

УДК 67.05

DOI 10.47367/0021-3497_2022_1_253

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДНА ФИЛЬЕРНОГО ПИТАТЕЛЯ
ВОЛНООБРАЗНОЙ ФОРМЫ СТЕКЛОПЛАВИЛЬНОГО АППАРАТА**

**THE RESEARCH AND CALCULATION OF THE STREAM FEEDER
ASSEMBLY BOTTOM OF THE WAVY FORM
FOR THE GLASS-MELTING MACHINE**

*А.В. КАНАТОВ, Э.В. ФЕДОРОВ, Н.А. ВИНОГРАДОВ,
Н.В. ЧУГУЙ, А.А. КУЛАКОВ*

*A.V. KANATOV, E.V. FEDOROV, N.A. VINOGRADOV,
N.V. CHUGUI, A.A. KULAKOV*

(Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: kanatov-av@rguk.ru; eduard_fedorov_1995@mail.ru; nik.vin2012@yandex.ru;
chuguj-nv@rguk.ru; kulakov-aa@rguk.ru

***Одним из главных направлений использования непрерывного стеклянного
и базальтового волокна является производство композитных материалов.***

***По сравнению с традиционными материалами композиты на основе ба-
зальтовых и стеклянных нитей обладают рядом преимуществ: коррозион-***

ной стойкостью, химической инертностью, низким коэффициентом теплопроводности и др. Поэтому для удовлетворения нужд промышленности и снижения себестоимости производства непрерывных стеклянных и базальтовых нитей важно продолжать работы по модернизации и разработке новых конструкций наиболее ответственного элемента стеклоплавильного агрегата – фильерного питателя (ФП).

В представленной исследовательской работе рассмотрены особенности работы стеклоплавильного оборудования и разработана конструкция фильерного питателя с волнообразным дном. Приведены результаты компьютерного моделирования и расчета с целью минимизации деформаций дна ФП в процессе его работы.

Цель статьи – провести анализ результатов компьютерного моделирования и расчета фильерного питателя с волнообразным дном с целью оптимизации процесса изготовления непрерывного стеклянного волокна и увеличения срока службы стеклоплавильного агрегата.

One of the most important ways of continuous fibers usage is manufacturing of different composite materials.

The materials made of fiberglass and basalt fibers have a lot of advantages, for example, rust resistance, unreactiveness, low heat conductivity, etc.

It is very important to work on improvement and engineering of new units of the glass-melting machine, especially its main unit – the stream feeder assembly – to provide industry and decrease the cost of production.

In the article the features of the glass-melting equipment are discussed. The structure of the stream feeder assembly with wavy-formed bottom is engineered. One can also find the results of computer simulation technique and calculations to minimization of stream feeder assembly strain during its operation.

The purpose of the article is to present an analysis of the results of computer simulation technique and calculations of the stream feeder assembly with wavy-formed bottom to improvement continuous fiberglass production and increase durability of the glass-melting machine.

Ключевые слова: стеклоплавильный агрегат, фильерный питатель, фильерная пластина, фильера, непрерывные стеклянные и базальтовые нити, композитные материалы, непрерывные и дискретные волокна.

Keywords: glass-melting machine, stream feeder assembly, forming bushing, bushing, continuous fiberglass and basalt fibers, composite materials, continuous fibers and discrete fibers.

Стекланным называют химическое неорганическое волокно, изготовленное различными способами из расплавленного стекла. Стекланное волокно и композитные материалы на базе базальта обладают редким сочетанием свойств: высокой прочностью на изгиб, растяжение и сжатие, негорючестью, температуроустойчивостью, низкой гигроскопичностью, стойкостью к хи-

мическому и биологическому воздействию, сравнительно низкой плотностью [1...3].

Непрерывное стекланное волокно получают фильерным формованием пучка тонких мононитей из расплавленной стекло-массы с последующей вытяжкой, замасливанием и намоткой комплексной нити на бобину при высоких (10...100 м/с) линейных скоростях [4].

Фильерный питатель представляет собой малогабаритную электрическую печь сопротивления, изготовленную из сплава драгоценных металлов, в основном из платины и родия (рис.1 – фильерный питатель общий вид. 1 – фильерная пластина; 2 – фланец; 3 – патрубок; 4 – крышка; 5 – экран; 6 – отбортовка; 7 – боковая стенка; 8 – крылышки; 9 – токоподвод; 10 – ребро жесткости; 11 – торцевая стенка).

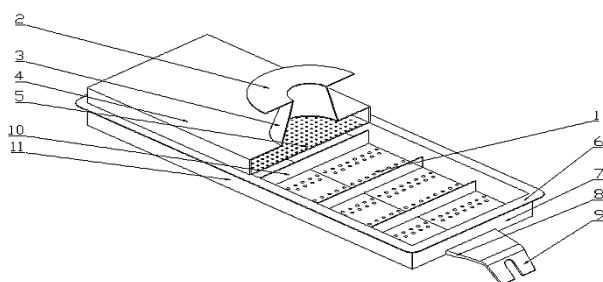


Рис. 1

Основным элементом конструкции, наиболее подверженным выходу из строя, является фильерная пластина, поэтому для проведения теоретических исследований по оптимизации процесса изготовления непрерывного базальтового волокна, а также с целью повышения сопротивления износостойкости в результате провисания, является востребованной разработка новой конструкции фильерной пластины [5], [6]

Дно фильерного питателя представляет собой тонкую прямоугольную пластину,

жестко закрепленную по всему контуру. В прямоугольных пластинах угол поворота сечения, прогиб и напряжения являются функциями двух независимых переменных (ширина и длина пластины) [5], [9]. Дно ФП является тонкой, но жесткой пластиной, поэтому для него справедливы следующие допущения: срединная плоскость пластины искривляется под действием равномерно распределенной нагрузки (давление расплава), но не растягивается: нормальные напряжения в сечениях, параллельных срединной плоскости малы, по сравнению с напряжениями в сечениях, перпендикулярных срединной плоскости, поэтому этими напряжениями можно пренебречь.

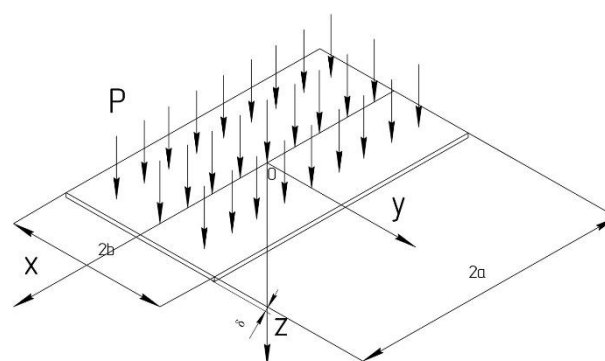


Рис. 2

Рассматривая сечения пластины (рис. 2) плоскостями $x = \text{const}$, $y = \text{const}$, $z = \text{const}$ до и после деформации, используя критерий начальных несовершенств, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_x = -\frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial y^2} \right), \\ \sigma_y = -\frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial x^2} \right), \\ \tau_{xy} = -\frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial x \partial y} \right), \\ M_x = -D \left(\frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial y^2} \right), \\ M_y = -D \left(\frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial x^2} \right), \\ M_{xy} = M_{yx} = -\frac{E}{1+\mu^2} \left(\frac{\partial^2(\omega-\omega_0)}{\partial x \partial y} \right); p = \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y}, \\ Q_x = -\frac{\partial M_x}{\partial x} - \frac{\partial M_{yx}}{\partial y}; Q_y = -\frac{\partial M_y}{\partial y} - \frac{\partial M_{xy}}{\partial x}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где σ_x и σ_y – нормальные напряжения; τ – касательные напряжения; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона матери-

ала пластины при соответствующей температуре; ω и ω_0 – полный и начальный прогиб пластины; D –цилиндрическая жест-

кость пластины; M_x, M_y – изгибающих моментов; Q_x, Q_y – интенсивность поперечных сил соответствующих в направлении осей x и y .

Примем для прогибов следующие выражения:

$$\omega = \frac{f}{4} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{a}\right) \left(1 + \cos \frac{\pi y}{b}\right),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(f - f_0)}{\partial x} &= \frac{\partial(f - f_0)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial^2(\omega - \omega_0)}{\partial x^2} &= \frac{f - f_0}{4} \left(1 + \cos \frac{\pi y}{b}\right) \frac{\pi^2}{a^2} \cos \frac{\pi x}{a}, \\ \frac{\partial^2(\omega - \omega_0)}{\partial y^2} &= \frac{f - f_0}{4} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{a}\right) \frac{\pi^2}{b^2} \cos \frac{\pi y}{b}. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку нас интересует напряжение в центре пластины ($x=0, y=0, z=\delta/2$):

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E\pi^2 \delta (f - f_0)}{4(1 - \mu^2)} \left(\frac{b^2 + \mu a^2}{a^2 b^2}\right), \\ \sigma_y &= \frac{E\pi^2 \delta (f - f_0)}{4(1 - \mu^2)} \left(\frac{a^2 + \mu b^2}{a^2 b^2}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

а интенсивность напряжений в точках ($x=0, y=0, z=\delta/2$):

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2}. \quad (5)$$

Основным недостатком существующей конструкции является недостаточно высокий запас прочности фильерной пластины, что приводит к искажению ее геометрии, соответственно к браку изделия и ускоренному выходу из строя фильерного питателя (рис. 3 – фильерный питатель с искаженной геометрией фильерной пластины), что в свою очередь приводит к недостаточно длительному сроку службы фильерного питателя и способствует развитию таких дефектов, как неравномерность разогрева фильерной пластины, неравномерность распределения температур массы по высоте, что приводит к низкому качеству непрерывного волокна [7], [8].

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{f_0}{4} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{a}\right) \left(1 + \cos \frac{\pi y}{b}\right), \\ \omega - \omega_0 &= \frac{f - f_0}{4} \left(1 + \cos \frac{\pi x}{a}\right) \left(1 + \cos \frac{\pi y}{b}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

где f и f_0 значения полного и начального прогиба.

Уравнение удовлетворяют условиям защемления, так как при $x = \mp a$ и $y = \mp b$



Рис. 3

В связи с этим предложена новая конструкция корпуса фильерного питателя. Основным отличием предложенной конструкции является использование волнообразной фильерной пластины с переходами на прямоугольные перфорированные зоны в местах крепления фильер взамен стандартной фильерной пластины прямоугольной формы. Такая конструкция позволяет минимизировать недостатки прямоугольной фильерной пластины. Оснащение фильерного питателя фильерной пластины волнообразной формы взамен стандартной прямоугольной повышает жесткость за счет увеличения площади контакта опорных граней и работы самой пластины на изгиб вместо растяжения [9], [10].

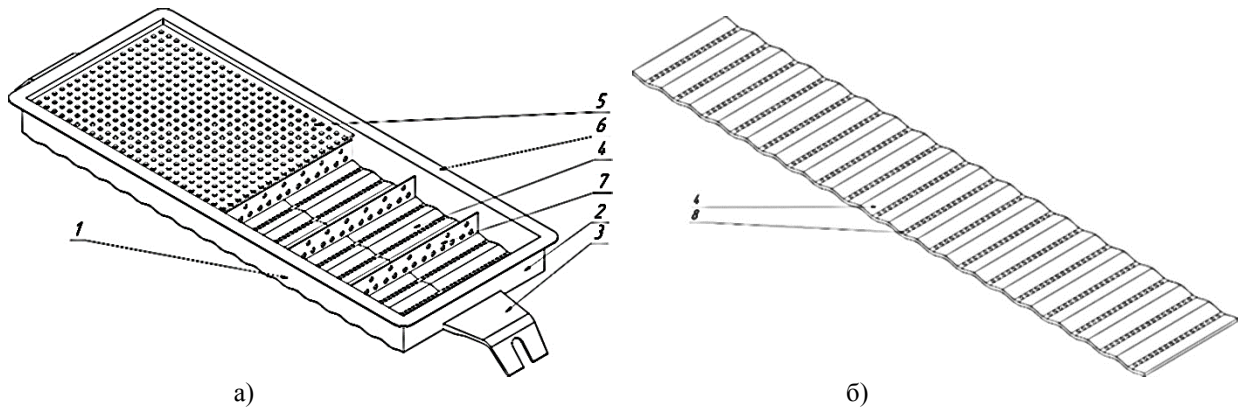


Рис. 4

Многофильерный питатель (рис. 4: а – многофильерный питатель, общий вид, совмещенный с разрезом; б – дно фильерного питателя) содержит электрообогреваемый корпус, образованный боковыми 1, торцевыми 2 стенками с токоподводами 3 и волнообразной фильерной пластиной 4 с фильерами, а также электрообогреваемый перфорированный фильтровальный экран 5, жестко закрепленный на корпусе над волнообразной фильерной пластиной 4. К волнообразной фильерной пластине 4 прикреплены перфорированные поперечные ребра жесткости, каждое из которых образовано пластиной 7. В верхней части к боковым 1 и торцевым 2 стенкам закреплена отбортовка 6. Волнообразная фильерная пластина имеет переходы на перфорированную зону 8 в местах крепления фильер.

При работе многофильерного питателя за счет его оснащения волнообразной фильерной пластиной, а также за счет выполнения поперечных ребер жесткости из вертикального плоского профиля, увеличивается жесткость многофильерного питателя в целом, что исключает деформацию фильерной пластины и фильтровального экрана и способствует повышению срока эксплуатации многофильерного питателя.

Для сохранения непрерывной работы ФП (фильерного питателя) в течение длительного срока важным является обеспечение сохранения механической прочности элементов, в первую очередь, фильерной пластины.

Недостатком данной конструкции является увеличение количества используемого материала на 5...10%.

Для проверки возможности использования волнообразной пластины в качестве дна ФП были проведены расчеты по трем основным характеристикам: максимальным и минимальным напряжениям, перемещениям и деформации в 3-х главных направлениях (X, Y, Z), а для увеличения срока службы и нахождения оптимальных параметров рассчитаны фильерные пластины волнообразной формы с различной кривизной (рис. 5...9: рис. 5 – график зависимых переменных от номера испытания, рис. 6 – график минимальных нормальных напряжений; рис. 7 – график максимальных нормальных напряжений; рис. 8 – график минимальных смещений; рис. 9 – график максимальных смещений).

Исследования проводились¹ для фильерной пластины волнообразной формы с размерами 400x72 мм и толщиной фильерной пластины в 2 мм относительно прямоугольной фильерной пластины, используемой в стандартных стеклоплавильных аппаратах, при стандартном напряжении в 0,046 МПа. Образующая фильерной пластины волнообразной формы описывается функцией $y = a \cos\left(\frac{x\pi}{b}\right)$, где $2a$ – амплитуда колебаний, мм; $2b$ – половина длины волны, мм; x – высота расположения перфорированной зоны, мм; радиус фильерных отверстий, мм; $d\ell$ – расстояния между фильерными отверстиями, мм.

¹ Результаты исследования были получены путем расчета в программе SOLIDWORKS Simulation.

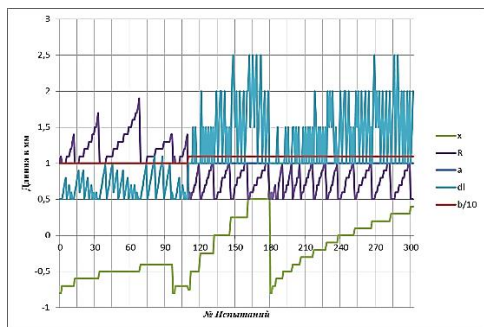


Рис. 5

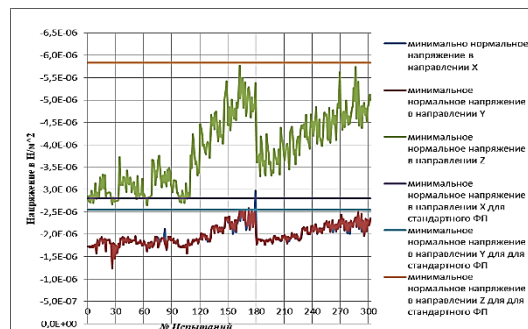


Рис. 6

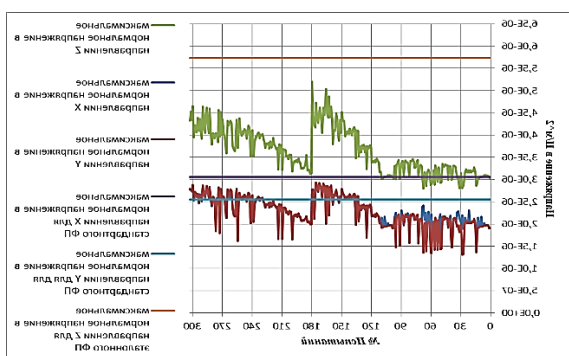


Рис. 7

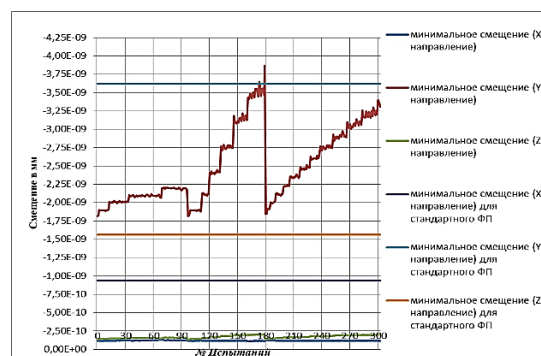


Рис. 8

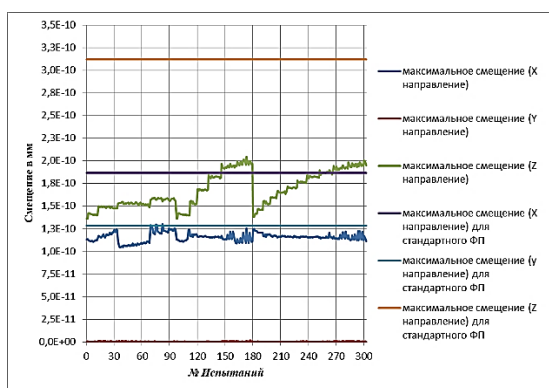


Рис. 9

По результатам теоретических исследований установлено, что фильтровая пластина волнообразной формы имеет большое преимущество по сравнению с традиционной прямоугольной.

Оснащение многофильтрового питателя фильтровой пластиной волнообразной формы взамен стандартной прямоугольной повышает жесткость за счет увеличения площади контакта опорных граней и работы самой пластины на изгиб вместо растяжения.

Для нахождения оптимальных параметров кривизны волны фильтровой пластины были смоделированы и рассчитаны пита-

тели в программе SOLIDWORKS Simulation.

По результатам расчета определено, что для достижения минимизации деформации дна фильтрового питателя диапазон отношения длины волны образующей волнообразной фильтровой пластины к длине фильтровой пластины должен составлять 0,1...0,2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бизюк А.Н., Ясинская Н.Н. Имитационное моделирование пористой структуры армирующих химических нитей // Вестник Витебского государственного технологического университета – 2017, №32. С. 33...40.
2. Парманчук В.В., Ольшанский В.И. Теплофизические свойства многослойных теплоизоляционных материалов // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2014, № 27. С. 87...93.
3. Степанов С.Г., Джаннаицова В.М., Мырхалыков Ж.У., Кенжибаева Г.С., Туракулов Б.С. Математическая модель строения технических тканей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 4. С. 79...83.
4. Коротеева Л.И., Яскин А.П., Лехтинен О.В. Исследование формирования пакетов при намотке нитей оптического стекловолокна // Изв. вузов. Тех-

нология текстильной промышленности. – 1998, № 3. С. 86..88.

5. Грачев М.С., Коротева Л.И. О влиянии усилия вытягивания на прочность дна фильеры // Химические волокна. – 2007, № 5. С. 47...50.

6. Васекин В.В., Перельман С.Л., Улыбышев В.В. Опыт разработки конструкций щелевых фильерных питателей в технологиях производства базальтовых волокон // Драгоценные металлы. Драгоценные камни. – М.: МАИ, 2008, № 6. С. 167...170.

7. Васекин В.В., Перельман С.Л., Улыбышев В.В., Ястребов В.А. Фильерные питатели с объемной фильерной пластиной // Мат. I Междунар. конф.: Производство оборудования из благородных металлов и его применение в химической и силикатной промышленности. Берлин, 2005. – М.: АСМИ, 2005 С. 199...206.

8. Гаврилова А.А., Винокуров Г.Г., Кычкин А.К., Оreshko С.М. Технологические характеристики формования базальтовых непрерывных волокон при фильерном способе их получения // Изв. Самарского научного центра РАН. – 2013. Т. 15, № 4 (2). С.448...450.

9. Канатов А.В., Федоров Э.В., Кулаков А.А. Проблемы ускоренного износа фильерного питателя в результате провисания фильерной пластины из платино-родиевых сплавов // Сб. мат. Междунар. научн.-техн. конф.: Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2020). – 2020. С. 273...276.

10. Никулин М.Д., Канатов А.В., Коротева Л.И. Исследование и выбор оптимальных параметров модульной конструкции корпуса фильерного питателя. // В сб. научн. тр. Междунар. Косыгинского форума: "Современные задачи инженерных наук", международный научно-технический симпозиум "Современные инженерные проблемы в производствах товаров народного потребления". – М.: РГУ имени А.Н. Косыгина, 2019. С. 217...222.

REFERENCES

1. Bizyuk A.N., Yasinskaya N.N. Imitatsionnoe modelirovanie poristoy struktury armiruyushchikh khimicheskikh nitey // Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta – 2017, №32. С. 33...40.

2. Parmanchuk V.V., Ol'shanskiy V.I. Teplofizicheskie svoystva mnogosloynnykh teploizolyatsionnykh materialov // Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2014, №27. С. 87...93.

3. Stepanov S.G., Dzhhanpaizova V.M., Myrkhal'kov Zh.U., Kenzhibaeva G.S., Turakulov B.S. Matematicheskaya model' stroeniya tekhnicheskikh tkaney dlya proizvodstva termoplastichnykh kompozitsionnykh materialov po sokrashchennoy tekhnologii // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 2020, № 4. С. 79...83.

4. Koroteeva L.I., Yaskin A.P., Lekhtinen O.V. Issledovanie formirovaniya paketov pri namotke nitey opticheskogo steklovolokna // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. – 1998, № 3. С. 86..88.

5. Grachev M.S., Koroteeva L.I. O vliyaniy usiliya vtyagivaniya na prochnost' dna fil'ery // Khimicheskie volokna. – 2007, № 5. С. 47...50.

6. Vasekin V.V., Perel'man S.L., Ulybyshev V.V. Opyt razrabotki konstruktsey shchelevykh fil'ernykh pitateley v tekhnologiyakh proizvodstva bazal'tovykh volokon // Dragotsennyye metally. Dragotsennyye kamni. – М.: МАИ, 2008, № 6. С. 167...170.

7. Vasekin V.V., Perel'man S.L., Ulybyshev V.V., Yastrebov V.A. Fil'ernyye pitateli s ob'emnoy fil'ernooy plastinooy // Мат. I Mezhdunar. конф.: Proizvodstvo oborudovaniya iz blagorodnykh metallov i ego primenenie v khimicheskoy i silikatnoy promyshlennosti. Berlin, 2005. – М.: АСМИ, 2005 С. 199...206.

8. Gavrilova A.A., Vinokurov G.G., Kychkin A.K., Oreshko S.M. Tekhnologicheskie kharakteristiki formovaniya bazal'tovykh nepreryvnykh volokon pri fil'ernom sposobe ikh polucheniya // Izv. Samarskogo nauchnogo tsentra RAN. – 2013. Т. 15, № 4 (2). С.448...450.

9. Kanatov A.V., Fedorov E.V., Kulakov A.A. Problemy uskorennogo iznosa fil'ernogo pitatelya v rezul'tate provisaniya fil'ernooy plastiny iz platino-rodievyykh splyavov // Sb. mat. Mezhdunar. nauchn.-tekhn. конф.: Dizayn, tekhnologii i innovatsii v tekstil'noy i legkoy promyshlennosti (INNOVATsII-2020). – 2020. С. 273...276.

10. Nikulin M.D., Kanatov A.V., Koroteeva L.I. Issledovanie i vybor optimal'nykh parametrov modul'noy konstruktsey korpusa fil'ernogo pitatelya. // V sb. nauchn. tr. Mezhdunar. Kosygin'skogo foruma: "Sovremennyye zadachi inzhenernykh nauk", mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskyy simpozium "Sovremennyye inzhenernyye problemy v proizvodstvakh tovarov narodnogo potrebleniya". – М.: РГУ имени А.Н. Косыгина, 2019. С.217...222.

Статья опубликована по материалам Косыгинского форума . Поступила 25.10.21.