

УДК.629.123

Ф.А. Бендеберя, Р.Г. Гудилко

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ РЕЖИМА ЗАХВАТА ВИХРЕЙ ПРИ КОЛЕБАНИИ СУДОВЫХ ГИБКИХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*В статье рассмотрен процесс обтекания судового гибкого трубопровода неограниченным потоком. Показано, что возникающие колебания трубопровода вызываются отрывом вихревых структур от его поверхности. Приведено описание трех характерных режимов поведения потока и рассмотрены основные параметры, которые оказывают влияние на захват вихрей при параметрических колебаниях трубопровода.*

**Ключевые слова:** *судовой гибкий трубопровод, вихревые структуры, параметрические колебания, число Струхала.*

*У статті розглянуто процес обтікання судового гнучкого трубопроводу необмеженим потоком. Показано, що виникаючі коливання трубопроводу викликаються відривом вихрових структур від його поверхні. Наведено опис трьох характерних режимів поведінки потоку і розглянуті основні параметри, які впливають на захоплення вихорів при параметричних коливаннях трубопроводу.*

**Ключові слова:** *судовий гнучкий трубопровід, вихрові структури, параметричні коливання, число Струхала.*

*The process of flowing around of ship flexible pipeline an unlimited stream is considered in the article. It is shown that the nascent vibrations of pipeline are caused by tearing away of vortical structures from his surface. Description over of three characteristic modes of behavior of stream is brought and basic parameters that have influence on the capture of whirlwinds at the self-reactance vibrations of pipeline are considered.*

**Keywords:** *ship flexible pipeline, vortex structures, parametric oscillation, Strouhal number.*

**Введение.** Основная проблема при решении задачи о взаимодействии движущегося потока с гибким цилиндрическим трубопроводом или тросом заключается в нахождении неизвестных данных относительно распределения гидро- или аэродинамических сил в зависимости от форм-параметра обтекаемой поверхности и угла атаки набегающего потока. Результаты таких исследований практически неизвестны поскольку в большинстве литературных источников обычно рассматривается обтекание неограниченным потоком только неподвижного цилиндра.

**Постановка задачи.** К важному аспекту гидродинамического взаимодействия потока с удлиненным цилиндром относится возникновение колебаний при отрыве вихрей.

Так согласно результатам работы [1] колебания всегда носят локальный характер и могут не распространяться на всю длину трубопровода. Для криволинейных стержней местная нормальная составляющая относительной скорости  $V_n$  обтекающего потока определяется координатой изгиба (отклонения от равновесного состояния). От величины  $v_n$  зависит местная сила Кармана и по этой причине синхронизация частоты срыва вихрей на конкретном участке трубы с собственной частотой ее колебаний тоже носит локальный местный характер. На одних участках трубопровода частота срыва вихрей может быть равной собственной частоте его колебаний, а на других участках трубопровода она может увеличиваться с ростом величины скорости  $V_n$ .

Срыв вихрей с поверхности цилиндра является самым упрощенным объяснением механизма возникновения колебаний гибкого трубопровода в потоке. В этом случае принимается, что силы Кармана, появляющиеся при срыве вихрей, перпендикулярны местной нормальной составляющей скорости потока. Именно они и начинают раскачивать гибкий трубопровод или трос, приводя во время колебаний к возникновению дополнительных подъемных сил.

В том случае, когда за счет взаимодействия с потоком гибкий трубопровод или трос начинают раскачиваться обтекание поверхности уже нельзя рассматривать как стационарное, а саму поверхность необходимо принимать как колеблющуюся. По этой причине в постановке задач исследований всегда должна присутствовать частота колебаний гибкого трубопровода и все неизвестные величины необходимо находить в зависимости от закона ее изменения.

**Результаты.** В работах [2-3] приводится описание результатов относительно нестационарного отрывного обтекания цилиндра, который под воздействием набегающего потока совершает вынужденные гармонические колебания. При колебаниях цилиндра происходящих в направлении, перпендикулярном оси симметрии набегающего потока было получено три характерных режима его обтекания. Эти режимы между собой отличались качественно. Количественное различие было описано границами соответствующих чисел Струхала.

Если частоту колебаний гибкого трубопровода или троса обозначить как  $f_1$ , а частоту отрыва вихрей пограничного слоя от его поверхности через  $f_2$  то два числа Струхала можно записать в виде

$$Sh_1 = f_1 \frac{d}{V} \quad (1)$$

$$Sh_2 = f_2 \frac{d}{V}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр трубопровода или троса,  $m$ ;  
 $V$  – скорость набегающего потока,  $m/c$ .

Определяющим критерием является  $Sh_1$  и в этом случае все три режима имеют следующие особенности:

1 режим.  $0 < Sh_1 < 0,04$  – колебания цилиндра не оказывают никакого влияния на частоту схода вихрей с его поверхности, т.е.  $Sh_2$  не зависит от  $Sh_1$  и выполняется неравенство  $f_1 \neq f_2$

2 режим.  $0,04 < Sh_1 < 0,1$  – за счет колебаний цилиндра происходит частичный «захват» отрывающегося пограничного слоя с затягиванием ближней вихревой стороны к донной части колеблющегося цилиндра. При этом частота отрыва вихрей и частота колебаний цилиндра частично не совпадают, но при этом в первом приближении  $f_1 \approx f_2$ .

3 режим.  $Sh_1 > 0,1$  – происходит полный «захват» частоты срыва вихрей, которая начинает полностью быть равной частоте колебаний цилиндра в потоке и выполняется равенство  $f_1 = f_2$ .

Проверка существования этих трех режимов была выполнена экспериментальным путем. На рисунке 1 показана полученная зависимость частоты колебаний гибкого трубопровода от частоты схода вихревых образований с его поверхности.

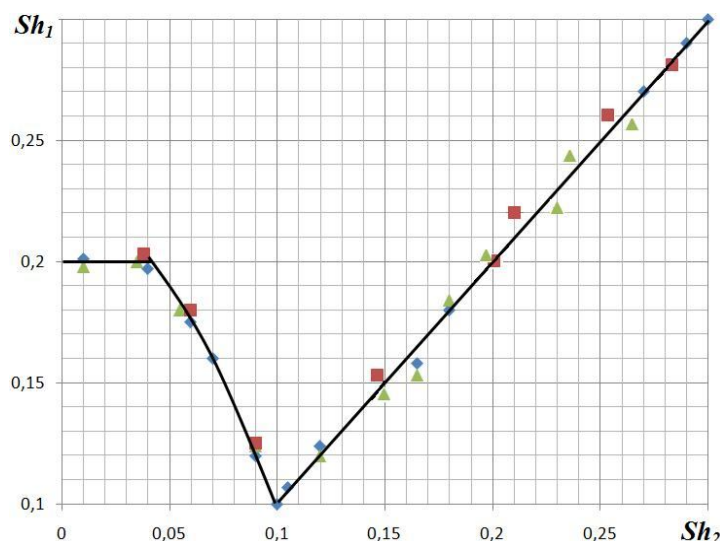


Рис. 1. Влияние частоты схода вихрей на частоту колебаний гибкого трубопровода:

■ – результаты выполненных измерений при  $Re = 0,238 \cdot 10^6$  и  $Re = 0,689 \cdot 10^6$ ; ◆ –  $Re = 0,795 \cdot 10^6$  данные [2]; ▲ –  $Re = 0,862 \cdot 10^6$ , данные [3]

В качестве сравнительных данных на графике приведены результаты экспериментальных измерений взятые из работ [2-3]. Анализ графической зависимости позволяет сделать вывод, что влияние отрыва вихрей

отчетливо сказывается начиная с частоты отрыва вихрей соответствующей  $Sh_2 = 0,1$ . Измерения проводились с использованием диаметров гибкого трубопровода равных:  $0,05$ ,  $0,075$  и  $0,1$  м. Следует отметить, что рост диаметра трубы при прочих равных условиях приводил к более раннему наступлению автомодельных колебаний. В частности, частота колебаний трубопровода диаметром  $100$  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 экспериментальных исследований была измерена частота колебаний гибкого трубопровода при динамических (возникающих только за счет отрыва вихревой пелены от поверхности трубы) и вынужденных колебаниях. Систематизация полученных результатов в графическом виде отображена на рисунках 2-4.

На рисунке 2 показано каким образом изменяется частота естественных колебаний  $f$  возникающих при отрыве набегающего потока от стенок трубы с наружным диаметром  $50$  мм. Зависимость построена по отношению к скорости набегающего потока  $V$ . Отложенные вдоль вертикальной оси численные значения измеренных частот соответствуют интервалу времени измерения равному  $10$  сек. На графике видно, что рост скорости приводил к неустойчивой работе трубопровода. В этом случае частота колебаний трубопровода увеличивается, а амплитуда отклонения его средней точки относительно осевой линии постоянно растет.

Изменение амплитуды колебаний гибкого трубопровода показано в графическом виде на рисунке 3. На графике для значений частот, полностью совпадающих с частотами приведенными на рис. 2, показано изменение величины 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.

На графике хорошо видно, что начиная со значения частоты  $1,3$  колебания в секунду трубопровод выходит на режим аварийной работы. В этом случае наблюдается резкий рост колебаний трубы. Изменение частоты на  $0,1$  колебания в секунду дало рост амплитуды на  $4,9$  мм или в относительных единицах на  $53$  %.

На графике хорошо видно, что начиная со значения частоты  $1,3$  колебания в секунду трубопровод выходит на режим аварийной работы. В этом случае наблюдается резкий рост колебаний трубы. Изменение частоты на  $0,1$  колебания в секунду дало рост амплитуды на  $4,9$  мм или в относительных единицах на  $53$  %.

На рисунке 4 показано каким образом зависит частота  $f_1$  колебаний гибкого трубопровода диаметром  $0,05$  м от частоты  $f$  вынужденных колебаний получаемых за счет работы колебательного механизма научно-исследовательского стенда.

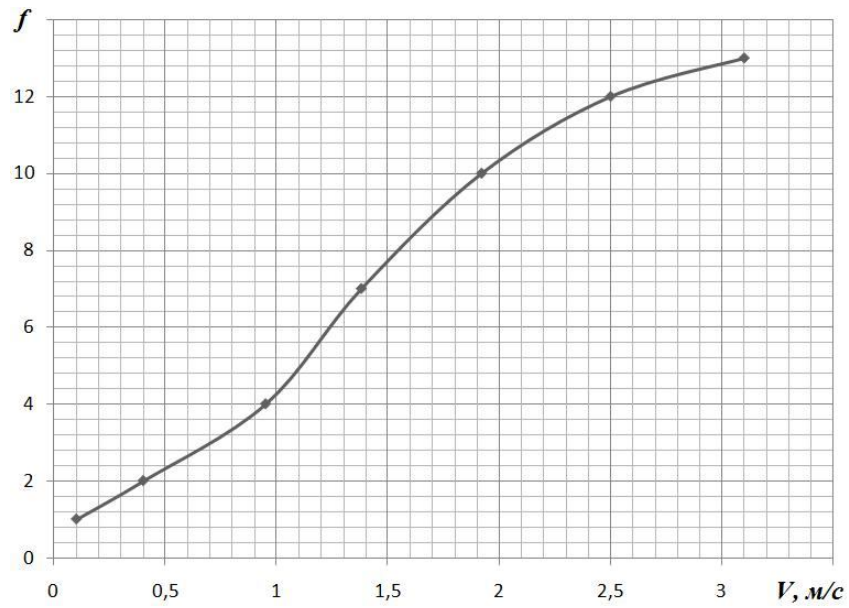


Рис. 2. Влияние скорости набегающего потока на частоту колебаний гибкого трубопровода

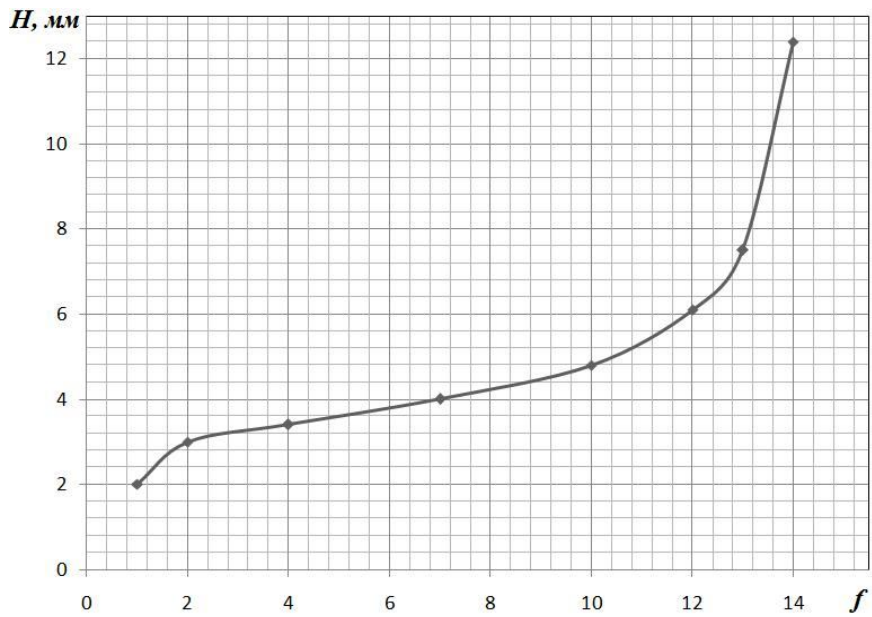


Рис. 3. Рост амплитуды колебаний гибкого трубопровода в зависимости от частоты его колебаний

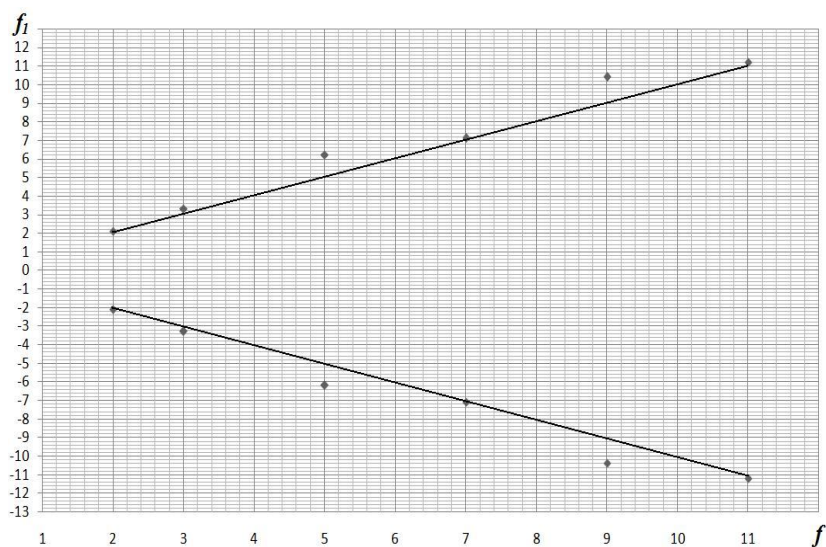


Рис. 4. Зависимость между частотой естественных колебаний гибкого трубопровода  $f_1$  и частотой вынужденных колебаний  $f$  механизма научно-исследовательского стенда

На графике хорошо виден зафиксированный в ходе экспериментов захват частоты естественных колебаний. В таблице показаны значения разности частот  $\Delta f = f_1 - f$  этих колебаний по отношению к частоте вращения колебательного механизма научно-исследовательской установки.

Анализ приведенных экспериментальных данных показывает, что с ростом частоты вынужденных колебаний гибкого трубопровода через каждые четыре значения частоты происходит захват срыва вихрей с поверхности трубы. В этом случае дисбаланс между частотами колебаний уменьшался на порядок с  $\pm 1,2$  до  $\pm 0,1$  и с  $\pm 1,4$  до  $\pm 0,2$  соответственно. На рисунке 5 показано изменение этого дисбаланса в вынужденных и динамических частотах колебаний гибкого трубопровода.

Таблица 1

Разность частот вынужденных  $f$   
и динамических колебаний  $f_1$  трубопровода диаметром 50 мм

Частота колебаний стенда, $f, c^{-1}$	2	3	5	7	9	11
Частота колебаний трубопровода, $f_1, c^{-1}$	$\pm 2,1$	$\pm 3,3$	$\pm 6,2$	$\pm 7,1$	$\pm 10,4$	$\pm 11,2$
Разность частот, $\Delta f, c^{-1}$	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	$\pm 1,2$	$\pm 0,1$	$\pm 1,4$	$\pm 0,2$

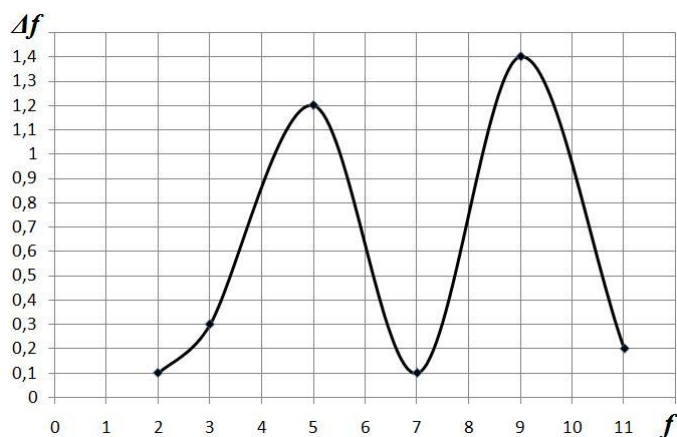


Рис. 5. *Изменение дисбаланса вынужденных и динамических частот колебаний гибкого трубопровода*

### Выводы

1. При колебаниях цилиндра, происходящих в направлении перпендикулярном оси симметрии набегающего потока, могут иметь место три характерных режима обтекания. Для описания этих режимов определяющим критерием является число Струхала.

2. Рост скорости набегающего потока всегда приводит к неустойчивой работе гибкого трубопровода. В этом случае частота колебаний трубопровода увеличивается, а амплитуда отклонения его средней точки относительно осевой линии постоянно растет.

3. Рост частоты вынужденных колебаний гибкого трубопровода приводит к режиму захвата срыва вихрей с поверхности трубы. В этом случае дисбаланс между частотами колебаний трубопровода и срыва вихрей с его поверхности может уменьшаться на порядок.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Светлицкий В.А. *Механика трубопроводов и шлангов* / В.А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1982. – 280 с.
2. *Математическое моделирование плоскоструйного обтекания тел* / С.М. Белоцерковский, В.Н. Котовский, М.И. Нишит, Р.М. Федоров. – М.: Наука. Гл.ред. физ-мат. лит., 1988. – 232 с.
3. Федяевский К.К. *Гидродинамика отрывного обтекания тел* / К.К. Федяевский, Л.Х. Блюмина. – М.: Машиностроение. 1977. – 120 с.

*Стаття надійшла до редакції 10.11.2015 р.*