

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ СРЕДЫ
С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КОРОТКИХ УГОЛЬНЫХ ВОЛОКОН**

© 2018 Е.И. Куркин, В.О. Чертыковцева, Я.В. Захваткин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

Статья поступила в редакцию 22.02.2018

Проведено экспериментальное исследование вязкости неньютоновской среды, созданной на основе эпоксидного связующего и угольных волокон. Исследованы различные составы с массовой долей волокон: 0%, 5%, 10% и 15%. Для измерения зависимостей вязкости от скорости сдвига использован вискозиметр Brookfield DV3T со шпинделем SC-29. Термостатирование образцов осуществляется с помощью термоячейки Brookfield Thermosel в диапазоне от 30 °С до 70 °С. Полученные результаты обработаны с помощью системы MATLAB. Рассмотрена модификация температурной зависимости Андраде для реактопластов, позволяющая получить устойчивую аппроксимацию степенной модели вязкости относительно стандартной температуры. Коэффициенты моделей вязкости рассчитаны на основе регрессионного анализа зависимости логарифма вязкости от логарифма скорости сдвига. Оценено влияние содержания коротких угольных волокон на параметры вязкости состава. *Ключевые слова:* композиционный материал, короткие волокна, скорость сдвига, модель вязкости. DOI: 10.24411/1990-5378-2018-00040

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 16-31-00365 мол_а.*

ВВЕДЕНИЕ

Обладая высокими механическими характеристиками короткоармированные композиционные материалы хорошо зарекомендовали себя в случае изготовления сложных пространственных конструкций методом литья. Армирование короткими высокопрочными волокнами позволяет увеличить прочность в 3 - 4 раза и жесткость в 10 раз по сравнению с ненаполненными конструкционными пластиками [1, 2, 3]. Механические свойства таких материалов определяются структурой армирования: долей армирующих волокон, их свойствами, размерами и расположением. Длина волокна должна быть достаточна, для того, чтобы при разрушении композиционного материала происходило разрушение волокон [4]. С другой стороны, волокна должны быть достаточно короткими для того, чтобы обеспечивать однородный процесс литья. Жесткость и прочность изделий из короткоармированных композитов существенно варьируются в соответствии с изменением ориентации и концентрации волокон и могут заметно изменяться в различных областях одного и того же изделия. Для прогнозирования механических

характеристик изделий из материалов, армированных короткими волокнами, стоит острая потребность в математическом моделировании процесса литья неньютоновских жидкостей с последующей экспериментальной верификацией полученных результатов. Основной характеристикой материала, определяющей модели литья изделий является вязкость. Целью работы является экспериментально-аналитическая оценка влияния массовой доли наполнителя на реологические характеристики смеси эпоксидного связующего и угольных волокон.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЯЗКОСТИ СМЕСИ**

В качестве матрицы полимерного композиционного материала выбрано однокомпонентное эпоксидное связующее Т-26 [5]. В качестве волокнистого наполнителя выбраны нарезанные из ленты углеродной конструкционной угольные волокна длиной 0,25 - 0,3 мм и диаметром 8 мкм. Исследована вязкость связующего без наполнителя, а также вязкость смесей, с массовой долей волокон 5%, 10% и 15%. С помощью ротационного вискозиметра Brookfield DV3T проводится измерение вязкости смесей в зависимости от скорости сдвига (рис. 1). При проведении эксперимента использован шпиндель SC-29. Скорость сдвига, измеряемая шпинделем SC-29 в с⁻¹, равна одной четвертой от скорости его вращения, измеренной в об/мин. Контроль температуры осуществлён с помощью термоячейки

*Куркин Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru
Чертыковцева Владислава Олеговна, магистрант. E-mail: vladislaava.s@yandex.ru
Захваткин Ярослав Вячеславович, студент. E-mail: mr.kirarik@ua.ru*

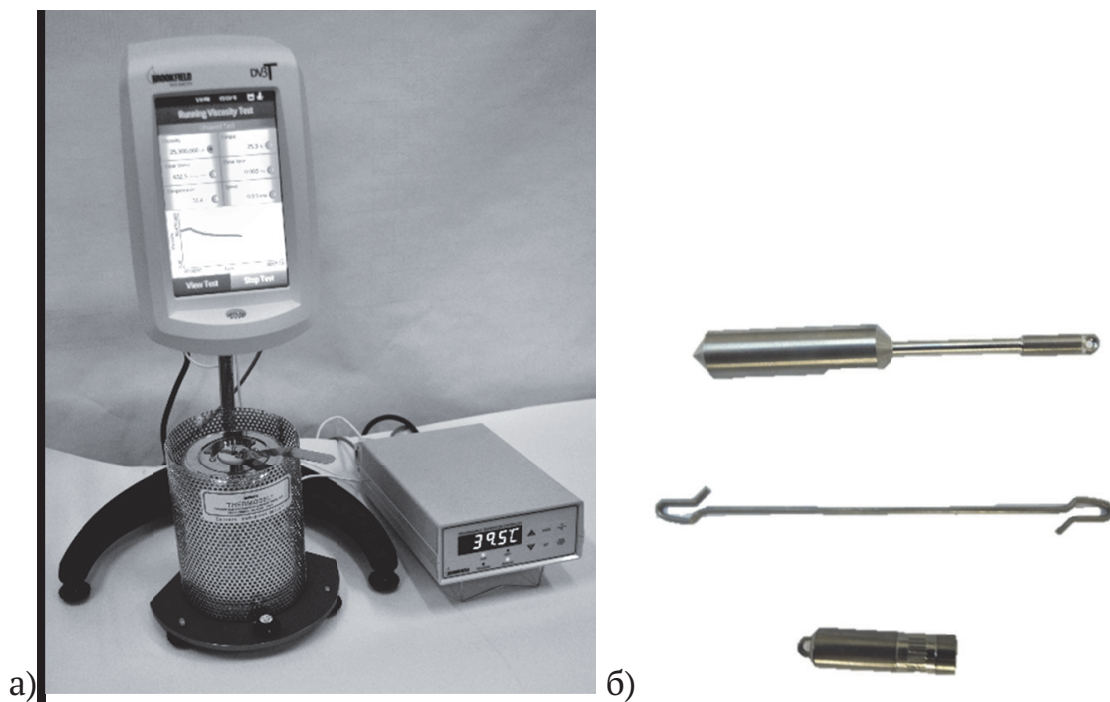


Рис. 1. Установка по измерению вязкости:
 а) общий вид, б) шпindelь SC-29 экспериментальной установки

Brookfield Thermosel, в которую помещается металлическая колба с составом. Эксперимент был проведен для скоростей вращения шпинделя от 0,1 до 240 об/мин, для температур от 30 до 70°C. В общей сложности проведено 81 исследование зависимости вязкости состава.

Для оценки вязкости исследуемых расплавов построены зависимости вязкости от скорости сдвига для весовой доли волокон: 0%, 5%, 10% и 15%. В системе MATLAB была разработана программа для обработки результатов с вискозиметра Brookfield_to_MATLAB [6]. На рис. 2

представлены зависимости вязкости от скорости сдвига при различных температурах с разным процентным содержанием волокон.

В случае исследования чистой смолы наблюдается ньютоновский характер течения. Значения вязкости содержащих волокна смесей снижаются с увеличением значений скорости сдвига, что подтверждает характерное для полимерных композиционных материалов псевдопластическое поведение в условиях сдвигового течения. С увеличением процентного содержания волокон увеличивается наклон линии вязкости.

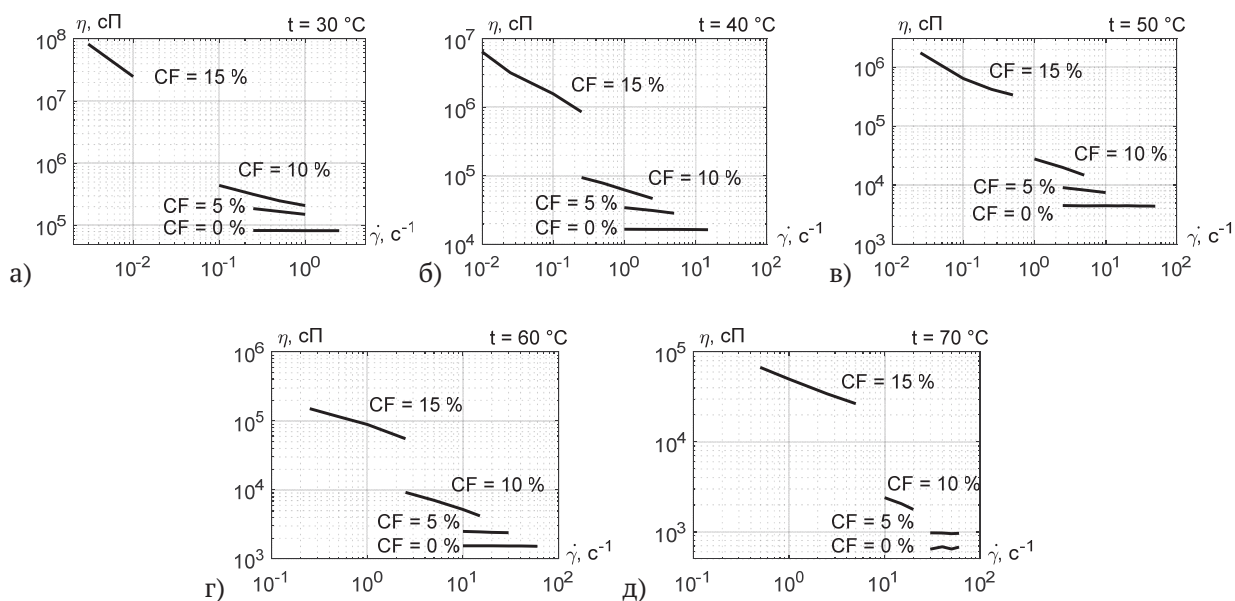


Рис. 2. Зависимость вязкости от скорости сдвига для составов с различной весовой долей волокон при температуре:
 а) $t = 30^\circ\text{C}$, б) $t = 40^\circ\text{C}$, в) $t = 50^\circ\text{C}$, г) $t = 60^\circ\text{C}$, д) $t = 70^\circ\text{C}$

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛИЧЕСТВА УГОЛЬНЫХ ВОЛОКОН НА ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ВЯЗКОСТИ СМЕСИ

Полученные результаты используются для построения степенной модели вязкости:

$$\eta = K \cdot (\dot{\gamma})^{n-1},$$

где n – показатель нелинейности, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, c^{-1} , – коэффициент густоты потока.

Зависимость коэффициента густоты потока от температуры запишем по аналогии с моделью Андраде [6], с тем отличием, что в модели Андраде вязкость жидкости оценивается относительно температуры плавления, а в рассматриваемой далее модели – относительно стандартной температуры 25 °С:

$$K = \eta^0 e^{T_b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^0} \right)},$$

где η^0 – коэффициент, определяющий значение густоты потока при и стандартной температуре $T^0 = 298,15$ К; T – температура среды, К; T_b – коэффициент, отражающий температурную чувствительность материала, К.

Коэффициенты модели вязкости определим через коэффициент линейной регрессии, получаемой после логарифмирования модели:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2,$$

где $y = \ln \eta$, $x_1 = \ln \dot{\gamma}$, $x_2 = \frac{1}{T} - \frac{1}{T_b}$, $a_0 = \ln \eta^0$,

$a_1 = n - 1$, $a_2 = T_b$.

В системе MATLAB разработана программа для расчета коэффициентов модели вязкости. В табл. 1 представлены значения полученных коэффициентов модели для расплавов с весовой долей волокон: 0%, 10%, 15%, а также коэффициент детерминации модели регрессии. Значения $R^2 > 0,98$ говорят о хорошей аппроксимации экспериментальных данных представленной моделью вязкости. На рис. 3 представлены зависимости полученных коэффициентов вязкости от весовой доли волокон.

Для сравнения полученных результатов с экспериментальными данными построены зависимости вязкости от скорости сдвига для каждого из рассмотренных составов (рис. 4).

ВЫВОДЫ

Проведена экспериментальная оценка зависимости вязкости эпоксидной смолы, армированной короткими угольными волокнами от температуры, скорости сдвига и массовой доли волокна. На основе полученных экспериментальных данных построены степенные модели вязкости. Зависимость коэффициента густоты потока от температуры записана по аналогии с моделью Андраде относительно стандартной температуры 25 °С. Коэффициенты модели вязкости определены через коэффициенты линейной регрессии, получаемой после логарифмирования модели. Коэффициент детерминации уравнения регрессии $R^2 > 0,98$ подтверждает хорошее качество аппроксимации моделью вязкости экспериментальных данных.

Таблица 1. Коэффициенты модели вязкости для составов с различной долей волокон

Массовая доля волокон, %	η^0	T_b	n	Коэффициент детерминации, R^2
0	127 462	11 825	0,9333	0,9923
5	247 608	11 790	0,8674	0,9954
10	305 611	9 343	0,6583	0,9980
15	1 886 871	8 559	0,3977	0,9839

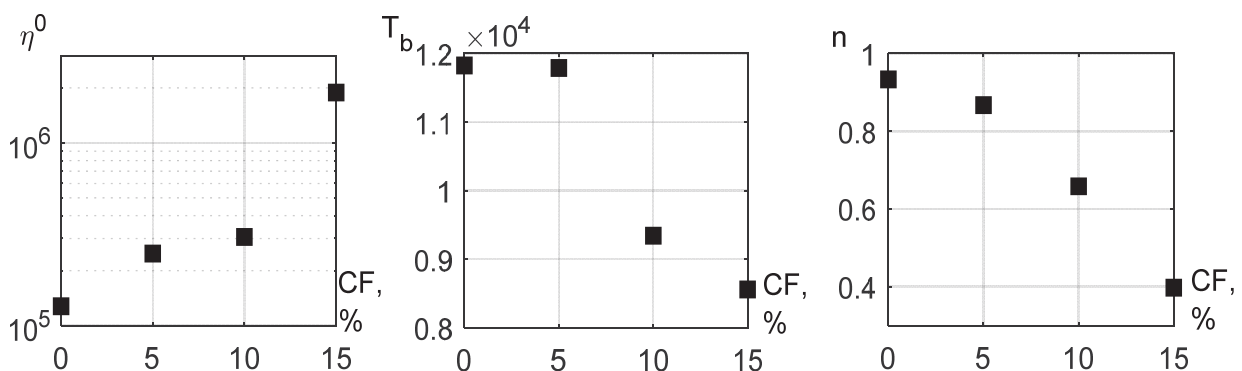


Рис. 3. Зависимости коэффициентов модели вязкости составов от весовой доли волокон

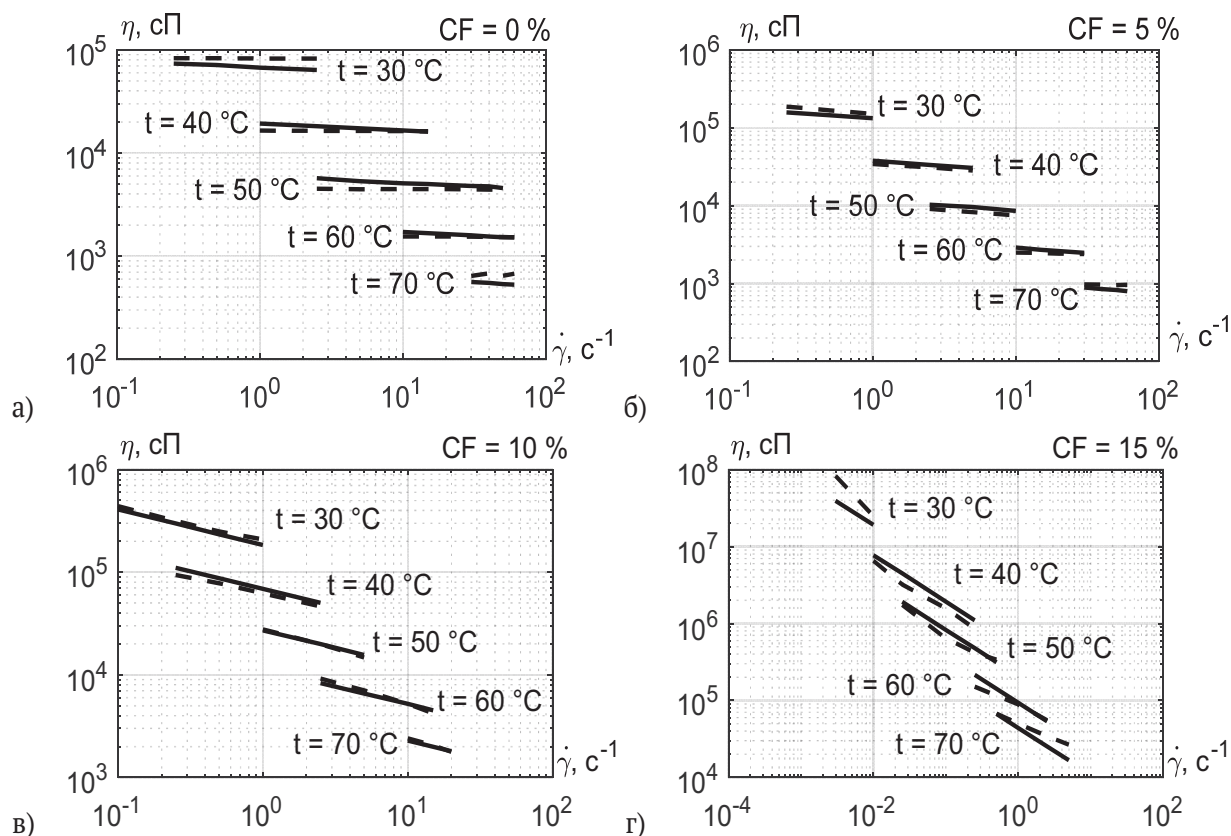


Рис. 4. Сравнение полученной модели вязкости с экспериментальными данными для расплава с весовой долей волокон: а) 0%, б) 5%, в) 10%, г) 15%

Добавление коротких угольных волокон длиной 0,3 мм в разы увеличивает вязкость среды и приводит к изменению ее типа – смола без добавления волокон близка к ньютоновской жидкости, тогда как смесь с волокнами имеет псевдопластичный характер. Увеличение доли волокон приводит к увеличению отклонения показателя нелинейности от единицы. Увеличение массовой доли волокон до 15% приводит к снижению коэффициента температурной чувствительности материала на 16%.

Полученные результаты могут быть применены для построения моделей вязкости материалов в CAE-системах, моделирующих литье изготовления изделий из композиционных материалов, армированных короткими высокопрочными волокнами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-00365 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Güllü, A., Özdemir A., Özdemir E. Experimental investigation of the effect of glass fibres on the

mechanical properties of polypropylene (PP) and polyamide 6 (PA6) plastics, *Materials and Design*, 2006, Volume 27. P. 316–323

2. Свойства материала Victrex PEEK 90P. URL: https://www.victrex.com/~media/datasheets/victrex_tds_90p.pdf (дата обращения 12.01.2018).
3. Свойства материала Victrex PEEK 90HMF40. URL: https://www.victrex.com/~media/datasheets/victrex_tds_90hmf40.pdf (дата обращения 12.01.2018).
4. Основные характеристики эпоксидного связующего ИНУМит Т26. URL: http://www.inumit.ru/img/file/tds_t_26.pdf (дата обращения 12.01.2018).
5. Hull D., Clyne T.W. *An Introduction to Composite Materials*. Cambridge Solid State Science Series. 1996. 333 p.
6. Куркин Е.И., Садыкова В.О. Программа Brookfield_to_MATLAB экспорта и обработки результатов измерений реологических характеристик на ротационном вискозиметре. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017661812; дата регистрации 28.08.2017.
7. Chen Z.L., Chao P.Y., Chiu S.H. Empirical Viscosity Model for Polymers with Power-Law Flow Behavior// *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 88. Pp. 3045–3057.

**EXPERIMENTAL ESTIMATE OF VISCOSITY OF NON-NEWTONIAN FLUID
WITH VARIOUS CONTENT OF SHORT CARBON FIBERS**

© 2018 E.I. Kurkin, V.O. Chertykovtseva, Ya.V. Zakhvatkin

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

The article describes an investigational study of viscosity of non-Newtonian fluid made from an epoxy binder and carbon fibers. A study was made for various contents of a mass fraction of fibers: 0%, 5%, 10%, and 15%. Brookfield DV3T viscometer with spindle SC-29 was used to measure the relations a viscosity on a shear rate. Thermostatting of the samples was carried out by the Brookfield Thermosel thermocouple in the range from 30 ° C to 70 ° C. The results were processed by the MATLAB system. A modification of the Andrade temperature relation for thermosets was considered, which makes it possible to obtain a stable approximation of the power-law viscosity model with respect to the standard temperature. The coefficients of the viscosity models were calculated on the basis of the regression analysis of the relation the viscosity logarithm on the shear rate logarithm. The influence of content of short carbon fibers for the viscosity parameters was estimated.

Keywords: composite material, short fibers, shear rate, viscosity model.

DOI: 10.24411/1990-5378-2018-00040

The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 16-31-00365 mol_a.

*Evgeny Kurkin, Candidate of Technics, Associate Professor of
Aircraft Construction and Design Department.*

E-mail: eugene.kurkin@mail.ru

Vladislava Chertykovtseva, Student.

E-mail: vladislaava.s@yandex.ru

Yaroslav Zakhvatkin, Student. E-mail: mr.kirarik@ya.ru