

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИЗГИБНОЙ ЖЕСТКОСТИ И ГЕОМЕТРИИ ГИБКОГО КАБЕЛЯ В ГЛУБОКОВОДНЫХ УСЛОВИЯХ

В.В. Вельтищев, Г.Г. Кулиш, С.В. Цветков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

e-mail: gennadijkulish@yandex.ru

При эксплуатации глубоководной системы выяснилось, что кабель, связывающий телеуправляемый необитаемый подводный аппарат с судном обеспечения, при сходе с лебедки образует спиралевидную конфигурацию. Это создает дополнительную нагрузку на средства движения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата. Геометрия кабеля и его жесткость зависят от глубины погружения. В работе получены экспериментальные зависимости изгибной жесткости кабеля и радиуса витков кабеля после схода с барабана от наложенного гидростатического давления. Эксперименты проводились с образцами кабеля на установке высокого давления. В результате выявили, что изгибная жесткость кабеля увеличивается с возрастанием гидростатического давления до значения 20 МПа. При этом изгибная жесткость в 2,2 раза больше, чем при атмосферном давлении. Дальнейшее увеличение давления свыше 20 МПа не приводит к изменению изгибной жесткости кабеля. При размотке кабеля с барабана при атмосферном давлении радиус витков кабеля увеличивается более чем в 2 раза. При значениях давления более 20 МПа радиус витков кабеля незначительно отличается от радиуса барабана.

Ключевые слова: глубоководный аппарат, подводный кабель, гидростатическое давление, изгибная жесткость.

STUDYING THE VARIATIONS IN BENDING STIFFNESS AND GEOMETRY OF ELASTIC CABLE UNDER DEEP-WATER CONDITIONS

V.V. Vel'tishchev, G.G. Kulish, S.V. Tsvetkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

e-mail: gennadijkulish@yandex.ru

It has been revealed during the deep-water system exploitation that a cable, tethering the remotely operated unmanned underwater vehicle to its support vessel, forms a spiral configuration when unwinding from the winch drum. This creates an additional load for the motion aids of the remotely operated unmanned underwater vehicle. The cable geometry and its stiffness depend on the submersion depth. Experimental dependences of cable's bending stiffness and a radius of cable coils after unwinding from the winch drum on the external hydrostatic pressure are obtained. The experiments were conducted with cable samples at the high pressure facility. As a result, it has been detected that the cable's bending stiffness increases as the hydrostatic pressure grows to a value of 20 MPa. In this case the bending-stiffness value is 2,2 times larger than the value under the atmospheric pressure. The subsequent increase in pressure above 20 MPa does not lead to a change in the cable's bending stiffness. When the cable unwinds from the drum under the atmospheric pressure, the radius of cable coils increases more than twice that obtained under the higher pressure. At pressure values more than 20 MPa, the radius of cable coils differs insignificantly from the drum radius.

Keywords: deep-water vehicle, underwater cable, hydrostatic pressure, bending stiffness.

Важным элементом подводной привязной системы является кабель, связывающий судно обеспечения с телеуправляемым необитаемым подводным аппаратом (ТНПА). При сходе кабеля с барабана лебедки ТНПА на глубине формируется спиралевидная конфигурация. На рис. 1 приведен кадр видеосъемки с подводного аппарата “Мир” на глубине 1690 м. Кабель, соединяющий аппарат “Мир” и ТНПА “Фиш-103”, имеет диаметр 16 мм и первоначально был намотан без натяга на барабан диаметром 0,3 м. Получающаяся спиралевидная конфигурация кабеля эквивалентна цилиндрической пружине и создает дополнительную нагрузку на средства движения ТНПА.

Многожильный гибкий кабель представляет собой сложную механическую систему, в которой возможно относительное движение внутренних элементов кабеля в процессе его изгиба. При этом возникает сила трения между его элементами. В наземных условиях работа сил трения составляет от 15 до 40% общей работы на деформацию кабеля [1]. На глубине давление воды увеличивает силу трения между внутренними элементами кабеля, что приводит к увеличению его изгибной жесткости.

В настоящей работе описаны экспериментальные исследования изгибной жесткости кабеля и изменения его геометрии при изгибе в условиях внешнего гидростатического давления. При этом под изгибной жесткостью кабеля понимается приведенная жесткость кабеля, являющаяся комбинацией жесткости при изгибе элементов кабеля и сдвиге этих элементов относительно друг друга.



Рис. 1. ТНПА “ФИШ-103” при работах на АПЛ “Комсомолец”, глубина 1690 м

Исследования проводились на образцах кабеля 96444.1 производства фирмы Scorpion Oceanics Lmd. Кабель имеет типичную для подводной техники конструкцию и содержит в своем составе две силовые жилы для подачи электропитания на борт ТНПА и четыре витые пары для передачи сигналов телеуправления и телеметрии. Изоляция электрических цепей осуществляется армированным многослойным покрытием из полиамида.

Исследование изгибной жесткости кабеля в условиях внешнего гидростатического давления. Для данной цели использовалась камера высокого давления установки И-1 [2] и разработан ряд устройств, позволяющих нагружать образцы исследуемого кабеля на изгиб в условиях гидростатического давления. Одно из этих устройств показано на рис. 2, а.

Отрезки кабеля 5 клеивались эпоксидной смолой в отверстия пластин 8. Одна из пластин 8 соединена с основанием 9, а другая с основанием 10. К основанию 10 сверху крепится датчик 1 силы. Он представляет собой рамку из листовой стали толщиной 2 мм. Чувствительный элемент датчика силы — тензометрическая скоба 2, на которую наклеены тензодатчики 3. Снизу основания 10 расположен датчик 7 перемещения. Это гибкая пластина с наклеенными на нее тензодатчиками 6. При приложении вертикальной сжимающей нагрузки

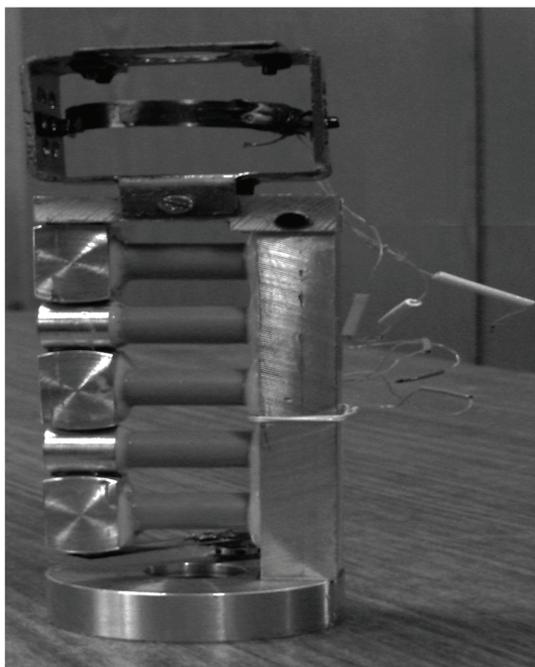
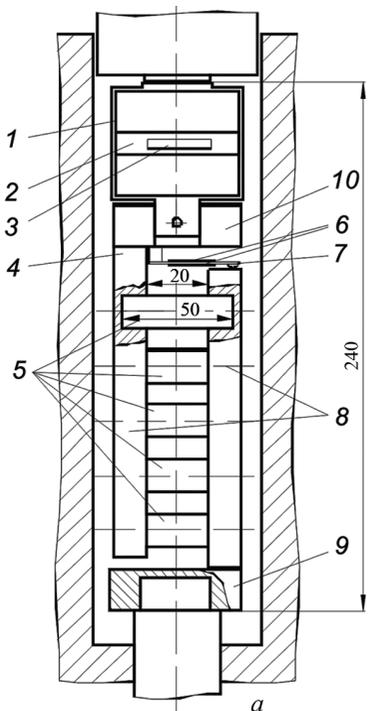


Рис. 2. Устройства I (а) и II (б) для определения изгибной жесткости кабеля в условиях гидростатического давления

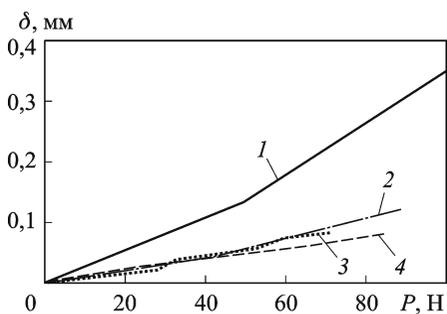


Рис. 3. Зависимости смещения от силы при атмосферном давлении (1); при 10 МПа (2); 20 МПа (3); 30 МПа (4)

устройству прикладывается штоком установки И-1, перемещающимся в вертикальном направлении.

Показания датчика силы и датчика перемещения через гермовыводы установки И-1 передаются на регистрирующую аппаратуру.

По полученным таким образом зависимостям перемещений от сил (рис. 3) при атмосферном давлении и давлениях 10, 20 и 30 МПа определялась изгибная жесткость кабеля

$$G = \frac{Pb^3}{60\delta}, \quad (1)$$

где P — сила, действующая на устройство; δ — смещение; b — свободная длина отрезка кабеля.

Второе устройство для определения жесткости образцов кабеля в зависимости от наложенного гидростатического давления показано на рис. 2, б. В этом устройстве образцы кабеля жестко заделывались только с одного конца и осуществлялось консольное нагружение образцов. В устройстве нагрузка передается на образцы через рычаг. Сила P , действующая на устройство и замеряемая датчиком силы, прикладывается в середине рычага.

В этом случае изгибная жесткость кабеля определялась по формуле

$$G = \frac{Pb^3}{30\delta}. \quad (2)$$

Испытания, проводимые с использованием различных устройств, показывали близкие значения жесткости при одинаковых значениях наложенного давления. Полученная зависимость жесткости кабеля от давления приведена на рис. 4.

Из представленных данных следует, что изгибная жесткость кабеля возрастает с увеличением внешнего гидростатического давления. Однако ее рост прекращается начиная с давления 20 МПа. При давлениях 20 и 30 МПа изгибные жесткости равны. При 30 МПа изгибная жесткость кабеля в 2,2 раза больше, чем при атмосферном давлении.

Физический смысл наблюдаемого явления — прекращение увеличения изгибной жесткости кабеля начиная с некоторого значения давления — имеет следующее объяснение. При атмосферном давлении в результате изгиба происходит перемещение внутренних элементов кабеля относительно друг друга. В условиях внешнего давления до 20 МПа перемещение затруднено из-за возрастания сил трения между элементами. При дальнейшем увеличении давления, начиная с некоторого значения, перемещение элементов прекращается, так как силы трения между ними становятся большими. Изгибная жесткость в этом случае определяется только механическими свойствами входящих в состав кабеля материалов.

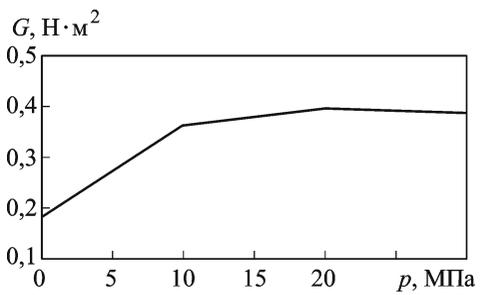


Рис. 4. Зависимость изгибной жесткости кабеля от внешнего гидростатического давления

Исследование изменения геометрии кабеля после схода с барабана лебедки в условиях гидростатического давления. Для определения радиуса витков кабеля после размотки в условиях гидростатического давления применялось устройство, чертеж которого показан на рис. 5.

Устройство содержит образец кабеля 1. Оба конца образца кабеля вклеены эпоксидной смолой в заглушки. Одна из заглушек (нижняя) крепится к основанию 5. К основанию 5 прикреплен калибр радиуса начального изгиба образца 6. Образец кабеля 1 с помощью распорного держателя 12 прижимается к калибру. Радиус кривизны осевой линии образца, прижатого к калибру, равняется 107,5 мм, что соответствует радиусу барабана лебедки 100 мм. Распорный держатель представляет собой пластину, один конец которой удерживает образец кабеля, а другой фиксируется на упоре 8. Для освобождения образца кабеля, после чего он может восстанавливать форму, в устройстве предусмотрен спусковой механизм, состоящий из кольца 9, пружины 10 и втулки 11.

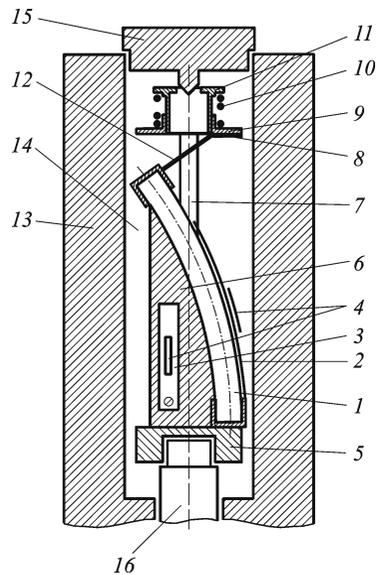


Рис. 5. Устройство для определения геометрии предварительно изогнутого образца кабеля после его освобождения в условиях гидростатического давления

Устройство помещается в камеру высокого давления установки И-1. При этом основание 5 прикручивается к подвижному штоку 16 установки. Камера высокого давления заполняется маслом и закрывается крышкой 15.

Для измерения кривизны образца кабеля в устройстве предусмотрен датчик измерения кривизны образца, представляющий собой отрезок тонкостенной упругой ленты с наклеенным тензодатчиком, которая изгибается вместе с образцом кабеля. Датчик подключен к измерительной аппаратуре.

Перед испытанием датчик тарируется с использованием шаблонов различной кривизны, которые помещаются между калибром и образцом кабеля.

В камере установки создается нужное по программе испытаний давление.

Подвижный шток 16 перемещается вверх с небольшой скоростью.

В какой-то момент втулка 11 упирается в крышку 15, пружина 10 сжимается и втулка 11 смещает распорный держатель 12 с упора 8. Распорный держатель 12 падает вниз и образец кабеля освобождается.

Процесс изменения радиуса кривизны кабеля по ходу испытаний записывается измерительной аппаратурой.

При испытаниях через отрезок времени примерно 300 с после срабатывания спускового механизма проводился сброс давления в камере до атмосферного и при этом записывалось изменение радиуса образца кабеля.

На рис. 6 показаны экспериментальные кривые изменения образца кабеля в зависимости от времени. На этом рисунке обозначено: t_0 — момент срабатывания спускового механизма; t_1 — момент сброса

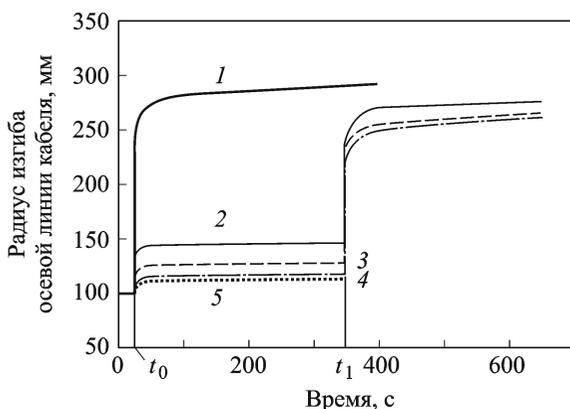


Рис. 6. Зависимость изменения радиуса средней линии образца кабеля от времени при давлении, МПа:

1 — 0; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 20; 5 — 30

давления до атмосферного. Диаграммы получены для разных первоначальных значений давления, при которых находился образец кабеля: атмосферном давлении; 5, 10, 20 и 30 МПа.

На рис. 7 приведены графики зависимости радиуса средней линии витков исследуемого кабеля после схода с барабана от гидростатического давления (кривая 1).

Из результатов проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

Значения кривизны кабеля после схода с барабана лебедки зависят от давления. Чем больше давление, тем больше кривизна.

При значениях давления более 20 МПа кривизна размотанного кабеля практически не меняется с увеличением давления.

При значениях давления 20...30 МПа значения кривизны размотанного кабеля незначительно отличаются от кривизны барабана, на который был намотан кабель (менее 5% сразу после освобождения кабеля, после прохождения релаксации — порядка 10%), в то время как при атмосферном давлении после освобождения образца кабеля его радиус увеличивается более чем в 2 раза.

Если после схода с барабана кабеля при некотором значении давления снизить его до атмосферного, то радиус витков кабеля дополнительно увеличивается. Значение этого окончательного радиуса слабо зависит от значения давления, при котором произошел сход кабеля с барабана.

Можно аналитически оценить значения радиуса спирали, которая получается при сходе кабеля с барабана в условиях гидростатического давления.

При намотке на барабан лебедки кабель получает необратимые пластические деформации и нагружается моментом M . Радиус витков кабеля, намотанного на барабан лебедки, R_0 . При размотке в условиях атмосферного давления радиус витков увеличивается и становится равным R_1 . Этот радиус можно определить по формуле

$$1/R_1 - 1/R_0 = -M/G, \quad (3)$$

где G — изгибная жесткость кабеля при атмосферном давлении.

Отсюда

$$R_1 = (R_0 G)/(G - MR_0). \quad (4)$$

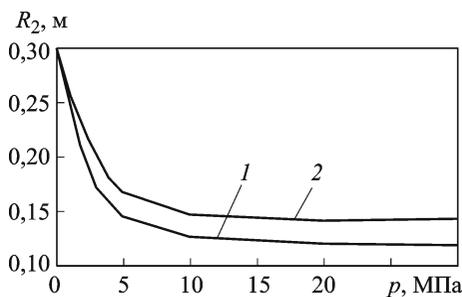


Рис. 7. Зависимость радиуса средней линии витков кабеля после схода с барабана лебедки от гидростатического давления:

1 — экспериментальные точки (значения после релаксации); 2 — расчет

При размотке в условиях гидростатического давления изгибная жесткость кабеля увеличивается в K раз. Радиус размотанных витков в этом случае будет

$$R_2 = (R_0 K G) / (K G - M R_0). \quad (5)$$

Как следует из последней формулы, R_2 зависит от момента M , который возникает при намотке кабеля на барабан лебедки. Момент M можно определить, если измерить радиус витка после размотки при атмосферном давлении R_1 , из (3). При этом считаем, что момент M не зависит от значений гидростатического давления:

$$M = G(R_1 - R_0)(R_1 R_0)^{-1}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), получим

$$R_2 = R_0 R_1 K (R_1 K + R_0 - R_1)^{-1}. \quad (7)$$

По формуле (7) на рис. 7 построен график изменения радиуса витков исследуемого кабеля после размотки в условиях гидростатического давления (кривая 2). При этом считается, что кабель первоначально был намотан на барабан радиусом 100 мм, т.е. радиус средней линии кабеля равнялся 107,5 мм. Радиус витка кабеля после размотки при атмосферном давлении $R_1 = 296,5$ мм и значения K при разных давлениях берутся из результатов проведенных экспериментов.

На рис. 7 видно, что формула (7) качественно описывает экспериментальную зависимость, но дает завышенные значения радиусов.

Полученные результаты имеют большое практическое значение, так как позволяют учесть повышение изгибной жесткости кабеля при энергетическом расчете исполнительных приводов лебедки, натяжных устройств и других силовых агрегатов кабельной проводки глубоководных робототехнических комплексов. Кроме того, достоверные параметры кабеля необходимы и при математическом моделировании пространственных конфигураций гибких кабельных линий телеуправляемых и буксируемых систем.

Используемая методика проведения экспериментов может быть использована как типовая при испытаниях вновь разрабатываемых конструкций глубоководных кабелей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Исмаилов Г. М., Соханев Б. В., Сапожков М. А.* Механические испытания гибких кабелей. Томск: Изд-во ТГУ, 1981. 145 с.
2. *Зиновьев П. А., Кулиш Г. Г., Цветков С. В.* Процессы деформирования и разрушения композиционных материалов при высокоинтенсивном трехосном нагружении. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 95 с.

REFERENCES

1. *Ismailov G. M., Sokhanev B. V., Sapozhkov M. A.* Mekhanicheskie ispytaniya gibkikh kabelei [Mechanical testing of elastic cables]. Tomsk, TGU Publ., 1981, 145 p.
2. *Zinov'ev P. A., Kulish G. G., Tsvetkov S. V.* Protsessy deformirovaniia i razrusheniia kompozitsionnykh materialov pri vysokointensivnom trekhosnom nagruzhenii [Processes of deformation and failure of composite materials under high intensity three-dimensional loading]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005, 95 p.

Статья поступила в редакцию 22.06.2012

Вадим Викторович Вельтищев — канд. техн. наук, зав. кафедрой “Подводные роботы и аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана, зав. отделом “Подводные системы” НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ в области подводных робототехнических комплексов.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

V.V. Vel'tishchev — Cand. Sci. (Eng.), head of “Underwater Robots and Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University, head of “Underwater Systems” department of the Research Institute of Special Machinery of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 70 publications in the field of underwater robotic complexes.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Геннадий Георгиевич Кулиш — заведующий лабораторией, старший преподаватель кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 48 научных работ в области динамики и прочности материалов и конструкций. Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

G.G. Kulish — head of laboratory, senior teacher of “Spacecrafts and Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 48 publications in the field of dynamics and strength of materials and structures.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.

Сергей Васильевич Цветков — заведующий сектором лаборатории композитов НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области механики твердого тела.

Московский государственный технический университет, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

S.V. Tsvetkov — head of sector in laboratory of composites of the Research Institute of Special Machinery of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of solid mechanics.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, stroenie 1, Moscow, 105005 Russia.