

УДК 532.595

О.С. Лимарченко, А.П. Тимохин*(Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев)*

Колебания трубопровода с жидкостью при закритических скоростях течения жидкости

olelim2010@yahoo.com, alexey.timohin@gmail.com*Светлой памяти Промарза Меликовича Тамразова посвящается*

В работе рассмотрены общие закономерности поведения динамической системы трубопровод – жидкость при закритических скоростях течения жидкости. Показано, что в закритической области существует диапазон скоростей течения, в котором прямолинейная форма трубопровода является устойчивой. Исследованы кинематические и динамические характеристики поведения системы в закритической области.

1. Введение. Задачи динамики трубопроводов с жидкостью, для случаев, когда линейная масса жидкости превосходит линейную массу трубопровода, представляют класс задач механики со сложными нелинейными свойствами. С одной стороны это создает значительные трудности в математическом описании системы, когда приходится описывать движение жидкости в эйлеровых, а движение трубопровода – в лагранжевых координатах. С другой стороны, в таких системах проявляется широкий спектр нелинейных свойств колебаний, вызванный в значительной степени существенным вкладом сил Кориолиса. Устойчивость динамического поведения такой системы в значительной мере определяется приближением скорости течения жидкости к критическому значению скорости течения. Традиционно критическая скорость течения традиционно определяется на основе одномерной линейной модели системы [1] значением скорости течения, при котором происходит равновесие центробежных и упругих сил. В случае много-

модовой нелинейной модели в динамическом равновесии системы принимают также участие силы Кориолиса и силы, обусловленные нелинейностями, что может значительно видоизменить поведение системы. При этом оказалось, что существуют режимы поведения трубопроводов в окрестности критических скоростей и в закритической области, когда устанавливается новое (альтернативное, не прямолинейное) динамическое положение равновесия, а также существует диапазон критических скоростей, в котором прямолинейная форма снова обретает динамическую устойчивость. Так было установлено [2] существование области устойчивых колебаний по первой форме при скоростях течения жидкости в диапазоне $V = 2.23 \cdot V_{kp}^1 \div 2.67 \cdot V_{kp}^1$. Для этой области изменения критических скоростей исследованы основные закономерности динамического поведения системы.

2. Анализ динамического поведения системы. Исследуем характеристическое уравнение системы на основе двухмодового приближения. В отличие от результата [1] в такую постановку входят силы Кориолиса. На Рис. 1 приведена зависимость собственных чисел в зависимости от безразмерной скорости течения (отнесенной к первому критическому значению). При этом на рисунке комплексная часть собственного числа показана пунктирной линией, а действительная – сплошной.

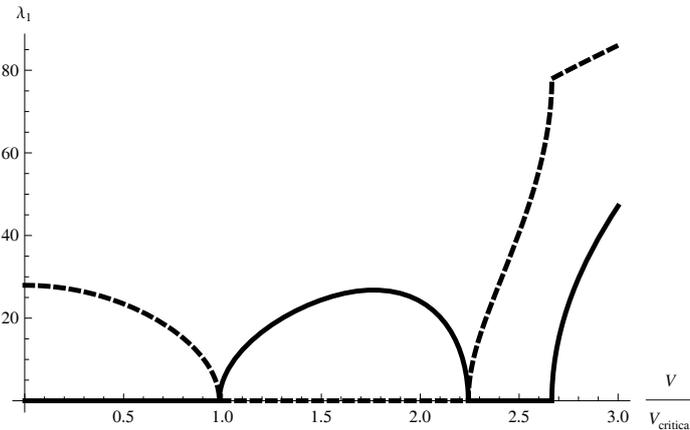


Рис. 1. Зависимость собственных чисел λ_1 от безразмерной скорости течения жидкости

Как видно из рисунка, в отличие от закона изменения собственного числа, полученного на основе одномодовой модели, после достижения значения скорости течения $V = 2.23 \cdot V_{kp}^1$ первое собственное значение становится комплекснозначным, что соответствует устойчивому режиму движения.

В дальнейшем все расчеты динамических параметров производятся на основе модели [2] для 12 форм колебаний трубопровода. Рассмотрим динамический режим поведения системы при $V = 2.5 \cdot V_{kp}^1$ при начальном возбуждении по второй форме колебаний $c_2(0) = 0.02l$ (где l – длина трубопровода). Амплитуды первых двух форм колебаний имеют следующий вид:

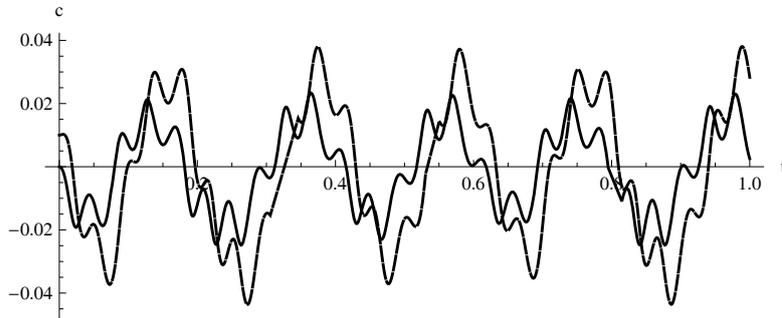


Рис.2. Амплитуды первых двух форм колебаний системы

$c_1(t)$ – пунктир, $c_2(t)$ – сплошная $V = 2.5 \cdot V_{kp}^1$

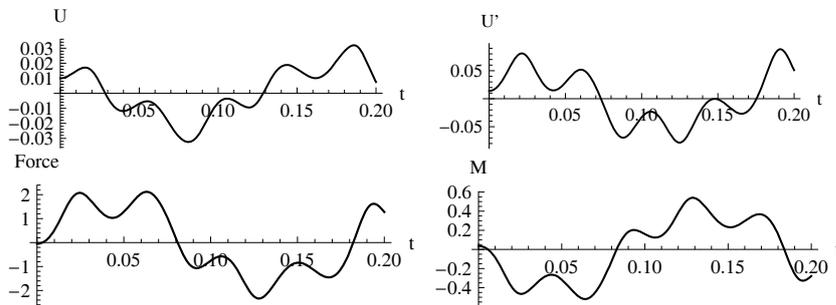


Рис.3. Перемещение и угол поворота свободного конца трубопровода, перерезывающая сила и изгибающий момент в задатке $V = 2.5 \cdot V_{kp}^1$

Как видно из Рис. 2, при $V = 2.5 \cdot V_{kp}^1$ режим колебаний устойчивый по первой и второй формам. Ниже на Рис. 3 приведены графики зависимостей перемещения и угла поворота свободного конца трубопровода, а также реакция силы и момента в заделке: на рассматриваемом интервале времени колебания всех анализируемых параметров происходят устойчиво.

Если проанализировать частотный спектр колебаний свободного конца трубопровода при $V = 2.5 \cdot V_{kp}^1$ (Рис. 4), то также можно увидеть четко выделенные первый и второй тона колебаний, при этом пик в нуле отсутствует. Это показывает, что постоянная составляющая в изменении амплитуд колебаний отсутствует, что свидетельствует об устойчивом колебательном характере поведения трубопровода.

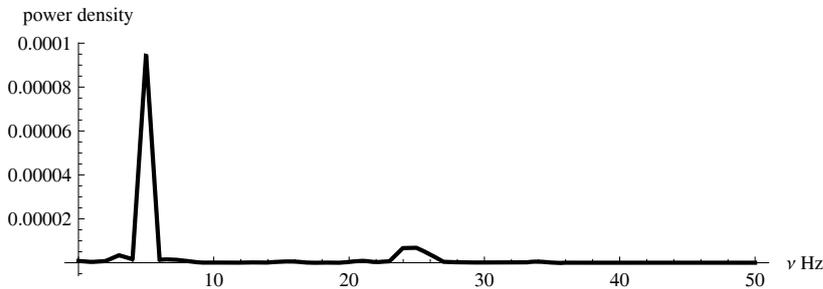


Рис.4. Спектр колебаний свободного конца трубопровода

При увеличении скорости течения жидкости выше $V = 2.67 \cdot V_{kp}^1$, происходит переход через третью точку бифуркации, соответствующую потере устойчивости системы по второй форме колебаний. При этом из Рис. 1 видно, что собственное значение λ_1 имеет как действительную, так и комплексную составляющие, т.е. режим колебаний становится неустойчивым по одной из форм колебаний (второй). Это можно увидеть, проанализировав графики первых двух форм колебаний при $V = 3 \cdot V_{kp}^1$. Из Рис. 5 видно, что амплитуды первых двух форм колебаний системы нарастают со временем, что соответствует проявлению неустойчивости. Для сравнения также приведем графики зависимостей перемещения и угла поворота свободного конца трубопровода, а также

реакции силы и момента в заделке при $V = 3 \cdot V_{kp}^1$ (Рис. 6). По сравнению с характером колебаний, представленным на Рис. 3 для $V = 2.5 \cdot V_{kp}^1$, изменения кинематических и динамических параметров являются более регулярными, влияние высших гармоник спектра снижается.

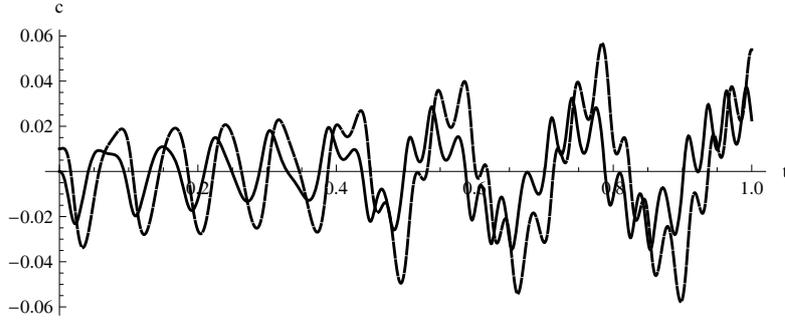


Рис. 5. Амплитуды первых двух форм колебаний системы с учетом сил Кориолиса $c_1(t)$ – пунктир, $c_2(t)$ – сплошная $V = 3 \cdot V_{kp}^1$

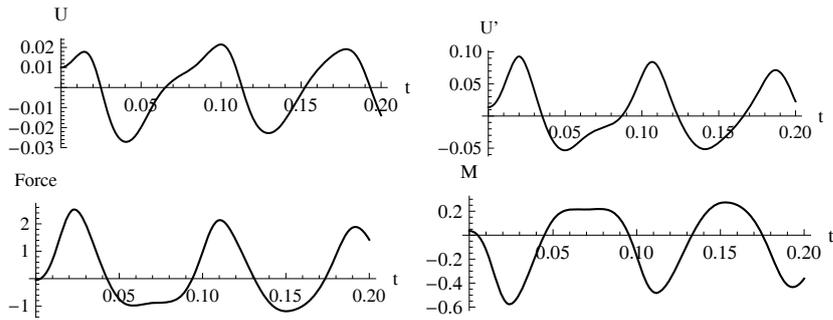


Рис.6. Перемещение и угол поворота свободного конца трубопровода, перерезывающая сила и изгибающий момент в заделке при $V = 3 \cdot V_{kp}^1$

Спектр колебаний свободного конца трубопровода при $V = 3 \cdot V_{kp}^1$ становится сильно зашумленным, в нем явно выделяется только первая форма колебаний, в то время как интенсивность второй формы стано-

вится сравнима с интенсивностью высших гармоник. Это также свидетельствует о характере нарастания интенсивности колебаний в системе.

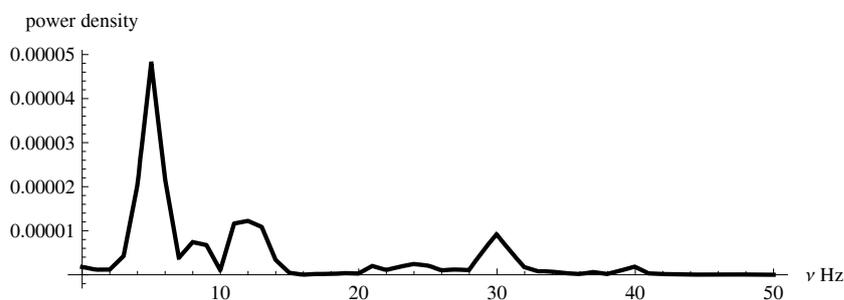


Рис.7. Спектр колебаний свободного конца трубопровода при $V = 3 \cdot V_{кр}^1$

3. Выводы. В работе исследовано динамическое поведение трубопровода, по которому течет жидкость, в области закритических скоростей течения. Установлено, что само понятие критических скоростей в определенном смысле требует пересмотра, поскольку в случае многомодовых нелинейных моделей системы существенным становится в первую очередь действие сил Кориолиса. Анализ, выполненный на основе многомодовой модели, указывает на наличие области скоростей течения жидкости, в которой в закритической области прямолинейная форма трубопровода снова становится устойчивой. Рассмотренные на основе нелинейной модели системы численные примеры подтверждают справедливость такого вывода. Проанализированы кинематические (перемещения и углы поворота конца трубопровода) и динамические (перерезывающая сила и изгибающий момент), а также спектральные характеристики колебаний нелинейной системы.

Список литературы

- [1] Feodosiev V. I., *On oscillations and stability of pipeline on liquid flowing inside it* // Engineering Collected Articles, AS USSR. – 1951. – № 10. – P. 169–170.
- [2] Лимарченко В.О., Лимарченко О.С., Тімохін О.П.. *Варіаційний метод дослідження нелінійних задач динаміки трубопроводів з рідиною* // Зб. праць Ін-ту математики НАН України. – 2012. – 9, № 2. – С. 224–239.