

УДК 621.695:622.276

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГИДРОУПРУГОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРОТЯЖЕННОГО ПОДВИЖНОГО ТРУБОПРОВОДА С ПОТОКОМ ЖИДКОСТИ

Франчук В.П., Кириченко Е.А., ИГАУ, г. Днепрпетровск

Значительная протяженность и конструктивная неоднородность по длине пульпопровода горно-морского добычного комплекса, а также нелинейный спектр действующих на него нагрузок накладывают жесткие требования к оценке его прочности. В этой связи, особый интерес представляют исследования параметров напряженно-деформированного состояния трубного става в условиях сложного нагружения, с учетом взаимного влияния внутреннего течения пульпы и динамики упругой конструкции става. Учитывая большие сложности в проведении натуральных экспериментов, на сегодняшний день предпочтение отдается теоретическим исследованиям и вычислительным экспериментам. Ввиду существенной нелинейности разрешающих уравнений равновесия для тел неканонической формы, аналитическое решение задач не представляется возможным.

Сердцевинной методического обеспечения выполняемых исследований является комплексная математическая модель статики и динамики трубного става, нагруженного внутренним и внешним потоками жидкости [1]. Разработанная модель предназначена для сопряжения задач гидродинамики двухфазного потока с учетом его подвижных границ и динамики упругого тела, границы которого взаимодействуют с окружающей морской средой.

Структурно модель состоит из упругого и гидродинамического блоков. Упругий блок включает систему уравнений теории упругости в балочно-стержневом приближении, описывающих совместные крутильные и продольно-поперечные колебания элементов конструкции става с учетом их взаимодействия с внутренним и внешним потоками жидкости.

Гидродинамический блок базируется на уравнениях, моделирующих процесс течения транспортируемой жидкости внутри упругого трубопровода, который рассматривается как гибкий канал, способный совершать некоторые перемещения. Анализ расчетных данных, выполненных с использованием разработанной модели в рамках конечно-элементной концепции показал, что в общем случае трубопровод с движущейся жидкостью склонен к самовозбуждающимся колебаниям как самого себя, так и колебаний жидкости. Другими

словами, колебания элементов става провоцируют колебания скорости жидкости (за счет связи уравнений движения жидкости с колебаниями трубопровода), а колебания жидкости, в свою очередь, могут приводить к потере динамической устойчивости става и возникновению параметрического резонанса. Установлено, что наиболее характерными явлениями, определяемыми взаимодействием трубопровода с движущейся жидкостью, являются следующие эффекты.

1) Потеря статической устойчивости (формы трубопровода) за счет наличия боковой силы, "следающей" за кривизной трубопровода. Этот вид неустойчивости может также проявляться при стационарном движении жидкости и равновесном положении трубопровода. Наступает при превышении скорости жидкости некоторого критического значения.

2) Динамическая потеря устойчивости за счет возникновения изгибных колебаний трубопровода с нарастающей амплитудой. Наступает также при превышении скорости потока некоторого критического значения.

3) Возникновение параметрического резонанса за счет пульсирующего внутреннего потока при определенных комбинациях частоты и амплитуды колебаний жидкости.

4) Аэроупругая неустойчивость трубопровода как протяженной конструкции во внешнем потоке жидкости (автоколебания типа бафтинг, флаттер, галопирование, вихревой резонанс).

Отметим, что динамическое поведение морского пульпопровода во внешнем потоке жидкости подробно исследовано в работе [2]. Поэтому, целью данной работы является изучение механизма возникновения неустойчивости трубного става, вызванной именно внутренним течением (пункты 1–3) и выявление основных факторов, влияющих на границы области устойчивости без подробного описания методов решения задач. Задача о "дивергентном выпучивании" трубного става (потеря статической устойчивости) решалась для наклонного погружного трубопровода, имеющего начальный статический изгиб от собственного веса и веса технологической платформы, а также от сил сопротивления при поперечном внешнем обтекании с учетом вязкого демпфирования. Верхний конец трубного става удерживается в спайдерном устройстве на судне, на свободном нижнем конце закреплена технологическая платформа, на которую может передаваться усилие, приходящее от агрегата сбора. Основные уравнения гидродинамики в подвижном упругом трубопроводе получены в работе [3]. В рамках гидравлического приближения считается, что все гидродинамические параметры распределены равномерно по живому сечению трубопровода и зависят только от продольной координаты, а в случае неустановившегося движения еще и от времени. В действительности, при течении жидкости по каналу с искривленной осью, давление по его живому сечению распределено неравномерно. Полное давление

можно представить в виде двух слагаемых P_{cp} и ΔP , где P_{cp} означает среднее по поперечному сечению давление, которое зависит только от продольной координаты, а ΔP означает неравномерную добавку за счет кривизны трубопровода. Именно наличие этой добавки приводит к образованию центростремительной силы приложенной к движущейся жидкости со стороны трубы и заставляет поток поворачиваться вдоль канала. Неравномерность давления по периметру трубопровода возникает и при его ускоренном движении. Таким образом, в гидравлическом приближении на движущийся элемент жидкости со стороны трубопровода действует сила трения, направленная вдоль оси элемента канала и нормальная сила, обусловленная искривлением оси трубопровода и его ускоренным движением.

Наряду с этим, со стороны протекающей жидкости на внутренние стенки трубы действует сила трения, зависящая не только от режима движения пульпы, но и от скорости продольных колебаний трубопровода. Кроме того, при изгибе става за счет кривизны его осевой линии возникают распределенные инерционные силы от воздействия потока на внутренние стенки трубы. Эта сила "следит" за изменением поперечного смещения сечения става и стремится увеличить кривизну его осевой линии. С учетом описанного механизма взаимного влияния жидкости и стенок трубы, получен ряд решений для форм статического и динамического прогибов для двух примеров. Рассматривался трубопровод диаметром 0,25м, изготовленный из высокопрочной стали длиной 3000м. Угол наклона к вертикали составляет 10^0 , скорость течения пульпы 3м/с, скорость движения судна 0,5м/с, погонная масса трубы 50кг, погонная масса пульпы 20кг, масса технологической платформы $100 \cdot 10^6$ кг, масса судна на порядок выше. В расчетах погонная масса трубы увеличена на 15% для учета присоединенных масс, а коэффициент затухания принят равным 0,05. При данных значениях параметров динамический прогиб оказался пренебрежимо мал по сравнению со статическим. "Дивергентное выпучивание" трубопровода отсутствует ввиду значительных нормальных растягивающих усилий и стабилизирующего воздействия конечных масс. Во втором примере длина трубопровода составила 6000м, а скорость течения пульпы – 5м. Остальные параметры остались без изменения. Несмотря на увеличение статического прогиба, динамический прогиб почти не изменился. Потеря статической устойчивости также не наблюдалась. Когда скорость жидкости, текущей по трубе зафиксированной в верхнем конце и свободной в нижнем (система в

общем случае консервативна) возрастает за пределы некоторой критической величины, система становится неустойчивой и малые произвольные возмущения вырастают в изгибные колебания больших амплитуд. Другими словами, динамической устойчивости трубопровода соответствуют ограниченные прогибы и моменты, а динамической неустойчивости – неограниченные значения указанных величин.

Во многих случаях исследование устойчивости колебаний можно свести к исследованию решений дифференциальных уравнений, описывающих колебательный процесс. С этой целью, с использованием системы дифференциальных уравнений [1] определялись собственные частоты, которые определяют собственные функции, а значит и амплитуды собственных колебаний трубопровода, транспортирующего жидкость. Задача приводилась к безразмерному виду и решалась методом Галеркина, делающим акцент на выборе аппроксимирующих функций (это должны быть известные аналитические функции), удовлетворяющим условию об ортонормированности интегральных соотношений и граничным условиям. Для удобства прослеживания поведения трубопровода в зависимости от его длины, скорости течения пульпы и других параметров собственная частота колебаний представлялась как комплексная величина. В такой постановке устойчивость исследуемой системы определяется сигнатурой мнимой части комплексной частоты. Положительная мнимая часть соответствует устойчивому состоянию системы, а отрицательная – неустойчивому. В случае равенства мнимой части нулю (безразмерная частота есть вещественная величина) достигается нейтральное равновесие системы, соответствующее наибольшему значению скорости течения, при которой система остается устойчивой. В результате решения краевой задачи в широком диапазоне изменения конструктивных и расходных параметров установлены следующие закономерности.

1) Движение трубопроводов с протекающей жидкостью характеризуется меньшими собственными частотами, причем по мере возрастания скорости жидкости все собственные частоты монотонно убывают.

2) При прочих равных условиях уменьшение массового расхода пульпы или увеличение массы и жесткости трубы, а также продольных растягивающих усилий увеличивает зону устойчивости.

3) В исследуемом диапазоне величина коэффициента вязкого демпфирования слабо влияет на динамическую устойчивость системы, а лишь вызывает незначительный сдвиг областей устойчивости в параметрической плоскости.

При исследовании возможности возникновения динамической неустойчивости транспортных трубопроводов также необходимо

учитывать нелинейные колебания с параметрическим возбуждением. Параметрически возбуждаемые колебания, математически описываются дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами, у которых некоторые параметры изменяются с относительно малыми амплитудами. Однако, при малом параметрическом возбуждении ранее устойчивая система может стать неустойчивой вследствие наступления параметрического резонанса. Это явление имеет место лишь для критических частот возбуждения. Основная задача теории параметрического резонанса применительно к глубоководным гидроподъемам заключается в определении спектра критических частот для различных эксплуатационных режимов установок и разработке методов построения границ областей устойчивости трубопровода в координатах его конструктивных и расходных параметров.

Так, пульпопроводы, вообще говоря, способны совершать периодические поперечные параметрические колебания, возбуждаемые пульсациями давления насоса. Для решения задачи использовалось безразмерное дифференциальное уравнение четвертого порядка в частных производных, описывающее поперечные колебания трубопровода с пульсирующей жидкостью [4], отличающееся от аналогичного уравнения, полученного в работе [2], лишь членами, учитывающими гармонические колебания, вызванные пульсациями скорости потока жидкости. В [4] принято, что колебания скорости жидкости изменяются по закону: $V = V_0(1 + \mu \cos kt)$, где: V_0 – среднее число скорости; k – частота колебаний жидкости; μ – некий параметр.

Уравнение поперечных колебаний трубопровода в отличие от работы [4], где использовался метод Болотина, решалось методом Галеркина. В качестве пробных функций выбирались собственные функции и собственные частоты изгибных колебаний става без потока жидкости.

В результате численного моделирования установлено, что при определенных соотношениях между возмущающей частотой – k и частотой собственных поперечных колебаний трубопровода, последний становится динамически неустойчивым, возникают интенсивные поперечные колебания с быстро нарастающей амплитудой, т.е. наступает параметрический резонанс. При исследовании области параметрического резонанса выявлены следующие закономерности.

1) С увеличением длины трубного става а также толщины его стенки область параметрического резонанса уменьшается.

2) С увеличением скорости пульсаций V_0 , диаметра трубопровода а также параметра μ область параметрического резонанса возрастает.

3) Существует критическое значение параметра μ , ниже которого параметрический резонанс невозможен ни при каких комбинациях геометрических и расходных параметров трубопровода.

Установленные закономерности позволяют проектировщикам реально сконструировать трубопроводы для подъема минерального сырья с глубин 3000–6000 м так, чтобы они находились на безопасном расстоянии от границ устойчивости. А в случае возникновения динамической неустойчивости при изменении исходных данных в процессе эксплуатации предусмотреть эффективные мероприятия по ее предотвращению, а также способы отстройки от возможных резонансных режимов.

Литература

1. Кириченко Е.А. Полная математическая модель гидроупругих эффектов для глубоководных пульпопроводов. // Науковий вісник НГА України.- Днепропетровск, 1998. -№2 – С. 53 – 57.
2. Гоман О.Г., Графский И.Ю., Кириченко Е.А. Экспериментальные исследования аэрогидроупругой неустойчивости элементов трубного става. // Сб. научных трудов НГА Украины.- Днепропетровск, 1988. -№2 – С. 400 – 418.
3. Кириченко Е.А. Основные уравнения гидродинамики жидкости в подвижном деформированном упругом трубопроводе. // Межведомственный сб. научных трудов ИГТМ НАН Украины.- Днепропетровск, 1999. -№15 – С. 99 – 108.
4. M.P. Paidousis, C. Sundararajan. Parametric and combination resonans of pipe conveying pulsating fluid// J. Of applied mechanics. -1975.-December.- pp. 780 – 784.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ БУРОВОЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ БУРЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СКВАЖИН НА ОБЪЕКТЕ “УКРЫТИЕ” ОП ЧАЭС

Мажниц А.Г., Сущенко А.И., Кулишенко В.Н., Райцын А.М.,
Крейзель А.З., НИПИОкеанмаш, г. Днепропетровск

Прошло более 10 лет с той поры, когда на Земле появился “уникальный объект”, в котором находится около 200 тонн высокоактивных материалов и несколько сотен тысяч тонн низко- и среднеактивных топливосодержащих материалов (ТСМ) и послеаварийного