

УДК 678.06+678.02

DOI 10.47367/0021-3497_2024_4_221

**РАСЧЕТ РАВНОПРОЧНОГО УГЛА НАМОТКИ
АРМИРУЮЩЕГО СЛОЯ МНОГОСЛОЙНОГО ШЛАНГА***

**CALCULATION OF THE EQUAL STRENGTH WINDING ANGLE
OF THE REINFORCEMENT LAYER OF A MULTILAYER HOSE**

М.С. МИХАЙЛОВ¹, Ю.А. СОБОЛЕВА², М.А. КОЧАРОВ², С.В. ХЕЙЛО³, Э. П. САРИЕВ⁴

M.S. MIKHAILOV¹, Y.A. SOBOLEVA², M.A. KOCHAROV², S.V. KHEYLO³, E.P. SARIEV⁴

¹МИРЭА - Российский технологический университет,

²Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук,

³Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),

⁴ООО «СЕВЕРМАШ»

¹MIREA - Russian Technological University,

²Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences,

³The Kosygin Russian State University,

⁴LLC "SEVERMASH")

E-mail: mikhailov.mms@yandex.ru

Представлены результаты исследования, направленного на повышение характеристик износостойких шлангов для перистальтических насосных агрегатов (ПНА), используемых в различных отраслях промышленности. Основное внимание уделено выбору оптимального угла намотки армирующего элемента с целью обеспечения долговечности и надежности шлангов при эксплуатации в различных условиях. Исследование охватывает анализ полимерных композиционных материалов, таких как смеси на основе эластомера EPDM и полипропилена PP, которые обеспечивают оптимальное сочетание эластичности и прочности. Выявлено, что использование термопластического полиолефина (ТРО) и термопластического вулканизатора (TPV) способствует значительному увеличению износостойкости шлангов. Кроме того, в работе рассматриваются методы аналитического моделирования напряжений в шлангах с использованием системы компьютерного автоматизированного проектирования, которые показали необходимость определения равно-

* Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по проекту № 075-11-2022-027 по теме: «Создание высокотехнологичного серийного производства перистальтических насосных агрегатов для агрессивных сред с повышенными эксплуатационными свойствами».

прочного угла намотки армирующего материала. Исследование также выявило ограничения применения изучаемых материалов, связанные с их химической и температурной устойчивостью, указывая на необходимость дальнейшего анализа и модификации состава материалов. Результаты данного исследования могут быть использованы для улучшения качества и эксплуатационных характеристик шлангов для перистальтических насосов, что представляет значительный интерес для промышленности.

The results of an investigation aimed at improving the performance of wear-resistant hoses for peristaltic pumping units (PPU) used in various industrial sectors are presented. The focus is on selecting optimal construction materials and reinforcing elements to ensure the durability and reliability of hoses under aggressive conditions. The research encompasses an analysis of polymer composite materials, such as mixtures based on EPDM elastomer and polypropylene PP, which provide an optimal combination of elasticity and strength. The use of thermoplastic polyolefins (TPO) and thermoplastic vulcanizates (TPV) significantly increases the wear resistance of hoses. Additionally, the paper examines methods of analytical stress modeling in hoses, conducted using computer-aided design system, which demonstrated the necessity of determining an equal-strength angle of the reinforcing material winding. The study also revealed limitations of the materials under study, related to their chemical and temperature resistance, indicating the need for further analysis and modification of material compositions. The results can be utilized to enhance the quality and operational characteristics of hoses for peristaltic pumps, presenting significant interest to the industry.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, намотка, волокнистые материалы, эластомер, износостойкость, моделирование, шланг повышенной износостойкости.

Keywords: polymer composites, winding, fibrous materials, elastomer, wear resistance, modelling, hose of increased wear resistance.

Введение

Современная промышленность позволяет использовать полимерные композиционные материалы для решения проблем в разных отраслях [1...3]. Они используются при разработке шлангов повышенной износостойкости (ШПИ), благодаря чему изделие обладает всеми необходимыми свойствами для поддержания работоспособности. Еще одним зарекомендовавшим себя методом повышения рабочего ресурса является нанесение защитных покрытий, однако применение данного метода не является целесообразным в рамках повышения прочности и надежности ШПИ [4, 5].

Процесс изготовления шланга состоит из нескольких технологических этапов,

включая подготовку и обработку материала, приготовление и дозирование резиновых смесей, формирование резиновых заготовок, производство резиновых клеев и сборку изделий [6]. Конечным процессом является вулканизация резиновых изделий [7]. При разработке также активно может применяться математическое моделирование, позволяющее минимизировать дорогостоящие испытания и ускорить проектирование [8, 9].

Разрабатываемый ШПИ, входящий в состав перистальтических насосных агрегатов (ПНА), устанавливаемых на трубопроводы специализированного назначения, должен обеспечивать надежную работу ПНА по перекачиванию химически агрес-

сивных сред (кислотных, щелочных, горючих и абразивных) в условиях динамических циклических воздействий на ШПИ со стороны рабочего механизма насоса в течение установленного срока службы.

Перистальтический насосный агрегат используется в качестве дозирующих аппаратов в различных системах трубопроводов и технологического оборудования [10]. Конструкция перистальтических насосов не допускает смешивания перекачиваемого продукта с посторонними веществами и при этом сохраняет детали насоса от воздействия агрессивных сред [11]. Благодаря этим свойствам его применяют в строительстве для перемещения всевозможных смесей, в нефтяной промышленности для перекачивания высоковязких продуктов, в химической промышленности для дозирования полимеров, в добывающей промышленности, медицине [12, 13].

ПНА представляет собой машину с опцией самовсасывания [14]. Он имеет в своей конструкции корпус, на валу которого установлен ротор с роликами, а также ШПИ [15]. Принцип действия основан на пережатии гибкого шланга роликами с образованием запертых секций с жидкостью, которая при вращении ротора перемещается от точки всасывания к каналу нагнетания [16]. Основным свойством шланга является восприятие деформации с последующим восстановлением изначальной формы [17].

Методы

Для разработки конструкции ШПИ на стадии проектирования важным аспектом является подбор конструкционного материала исходя из требований, выдвинутых к шлангу. Для разрабатываемой конструкции это возможность транспортировки химически агрессивных высокоплотных (до 1500 кг/м^3) сред с твердыми включениями размером не более $0,2 \text{ мм}$ в объемной концентрации не более $0,1\%$. Согласно проведенным ранее исследованиям определены составы компонентов многослойного материала ШПИ:

1. Полимерная смесь на основе эластомера EPDM и полипропилена PP при содержании PP от 20 до 25 %, что соответствует термопластичным полиолефинам (ТРО).

2. Полимерная смесь на основе эластомера EPDM и полипропилена PP при содержании PP от 15 до 20 %, что соответствует термопластическим вулканизаторам (ТРВ).

3. Материал на основе эластомера EPDM как основной эластомер, выступающий в качестве эталонного для сравнения разработанных комбинаций.

EPDM (этиленпропилендиеновый мономер) представляет собой эластомер с широким спектром применения, который образуется серной или пероксидной вулканизацией. Благодаря своим свойствам (устойчивость к воде, водяному пару, озону, УФ-излучению, гидравлическим жидкостям) он используется во всем мире для изготовления шлангов, уплотнителей, изоляторов и соединителей.

Синтетический каучук EPDM, вулканизированный пероксидом, демонстрирует устойчивость: к сжатию и старению (что повышает срок службы); к спирту; горячей воде; пару (до $204,4 \text{ }^\circ\text{C}$); кетонам; органическим и неорганическим кислотам. ШПИ с уплотнительными кольцами из EPDM, отвержденного перекисью водорода, не должны использоваться в областях, где они контактируют со смазочными материалами и маслами, гидравлическими жидкостями на основе эфиров фосфорной кислоты, алифатическими углеводородами и минеральными маслами.

ТРО – смесь полипропилена PP и неретикулированного каучука EPDM, иногда содержащая низкий уровень поперечной сшивки для улучшения таких свойств, как термостойкость и устойчивость к сжатию. Эти материалы используются там, где требуется повышенная ударная вязкость по сравнению с обычными сополимерами полипропилена. Материал характеризуется невысокими значениями верхнего предела твердости (обычно 80 по шкале Шора А) и эластомерных свойств.

ТРВ представляет следующий уровень по сравнению с ТРО. Это также соединения из полипропилена и EPDM, однако они динамически вулканизированы на стадии смешивания. Уровни твердости варьируются от 45 по шкале Шора А до 45 по шкале

Шора D. В настоящее время разрабатываются новые TPV, называемые «Super TPVs», которые основаны на инженерных пластиках, смешанных с высокоэффективными эластомерами, способными обеспечить значительно улучшенную термическую и химическую стойкость.

Время эксплуатации ШПИ зависит от условий его работы и способа производства. Поэтому срок службы шланга, по которому ведется перекачивание под низким давлением, будет значительно больше, чем у шланга, работающего под высоким давлением. В то же время шланг со стенками неравной толщины будет находиться в рабочем состоянии на протяжении меньшего срока из-за возникновения колебаний давления жидкости.

Кроме вышеперечисленных причин, срок работы шлангов сокращают ошибки, возникающие при сборке, например, увеличение радиуса изгиба шланга или изменение его внутреннего сечения с круглого на эллиптическое; присутствие брешей в резиновом слое стенок; лишение шланга ровной части в области его соединения с муфтой, увеличение или уменьшение размеров данного фрагмента; несоответствие норме минимального радиуса изгиба шланга; сворачивание шланга вокруг оси. Еще один чрезвычайно распространенный источник неисправностей сопряжен с нарушением герметичности соединений.

Если при периодической работе возникает досрочный выход из строя шланга, важно правильно идентифицировать причину неисправности. Возможно возникновение выпуклостей с наружной части резинового слоя, обусловленное попаданием жидких веществ в армирующие элементы сквозь небольшие брешки во внутренней части трубки. Это влечет за собой понижение адгезионной прочности разных слоев и деформацию шланга. Изъяны внутренней стороны шланга (наличие в нем пор) тоже могут способствовать возникновению вздутий. На участке размещения фитинга могут присутствовать повреждения. Однако, даже если шланг производится без фитингов и армирующий слой будет представлен небольшим

количеством витков, остается некоторая вероятность наличия дефектов. При соприкосновении материалов разных армирующих слоев возможен фитинг-износ, возникающий в результате трения между проволоками разных армирующих слоев.

Таким образом, определено, что использование металлического армирующего материала в конструкции шланга повышенной износостойкости перистальтического насосного агрегата приведет к преждевременному выходу из строя эластичного рабочего элемента и всей конструкции ПНА. Поэтому в условиях циклического нагружения эластичного элемента внутренним давлением рабочей среды и внешним механическим воздействием прижимного элемента для дальнейшего проектирования в качестве армирующего слоя необходимо использовать мягкую полиэфирную сетку или текстильную оплетку.

Таким образом, оптимальным вариантом конструкционного исполнения ШПИ для разрабатываемого перистальтического насосного агрегата является многослойная конструкция, состоящая из полимерного материала, армируемого нейлоновым мягким кордом (рис. 1: 1 – наружная стенка; 2 – армирующий слой; 3 – внутренняя стенка).

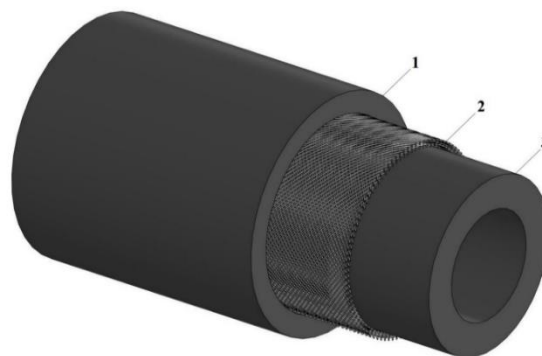


Рис. 1

Для повышения прочности и долговечности ШПИ при воздействии циклической внешней нагрузки в виде внутреннего давления транспортируемой жидкости и внешнего давления прижимного элемента необходимо определить равнопрочный угол намотки армирующего слоя (угол намотки, при котором нагрузка распределяется равномерно

между всеми нитями шланга и не превышает максимально допустимое значение).

Установить параметры напряжений и разработать конструкцию шлангов, состоящих из многослойных материалов, с применением механизма намотки можно, используя разные подходы к волокнистым материалам. В одном из них стенки шланга, содержащие волокна и высокомолекулярную матрицу, считаются гомогенными анизотропными средами. Данное утверждение возможно, так как масштабная разница между габаритами силовой конструкции и компонентами шланга, включающими в себя волокнистый наполнитель, крайне значительна. Использование описанного способа подразумевает оценку средних упругих свойств стенок ШПИ в соответствии со степенью упругости их составляющих. Далее благодаря полученным данным можно произвести необходимые расчеты изотропных ШПИ, содержащих анизотропные волокнистые соединения.

Другая модель предполагает, что армирующий слой шланга состоит из системы гибких нитей, которые воспринимают всю нагрузку от внешних воздействий. Равное натяжение каждой нити обеспечивает оптимальное соотношение сил каждого слоя. Модель не учитывает несущую способность композита, однако материал рассматривается как полностью эластичный, обладающий единой структурой.

Если использовать линейную модель напряженно-деформированного состояния при растяжении гибких нитей до их разрушения, то основным критерием работоспособности шланга является условие равномерного распределения напряжений между всеми армирующими нитями.

Для конструирования данного варианта ШПИ с применением численного анализа необходима разработка модели с равномерно распределенными напряжениями, при которой каждая нить армирующего слоя испытывает напряжения, не превышающие максимально допустимые для нее значения.

Для определения угла намотки армирующего материала разработана и подобрана аналитическая модель, подходящая под

разрабатываемую конструкцию шланга повышенной износостойкости.

Равнопрочность ШПИ означает его способность выдерживать максимальные нагрузки в местах повреждения, если напряжения в нитях одинаковы и меньше уровня прочности армирующего слоя при растяжении. Это условие также означает достижение максимальной деформационной энергии в момент разрушения шланга. Однако возможности создания равнонапряженных конструкций методом намотки существенно ограничены, поскольку форма и паттерн армирования конструкции тесно связаны и определяются строго. Это объясняется основным принципом метода намотки, заключающимся в непрерывности намотки нитей, где каждый слой формируется через непрерывное и последовательное распределение армирующего материала по всей поверхности шланга. Безостановочная намотка с радиусом вращения r_0 , количеством n нитей, пролегающих через широту конструкции, занимающих при этом площадь f_{KM} , с углом намотки $\beta = \beta_r$ будет описываться формулой:

$$h_r \cos \beta = h_0 r_0 \cos \beta_0 = \text{const}, \quad (1)$$

где h_0 и β_0 – толщина и угол намотки на максимальном радиусе намотки $r = r_0$.

Выразим переменную толщину армирующего слоя ШПИ с полимерным материалом (композитной конструкции) $h_{KM} = h_r$ в следующем виде:

$$h_{KM} = h_r = \frac{nf_{KM}}{2\pi r \cos \beta} = \frac{h_0 r_0 \cos \beta_0}{r \cos \beta}, \quad (2)$$

где f_{KM} – площадь поперечного сечения одной нити армирующего слоя с полимером.

Для определения меридиональных N_1 и окружных N_2 сил для армирующего слоя ШПИ с полимером запишем следующие соотношения:

$$\begin{cases} N_1 = PR, \\ N_2 = \frac{P}{2\pi R} + \frac{\cos \beta}{\pi R^2} (M + Ql), \end{cases} \quad (3)$$

где R – радиус цилиндра; Q – внешняя нагрузка; P – осевая сила тяжести; M – из-

гибающий момент, соответствующий максимальному изгибающему моменту при движении прижимного элемента.

Силы N_1 и N_2 , возникающие в стенке при действии внешней нагрузки, будут восприниматься однонаправленным армирующим материалом. Каждая прядь наклонена к меридиану под углом β и натянута с силой F (рис. 2).

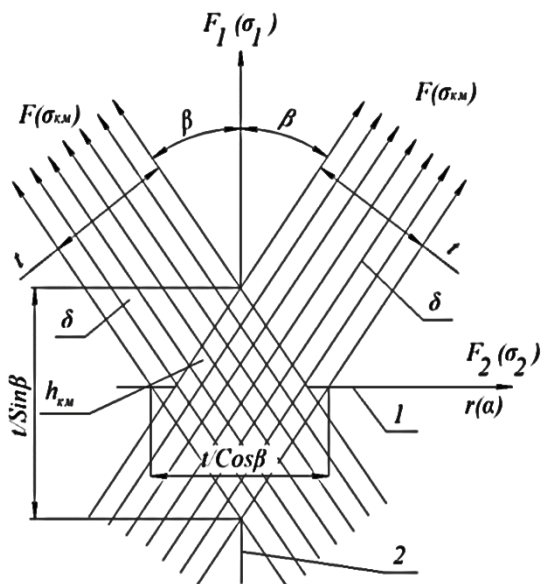


Рис. 2

Напряжение растяжения по направлению волокон будет вычисляться по формуле:

$$\sigma_{KM} = \frac{F}{t\delta}, \quad (4)$$

где δ – половина толщины КМ; t – ширина КМ.

Спроецируем силы F на координатные оси и запишем соотношения:

$$\begin{cases} F_1 = 2F \cos \beta, \\ F_2 = 2F \sin \beta. \end{cases} \quad (5)$$

Вычислив отношение проекции сил к площади сечения прядей, ориентированных вертикально и горизонтально, можно вывести формулы для напряжений:

$$\sigma_1 = \frac{F_1 \cos \beta}{2t\delta} = \sigma_{KM} \cos^2 \beta, \quad (6)$$

$$\sigma_2 = \frac{F_2 \sin \beta}{2t\delta} = \sigma_{KM} \sin^2 \beta. \quad (7)$$

Умножая левую и правую стороны этих уравнений на толщину $h_{KM} = 2\delta$, получаем значения сил, рассчитываемые по формулам:

$$N_1 = \sigma_1 h = \sigma_{KM} h_{KM} \cos^2 \beta, \quad (8)$$

$$N_2 = \sigma_2 h = \sigma_{KM} h_{KM} \sin^2 \beta. \quad (9)$$

Отношение уравнений сил N_1 и N_2 позволяет записать формулу:

$$\frac{N_1}{N_2} = \operatorname{tg}^2 \beta. \quad (10)$$

В конструкции, находящейся в равновесии, нельзя брать случайное расположение витков нитей, соответственно произвольные углы $\beta(r)$, так как задан меридиан $u(r)$. Точно так же, если определены углы намотки, то оболочка должна иметь определенную форму. Поэтому нужно вычислить конкретные параметры меридиана, дающие возможность создания одновременно безмоментной, равновесной и равнонапряженной конструкции.

Чтобы установить необходимые углы намотки, необходимо использовать переменную величину толщины стенки $h_{KM} = h_r$, получим формулы:

$$N_2 = \sigma_2 h_r = \frac{\sigma_{KM} h_0 r_0 \cos \beta_0 \sin^2 \beta}{r \cos \beta}, \quad (11)$$

$$N_1 = \sigma_1 h_r = \frac{\sigma_{KM} h_0 r_0 \cos \beta_0 \cos \beta}{r}. \quad (12)$$

Не беря в расчет угол β и рассматривая равнонапряженную конструкцию, для которой $\sigma_{KM}(r) = \sigma_{KM} = \text{const}$, можно вычислить:

$$N_1^2 + N_1 N_2 = \frac{(\sigma_{KM} h_0 r_0 \cos \beta_0)^2}{r^2} = \frac{A^2}{r^2}, \quad (13)$$

где A – константа.

Армирование шлангов высокого давления способствует созданию конструкций, одновременно равновесных и равнонапряженных, обеспечивая необходимую эластичность и прочность, что увеличивает их долговечность. Корректное расположение нитей на поверхности, отсутствие скольжения возможно достичь за счет намотки по геодезическим линиям на поверхности вращающейся образующей. В таком случае

для каждого типа волокон достигается оптимальное натяжение, что в итоге позволяет получить максимальную прочность материала в шланге.

На поверхности напряжения равны согласно формуле:

$$\sigma_{KM}(r) = const. \quad (14)$$

В этом случае волокна нитей несут всю нагрузку на растяжение, что обусловлено следующим:

$$\sigma_{KM} = \sigma_B \vartheta_B + \sigma_{MET} \vartheta_{MET} \approx \sigma_B \vartheta_B. \quad (15)$$

Заключение

В исследовании разработан и проанализирован износостойкий многослойный шланг для перистальтических насосов. Использование смесей на основе эластомера и полипропилена, а также термопластических полиэфиров и вулканизаторов значительно улучшило его эластичность и прочность. В исследовании выявлен преждевременный износ шланга от металлического армирования и предложена полиэфирная сетка для увеличения долговечности.

Аналитическое моделирование напряжений в шлангах позволило определить значение равнопрочного угла намотки армирующего материала.

Полученные результаты важны для производства шлангов, применяемых в различных отраслях промышленности, и способствуют улучшению их качества и эксплуатационных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Muranov A.N., Alexandrov I.A., Kapitanov A.V., Egorov S.B. Thermokinetic Diagram of Curing of an EHD–MD Chlorine-Containing Epoxy Binder // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2021. № 15(1). P. 156...160.
2. Михеев П.В., Муранов А.Н., Гусев С.А. Экспериментальное определение модуля межслоевого сдвига слоистого углепластика // Конструкции из композиционных материалов. 2015. № 4(140). С. 46...50.
3. Муранов А.Н., Александров И.А. Чувствительность коэффициента линейного теплового расширения терморазмеростабильных композитных ламинатов к отклонениям угла армирования // Вестник МГТУ "Станкин". 2019. № 4(51). С. 56...59.

4. Vereschaka A., Milovich F., Andreev N. etc. Efficiency of Application of (Mo, Al)N-Based Coatings with Inclusion of Ti, Zr or Cr during the Turning of Steel of Nickel-Based Alloy // Coatings. 2021. №11(11). P. 1271.

5. Vereschaka A., Milovich F., Andreev N. etc. Comparison of properties of ZrHf-(Zr,Hf)N-(Zr,Hf,Cr,Mo,Al)N and Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N nanostructured multilayer coatings and cutting properties of tools with these coatings during turning of nickel alloy // Journal of Manufacturing Processes. 2023. №88. P. 184...201.

6. Глобин А.Н., Краснов И.Н., Копица Р.В. Перистальтические насосы: монография. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 148 с.

7. Боброва В.В., Прокопчук Н.Р., Ефремов С.А., Нечипуренко С.В. Биокomпонент для эластомерных композиций // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2023. №1.

8. Tatarcanov A.A., Alexandrov I.A., Mikhailov M.S., Muranov A.N. Algorithmic Approach to the Assessment Automation of the Pipeline Shut-Off Valves Tightness // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2021. №12. P. 147...162.

9. Александров И.А., Муранов А.Н., Червяков Л.М. Вопросы обеспечения гибкости машиностроительных производств // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 5(361). С. 40...47.

10. Гринин А.И. Влияние на характеристику линейного перистальтического насоса формы сечения и длины сжимаемых участков // Известия МГТУ МАМИ. 2021. №2. С. 9...17.

11. Abello J., Raghavan S., Yien Y.Y., Stratman A.N. Peristaltic pumps adapted for laminar flow experiments enhance in vitro modeling of vascular cell behavior // Journal of Biological Chemistry. 2020. №10.

12. Васильева М.А., Волчихина А.А., Морозов М.Д. Оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства // ГИАБ. 2021. №6.

13. Васильева М.А. Магнитные перистальтические насосы для закладочных работ // Известия Уральского государственного горного университета. 2020. №1. С. 150...155.

14. Kim E.K., Kang B.M., Lee H.G. etc. Energy-efficient self-locking micropump system using single bistable electromagnetic actuator // Sensors and Actuators A: Physical. 2023. №351.

15. McIntyre M.P., van Schoor G., Uren K.R., Kloppers C. P. Modelling the pulsatile flow rate and pressure response of a roller-type peristaltic pump // Sensors and Actuators A: Physical. 2021. №325.

16. Луговая И.С. Классификация гидравлических систем для перекачивания высоковязких жидкостей // Наука и техника. 2019. №5.

17. Gasoto S. C., Schneider B., Setti J. A. P. Study of the Pulse of Peristaltic Pumps for Use in 3D Extrusion Bioprinting // ACS Omega. 2022. P.24091...24101.

REFERENCES

1. *Muranov A.N., Alexandrov I.A., Kapitanov A.V., Egorov S.B.* Thermokinetic Diagram of Curing of an EHD–MD Chlorine-Containing Epoxy Binder // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2021. № 15(1). P. 156...160.
2. *Mikheev P.V., Muranov A.N., Gusev S.A.* Experimental determination of interlayer shear modulus of layered carbon fibre-reinforced plastic // *Structures of composite materials*. 2015. № 4(140). P. 46...50.
3. *Muranov A.N., Alexandrov I.A.* Sensitivity of the coefficient of linear thermal expansion of thermo-dimensionally stable composite laminates to the deviation of the reinforcement angle // *Bulletin of MSTU "Stankin"*. 2019. № 4(51). P. 56...59.
4. *Vereschaka A., Milovich F., Andreev N. etc.* Efficiency of Application of (Mo, Al)N-Based Coatings with Inclusion of Ti, Zr or Cr during the Turning of Steel of Nickel-Based Alloy // *Coatings*. 2021. №11(11). P. 1271.
5. *Vereschaka A., Milovich F., Andreev N. etc.* Comparison of properties of ZrHf-(Zr,Hf)N-(Zr,Hf,Cr,Mo,Al)N and Ti-TiN-(Ti,Cr,Al)N nanostructured multilayer coatings and cutting properties of tools with these coatings during turning of nickel alloy // *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. №88. P. 184...201.
6. *Globin A.N., Krasnov I.N., Kopitsa R.V.* Peristaltic Pumps: A Monograph. Moscow: IP Media, 2023. 148 p.
7. *Bobrova V.V., Prokopchuk N.R., Efremov S.A., Nechipurenko S.V.* Biocomponent for Elastomer Compositions // *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technologies, Biotechnology, Geoecology*. 2023. №1.
8. *Tatarkanov A.A., Alexandrov I.A., Mikhailov M.S., Muranov A.N.* Algorithmic Approach to the Assessment Automation of the Pipeline Shut-Off Valves Tightness // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2021. №12. P. 147...162.
9. *Aleksandrov I.A., Muranov A.N., Cherviakov L.M.* Issues of ensuring the flexibility of machine-building production // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2023. № 5(361). P. 40...47.
10. *Grinin A.I.* Influence on the Characteristics of a Linear Peristaltic Pump of the Cross-Section Shape and Length of the Compressed Sections // *News of MSTU MAMI*. 2021. №2. P. 9...17.
11. *Abello J., Raghavan S., Yien Y.Y., Stratman A.N.* Peristaltic pumps adapted for laminar flow experiments enhance in vitro modeling of vascular cell behavior // *Journal of Biological Chemistry*. 2020. №10.
12. *Vasileva M.A., Volchikhina A.A., Morozov M.D.* Equipment and Technologies for Work on Backfilling the Developed Space // *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021. №6.
13. *Vasileva M.A.* Magnetic Peristaltic Pumps for Backfilling Operations // *News of the Ural State Mining University*. 2020. №1. P. 150...155.
14. *Kim E.K., Kang B.M., Lee H.G., Yoon H.M., Kim J.H., Jung J.W.* Energy-efficient self-locking micropump system using single bi-stable electromagnetic actuator // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2023. №351.
15. *McIntyre M.P., van Schoor G., Uren K.R., Kloppers C. P.* Modelling the pulsatile flow rate and pressure response of a roller-type peristaltic pump // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. №325.
16. *Lugovaya I.S.* Classification of Hydraulic Systems for Pumping High-Viscosity Liquids // *Science and Technique*. 2019. №5.
17. *Gasoto S. C., Schneider B., Setti J. A. P.* Study of the Pulse of Peristaltic Pumps for Use in 3D Extrusion Bioprinting // *ACS Omega*. 2022. P. 24091...24101.

Рекомендована ИКТИ РАН. Поступила 06.05.24.