

**О.Г. Гоман, д-р физ.-мат. наук, Е.А. Кириченко, д-р техн. наук,
И.М. Чеберячко, канд. техн. наук, О.А. Иванченко**
(Украина, Днепрпетровск, Национальный горный университет)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОУПРУГИХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБНОГО СТАВА

В связи с дефицитом некоторых цветных металлов, добываемых традиционным способом, в настоящее время интенсивно развивается новая область горного дела – разработка подводных месторождений полезных ископаемых. Глубоководные районы Мирового океана содержат значительные месторождения полиметаллических конкреций, освоение которых представляет интерес в плане добычи никеля, кобальта, меди и свинца. В акватории Черного моря обнаружены нефть, газ и газогидраты, добываются песок, гравий и другие строительные материалы. Национальная программа исследования и использования ресурсов Азово-Черноморского бассейна, других районов Мирового океана определяет освоение этих месторождений как важнейшую задачу экономики Украины XXI столетия.

Основным элементом горно-морского добычного комплекса с гидравлической системой подъема является подводный трубный став, ответственный за работоспособность всего комплекса. Данная статья посвящена важной научной проблеме – выбору и обоснованию параметров трубных систем, обеспечивающих работоспособность гидроподъемов в составе добычных судовых комплексов, что напрямую связано с определением нагрузок, действующих на элементы става.

Исследования гидродинамических сил, действующих на колеблющееся тело в потоке жидкости, показали, что надежного аналитического метода для определения этих сил при различных режимах обтекания не существует [1, 2]. Кроме того, ряд параметров, входящих в выражения для гидродинамических сил, нуждаются в экспериментальной проверке [3, 4]. Многочисленные экспериментальные данные, приведенные в работе [5], получены только для тел кругового сечения. Результаты работ [6, 7] относятся к обтеканию наклонных, но опять же круговых одиночных цилиндров.

Таким образом вопрос об исследовании автоколебаний для такого сложного профиля, как сечение трубного става, остается открытым.

Цель данной статьи – экспериментальное определение параметров областей возможной гидроупругой неустойчивости для двух наиболее вероятных компоновок трубного става.

Достижение поставленной цели, в первую очередь, связано с экспериментальным определением нестационарных аэрогидродинамических характеристик трубного става гидроподъемов.

Следует отметить, что полное моделирование динамических процессов колебания трубного става в аэродинамической трубе на уменьшенных геометрических моделях элементов става затруднительно из-за невозможности вы-

держат модель в воздухе такие же соотношения между упругими силами и силами инерции, как для реальной конструкции в потоке воды. Кроме того, для аэродинамической модели элемента трубного става в условиях крепления ее по концам невозможно смоделировать те условия, в которых находится элемент в составе реальной протяженной конструкции.

В связи с этим термин “динамическая модель” следует понимать лишь в том смысле, что изготовлялась специальная аэродинамическая модель, которая благодаря своему упругому креплению допускала возможность существования колебаний и возможность их регистрации.

Поэтому, хотя непосредственное безоговорочное перенесение результатов модельных исследований аэроупругих явлений в аэродинамической трубе на натурный объект и неправомерно, однако такие исследования позволят выявить ряд качественных явлений потери устойчивости и апробировать разработанные математические модели для анализа гидроупругой неустойчивости конструкции става.

Именно с такой целью и были выполнены специальные динамические исследования моделей става в аэродинамической трубе Т-5 Днепропетровского национального университета. Программа и методика испытаний подробно приведены в работе [8].

Аэродинамическая труба Т – 5 – это установка замкнутого типа с открытой рабочей частью, диаметр выходного сопла 0,75 м (рис.1). Поток воздуха обеспечивается осевым вентилятором; максимальная скорость потока 50 м/с. Неравномерность поля скоростей в ядре потока пустой трубы не превышает 0,5%; скос потока в вертикальной и горизонтальной плоскостях – не более 0,5%. Начальная турбулентность потока $\varepsilon = 0,4 - 0,5\%$; акустический шум при максимальной скорости потока – 96 дБ.

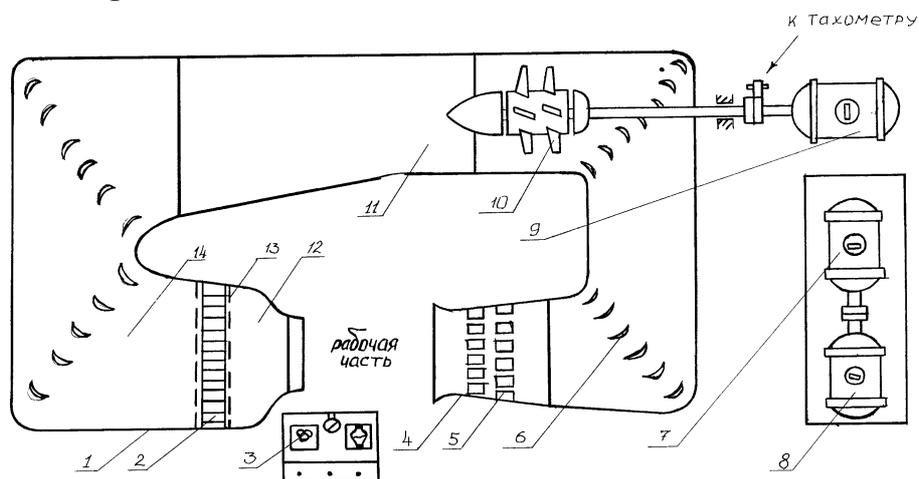


Рис.1. Аэродинамическая труба Т – 5: 1 – внутренний контур трубы; 2 – хонейкомб; 3 – пульт управления; 4 – диффузор; 5 – отверстия для демпфирования пульсаций давления; 6 – лопатки поворотные; 7 – генератор постоянного тока; 8 – электромотор переменного тока; 9 – электромотор постоянного тока; 10 – вентиляторная установка; 11 – канал нагнетания; 12 – сопло; 13 – сетки турбулизирующие; 14 – форкамера

На рис.2 схематически показаны трехкомпонентные весы и их расположение вместе с моделью в трубе.

Весовой элемент Y_1 в виде упругой пластины одним концом крепится к массивному координатнику, с помощью которого изменяется угол атаки модели, а другим – к тяге с двумя шарнирами с моделью.

На упругие пластины наклеены тензодатчики, соединенные по мостовой схеме между собой и с тензостанцией.

Достоинство такой конструкции тензовесов в том, что кроме стационарных сил они могут измерять силы и амплитуды нестационарных колебаний при возникновении аэроупругой неустойчивости моделей, исследуемых путем осциллографирования процесса колебания и предварительной тарировки перемещений упругих весовых элементов под действием нагрузки.

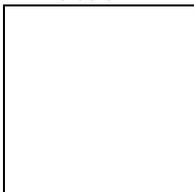


Рис.2. Схема тензометрических трехкомпонентных весов в рабочей части аэродинамической трубы: 1, 2, 12 – упругие весовые элементы “X”, “Y”, “ Y_1 ”; 3 – шарнир шаровой; 4 – жесткая ось модели; 5 – шайба концевая; 6 – исследуемая модель; 7 – обтекатель; 8 – стойка опорная; 9 – механический колебательный контур; 10 – сопло трубы; 11 – координатник; 13 – тяга с двумя шарнирами; 14 – шаровая опора с отверстием; 15 – накладка

На рис.3, 4 показаны две различные компоновки пакета трубопроводов, а также гидродинамические силы, действующие на вспомогательные трубопроводы.

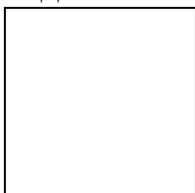


Рис.3. Компоновка труб в пакете и схема гидродинамических сил, действующих на вспомогательные цилиндры (компоновка 1)

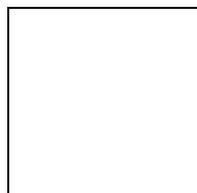


Рис.4. Схема сил и компоновочная схема пакета трубопроводов (компоновка 2)

Динамическая модель первой компоновки позволяла определять аэроупругие автоколебания става в целом и каждого отдельного трубопровода, модель второй – только всего става в целом.

Диапазон чисел Рейнольдса при динамических исследованиях составлял: $3 \cdot 10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$.

Графики изменения безразмерных амплитуд продольно-поперечных и крутильных колебаний для первой модели в зависимости от числа Re и угла атаки представлены на рис. 5, 6 (величины a_x и a_y – амплитуды продольных и поперечных колебаний модели става в целом; γ – амплитуда крутильных колебаний всей модели; a_{xi} – амплитуды продольных колебаний отдельных сателлитных трубопроводов пакета).

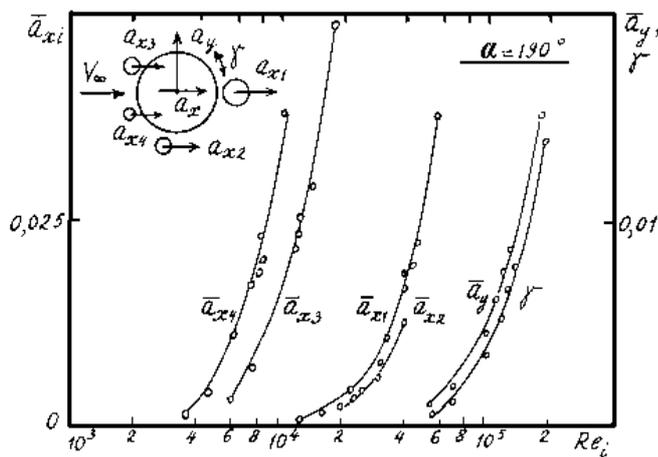


Рис.5. Изменение кинематических параметров изгибных и крутильных перемещений для пакета в целом и для вспомогательных трубопроводов в зависимости от числа Рейнольдса (компоновка 1)

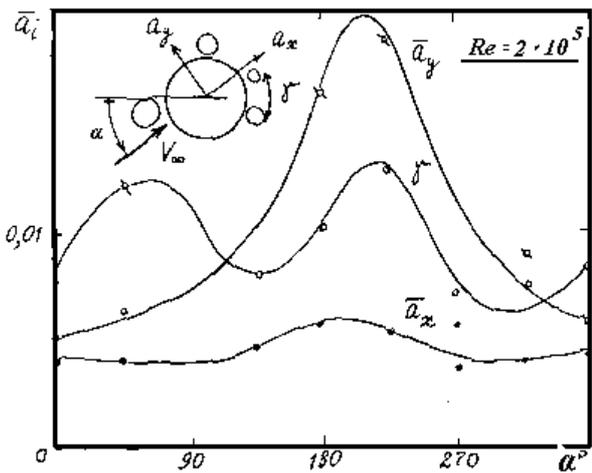


Рис.6 – Изменение амплитуд продольных поперечных и крутильных колебаний пакета в целом в зависимости от угла атаки (компоновка 1)

В результате анализа приведенных зависимостей получены новые научные результаты. Так обнаружено, что наличие вспомогательных трубопроводов в пакете приводит к значительному изменению коэффициента силы сопротивления, появлению боковой силы и крутящего момента.

Результаты свидетельствуют также о том, что при $Re = 1,2 \cdot 10^5$ модель трубного става колеблется в горизонтальной плоскости по обоим направлениям, причем, наиболее интенсивно при угле атаки $\alpha \cong 190^0$. Потеря аэрогидроупругой устойчивости всего става наступает при $Re \cong 5 \cdot 10^4$, а отдельных трубопроводов в пакете значительно раньше (число Рейнольдса для каждого трубопровода подсчитано по его собственному диаметру). Характер изменения амплитуд изгибных перемещений (a_{xi} – вдоль потока и a_{-i} – поперек потока) и крутильных колебаний (γ – амплитуда угла закрутки) свидетельствует о галопирующем типе автоколебаний в исследованном диапазоне скоростей, поскольку колебания имели тенденцию к нарастанию неограниченно.

На рис.7 представлены результаты исследования аэрогидроупругой неустойчивости пакета трубопроводов в целом для компоновки 2 в зависимости от приведенной скорости $V_{np} = V_{\infty} / \omega_{-} d$, где ω_{-} – круговая частота поперечных колебаний. Обнаружено два типа потерь аэрогидродинамической устойчивости: вихревое возбуждение (область А) и галопирование (область Б). В области вихревого возбуждения амплитуда поперечных колебаний с ростом скорости сначала возрастает, а затем затухает, в области галопирования она, как правило, имеет тенденцию возрастать.

В указанных исследованиях амплитуды колебаний были незначительными, поскольку крепление модели было выполнено упругими пластинами большой жесткости.

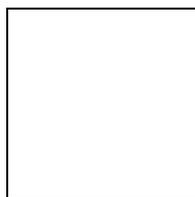


Рис.7. Зависимость амплитуды поперечных колебаний пакета от приведенной скорости:

- а – $\bar{l} = 0,05$; $\varphi = 30^0$; А – область вихревого возбуждения ($\alpha = 0^0 - 180^0$),
Б – область галопирования ($\alpha = 0^0 - 180^0$);
- б – $\bar{l} = 0,05$; $\varphi = \varphi_0$; А – область вихревого возбуждения ($\alpha = 180^0 \pm 20^0$),
Б – область галопирования;
- в – $\bar{l} = 0,05$; $\varphi = \varphi_0$; А – область вихревого возбуждения ($\alpha = 0^0 \pm 10^0$),
Б – область галопирования (1 - $\alpha \cong 0^0$, 2 - $\alpha = 20^0 - 180^0$)

Модель пакета при $\bar{l} = 0$ (когда все окружающие трубопроводы прилегают к центральному), оказалась наиболее устойчивой во всех диапазонах изменения углов α и $V_{\text{пр}}$, за исключением $\alpha \sim 0$.

Область автоколебаний вихревого возбуждения А незначительна: $V_{\text{пр}} = 5 \dots 10$ или $Sh = 0,2 \dots 0,1$.

Потеря устойчивости типа галопирования происходит при $V_{\text{пр}} > 14,5$ ($Sh \approx 0,7$). Исключение составляет модель пакета, у которой $\bar{l} = 0$, $\varphi = \varphi_0$. В этой модели закономерность изменения амплитуды с ростом скорости аналогична вихревому возбуждению.

Колебания при галопировании как поперек, так и вдоль потока происходят по собственным изгибным частотам. При вихревом возбуждении модели, у которой $\varphi = 30^0$, $\bar{l} = 0$, круговая частота колебаний возростала от $\omega_y = 12,8$ до 15. При этом кинематическое число Струхала $Sh_1 = 0,21$, т.е. происходил захват частоты срыва вихрей собственной частотой модели, как и для одиночного цилиндра, что также является новым научным результатом. В остальных случаях вихревое возбуждение осуществлялось на собственной частоте.

Обобщая вышесказанное, можно сделать вывод, что поперечное сечение трубного става имеет склонность к проявлению аэроупругих автоколебаний указанных типов, и поэтому любая конкретная конструктивная компоновка пакета нуждается в систематических аэрогидроупругих исследованиях.

Следующим этапом исследований, на базе полученных результатов, является подбор таких геометрических и динамических характеристик элементов трубного става, которые с учетом возможных условий эксплуатации гидроподъемов исключили бы возникновение автоколебаний.

Список литературы

1. Гриффин О.М. Обтекание круговых цилиндров, совершающих автоколебания и вынужденные колебания // Конструирование и технология машиностроения. – 1972. – Т.94, сер. В. – №2.

2. Chen S.S. Instability mechanism and stability criteria of a group of circular cylinders subjected to cross flow. Part 1. Theory // *Journal of vibration, acous. stress and reliab. in design.* – 1983. – №1.
3. Connors H. Fluidelastic vibrations of tube arrays excited by cross flow // *Flow-induced vibrations in heat exchangers.* ASME, 1970.
4. Девнин С.И. Гидроупругость конструкций при отрывном обтекании.– Л.: Судостроение, 1975. – 192 с.
5. Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: Справочник. – Л.: Судостроение, 1983. – 332 с.
6. Blevins R.D., Burton T.E. Fluid forces induced by vortex shedding // *ASME Journal of Fluids Engineering.* – 1976. – Vol. 98, Mar. – P. 19 – 26.
7. Ван Атта. Экспериментальное исследование вихрей с наклонных цилиндров // *Ракетная техника и космонавтика.* – 1965. – №6.
8. Кириченко Е.А. Научное обоснование параметров трубных систем для гидроподъема полезных ископаемых: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Днепропетровск, 2002. – 37 с.