

СТАТЬИ

УДК 539.4:553.2

ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ СКОРОСТЬЮ ДЕФОРМАЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТОМ ВЯЗКОСТИ БАЗАЛЬТОВОГО РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ ВОЛОКНООБРАЗОВАНИЯ

Айдаралиев Ж.К., Исманов Ю.Х., Кайназаров А.Т.

*Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры
им. Н. Исанова, Бишкек, e-mail: i_yusupjan@mail.ru*

В любом производстве изделий на основе минеральных волокон одним из основных видов оборудования, входящего в линию по производству изделий из волокна, являются установки для формирования базальтового ковra, или так называемые камеры волокноосаждения. От их совершенства зависит качество готовых изделий. В настоящее время существует несколько широко используемых в промышленности способов получения минеральных волокон из расплава, которые и обуславливают различные типы и конструкции камер волокноосаждения. Во всех камерах формование минераловатного ковra происходит под действием гидродинамических сил. Поэтому изучение таких гидродинамических характеристик, как скорости падения отдельных волокон и сгустков из этих волокон и гидродинамическое сопротивление ковra, имеет первостепенное значение при проектировании новых и реконструкции старых камер волокноосаждения. В данной работе исследована взаимосвязь между скоростью деформации и коэффициентом вязкости базальтового расплава в процессе волокнообразования при посредстве дутьевой головки, разработанной авторами. Дано обоснование процесса волокнообразования с помощью дутьевой головки. Получены соотношения, устанавливающие зависимость скорости деформации в струе волокна от вязкости расплава. Получены экспериментальные данные, по которым можно оценить влияние месторождения базальтов на зависимость скорости деформации от вязкости базальтового расплава. Установлено, что высокоскоростная деформация расплава сильно влияет на качество волокон и на количество отходов при производстве волокон.

Ключевые слова: базальтовый расплав, минеральные волокна, скорость деформации, коэффициент вязкости, дутьевая головка

RELATIONSHIP BETWEEN THE DEFORMATION SPEED AND THE VISCOSITY COEFFICIENT OF THE MOLTEN BASALT IN THE PROCESS OF FORMATION OF FIBERS

Aidaraliev Zh.K., Ismanov Yu.Kh., Kaynazarov A.T.

*Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov,
Bishkek, e-mail: i_yusupjan@mail.ru*

In any production of products based on mineral fibers, one of the main types of equipment included in the line for the production of fiber products is installations for forming a basalt carpet, or the so-called fiberizing chambers. The quality of finished products depends on their perfection. Currently, there are several widely used in industry methods for producing mineral fibers from melt, which determine the various types and designs of fiberization chambers. In all chambers, the formation of mineral wool carpet occurs under the influence of hydrodynamic forces. Therefore, the study of such hydrodynamic characteristics as the rate of fall of individual fibers and clumps of these fibers and the hydrodynamic resistance of the carpet are of paramount importance in the design of new and reconstruction of old chambers. In this paper, we study the relationship between the strain rate and the viscosity coefficient of basaltic melt during fiber formation using a blow head developed by the authors. The substantiation of the process of fiber formation using a blowing head is given. Relations are obtained that establish the dependence of the strain rate in the fiber stream on the viscosity of the melt. Experimental data have been obtained that can be used to evaluate the effect of a basalt deposit on the dependence of the strain rate on the viscosity of a basalt melt. It was found that high-speed deformation of the melt greatly affects the quality of the fibers and the amount of waste in the production of fibers.

Keywords: molten basalt, mineral fibers, strain rate, viscosity coefficient, blow head

Современная теория волокнообразования из расплавов горных пород, в том числе базальтового расплава, в некоторой степени отражает физический механизм этого сложного процесса и определяет пути совершенствования методов получения неорганических волокон.

В работах [1–3] достаточно подробно описан процесс образования волокна из расплава горных пород. В указанных

работах рассматриваются различные схемы образования волокна. В одной из схем за основу берется предварительное расщепление расплавленной струи каким-либо энергоносителем на отдельные структуры (карли), из которых затем получают волокна посредством вытягивания. Предлагается также схема в виде прямого вытягивания волокон из горного расплава, которое происходит за счет трения, возникающего

между энергоносителем и непосредственно расплавом.

Кроме того, в работах [4–6] рассмотрен процесс волокнообразования в присутствии акустического поля. Показано, что при построении теории волокнообразования в присутствии акустического поля желательно брать за основу капиллярно-волновую и кавитационную гипотезы.

В любом производстве изделий на основе минеральных волокон одним из основных видов оборудования, входящего в линию по производству изделий из волокна, являются установки для формирования базальтового ковra, или так называемые камеры волокноосаждения [7–9]. От их совершенства зависит качество готовых изделий. В настоящее время существует несколько широко используемых в промышленности способов получения минеральных волокон из расплава, которые и обуславливают различные типы и конструкции камер волокноосаждения. Во всех камерах формирование минераловатного ковra происходит под действием гидродинамических сил. Поэтому изучение таких гидродинамических характеристик, как скорости падения отдельных волокон и сгустков из этих волокон и гидродинамическое сопротивление ковra, имеет первостепенное значение при проектировании новых и реконструкции старых камер волокноосаждения [1].

Целью настоящей работы является исследование взаимосвязи между скоростью деформации и коэффициентом вязкости базальтового расплава в процессе волокнообразования при помощи дутьевой головки.

Материалы и методы исследования

В наших исследованиях была использована дутьевая головка [10], представленная на рис. 1.

Дутьевая головка состоит: из корпуса 1 с вводом 2, через который подается энергоноситель; верхнего покрытия 3 с отверстием 4 в центре и вводом 5, через который подается расплав; разъемного стакана 6 с фланцем 7, размещенного коаксиально корпусу 1; кольцевого сопла 8, образованного стаканом 6 и сопловым патрубком 5; генератора акустических колебаний 9, образованного кольцевой проточкой во фланце 7 стакана 6; досопловой 10 и подсопловой 11 камер между собой посредством кольцевого сопла 8, тангенциальных каналов 12 и дополнительных прямоструйных сопел 13, которые выполнены во фланце 7 стакана 6. Такая конструкция дутьевой голов-

ки обеспечивает ее эффективную работу и получение супертонкого базальтового волокна диаметром 0,6–2,5 мкм и длиной 30–50 мм (рис. 2).

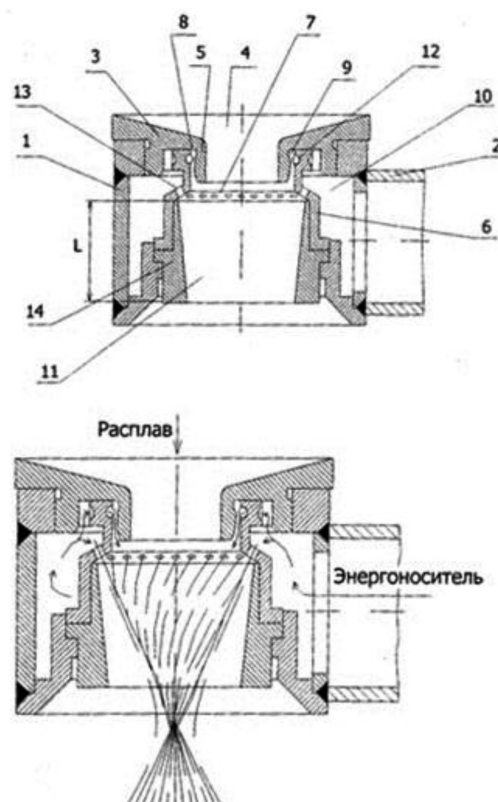


Рис. 1. Дутьевая головка для получения супертонких волокон диаметром 0,5–2,5 мкм

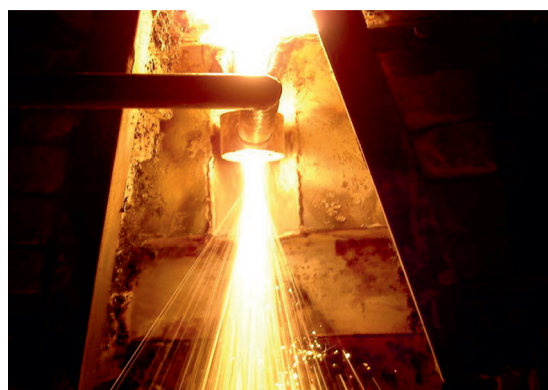


Рис. 2. Расщепление базальтового расплава в волокно

Для описания процесса расщепления волокна в дутьевой головке представим входящий расплав в виде стержня из вязкого вещества (базальтового расплава) с беско-

нечно малыми сдвиговыми характеристиками в поперечном направлении и находящегося под действием растягивающих сил $\pm F$, приложенных к его концам.

Согласно теории вязкого течения [11–12] распределение скоростей образующих течение частиц вокруг неподвижной нейтральной точки описывается следующими формулами:

$$\vartheta_x = \alpha x, \vartheta_y = -\frac{1}{2}\alpha y, \vartheta_z = -\frac{1}{2}\alpha z, \quad (1)$$

где $\alpha(t)$ – параметр, характеризующий градиент скорости. Он зависит от времени. Если обозначить длину стержня (из базальтового расплава) через $l(t)$, то для момента времени t получаем согласно формуле (1):

$$\frac{dl}{dt} = \alpha \frac{l}{2}, \quad (2)$$

где $\alpha/2$ – коэффициент линейного растяжения базальтового расплава (стержня) за единицу времени.

Для определения зависимости коэффициента α от приложенной силы F заметим, что работа:

$$A = F \cdot \frac{dl}{dt} = \frac{1}{2} Fl\alpha. \quad (3)$$

Малые смещения частиц упругого тела под действием внешних сил можно охарактеризовать вектором смещения, который зависит от трех пространственных координат $s(x, y, z)$.

Изменение положения частиц по отношению к выбранной точке можно описать с помощью градиента вектора смещения вдоль радиус-вектора:

$$\frac{ds}{dr} = \frac{1}{2} \left(\frac{ds}{dr} + \nabla s \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{ds}{dr} - \nabla s \right). \quad (4)$$

Даже при малых внешних воздействиях, но, если их длительность велика, происходят изменения среды, характерные при деформациях. Следовательно, при деформациях частицы среды приобретают определенную скорость. Описать смещения в структуре среды при условии, что длительность внешнего воздействия очень мала, можно с помощью вектора перемещения, который пропорционален скорости частиц среды:

$$s(x, y, z) = \vartheta(x, y, z)\Delta t.$$

Выражение для скорости через его пространственные компоненты имеет вид:

$$\vartheta = \begin{pmatrix} \vartheta_x \\ \vartheta_y \\ \vartheta_z \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Деформация жидкости определяется значениями производных скоростей вблизи данной точки, т.е. при изучении деформаций упругих тел важны не столько векторы перемещений, сколько значения скоростей частиц среды. Изменение скоростей частиц среды вблизи рассматриваемой точки можно задать следующим соотношением:

$$\vartheta(r + dr) = \vartheta(r) + \frac{d\vartheta}{dr}r. \quad (6)$$

Производная вектора скорости вдоль радиус-вектора, выраженная через пространственные компоненты, может быть представлена в виде следующей матрицы:

$$\frac{d\vartheta}{dr} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} & \frac{\partial \vartheta_1}{\partial y} & \frac{\partial \vartheta_1}{\partial z} \\ \frac{\partial \vartheta_2}{\partial x} & \frac{\partial \vartheta_2}{\partial y} & \frac{\partial \vartheta_2}{\partial z} \\ \frac{\partial \vartheta_3}{\partial x} & \frac{\partial \vartheta_3}{\partial y} & \frac{\partial \vartheta_3}{\partial z} \end{pmatrix}; \nabla \vartheta = \left(\frac{d\vartheta}{dr} \right)^T. \quad (7)$$

Если соотношение (6) рассматривать как тензор, то его можно представить в виде суммы тензоров скоростей деформации и вращения:

$$\frac{d\vartheta}{dr} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\vartheta}{dr} + \nabla \vartheta \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{d\vartheta}{dr} - \nabla \vartheta \right). \quad (8)$$

Изменение скорости при удалении от рассматриваемой точки вдоль некоторого радиус-вектора, начало которого находится в этой точке, можно выразить через ротор поля векторов скоростей изучаемой среды:

$$\vartheta(r + dr) = \vartheta(r) + \vartheta_{ik} dr + \frac{1}{2} \text{rot} \vartheta \times dr. \quad (9)$$

Здесь ϑ_{ik} – тензор скоростей среды, он определяется соотношением:

$$\vartheta_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\vartheta}{dr} + \nabla \vartheta \right). \quad (10)$$

Или в матричном представлении:

$$\vartheta_{ik} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \vartheta_1}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \vartheta_2}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \vartheta_3}{\partial z} + \frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta_2}{\partial y} \right) & \frac{\partial \vartheta_2}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \vartheta_3}{\partial z} + \frac{\partial \vartheta_2}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \vartheta_1}{\partial x} + \frac{\partial \vartheta_3}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \vartheta_2}{\partial y} + \frac{\partial \vartheta_3}{\partial z} \right) & \frac{\partial \vartheta_3}{\partial z} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Применение формулы (11) для описания работы (работа рассчитывается на единицу объема среды) сил внутреннего трения, обусловленных вязкостью среды, дает следующее соотношение:

$$A = 2\eta \sum_i \sum_k \vartheta_{ik}^2. \quad (12)$$

В случае рассмотрения движения, описываемого формулами (1), $\vartheta_{11} = \alpha$, $\vartheta_{22} = \vartheta_{33} = -\alpha/2$, остальные компоненты тензора ϑ_{ik} обращаются в нуль.

Полная работа сил трения во всем объеме стержня $V = Sl$ (S – поперечное сечение в рассматриваемый момент) выражается следующей формулой:

$$A = \frac{3}{2} \eta V \alpha^2.$$

Приравняв ее к работе растягивающей силы $F(dl/dt)$, мы получаем следующее соотношение для коэффициента α (градиента скорости течения):

$$3\eta V \alpha^2 = Fl\alpha,$$

т.е.

$$\alpha = \frac{lF}{3\eta V}. \quad (13)$$

Для описания процесса волокнообразования в дутьевой головке воспользуемся уравнением энергодоланса в следующем виде:

$$\frac{3}{2} \eta V \alpha^2 + \frac{d(\sigma S)}{dt} = \frac{1}{2} Fl\alpha. \quad (14)$$

Здесь η – вязкость базальтового расплава; V – объем расплава; α – градиент скорости деформации; σ – поверхностное натяжение базальтового расплава; S – площадь поверхности; F – вытягивающая сила; l – длина.

Первое слагаемое в уравнении (14) представляет собой работу сил внутреннего трения, второе слагаемое определяет скорость

изменения поверхностной энергии, правая часть описывает работу внешних сил. При достаточно больших скоростях вытяжки волокон работа, затрачиваемая на преодоление вязкости, значительно превосходит работу, затрачиваемую на преодоление сил поверхностного натяжения, т.е.:

$$\frac{3}{2} \eta V \alpha^2 = \frac{1}{2} Fl\alpha. \quad (15)$$

Приведем уравнение (15) к следующему виду: $\frac{3}{2} \eta V \alpha = \frac{1}{2} Fl$.

Используя (2), получаем $\frac{1}{l^2} \frac{dl}{dt} = \frac{F}{6\eta V}$.

Принимая во внимание, что $V = Sl$ и $F = PS$, получаем:

$$\frac{1}{l} \frac{dl}{dt} = \frac{P}{6\eta} dt. \quad (16)$$

После интегрирования уравнения (16) получим:

$$l = l_0 \exp \left[\int_0^t \frac{P(t)}{6\eta(t)} dt \right]. \quad (17)$$

Здесь l – длина волокон; $P(t)$ – удельная сила, величина которой и зависимость ее от времени определяются конструкцией дутьевой головки, давлением подаваемого пара и другими факторами; l_0 – характерный размер элементарного объема струи расплава в начальный момент времени; $\eta(t)$ – вязкость расплава; t – время.

При условии, что плотность расплава в процессе охлаждения изменяется незначительно, из уравнения сохранения массы получаем:

$$V = V_0 = \frac{\pi d^2 l}{4} = \frac{\pi d_0^2 l_0}{4}.$$

Здесь V – объем волокна; V_0 – объем струи базальтового волокна.

Отсюда диаметр поперечного сечения волокна можно выразить через его длину:

$$d = 2\sqrt{V / \pi l}.$$

Площадь волокна или струи равна

$$s = 2\pi r^2 + 2\pi r l = 2\pi(r + l); r \ll l, s = 2\pi r l = \pi d l = 2\sqrt{\pi V l},$$

$$\frac{d(\sigma s)}{dt} \approx \sigma \frac{ds}{dt} = \sigma \frac{d2\sqrt{\pi V l}}{dt} = \sigma 2\sqrt{\pi V} \frac{1}{2\sqrt{l}} \frac{dl}{dt} = \sigma \sqrt{\pi V / l} \frac{dl}{dt},$$

$$\frac{\sigma ds}{dt} = \sigma \sqrt{\pi V / l} \frac{dl}{dt}, \quad (18)$$

$$\frac{3}{2} \eta V \alpha^2 = \frac{3}{2} \eta V \frac{\left(\frac{dl}{dt}\right)^2}{l^2}. \quad (19)$$

Сравнивая выражения (2) и (3), получаем формулу оценки:

$$\frac{\sigma \frac{ds}{dt}}{\frac{3}{2} \eta V \alpha^2} = \sigma \sqrt{\pi V / l} \frac{dl}{dt} \cdot \frac{2}{3} \frac{l^2}{\eta V \left(\frac{dl}{dt}\right)^2} = \sigma \sqrt{\pi V / l} \cdot \frac{2}{3} \frac{l^2}{\eta V \frac{dl}{dt}} = \frac{2}{3} \frac{\sigma}{\eta} \sqrt{\frac{\pi V l^2}{V^2}} \cdot \frac{1}{\frac{dl}{dt}} \cdot l =$$

$$= \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma}{\eta} \cdot \sqrt{\frac{\pi l}{V}} \cdot \frac{1}{\frac{dl}{dt}} \cdot l = \frac{2}{3} \cdot \frac{\sigma}{\eta} \cdot \frac{2}{d} \cdot \frac{1}{\frac{dl}{dt}} \cdot l = \frac{4}{3} \frac{\sigma}{\eta} \frac{1}{\frac{dl}{dt}} \frac{l}{d},$$

$$\frac{\sigma \frac{ds}{dt}}{\frac{3}{2} \eta V \alpha^2} = \frac{4}{3} \frac{\sigma}{\eta} \frac{1}{\frac{dl}{dt}} \frac{l}{d}.$$

На основании (14) и (18) имеем:

$$\frac{3}{2} \eta V \alpha^2 + \sigma \sqrt{\pi V / l} \cdot \frac{dl}{dt} = \frac{1}{2} F l \alpha,$$

$$\alpha = \frac{dl}{dt \cdot l},$$

$$\frac{3}{2l} \eta V \alpha^2 + \sigma \sqrt{\pi V / l} \cdot \frac{dl}{dt \cdot l} = \frac{1}{2} F \alpha,$$

$$\frac{3}{2l} \eta V \alpha^2 + \sigma \sqrt{\pi V / l} \cdot \alpha = \frac{1}{2} F \alpha,$$

$$\frac{3}{2l} \eta V \alpha^2 = \frac{1}{2} F \alpha - \sigma \sqrt{\pi V / l} \cdot \alpha, \quad \frac{3}{2l} \eta V \alpha^2 = \alpha \left(\frac{1}{2} F - \sigma \sqrt{\pi V / l} \right),$$

$$\frac{3}{2l} \eta V \alpha = \frac{1}{2} F - \sigma \sqrt{\pi V / l},$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2}F - \sigma\sqrt{\pi V/l}}{\frac{3}{2l}\eta V},$$

$$\alpha = \frac{\frac{1}{2}F - \sigma\sqrt{\pi V/l}}{\frac{3}{2l}\eta V} = \frac{\frac{1}{2}P \cdot S - \sigma\sqrt{\pi V/l}}{\frac{3}{2l}\eta V} = \frac{\frac{1}{2}P \cdot V/l - \sigma\sqrt{\pi V/l}}{\frac{3}{2l}\eta V} =$$

$$= \frac{\frac{1}{2}P \cdot \sqrt{V/l} \cdot \sqrt{V/l} - \sigma\sqrt{\pi V/l}}{\frac{3}{2l}\eta V} = \frac{\frac{1}{2}P \cdot \sqrt{V/l} - \sigma\sqrt{\pi}}{\frac{3}{2}\eta \cdot \sqrt{V/l}} = \frac{P}{3\eta} - \frac{2\sigma\sqrt{\pi}}{3\eta \cdot \sqrt{V/l}} =$$

$$= \frac{P}{3\eta} - \frac{2\sigma\sqrt{\pi}}{3\eta \cdot \sqrt{S}} = \frac{P}{3\eta} - \frac{2\sigma\sqrt{\pi}}{3\eta \cdot \sqrt{\pi r^2}} = \frac{P}{3\eta} - \frac{2\sigma}{3\eta \cdot r} = \frac{P}{3\eta} - \frac{4\sigma}{3\eta \cdot d} = \frac{1}{3\eta} \left(P - \frac{4\sigma}{d} \right),$$

$$\alpha = \frac{1}{3\eta} \left(P - \frac{4\sigma}{d} \right). \quad (19)$$

Технологические параметры и расчетные значения скорости деформации приведены в таблице.

Технологические характеристики расплавов из базальтовых горных пород

Месторождение	Вязкость, η Па·с, при t , °С				
	1450	1400	1350	1300	1250
Сулуу-Терек (Кыргызстан)	4,7	8,4	14,0	24,5	47,0
Берестовецкое (Украина)	3,6	6,2	10,2	18,2	35,4
Марнеульское (Грузия)	7,8	13,0	22,5	41,0	76,5
Давление энергоносителя, Р, кг/с	5				
Диаметр волокна, d, мкм	0,5–2,5				
Коэффициент поверхностного натяжения, среднее значение, σ , н/м	0,2–0,5				
Скорость деформации, с ⁻¹					
Сулуу-Терек (Кыргызстан)	4283,62	2396,79	1438,07	821,76	428,36
Берестовецкое (Украина)	5592,50	3247,26	1973,82	1106,21	568,73
Марнеульское (Грузия)	2581,15	1548,69	894,80	491,05	263,18

Из таблицы видно, что с увеличением температуры расплава его вязкость увеличивается, также увеличивается скорость деформации. Поэтому слишком большое увеличение малых деформаций может стать основой появления отходов волокнообразования. Экспериментально определена вязкость расплава в зависимости от химико-минералогического состава электродуговой печи для диапазона температур 1250–1450 °С [13–15]. В соответствии с полученными результатами из-

менение скорости деформации в процессе волокнообразования происходит в пределах 428,36–4283,62 с⁻¹.

Таким образом, при выходе за пределы скоростей деформации в процессе производства базальтовых волокон 15–25% базальтового расплава не попадает в готовое изделие – холст из базальтовых волокон. Возникает необходимость утилизации отходов производства или использования их в качестве сырья при создании новых композиционных материалов и изделий на их основе.

Выводы

1. Дано обоснование процесса волокнообразования с помощью дутьевой головки. Получены соотношения, устанавливающие зависимость скорости деформации в струе волокна от вязкости расплава.

2. Получены экспериментальные данные, по которым можно оценить влияние месторождения базальтов на зависимость скорости деформации от вязкости базальтового расплава.

3. Установлено, что высокоскоростная деформация расплава сильно влияет на качество волокон и на количество отходов при производстве волокон.

Список литературы

1. Ормонбеков Т.О. Техника и технология производства базальтовых волокон. Бишкек: Илим, 2010. 152 с.
2. Гурьев В.В., Тихонов Р.Д., Бегларов Э.М., Тихонова В.Р. Волокнообразование силикатных расплавов в акустическом поле // Стекло и керамика. 2011. № 11. С. 12–15.
3. Бегларов Э.М., Ковылов В.М. Физический механизм процесса волокнообразования // Огнеупоры. 1980. № 6. С. 27–29.
4. Димитриенко Ю.И. Нелинейная механика сплошной среды. М.: Физматлит, 2009. 624 с.
5. Емельянов В.Н. Механика сплошной среды: Теория напряжений и основные модели. М: Юрайт, 2018. 163 с.
6. Татаринцева О.С., Углова Т.К., Игонин Г.С., Бычин Н.В. Определение сроков эксплуатации базальтоволочнистых теплоизоляционных материалов // Строительные материалы. 2014. № 11. С. 14–15.
7. Веллис С.А., Каминкас А.Л., Верикас Т.К., Степанов И.Я. Теплопроводность влажных стекловолочнистых и минераловатных плит // Строительные материалы. 2012. № 6. С. 38–40.
8. Асланова М.С., Мясников А.А. Влияние химического состава базальтового волокна на его кислотоустойчивость // Стекло и керамика. 2014. № 5. С. 18–22.
9. Айдаралиев Ж.К., Кайназаров А.Т., Исманов Ю.Х., Абдиев М.С., Атырова Р.С., Сопубеков Н.А. Супертонкие волокна на основе алевролита и базальта, добываемых в Кыргызстане // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 5. С. 109–114. DOI 10.17513/mjrfi.12748.
10. Абдыкалыков А.А., Айдаралиев Ж.К., Сопубеков Н.А., Байсалов Э.А., Дубинин Ю.Н. Дутьевая головка // Патент на изобретение КР. Кыргызпатент № 1612. 2014.
11. Феннер Б., Ульрих М. Газовая вагранка – новая разработка для производства минеральной ваты // Базальтовые технологии. 2017. № 5. С. 27–31.
12. Закожурников С.С., Закожурникова Г.С. Оптимизация технологического процесса производства карбида кремния // Молодой ученый. 2016. № 9. С. 147–150.
13. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник КГУСТА. 2015. № 4 (40). С. 194–198.
14. Исманов Ю.Х. Голографическая интерферометрия на основе эффекта Тальбота // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 2. С. 20–23.
15. Ismanov Y.Kh., Tynyshova T.D., Aidaraliev Z.K. Wide-range holographic interferometer. Optical Engineering. 2018. № 57(12). 124106. DOI: 10.1117/1.OE.57.12.124106.