

11. Голиков Н.И., Сидоров М.М. Перераспределение остаточных сварочных напряжений при ультразвуковой ударной обработке сварных соединений стыков труб // Сварочное производство. 2011. № 5. С. 3–6.

12. Голиков Н.И., Сидоров М.М. Влияние ультразвуковой ударной обработки на ударную вязкость сварных соединений труб, изготовленных из сталей 09Г2С и 13Г1С-У// Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 7. С. 3–5.

13. Голиков Н.И., Сидоров М.М. Исследование перераспределений остаточных напряжений при циклическом нагружении сварных соединений // Сварочное производство. 2013. № 12. С. 18–20.

14. Голиков Н.И., Аммосов А.П. Прочность сварных соединений резервуаров и трубопроводов, эксплуатирующихся в условиях Севера. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2012. 232 с.

*Поступила в редакцию 10.02.2016*

УДК 669.041:536.24

## **Гидромеханика и технологические характеристики формования базальтовых непрерывных волокон при фильерном способе их получения**

А.А. Гаврильева, Г.Г. Винокуров, А.К. Кычкин  
*Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск*

*Для получения волокон с уникальными свойствами с целью последующего изготовления на их основе композиционных материалов наиболее приемлемым сырьем являются базальты – высокостабильные по химическому и минералогическому составу экструзивные горные породы магматического происхождения, запасы которых в мире практически неисчерпаемы, в том числе и запасы месторождения Республики Саха (Якутия). Получают базальтовые волокна при одностадийном технологическом процессе из однокомпонентного дешевого сырья – формование волокна производится из вязкого потока расплава базальта, вытекающего из фильеры. В настоящее время в производстве ООО «ТБМ» (г. Якутск) используют канал фильеры, который имеет вид цилиндра и для него ранее авторами были определены технологические характеристики формования базальтовых непрерывных волокон. В данной статье предлагается альтернативная геометрия канала фильеры для получения базальтового непрерывного волокна, которая состоит из усеченного конуса (конфузора) и цилиндра. Показано, что предлагаемая конструкция фильеры стабилизирует истечение расплава базальта, что повышает скорость вытяжки за счет улучшения физико-механических свойств получаемого волокна по сравнению с каналом постоянного сечения. Описана гидромеханика формования базальтовых непрерывных волокон на стадии истечения вязкого расплава через канал фильеры. А именно, получены аналитические формулы для инженерных расчетов распределения скорости потока и давления по каналу фильеры при малых углах конфузурности и малых числах Рейнольдса. На основе полученных зависимостей определен объемный расход расплава базальта через канал фильеры. Результаты исследований могут использоваться для выбора и оптимизации технологических режимов получения непрерывных базальтовых волокон из сырья месторождения Республики Саха (Якутия) на промышленной установке разработки НПК «Терм» ОАО «Стеклопластик».*

**Ключевые слова:** базальтовое непрерывное волокно, фильера, расплав, вязкость, гидромеханика.

## **Hydromechanics and Technical Characteristics of Formation of Continuous Basalt Fibres by Spinneret Method**

A.A. Gavrilieva, G.G. Vinokurov, A.K. Kychkin

*Institute of Physical-Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk*

---

ГАВРИЛЬЕВА Анна Андреевна – м.н.с., e-mail: gav-ann@yandex.ru; ВИНОКУРОВ Геннадий Георгиевич – к.т.н., в.н.с., e-mail: g.g.vinokurov@iptpn.ysn.ru; КЫЧКИН Анатолий Константинович – к.т.н., в.н.с., e-mail: kychkinplasma@mail.ru.

*For getting fibers with unique properties, for the purpose of the subsequent production on their basis of composite materials, the most acceptable raw materials are basalts – extrusive rocks of a magmatic origin, highly stable on chemical and mineralogical composition, which resource in the world are almost inexhaustible including resource of a field of the Republic of Sakha (Yakutia). Basalt fibers are produced by a single-stage technological process from unicomponent cheap raw materials. Formation of fiber is made from a viscous stream of melted basalt flowing from spinner. The alternative geometry of the channel spinning jet for making basalt continuous fiber which consists of the truncated cone and the cylinder is offered. It is shown that this construction of spinner stabilizes the basalt outflowing, that increases extract speed due to improvement of physico-mechanical properties of the fiber in comparison with the channel of constant section. The hydromechanics of basalt continuous fibers formation at a stage of the viscous melt outflow through the channel spinning jet is described. Exactly, analytical formulas of flow velocity and pressure distributions along channel of spinner are found at small entering angles and at small Reynold's number for engineering calculations. On the basis of the founded dependences the volume consumption of basalt melt along the channel of spinner is defined. Results of researches can be used for a choice and optimization of the technological modes of making continuous basalt fibers from raw materials of the Republic of Sakha (Yakutia) field on the industrial plant of NPK «Term» of JSC «Stekloplastik».*

Key words: continuous basalt fiber, spinneret method, melt, viscosity, hydromechanics.

### Введение

Для получения волокон с уникальными свойствами с целью последующего изготовления на их основе композиционных материалов наиболее приемлемым сырьем являются базальты – высокостабильные по химическому и минералогическому составу экструзивные горные породы магматического происхождения, запасы которых в мире практически неисчерпаемы. Получают базальтовые волокна при одностадийном технологическом процессе из однокомпонентного дешевого сырья [1], что значительно снижает их себестоимость по сравнению с другими волокнами, производимыми по многостадийным технологическим схемам. Главные преимущества базальтовых волокон – широкий диапазон температур применения (от  $-260$  до  $+900$  °C), стабильность свойств даже при продолжительной эксплуатации в разнообразных условиях, высокая стойкость в агрессивных средах и вибростойкость, низкая гигроскопичность, хорошая адгезия к различным связующим, пожаробезопасность, экологическая безопасность (не выделяют опасных для здоровья людей веществ в воздушной и водной средах), долговечность. Материалы и изделия на основе базальтовых волокон отличаются высокими конструкционными, теплозвукоизоляционными, диэлектрическими свойствами, позволяющими широко использовать их в различных отраслях промышленности: космической, авиа-, судо-, автомобилестроении, химической, нефтеперерабатывающей и др. [2–7].

Актуальность данной работы вызвана тем, что на данный момент одним из современных, перспективных и инновационных направлений развития Якутии и Севера России является развитие технологии, связанной с производством базальтового непрерывного волокна и композиционных материалов на его основе. Это обу-

словлено наличием в республике сырьевой базы для их производства и экономической целесообразностью замены традиционных материалов в виде металлов и сплавов, а также армированных органическими и неорганическими волокнами пластиков на базальтопластики [8].

В 2008 г., согласно Договору о научно-техническом сотрудничестве между филиалом НПК «Терм» ОАО «Стеклопластик» (г. Москва) и ООО «ТБМ» (г. Якутск), было запущено производство непрерывных базальтовых волокон с последующей переработкой их в ровинги и рубленые базальтовые волокна. По результатам научно-исследовательских работ было выбрано технологическое оборудование для серийного производства и определены его технологические режимы.

Основной стадией технологического процесса получения непрерывного базальтового волокна при фильерном способе его производства является стадия формирования материала, которая состоит из:

- истечения вязкого расплава через канал фильеры;
- вязкой деформации базальтовой массы под действием приложенных сил;
- отверждения при охлаждении.

В производстве непрерывных базальтовых волокон используются фильеры с постоянными сечениями, которые образуют фильерное поле; в отверстие фильеры вводится заклепка с каналом фильеры, где формируется волокно (рис. 1).

Канал фильеры имеет вид цилиндра и для него ранее авторами были определены технологические характеристики формования базальтовых непрерывных волокон [1].

Однако так как канал фильеры формирует заклепка, то изменяя ее геометрию, можно изменить технологические характеристики произ-

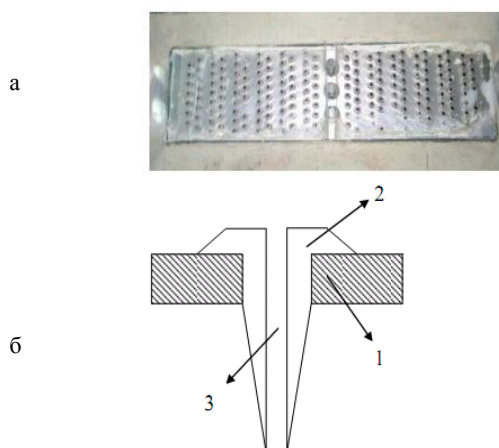


Рис. 1. Платиновые фильеры: а – общий вид; б – схема фильеры: 1 – фильерное поле, 2 – заклепка, 3 – канал фильеры

водства; при этом неизменным остается фильерное поле из дорогостоящей платины. Канал фильеры в виде цилиндра можно изменить на конфигурацию из усеченного конуса (конфузора) и цилиндра, причем конус стыкуется с цилиндром меньшим своим основанием (рис. 2). Известно, что течение вязкой жидкости в конфузоре обладает лучшими свойствами устойчивости по сравнению с течением в цилиндре [9].

Целью настоящей работы является расчет поля скоростей базальтового расплава в предлагаемом канале фильеры «конфузор–цилиндр».

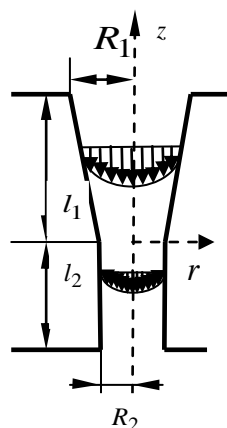


Рис. 2. Схема движения расплава базальто­массы по каналу «конфузор–цилиндр»

Расчеты поля скоростей проведены, исходя из геометрических размеров конусообразной части фильеры и условия сшивания решения с последующим течением расплава в цилиндре. Из поля скоростей в канале фильеры интегрированием можно найти объемный расход расплава – дебет фильеры м<sup>3</sup>/с для оценки основных технологических параметров формирования непрерывного базальтового волокна [1].

### Постановка задачи и аналитическое решение

Будем исходить из уравнений неразрывности и движения вязкой жидкости в цилиндрических координатах  $(r, \varphi, z)$ ; расположения осей координат указаны на рис. 2.

Течение осесимметричное  $V_{\varphi}=0$ , уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rV_r)}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где  $V_r, V_{\varphi}, V_z$  – проекции скорости потока базальтового расплава на направление  $r, \varphi$  и  $z$ , соответственно, м/с.

Предположим ламинарное стационарное течение расплава базальта в фильере при малых числах Рейнольдса. Это обосновывается тем, что динамическая вязкость и плотность базальтового расплава значительные, а гидравлический диаметр фильеры небольшого размера. Тогда уравнение движения вязкой жидкости Навье-Стокса в проекции на направление  $r$  примет следующий вид [9]:

$$\frac{1}{\eta} \frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{V_r}{r^2}, \quad (2)$$

где  $P$  – давление, Па.

Для скорости на направление  $z$ :

$$\frac{1}{\eta} \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Уравнения (1–3) образуют замкнутую относительно  $V_r(r, z), V_z(r, z), P(r, z)$  систему дифференциальных уравнений в частных производных. Для получения аналитического решения введем следующее допущение [10]:

$$V_r(r, z) = k_1(z)r^2 + k_2(z)r, \quad (4)$$

где  $k_1(z), k_2(z)$  – произвольная функция своего аргумента.

Это допущение обосновано тем условием, что компонента скорости вязкой жидкости на направление  $r$  должна быть равной нулю на оси канала. Изменение компоненты скорости по продольной координате задается зависимостью  $k_1(z)$  и  $k_2(z)$ .

Тогда общее решение системы уравнений (1)–(3) имеет вид [10]:

$$V_r(r, z) = (C_1 z + C_2)r, \quad (5)$$

$$V_z(r, z) = -C_1 z^2 - 2C_1 z + \frac{1}{4}(2C_1 + C_3) + \hat{C}_5, \quad (6)$$

$$P(z) = \eta(C_3 z + C_4), \quad (7)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  – произвольные постоянные.

Чтобы получить частное решение, реализуемое на практике, нужно удовлетворить граничным условиям при вязком течении: скорость расплава на границе конфузора должна быть

равна нулю, т. н. условие прилипания. На самом деле пока  $\max(V_r) < \max(V_z)$ , то условием прилипания для радиальной компоненты скорости можно пренебречь и заменить последние на условие перехода к параболическому распределению поля скоростей (течению Пуазейля) на выходе из конфузора.

Тогда остается только условие прилипания для продольной составляющей скорости  $V_z$ :

$$V_z(R(z), z) \equiv 0, \quad (8)$$

где согласно допущению (4) уравнение границы  $R(z) = R_2 - kz$ ; здесь  $k$  – тангенс угла конфузорности:  $k = (R_1 - R_2)/l_1$ .

Подставляя общее решение для  $V_z$  (6) в граничное условие (8), получим, что полином второй степени независимой переменной  $z$  тождественно должен быть равен нулю:

$$(-C_1 + C_1 k^2 / 2 + C_3 k^2 / 4) z^2 - (2C_2 + C_1 R_2 k + C_3 k R_2 / 2) z + C_5 + C_1 R_2^2 / 2 + C_3 R_2^2 / 4 \equiv 0.$$

Или коэффициенты перед степенью  $z$  должны быть равны нулю:

$$C_1 = \frac{C_3 k^2}{2(2 - k^2)}, C_2 = -\frac{C_3 k R_2}{2(2 - k^2)}, C_5 = -\frac{C_3 R_2^2}{2(2 - k^2)}. \quad (9)$$

Коэффициент  $C_3$  можно найти из условия перехода к параболическому распределению поля скоростей (течению Пуазейля) на выходе из конфузора [9]:

$$V_z(r, 0) = -\frac{\Delta p}{4\eta l_2} (R_2^2 - r^2). \quad (10)$$

Подставляем значения (9) в общее решение для  $V_z$  (6) и, удовлетворяя условию (10), получим, что  $C_3 = \frac{(2 - k^2) \Delta p}{2\eta l_2}$ .

Значение  $C_4$  найдем из условия, что давление на входе в конфузор обусловлено гидростатическим напором  $H$ :

$$P(l_1) \equiv \rho g H. \quad (11)$$

Подставляя общее решение для давления (7) в (11) с найденным выражением для константы  $C_3$ , получим:

$$C_4 = \frac{1}{\eta} (\rho g H - \Delta p l_1 / l_2 + k^2 \Delta p l_1 / 2 l_2).$$

По определению  $\Delta p = p(0) - p(l_2) \equiv C_4$  [9], откуда следует, что

$$\Delta p = \frac{\rho g H l_2}{l_1 + l_2 - k^2 l_1 / 2}.$$

Окончательно получаем частное решение уравнений (1)–(3) при допущении (4) и с граничными условиями (8), (10), (11):

$$V_r(r, z) = -\frac{k r (R_2 - kz)}{4\eta l_2} \Delta p,$$

$$V_z(r, z) = -\frac{(R^2 - kz)^2 - r^2}{4\eta l_2} \Delta p, \quad (12)$$

$$p(z) = \rho g H - \frac{(2 - k^2)(l_1 - z)}{2l_2} \Delta p,$$

где  $\Delta p = \rho g H \frac{l_2}{l_1 + l_2 - k^2 l_1 / 2}$ ,  $k$  – тангенс угла

конфузорности:  $k = (R_1 - R_2)/l_1$ .

Здесь следует заметить, что условие  $\max(V_r) < \max(V_z)$  будет тождественно выполняться, если  $k \ll 1$ , т.е. полученное течение (12) будет реализовываться при малых углах конфузорности.

### Результаты и обсуждение

Полученное частное решение (12) при малых углах конфузорности  $k \ll 1$  вполне удовлетворительно описывает процесс формирования базальтового непрерывного волокна [10]. Поперечная составляющая скорости потока линейно убывает с приближением к выходу из конфузора, а также к его оси. Продольная составляющая образует параболическое распределение векторов в поперечном сечении конфузора, модуль которых увеличивается с уменьшением квадрата продольной координаты. Давление в конфузоре снижается по мере уменьшения продольной координаты [10].

Полученные зависимости (12) можно представить графически для характерных размеров геометрии канала фильеры (рис.3).

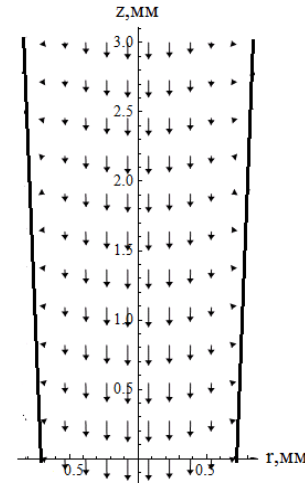


Рис. 3. Векторное поле скоростей потока базальтового расплава в конфузоре

Учитывая зависимость падения давления в конфузоре (12), найдем объемный расход расплава базальта по формуле Пуазейля [9]:

$$Q_k = \frac{\pi R_2^4}{8\eta} \frac{\rho g H}{2(l_1 + l_2) - k^2 l_1}. \quad (13)$$

Расход в предлагаемом канале фильеры «конфузор–цилиндр» целесообразно определить относительно объемного расхода расплава с цилиндрическим каналом той же длины  $Q_{ц}[1]$ :  $l_1+l_2=L=const$ .

На рис. 4 приведена зависимость относительного расхода от тангенса угла конфузорности и относительной длины цилиндрического участка канала фильеры. Как видно из графика, даже при малых углах конфузорности наблюдается повышение объемного расхода базальтового расплава до  $\approx 15\%$ . Это позволит увеличить производительность процесса вытяжки базальтового непрерывного волокна без изменения других технологических параметров.

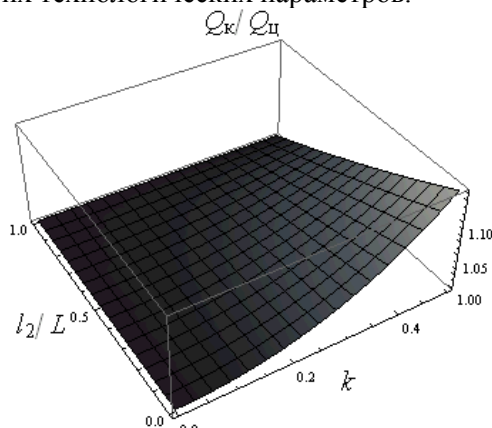


Рис. 4. Зависимость относительного объемного расхода базальтового расплава от геометрических параметров фильеры «конфузор–цилиндр»

### Выводы

Предложена геометрия канала фильеры для формования базальтового непрерывного волокна, составленная из усеченного конуса и цилиндра, причем конус стыкуется с цилиндром меньшим своим основанием. Течение расплава в канале «конфузор–цилиндр» обладает лучшими свойствами устойчивости по сравнению с движением расплава в фильере цилиндрической формы, что в последующем при деформировании струи расплава и ее отверждении при охлаждении улучшает прочностные и деформационные свойства волокна.

Получены аналитические формулы для инженерных расчетов поля скоростей потока и давления по каналу фильеры «конфузор–цилиндр» при малых углах конфузорности. Полученные зависимости поля скоростей и давления в канале фильеры «конфузор–цилиндр» определяют значение объемного расхода базальтового расплава. Показано, что даже при малых углах конфузорности наблюдается повышение объемного расхода базальтового расплава до  $\approx 15\%$ . Это позволит увеличить производительность процесса вытяжки базальтового непрерывного волокна без изменения других технологических параметров.

Результаты расчетов будут использованы для оптимизации технологических режимов процесса формования базальтовых непрерывных волокон из сырья месторождения Республики Саха (Якутия) на промышленной установке разработки НПК «Терм» ОАО «Стеклопластик» [1].

### Литература

1. Гаврильева А.А., Винокуров Г.Г., Кычкин А.К., Орешко С.М. Технологические характеристики формования базальтовых непрерывных волокон при фильерном способе их получения // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т. 15, №4, С.448–450.
2. Обзор рынка теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна в России: Отчет ООО «Инфолайн» (демоверсия). 2007. 145 с.
3. Охлопкова А.А., Васильев С.В., Гоголева О.В. Разработка полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и базальтового волокна // Нефтегазовое дело. 2011. №6. С. 404–411 (электронный научный журнал)
4. Ходакова Н.Н., Углова Т.К., Фирсов В.В., Татаринцева О.С. Минеральное сырье Кавказа для производства базальтовых волокон // Ползуновский вестник. Прикладная химия и смежные области. 2013. №1. С. 138–142.
5. Исследование рынка армирующих изделий и материалов из непрерывного базальтового волокна в России: Отчет агентства «Megaresearch» (демоверсия). 2011. 142 с.
6. Степанова Е.В. Структура и свойства базальтопластиков, армированных базальтовыми нитями разных производителей, и модификация их физическими и химическими методами: Автореф. дис. ... к.т.н. Саратов, 2006. 20 с.
7. Татаринцева О.С. Изоляционные материалы из базальтовых волокон, полученных индукционным способом: Автореф. дис. ... д.т.н. Бийск, 2006. 42 с.
8. Васильева А.А. Повышение прочностных характеристик однонаправленных базальтопластиков модификацией эпоксидного связующего силикатными наночастицами: Автореф. дис. ... к.т.н. Барнаул, 2013. 19 с.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учебное пособие в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1986. 736 с.
10. Смирнов Л.Н., Кошелев В.Ю. Механика формования непрерывных базальтовых волокон при фильерном способе их получения. М.: Информконверсия, 2000 (Научная библиотека журнала «Конверсия в машиностроении», вып. 3, приложение к журналу № 2, 2000). 24 с.

Поступила в редакцию 20.10.2015