
МЕХАНИКА МАШИН

УДК 532.526.5

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ ПАРАМЕТРОВ
ПОПЕРЕЧНОГО ОБТЕКАНИЯ
ДВУХ ТАНДЕМНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ****© 2021 г. С. М. Каплунов^{1,*}, Н. Г. Вальес¹, В. Ю. Фурсов¹,
Н. А. Ченцова¹, В. В. Перевезенцев²**¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*² *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия***e-mail: saveliykaplunov@gmail.com*

Поступила в редакцию 28.08.2020 г.

Принята к публикации 26.04.2021 г.

В статье приводится описание эффективного подхода при нахождении опасных соотношений конструкционных параметров для подводной трубопроводной транспортной системы при наиболее часто применимом последовательном по потоку (тандемном) расположении труб для обеспечения безаварийной работы исследуемой конструкции. Для решения такой задачи анализируется влияние специфического расположения трубопроводов на характер их динамического отклика. При этом, в первую очередь, рассматриваются гидродинамические механизмы возбуждения вибраций труб, существенно влияющих на прочность конструкций. На основании анализа результатов численных и экспериментальных исследований поведения труб в потоке жидкости или газа разработана методика определения недопустимых значений амплитуды колебаний труб и обеспечения безопасности эксплуатации подобных трубных конструкций. Предложенная модель численного эксперимента применима для полного воспроизведения всех основных механизмов возбуждения колебаний трубных пучков, а именно – периодического вихревого отрыва и гидроупругого возбуждения.

Ключевые слова: вихревой отрыв, отрывное течение, опасные соотношения конструкционных параметров, численные методы, метод дискретных вихрей, периодический вихревой отрыв

DOI: 10.31857/S0235711921040040

Результаты анализа состояния подводных транспортных трубопроводов на участках перехода рек и морей свидетельствуют о том, что их прочностные характеристики существенно снижаются, т.е. запасы их прочности и долговечности можно исчерпать в ближайшие годы. Такая опасная тенденция в недалеком будущем может привести к выработке допустимых сроков эксплуатации и к еще более значительному росту числа аварийных ситуаций. При внешнем воздействии водной среды технические характеристики трубопровода изменяются вплоть до критического их состояния, что может быть причиной их последующего разрушения. При ликвидации подобных аварий требуется их оперативный дорогостоящий ремонт с применением специальных средств и техники.

В статье рассматривается природа гидродинамических механизмов возбуждения вибраций трубных конструкций в поперечном потоке жидкости или газа (рис. 1) [1, 2]. Такое возбуждение происходит по причине взаимодействия конструктивных элемен-

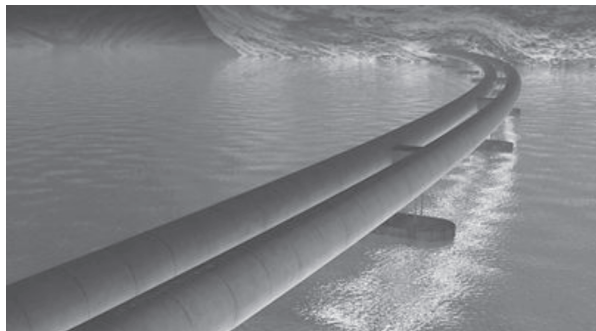


Рис. 1. Укладка подводного трубопровода.

тов между собой, а гидродинамические силы возникают в результате нестационарного отрывного обтекания трубной конструкции.

Цель исследования – разработка методики на основании постановки численного эксперимента для определения недопустимых значений амплитуды колебаний последовательно по потоку (тандемно) расположенных труб в обеспечение безопасности их эксплуатации.

Объектами приложения результатов исследований являются ответственные комплексы теплообменного оборудования, трубопроводы, элементы газонефтехимического машиностроения, а также объекты гражданского строительства.

С учетом известного опыта исследований авторов в данной области была подтверждена и апробирована эффективность использования разработанного ими метода дискретных вихрей (ММДВ, ИМАШ РАН) [1, 2].

На рис. 1 показана укладка системы подводных трубопроводов, состоящей из двух тандемных труб (распространенная схема при транспортировке нефти и газа).

Анализ механизмов возбуждения колебаний трубных конструкций в поперечном потоке жидкости. Довольно хорошо изучено явление вихревого отрыва при обтекании одиночной трубы (кругового цилиндра) [4], которое проявляется в образовании вихревой дорожки Кармана и, как следствие, в появлении отчетливо выраженной периодической компоненты гидродинамической силы.

Рассмотрим природу гидродинамических механизмов возбуждения вибраций трубных конструкций в поперечном потоке жидкости или газа (рис. 2). Математическое описание явления требует разработки достаточно сложных моделей.

При поперечном обтекании трубного пучка потоком различают несколько механизмов возбуждения колебаний подобных конструкций: вихревое возбуждение и гидроупругое возбуждение. Для этого используются известные зависимости амплитуды колебаний пучка труб A от скорости поперечного потока U , обтекающего трубный пучок (амплитудно-скоростная характеристика – АСХ) (рис. 2) [3]. В области вихревого возбуждения характерная частота отрыва вихрей совпадает с собственной частотой колебаний труб и происходит их резонансное возбуждение. На рис. 2 указаны границы проявления различных физических механизмов возбуждения колебаний труб.

Сведений о величине гидродинамической силы, связанной с отрывом вихрей в пучке труб в литературе существенно меньше [3, 6, 7]. Таким образом, имеющиеся данные позволяют только оценить возможность резонанса труб в зависимости от параметров пучка, если известны собственные частоты колебаний трубного пучка.

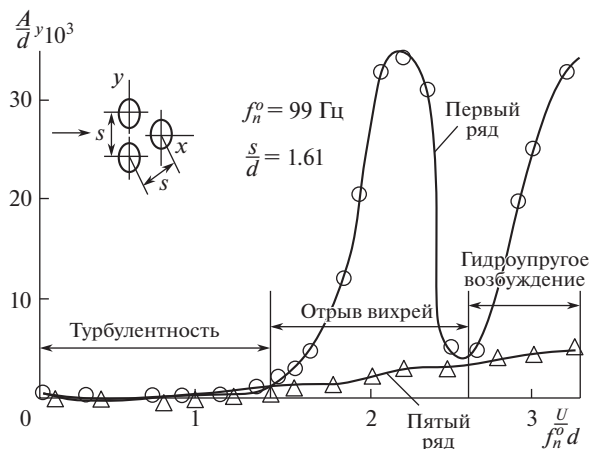


Рис. 2. Типичная амплитудно-скоростная характеристика (АСХ) при поперечном обтекании пучка параллельных труб [3].

Частотная отстройка при тандемном расположении труб. Зная собственные частоты колебаний труб, можно определить опасные значения скорости потока, при которых возможно резонансное возбуждение их колебаний за счет отрыва вихрей.

Необходимые численные исследования реализуются на основании специально разработанных алгоритмов [1, 2]. Подобная стратегия позволяет проводить для решения данной задачи динамический анализ гидродинамических нагрузок для многокомпонентных конструкций методом дискретных вихрей для всего возможного диапазона скоростей потока в реальном времени. Численный эксперимент был проведен на модельном фрагменте из двух труб.

В различных отраслях техники, и в судостроении особенно [6], имеется ряд конструкций, состоящих из плохообтекаемых элементов, представляющих цилиндры с круглым поперечным сечением, которые располагаются один за другим по потоку (тандем). К таким конструкциям можно отнести различного рода трубные решетки, помещенные в поток жидкости, группы дымовых труб теплоцентралей и др. Рассматриваемая в статье конструкция представляет две параллельные трубы (рис. 3а), одна из которых расположена в следе другой.

Опыты показывают [6, 7], что вибрация цилиндра, находящегося в следе другого цилиндра, существенно увеличивается, причем тем значительнее, чем ближе цилиндры расположены друг к другу. Под влиянием следа впереди стоящего цилиндра средняя скорость обтекания цилиндра в следе уменьшается и происходит смещение зоны резонанса в сторону больших скоростей потока (рис. 3б). Обратное влияние мало и практически им можно пренебречь при $t/d > 2$ (t – расстояние между осями цилиндров; d – диаметр впереди стоящего цилиндра, который в дальнейшем называется изолированным). При относительном смещении $t/d = 15–20$ влияние следа на вибрацию цилиндра практически прекращается. Смещение осей цилиндров поперек потока уменьшает влияние впереди стоящего цилиндра на вибрацию цилиндра, находящегося в следе.

В зависимости от картины обтекания изменяется число Струхалия для следа за цилиндрами (рис. 4).

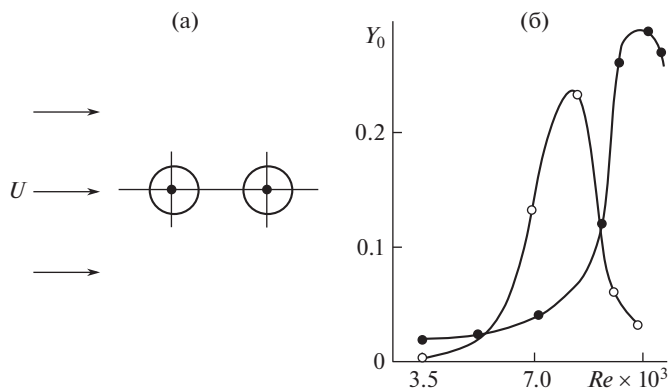


Рис. 3. (а) – обтекаемая потоком система цилиндров (трубопроводов); (б) – резонансные колебания цилиндра, расположенного в вихревом следе стоящего впереди цилиндра [6]; U – скорость набегающего потока; Y_0 – амплитуда колебаний цилиндров в потоке жидкости. \circ – колебания изолированного цилиндра; \bullet – колебания цилиндра, расположенного в следе.

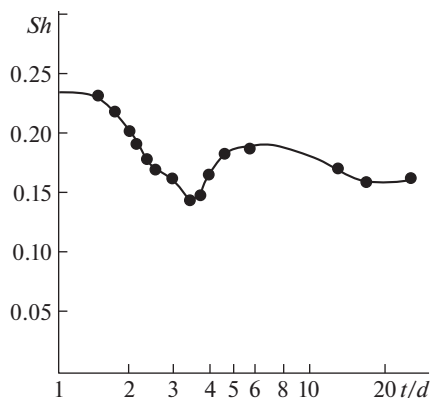


Рис. 4. Число Sh Струхала в потоке за цилиндрами, установленными тандемом [6, 7], (задний цилиндр – $Re = 5.1 \times 10^3$).

Взаимное влияние между цилиндрами весьма существенно при относительном расстоянии между ними $t/d < 3.5$. Как показывает анализ экспериментов, существуют две картины обтекания [6, 7]. При $t/d < 3.5$ обтекание цилиндров происходит практически как обтекание двух соединенных тел. Вихревой след образуется за цилиндром в следе. При $t/d > 3.5$ вихревой след образуется как за цилиндром в следе, так и за изолированным цилиндром, но влияние потока, обтекающего цилиндр в следе, на силы, образующиеся на изолированном цилиндре, практически отсутствует.

В настоящее время можно провести расчет колебаний пары цилиндров для самого общего случая с помощью вихревых методов. Имеющаяся экспериментальная информация [6, 7] о характеристиках колебаний цилиндров в поперечном потоке дает возможность оценить качество результатов, полученных численными методами, и оста-

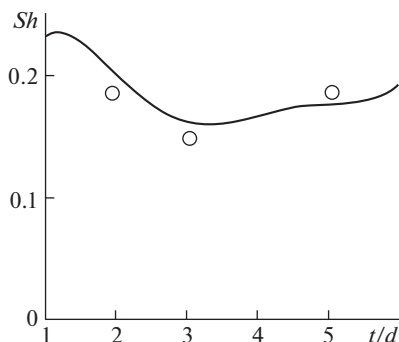


Рис. 5. Число Sh Струхала в потоке за цилиндрами, установленными тандемом: — — эксперимент [7], \circ — численный эксперимент авторов методом дискретных вихрей.

новиться на наиболее адекватном методе для оценки параметров обтекания различных трубных конструкций.

Вывод формул для определения опасного соотношения величин зазора между трубами и расстояния между опорами. Для двух труб, расположенных тандемом, можно вычислить частоту собственных колебаний в зависимости от расстояния между опорами. Так как из эксперимента [6, 7], изображенного на рис. 4, известны опасные частоты отрыва вихрей в зависимости от расстояния между трубами, то при совпадении собственной частоты колебаний труб с частотой отрыва вихрей от данной конструкции получается резонансное возбуждение периодическим вихревым отрывом (рис. 2). Таким образом, можно получить опасные соотношения расстояния между опорами и расстояния между трубами при фиксированной скорости обтекания. Если известна скорость течения реки, где установлена система трубопроводов, то, варьируя расстояниями между опорами (меняя собственную частоту колебаний труб) или меняя расстояния между трубами (меняя частоту отрыва вихрей), можно отстроить конструкцию от интенсивного возбуждения периодическим вихревым отрывом.

Зависимость числа Sh Струхала (рис. 5) определяется формулой

$$Sh = A_0 + A_1 \left(\frac{t}{d}\right) + A_2 \left(\frac{t}{d}\right)^2 + A_3 \left(\frac{t}{d}\right)^3 + A_4 \left(\frac{t}{d}\right)^4 + A_5 \left(\frac{t}{d}\right)^5. \quad (1)$$

На рис. 5 изображены точки, полученные в результате численного эксперимента методом дискретных вихрей, и показана экспериментальная кривая, полученная в [7]. Убедившись в удовлетворительном совпадении численного и физического эксперимента, получим формулу зависимости числа Sh от t/d . Находим $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5$, решая систему линейных уравнений по точкам рис. 5.

Так как $Sh = \frac{f_{cp}d}{u}$, где f_{cp} — частота срыва вихрей с конструкции из двух труб, то

$$\frac{f_{cp}d}{u} = A_0 + A_1 \left(\frac{t}{d}\right) + A_2 \left(\frac{t}{d}\right)^2 + A_3 \left(\frac{t}{d}\right)^3 + A_4 \left(\frac{t}{d}\right)^4 + A_5 \left(\frac{t}{d}\right)^5. \quad (2)$$



Рис. 6. Расчет срывного обтекания двух колеблющихся цилиндров методом дискретных вихрей. Анимация.

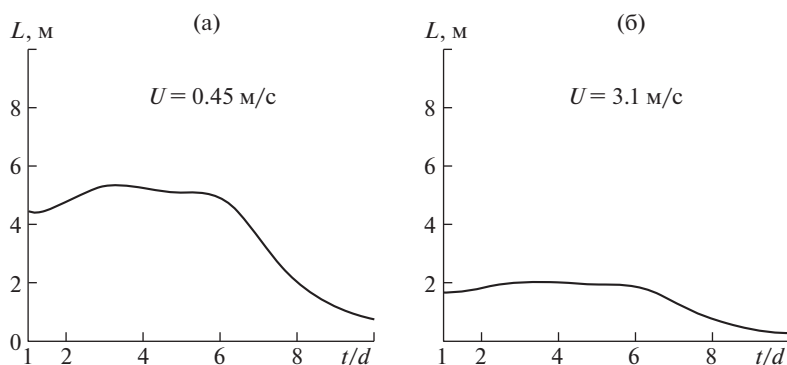


Рис. 7. Графики опасного соотношения расстояния между опорами L и расстояния между центрами труб t/d (d – диаметр трубы), при фиксированной скорости обтекания: (а) – $U = 0.45$ м/с; (б) – $U = 3.1$ м/с.

Приравняв частоту срыва $f_{\text{ср}}$ к собственной частоте колебаний трубы на опорах f_0 , получим формулу для опасного соотношения между опорами $\frac{t}{d}$

$$L\left(\frac{t}{d}\right) = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{2} d \sqrt{\frac{EJ}{m}}}{U \left(A_0 + A_1 \left(\frac{t}{d}\right) + A_2 \left(\frac{t}{d}\right)^2 + A_3 \left(\frac{t}{d}\right)^3 + A_4 \left(\frac{t}{d}\right)^4 + A_5 \left(\frac{t}{d}\right)^5 \right)}} \quad (3)$$

На рис. 6 показана анимация процесса обтекания двух колеблющихся цилиндров методом дискретных вихрей.

При обтекании двух труб, расположенных одна за другой и закрепленных на опорах, существуют опасные конфигурации. Опасная конфигурация определяется соотношением расстояния между опорами L и расстояния между центрами труб t/d при фиксированных скоростях потока (рис. 7) (при совпадении частоты срыва вихрей и собственной частоты колебаний трубы в следе).

Заключение. В статье приводится описание эффективного подхода при нахождении опасных соотношений конструкционных параметров трубопроводной системы из

двух последовательно расположенных труб в поперечном потоке среды (тандем) для обеспечения их безаварийной работы.

С учетом значительного опыта применения авторами результатов сравнительного анализа физических и численных экспериментов, можно обоснованно установить идентичность картин обтекания, что дает возможность в дальнейшем проводить решение подобных задач, используя только численный эксперимент.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kaplunov S., Valles N., Shitova L., Foursov V.* Aero-hydrodynamic loads investigations for different constructions in turbulent flows with special verification approach // *Vibroengineering PROCEDIA*. 2019. V. 26. P. 7.
2. *Kaplunov S., Valles N., Foursov V.* Application of numerical Experiment to Determine the Parameters of Pipeline Transport Depending on the Flow Stream Velocity // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. V. 49. № 9. P. 69.
3. *Жукаускас А., Улинскас Р., Катинас В.* Гидродинамика и вибрации обтекаемых пучков труб // Вильнюс, Мокслас, 1984. 312 с.
4. *Добровольский К.Г.* Методика исследования поперечного обтекания цилиндра в гидродинамической трубе // НГУ, Новосибирск, Вестник НГУ. Серия: Физика. 2013. Т. 8. № 4. С. 110.
5. *Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J.* Synchronization. A Universal Concepts in Nonlinear Sciences // Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 433 p.
6. *Девнин С.И.* Гидроупругость конструкций при отрывном обтекании // Издательство “Судостроение”, Ленинград, 1975. С. 99.
7. *Девнин С.И.* Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций. Справочник // Издательство “Судостроение”, Ленинград, 1983. С. 192.