

УДК 539.3:534.1

© 2002 г. В.А. ПИЛИПЕНКО

САМООРГАНИЗОВАННОЕ ДВИЖЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ЦЕПОЧКИ В ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ

Экспериментально исследуется стационарное движение металлической цепочки, образующей замкнутый контур, через эжекторное сопло. Транспортирующий воздушный поток действует на механическую систему с односторонними связями как источник неравновесности. Развивается процесс самоорганизации с наблюдаемым отвердеванием цепочки – эффектом самонаведенной когерентности и гироскопической жесткости.

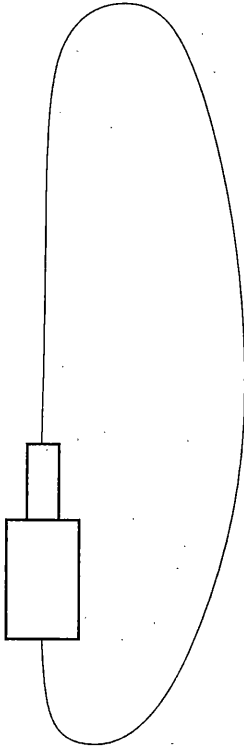
При возмущении потока энергии (неоднородность цепочки, случайная закрутка воздушного потока) на устойчивой когерентной структуре образуются групповые солитоны. Существование такого стационарного движения обусловлено близостью к невозмущенному.

Контурное движение цепочки в воздушном потоке служит модельным экспериментом для изучения эволюции состояний открытой распределенной механической системы, обладающей внутренними степенями свободы [1].

Гибкая система, частично погруженная в транспортирующий поток, становится средой распространения нелинейных волн импульса, генерируемых потоком [2]. Нелинейные эффекты с наибольшей полнотой выражены в движении плетеной цепочки с зазорами, которые допускают продольный сдвиг звена или группы звеньев, вовлеченных в соосное движение воздушного потока. Такая структурная нелинейность механической системы кинематически подобна распределенным дефектам в жидкой или упругопластической среде, активизирующим вращательные степени свободы [3, 4]. Продольно-поляризованную поперечную волну на ведомой ветви контура по кинематическим характеристикам можно определить как волну завихренности. Опыты с цепочками подтверждают существование этой волны.

Для эксперимента были выбраны плетеные декоративные цепочки с линейной плотностью $m_0 = (2.5-13.0)$ г/м. Цепочки разрываются в воздушном потоке вскоре после разгона, причем обнаруживается усталостный характер разрыва – разгибание одного из звеньев почти до выпрямления. Иногда разрыв происходит сразу в двух точках, что подтверждает динамический характер воздействия. Увеличение времени движения до нескольких минут возможно только при минимальной контурной скорости, когда тянущее усилие воздушного потока незначительно превосходит вес цепочки. Эту скорость можно считать порогом буксования, ниже которого происходит нерегулярное чередование продольных смещений и остановок. Прерывистое движение в качестве альтернативы непрерывному свидетельствует о необходимости существования волнового поля в стационарном движении. Форма контура в указанных условиях устойчива только при вертикальном расположении сопла, с ориентацией вверх или вниз.

При любой скорости контурного движения и только в движении в цепочке образуются области отвердевания – в зоне воздействия воздушного потока, а также в зонах повышенного натяжения – у входа в сопло и в верхней части контура. При расширении областей отвердевания на полную длину цепочки контур становится жест-



ким. На фигуре показан отвердевший контур, уравновешенный воздушной струей, направленной вверх.

Отвердевание цепочки сопровождается увеличением амплитуды колебаний звеньев. Их продольные рывки становятся доступными для непосредственного наблюдения, если зазоры в цепочке достаточно велики, при этом заметна синфазность колебаний на участках наибольшего отвердевания. Интенсивная вибрационная нагрузка уменьшает время движения цепочки до разрыва: простейшая цепочка – якорного плетения, с наибольшими зазорами является в этом смысле предельным случаем.

Отвердевание и разрыв цепочки вызываются накачкой энергии в колебательное движение звеньев при многократном прохождении каждого элемента ее длины через сопло; но цепочка, остановленная в потоке, при сколь угодно продолжительном обтекании и весьма интенсивных поперечных колебаниях не отвердевает и не разрывается. Только в свободном, самосогласованном движении, без каких-либо кинематических внешних связей повторяющееся воздействие потока на волновое поле приводит к саморазвитию когерентности. Степень когерентности (и отвердевания) изменяется вдоль контура и зависит от ориентации сопла и длины цепочки, причём в стационарном потоке степень когерентности также достигает стационарного значения.

Величина контурной скорости является функцией интегрального осредненного значения силы гидравлического сопротивления, которое не изменяется в стационарном потоке.

Эффекты развития когерентности могут влиять на контурное движение, возможно, вызывая некоторое его замедление. Наблюдаемые значения скорости цепочки были порядка 2.0 м/с.

Важный фактор процесса самоорганизации – встречное движение потока массы и потока волн импульса: воздействию воздушного потока подвергается сформированное волновое поле, что ускоряет развитие когерентности.

Очевидно, что рассматриваемое движение в целом подчиняется законам сохранения для процессов переноса в двухкомпонентной среде. Эти законы в качестве глобального условия играют роль информационной обратной связи в наблюдаемых явлениях самоорганизации [1]. Стационарные состояния различаются уровнем избыточной энергии. В контурном движении цепочки последующее состояние возможно только при одновременном существовании предыдущего, причём при разной физической реализации последовательные состояния одновременно наблюдаемы.

Физическая реализация определяется формой полного поглощения избыточной энергии, что на первом уровне самоорганизации тождественно самосогласованности движения.

Факт существования локализованных структур только в свободном от внешних кинематических связей движении является косвенным подтверждением того, что движущееся волновое поле и контурное движение – это последовательность взаимосвязанных физических состояний, подчиняющихся условию непрерывности потока импульса. Источник импульса и источник массы расположены соответственно в начале (натяжение $T = T_{\max}$) и в конце ($T = T_{\min}$) дуги контура, называемой ведомой ветвью. Если принять, что импульс потока передается транспортируемой системе только резонансно-волновым взаимодействием в точке с наименьшим натяжением, то самосогласование выражается равенством потока энергии $T_{\min}V$ в контурном движении со скоростью V потоку энергии бегущей волны $T_{\min}\dot{\xi}$, где $\dot{\xi}$ – скорость частиц в волне. В условиях резонанса обе величины равны m_0V^3 .

В ранее проведенных экспериментах было установлено, что в движении нити величина $P = m_0 V^3$ является инвариантом при изменении m_0 и постоянном расходе сжатого воздуха.

При сматывании с накопителя хлопчатобумажных нитей линейной плотностью $m_{01} = 15.38$ мг/м и $m_{02} = 50$ мг/м были получены значения $V_1 = 10.58$ м/с и $V_2 = 7.18$ м/с, т.е. $P_1 = 1.82$ сНм/с, $P_2 = 1.85$ сНм/с, различие составляет 1.6%. В этом вполне упорядоченном движении можно сделать оценку условий распространения волны по величине отношения $k = T_{\max}/T_{\min}$, где T_{\max} – натяжение, измеренное у входа нити в сопло, $T_{\min} = m_0 V^2$: $k_1 = 8.54$; $k_2 = 8.37$, т.е. потери импульса, зависящие от строения нити, здесь очень велики. Поэтому можно предположить, что возможность устойчивого переноса импульса заложена в условиях формирования волны. На длине S интенсивного воздействия потока на гибкую систему выполняются известные условия самолокализации [5] – слабые связи в системе, а также локально избыточный удельный поглощенный поток энергии $T_{\max} V / (m_0 S)$, что допускает образование солитонов. Свойственный им изоморфизм позволяет сохранить продольную поляризацию волны. Универсальная роль солитонов в аккумуляции и передаче энергии и информации находит все больше подтверждений [6].

Саморазвитие когерентности означает переход во второе стационарное состояние, невозмущенное, если величина зазоров в цепочке не менее некоторого критического значения, что соответствует известному факту: скорость поглощения излучением пропорциональна квадрату амплитуды. Самая жесткая из испытанных цепочек (с минимальными зазорами и усложненной формой звеньев) при сравнительно малой вибрационной нагрузке в основном движении периодически изменяет форму: появляются и исчезают волны большой амплитуды, которые изгибают отвердевший контур. Таким образом, остаток избыточной энергии поглощается периодической генерацией новой гармоники.

Для исследования реакции на возмущения системы с самонаведенной когерентностью были проведены опыты с неоднородными цепочками, т.е. последовательно соединенными цепочками с разной линейной плотностью. Если это различие велико, особенно при малой линейной плотности, наблюдаются поперечные всплески и запутывание цепочки. Непрерывное периодическое движение (с ориентацией сопла вниз) оказалось возможным при $m_{01} = 12.96$ г/м, $m_{02} = 10.86$ г/м, $m_{01}/m_{02} = 1.19$. Это дает основание считать, что при возмущении когерентной структуры стационарное состояние является пороговым. В точке соединения тяжелой и легкой цепочек образуется поток избыточной энергии, достаточный для образования группы кноидальных волн или солитонов. Условием их существования является наличие когерентной структуры. Направление распространения этих волн – противоположно контурному движению. Волны с крутым изломом профиля, не изменяя своей формы, изгибают жесткий участок на ведомой ветви отвердевшей цепочки. Попытка образовать изгиб на сильно отвердевших участках цепочки внешним воздействием вызывает явления взрывной неустойчивости.

В нижней части цепочки, где натяжение минимально, профиль волн солитонной группы совмещается с изгибом цепочки на повороте. Можно предположить, что здесь происходит передача импульса этих волн в контурное движение, поскольку иногда наблюдаются весьма интенсивные низкочастотные рывки в контурном движении неоднородной цепочки.

Вообще эффекты, связанные с генерацией мод при возмущении когерентной структуры, имеют выраженный бифуркационный характер.

К той же группе явлений можно отнести следующий трудновоспроизводимый эксперимент (с ориентацией сопла вниз): движение уединенной волны, вызванное поперечным ударом в точке на ведомой ветви при умеренной степени отвердевания в окрестности точки. Не изменяя профиля, волна перемещается в сторону, обратную контурному движению, до совмещения с изогнутой частью цепочки. Если увеличить

скорость удара, волна проходит нижнюю часть цепочки, преодолевая захват в резонанс, при этом ее профиль изменяется в масштабе, уменьшаясь приблизительно в два раза. Затем без изменения профиля, проявляя свойства солитона, волна движется по жесткому, как стержень, участку контура к соплу и, снова уменьшаясь в масштабе, уходит в сопло.

Образование стационарной волны на когерентной структуре можно считать переходом системы в третье стационарное состояние. В этом случае избыточным является поток энергии, индуцированный какой-либо неоднородностью основного потока энергии, например, при случайной закрутке воздушного потока, характерной для эжекторного сопла с радиальным вводом сжатого воздуха, возможно образование спирального солитона.

Представляет интерес особенность рассматриваемого движения, наблюдаемая также в поведении нитей [2]: воздействия, которые можно назвать возмущениями параметров системы, могут вызвать изменение состояния на уровне фазового перехода, в то время как внешние возмущения приводят только к рассеянию энергии. Опыты с отвердевшей цепочкой позволяют наблюдать реакцию самосогласованной, самоорганизующейся системы на произвольные внешние возмущения, обобщенной моделью которых является поперечный удар.

Обычно на удар с малым импульсом (не разрушающий состояние движения) отвердевшая цепочка реагирует как жесткий стержень или натянутая струна. Только иногда, при ориентации сопла вниз, легким ударом можно вызвать возмущение основного потока энергии с последующими явлениями деградации: цепочка мгновенно разрывается от удара в верхней части ведомой ветви или происходит остановка контурного движения от удара в нижней части контура, на осевой линии сопла. Эти явления наблюдаются при испытании некоторых цепочек приблизительно в 10% проб. Солитон на отвердевшей цепочке при поперечном ударе может образоваться только при определенном сочетании параметров движения. Во время одного запуска цепочки длиной 1.2 м успешными были 100% проб, но такой случай является редким событием.

Различие реакций системы на внешние и внутренние нарушения равновесия проявляется в поразительной податливости жесткого участка цепочки прохождению волн большой амплитуды. Этот кажущийся парадокс следует рассматривать как один из определяющих признаков для физической трактовки отвердевания цепочки: коллективный эффект самоорганизации – когерентность в контурном движении сопровождается эффектом гироскопической жесткости [7], в данном случае также коллективным, максимально выраженном при синфазных колебаниях звеньев.

Упомянутая выше цепочка с реальной изгибной жесткостью отличается тем, что в движении принимает форму, близкую к дуге окружности.

В контурном движении нити не происходит отвердевания, но факт существования когерентной структуры в зоне воздействия воздушного потока можно установить по косвенным признакам, из сравнения с движением цепочки.

В движении по замкнутому контуру нити некоторых видов разрываются через несколько секунд после начала движения; на воздействия или возмущения, которые нельзя считать малыми, замкнутая нить за срезом сопла отвечает реакцией типа взрывной неустойчивости.

Когерентная структура образуется также при сматывании нити с накопителя, т.е. в разомкнутой схеме движения, когда волноведущий элемент длины нити, проходя через воздушный поток, становится излучателем.

В одном из экспериментов при испытании пробных конструкций сопловых устройств определялась критическая скорость принудительного ввода нити в поток для соплового устройства с уменьшенным диаметром проточной части. Сматывание нити с паковки осуществлялось фрикционной парой роликов. Ни при какой скорости принудительной подачи нить не проходила через сопловое устройство, накапливаясь в проточной части. Но при извлечении нити из зажима фрикционной пары, т.е. при

свободном сматывании с накопителя нить двигалась без помех. Это свидетельствует о том, что когерентная структура возникает только при свободном движении гибкой системы, а также об устойчивости этой структуры к малым возмущениям.

В классификации возможных состояний нити в контурном движении под действием воздушного потока, принятой в работе [2], базовым, или идеальным считается устойчивое движение при $T_{\max} = 2T_{\min}$. В движении плетеной цепочки по замкнутому контуру последовательность стационарных состояний отражает общее для всех рассмотренных случаев свойство самоорганизации, расширяя представление об устойчивости стационарных движений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Климонтович Ю.Л.* Статистическая теория открытых систем. Т. 1. М.: Янус, 1995. 624 с.
2. *Пилипенко В.А.* О моделях контурного движения гибкой нити // Изв. РАН. МТТ. 1997. № 2. С. 185–195.
3. *Гузев М.А., Мясников В.П.* Калибровочно-инвариантная гидродинамика идеальной жидкости // Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 4. С. 25–29.
4. *Гузев М.А., Мясников В.П.* Термомеханическая модель упругопластического материала с дефектами структуры // Изв. РАН. МТТ. 1998. № 4. С. 156–172.
5. *Веденова Е.Г., Маневич Л.И.* Периодические и локализованные волны в виброударных системах регулярной структуры // Машиноведение. 1981. № 4. С. 21–30.
6. *Петухов С.В.* Биосолитон – тайна живого вещества. Основы солитонной биологии. М.: "ГП Кимрская типография", 1999. 288 с.
7. *Меркин Д.Р.* Гироскопические системы. М.: Наука, 1974. 344 с.

Москва

Поступила в редакцию
10.03.2000