводит к неустойчивой работе трубопровода – частота колебаний увеличивается, а амплитуда отклонения его средней точки постоянно растет. Изменение амплитуды хорошо видно на рис. 6, где для значений частот, приведенных на рис. 5, можно увидеть величину максимального подъема середины трубы относительно ее равновесного состояния. Измерение высоты подъема трубопровода производилось при помощи оптической лазерной системы путем регулирования высоты установки источника лазера и приемного фотоэлемента (рис. 3). На графике хорошо видно, что, начиная со значения частоты 1,3 колебания в секунду, трубопровод выходил на режим аварийной работы. Изменение частоты на 0,1 колебания в секунду приводило к росту амплитуды на 4,9 мм или в относительных единицах на 53 %.

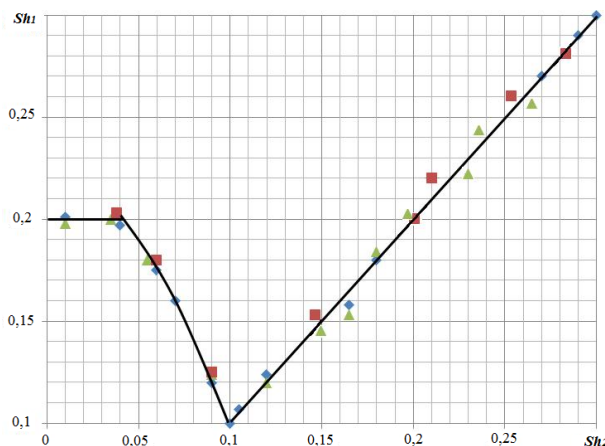


Рис. 4. Влияние частоты схода вихрей  $Sh_2$  на частоту колебаний гибкого трубопровода  $Sh_1$ : ■ – результаты выполненных измерений при  $Re=0,238 \cdot 10^6$  и  $Re=0,689 \cdot 10^6$ ; ◆ –  $Re=0,795 \cdot 10^6$  данные Федяевского [3]; ▲ –  $Re=0,862 \cdot 10^6$ , данные Белоцерковского [5]

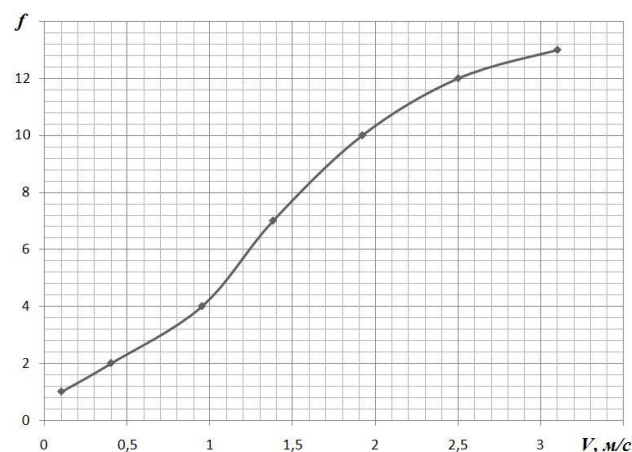


Рис. 5. Влияние скорости набегающего потока  $V$  на частоту колебаний  $f$  гибкого трубопровода

На рис. 7 показано, каким образом зависит частота  $f_1$  колебаний гибкого трубопровода диаметром 50 мм от частоты  $f$  вынужденных колебаний, получаемых за счет работы колебательного механизма. На графике хорошо виден зафиксированный в ходе экспериментов захват частоты естественных колебаний.

Анализ приведенных экспериментальных данных показал, что с ростом частоты вынужденных колебаний трубопровода через каждые четыре значения частоты происходил захват срыва вихрей с поверхности трубы. В этом случае дисбаланс между частотами колебаний уменьшался на порядок с  $\pm 0,1$  до  $\pm 0,2$  соответственно. На рис. 8 показано изменение этого дисбаланса в вынужденных и динамических частотах колебаний гибкого трубопровода.

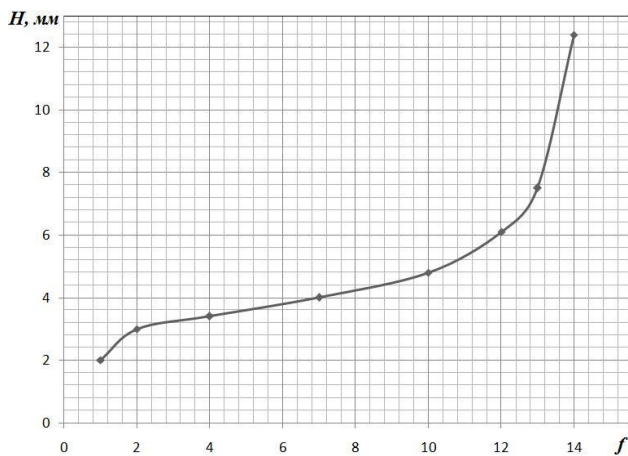


Рис. 6. Рост амплитуды колебаний гибкого трубопровода в зависимости от частоты его колебаний

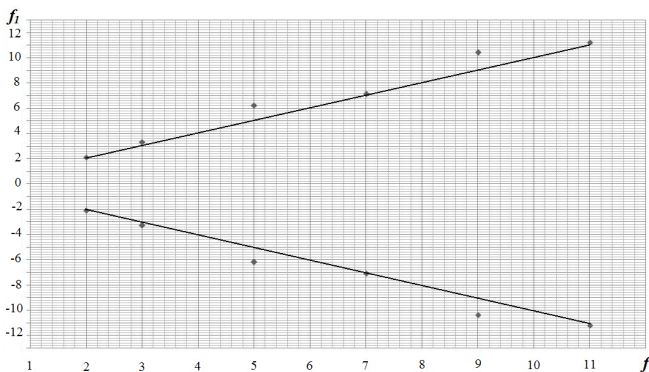


Рис. 7. Зависимость между частотой естественных колебаний гибкого трубопровода f и частотой вынужденных колебаний f<sub>1</sub> механизма научно-исследовательского стенда

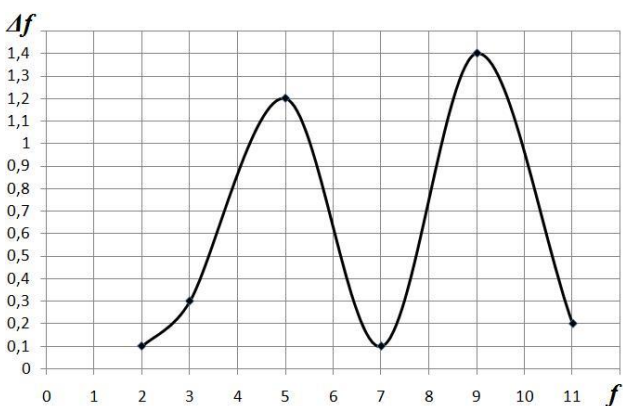


Рис. 8. Изменение дисбаланса вынужденных и динамических частот колебаний гибкого трубопровода

Анализ кривой показывает, что по отношению к вынужденной частоте, которая создавалась за счет работы вращения колебательного барабана научно-исследовательской установки, после наступления режима захвата частоты синхронизация динамических колебаний трубопровода происходила через каждые два значения частоты f. Как видно на рис. 8, в этом случае  $f=5, f=7, f=9, f=11$  и т. д.

### 6. Обсуждение результатов исследований процесса обтекания гибкого трубопровода при произвольных и вынужденных динамических колебаниях

Одним из самых главных достоинств выполненных исследований является возможность установления четких эксплуатационных границ для судовых гибких трубопроводов и тросов при возникновении их параметрических колебаний. Приведенные результаты позволяют в реальных условиях работы нефтедобывающих судов снижать негативное влияние колебаний трубопровода за счет использования режима захвата частоты срывающихся с их поверхности вихрей.

Анализ результатов исследований процесса обтекания неограниченным потоком гибкого трубопровода показывает, что самое главное влияние на возникающие колебания оказывает вихревая пелена. Отрыв вихрей от поверхности трубы отчетливо сказывается, начиная с частоты схода вихрей, соответствующей числу Струхала  $Sh=0,1$ . В этом случае также особое влияние имеет поперечный размер трубы. Чем больше диаметр, тем раньше наступают автоколебания трубопровода.

В ходе экспериментов из-за ограничений, налагаемых размерами научно-исследовательской установки, не был изучен вопрос влияния длины трубопровода на колебательные характеристики гибкого трубопровода. Это является одним из недостатков, поскольку наличие боковых стенок резервуара несомненно оказывало влияние на получаемый спектр частот колебаний.

Кинематические характеристики набегающего потока влияют на устойчивость режима эксплуатации гибкой трубы. Рост скорости приводит к увеличению частоты колебаний и росту амплитуды отклонений трубопровода относительно его первоначального равновесного состояния.

Начиная с определенных значений частоты колебаний гибкого трубопровода, происходит захват срыва вихрей с поверхности трубы. В этом случае дисбаланс между частотами колебаний может уменьшаться на порядок.

Приведенные результаты исследований являются новыми и они соответствуют только первоначальной стадии их реализации. По этой причине одним из главных направлений последующих работ должно являться получение новых данных, указывающих на возможность уменьшения негативного влияния параметрических колебаний гибких трубопроводов в условиях работы судов. В этом случае очень важным является вопрос о том, каким образом длина судового

гибкого трубопровода влияет на аварийные режимы его работы.

### 7. Выводы

В результате проведенных исследований было установлено, что:

1. Влияние отрыва вихрей на возникновение колебаний гибкого трубопровода начинает сказываться при частоте отрыва вихрей  $Sh=0,1$ .

2. Увеличение диаметра гибкого трубопровода всегда приводит к более раннему наступлению авто-модельных колебаний.

3. При обтекании неограниченным потоком гибкого трубопровода увеличение скорости потока приводит к росту частоты колебаний трубопровода и росту амплитуды его отклонения от средней точки.

4. Рост частоты вынужденных колебаний трубопровода приводит к захвату срыва вихрей с поверхности трубы. В этом случае дисбаланс между частотами колебаний уменьшается на порядок.

### Литература

1. Светлицкий, В. А. Механика трубопроводов и шлангов [Текст] / В. А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1982. – 280 с.
2. Bruschi, R. Pipe technology and installation equipment for frontier deep water projects [Text] / R. Bruschi, L. Vitali, L. Marchionni, A. Parrella, A. Mancini // Ocean Engineering. – 2015. – Vol. 108. – P. 369–392.
3. Bai, Q. Flexible Pipe [Text] / Q. Bai, Y. Bai // Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation. – 2014. – Vol. 24. – P. 559–578. doi: 10.1016/b978-0-12-386888-6.00024-9
4. Turner, T. M. Fundamentals of hydraulic dredging. 2nd edition [Text] / T. M. Turner. – ASCE Press, 1996. – 258 p.
5. Peyrot, A. H. Statics and Dynamics of Offshore Cable and Flexible Pipe [Text] / A. H. Peyrot // Systems Oil & Gas Science and Technology. – 2006. – Vol. 35, Issue 5. – P. 833–848. doi: 10.2516/ogst:1980053
6. Zhang, Zhong-lin. An apparatus design and testing of a flexible pipe-laying in submarine context [Text] / Z. Zhang, L. Wang, H. Ci // Ocean Engineering. – 2015. – Vol. 105. – P. 386–395. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.017
7. Федяевский, К. К. Гидродинамика отрывного обтекания тел [Текст] / К. К. Федяевский, Л. Х. Блюмина. – М.: Машиностроение, 1977. – 120 с.
8. Zahid I. Al-Hashimy. Effect of Various Fluid Densities on Vibration Characteristics in Variable Cross-section Pipes [Text] / Z. I. Al-Hash, H. H. Al-Kayi, F. Hasan, A. O. Mohammed // Journal of Applied Sciences. – 2014. – Vol. 14, Issue 18. – P. 2054–2060. doi: 10.3923/jas.2014.2054.2060
9. Цай, Н. Анализ нелинейного неустойчившегося движения тросов с использованием метода диаграмм связи [Текст] / Н. Цай // Труды Американского общества инженеров-механиков. Прикладная механика – 1972. – Т. 94, Сер. В, № 2. – С. 1–8.
10. Белоцерковский, С. М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел [Текст] / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ, Р. М. Федоров. – М.: Наука, 1988. – 232 с.