

УДК 678.057.745.53

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РЕАКТОПЛАСТА, АРМИРОВАННОГО КОРОТКИМИ УГОЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ

© 2016 Е.И. Куркин, В.О. Садыкова, Р.В. Чарквиани

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 19.12.2016

Исследовано литье пластины из реактопласта Этал-Карбон-М, армированного 3% угольными волокнами длиной 0,3 мм. Литье осуществлено с помощью гидроцилиндра, установленного на универсальной сервогидравлической машине MTS 793, внутри термокамеры MTS Environmental Chamber. Моделирование литья проведено в системе Moldex3D с учетом влияния гравитации. Получены значения распределения давления, времени распространения фронта литья и направления ориентации армирующих волокон. Верификация модели проведена путем сравнения расположения фронта литья для ряда значений времени полученных теоретически и экспериментально. Информация об ориентации армирующих волокон позволяет учитывать анизотропию механических характеристик изготавливаемых из пластины образцов и изделий.

Ключевые слова: литье, армирование, короткие волокна, реактопласт, эксперимент, модель

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

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Армированные пластики в силу своих структурных свойств аккумулируют в себе свойства традиционных полимерных композиционных материалов и высокие технологические возможности изготовления литьём в формы. Благодаря такой совокупности свойств их можно использовать для изготовления элементов сверхлегких конструкций без дорогостоящей технологической оснастки и оборудования при сохранении высоких механических характеристик и низкой массы изделия. К достоинствам таких материалов можно отнести высокую прочность при низкой плотности, устойчивость к воздействию агрессивных сред, низкую материалоемкость изготовленных из них изделий, высокую технологичность и работоспособность в широком диапазоне температур и напряжений.

Цель проведенной работы – моделирование литья реактопласта, армированного короткими угольными волокнами в программном комплексе Moldex3D. В статье проведен гидродинамический расчет литья материала EtalCarbon\_EPCF3\_0,3. Данный материал имеет 3% армирование угольными волокнами длиной 0,3 мм и высокие механические характеристики.

Для прогнозирования механических характеристик композитов, изготавливаемых литьём,

необходимо определение ориентации армирующих волокон, влияющей на механические характеристики изделий. Для математического моделирования процессов литья из материала, армированного короткими высокопрочными волокнами возможно использование специальных программных комплексов, описывающих литье армированных композитов, с учётом всего технологического цикла изготовления. Одним из таких комплексов является Moldex3D. Широкие возможности Moldex3D позволяют эффективно моделировать и оптимизировать пластмассовые изделия с точки зрения давления и скорости заполнения литьевой формы, расположения впускных литников и каналов системы охлаждения, предотвращения эффекта неполного впрыска и возникновения линий спая, минимизации времени цикла литья, уменьшения коробления и усадки. Кроме того, Moldex3D позволяет определять ориентацию коротких волокон внутри материала в процессе его литья и после полимеризации.

В статье представлены результаты моделирования литьевого процесса, которые позволяют оценить возможность изготовления изделий из материала EtalCarbon\_EPCF3\_0,3. Получен файл с информацией о расчётной сетке и информацией об ориентации волокон, которые во многом определяют механические характеристики будущих изделий.

### 2. СОЗДАНИЕ МОДЕЛИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Процесс моделирования начинается с построения геометрии литниковой области. Литник представляет собой деталь литьевой формы, пред-

Куркин Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru  
Садыкова Владислава Олеговна, магистрант института авиационной техники. E-mail: vladislaava.s@yandex.ru  
Чарквиани Рамаз Валерьевич, аспирант института авиационной техники. E-mail: oneram@yandex.ru

назначенную для литья под давлением, а также для подачи по нему материала в форму. Он оказывает существенное влияние на качество готового изделия, так как от его месторасположения зависит равномерное распределение сердцевинных компонентов при литье. Также в зоне нахождения литника происходит охлаждение расплава. Модель пластины проектировалась в системе Siemens NX, которая позволяет точно воспроизвести геометрию и сохранить полученную модель пластины в формате .stp. Трёхмерная геометрическая модель плоской пластины для литья с литниковой областью представлена на рис. 1.

Конечно - элементная сетка модели была сгенерирована в режиме eDesign. Манипуляция сетки была сделана в системе ANSYS и переведена в формат .cdb с помощью модуля APDL. Сетка

конечных элементов по пластине и по её толщине показана на рис. 2.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА ETALCARBON\_EPCF3\_0,3

Задать характеристики материала в Moldex 3D можно двумя способами: выбрать из предложенного программой банка материалов либо создать новый материал. В данной работе для моделирования литья изделий из EtalCarbon\_EPCF3\_0,3 характеристики материала задавались вручную. Для рассматриваемого материала вязкость составляет 220 сП. Композиционный материал ведет себя как ненейютоновская жидкость. Зависимость вязкости от температуры представлена на рис. 3.

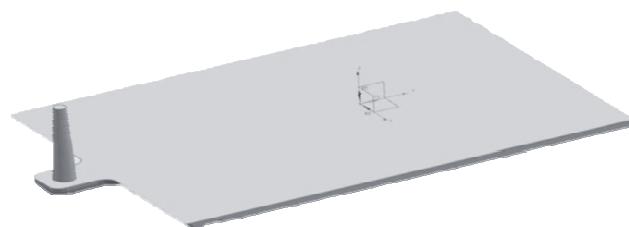


Рис. 1. Трёхмерная геометрическая модель пластины с учетом литниковой области

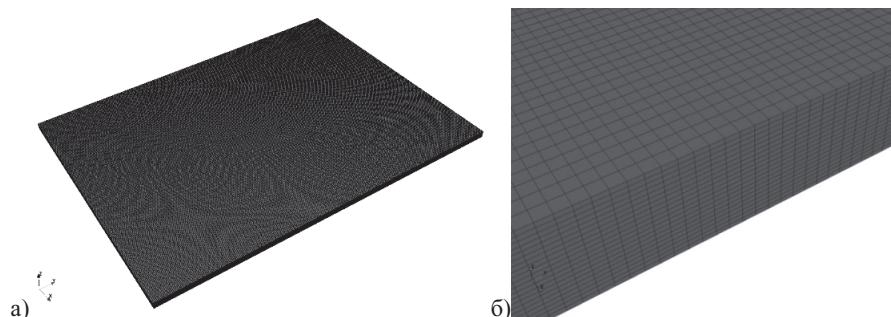


Рис. 2. Сетка конечных элементов:  
а) общий вид, б) распределение элементов по толщине пластины

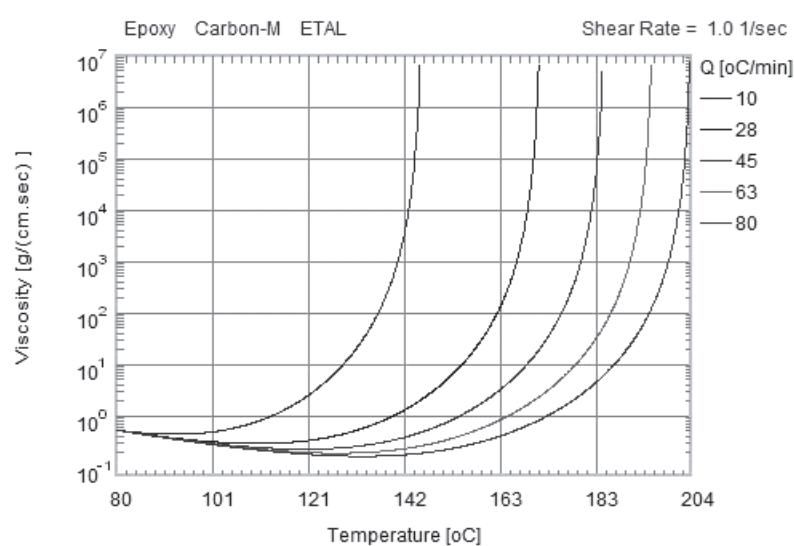


Рис. 3. Зависимость вязкости от температуры для EtalCarbon\_EPCF3\_0,3

Механические характеристики для материала EtalCarbon\_EPCF3\_0,3 представлены на рис. Рисунок 4. Было задано 3% угольное армирование. Коэффициент линейного температурного расширения материала составляет .

#### 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИТЬЯ

Технологические характеристики заданы в соответствии с проведенными проливками пластин из материала EtalCarbon\_EPCF3\_0,3 в термокамере при температуре 40 °C. Нагнетающая часть технологической оснастки представляет собой цилиндр с поршнем диаметром 50 мм и высотой 150 мм. Оба имеют стержни для закрепления в губках универсальной испытательной сервогидравлической машины MTS-793 (рис. рис. 5).

В системе Moldex3D технологические параметры задаются тремя способами: задание

параметров литьевой машины, подгрузка файла с расширением .bnk с программой литья или математический метод. В данной работе применялся математический метод CAE.

Он позволяет описать задание технологических условий процесса литья, когда требуемые характеристики литьевой машины определяются в ходе расчетов. С учетом разработанной оснастки для проведения проливок были заданы: температуры формы, окружающей среды и расплава; давление впрыска; расчетное время заполнения формы, а также параметры выдержки изделия (рис. 6).

Корректное задание технологических условий и учет различий параметров, указываемых при расчете и в реальном процессе литья, имеют большое значение для правильной интерпретации полученных в результате моделирования данных при прогнозировании механических характеристик будущих изделий.

Polymer   Grade Name   Producer	Epoxy   Carbon-M   ETAL
Mechanical Properties	Fiber-filled polymer - Theoretical properties (Custo...
Polymer density	1.11 (g/cc)
Polymer Poisson's ratio	0.3 (-)
Polymer Modulus E	2e+010 (dyne/cm^2)
Polymer CLTE(solid)	5.4e-005 (1/K)
Fiber weight percentage	3 (%)
Fiber density	1.78 (g/cc)
Fiber Poisson's ratio	0.26 (-)
Fiber Modulus E1 (fiber direction)	2.3e+012 (dyne/cm^2)
Fiber Modulus E2 (transverse direction)	2.3e+011 (dyne/cm^2)
Fiber Shear Modulus G	9e+010 (dyne/cm^2)
Fiber CLTE a1 (fiber direction)	1.5e-006 (1/K)
Fiber CLTE a2 (transverse direction)	1e-005 (1/K)
Fiber Length/Diameter (L/D)	20 (-)
Interaction coefficient	0.01 (-)

Рис. 4. Механические характеристики материала EtalCarbon\_EPCF3\_0,3

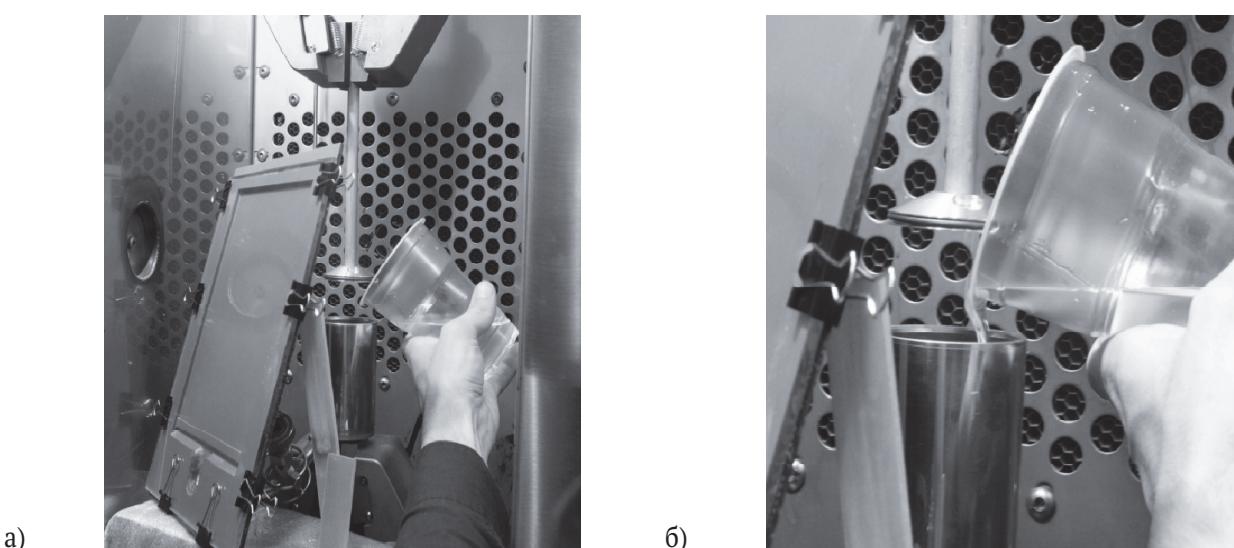
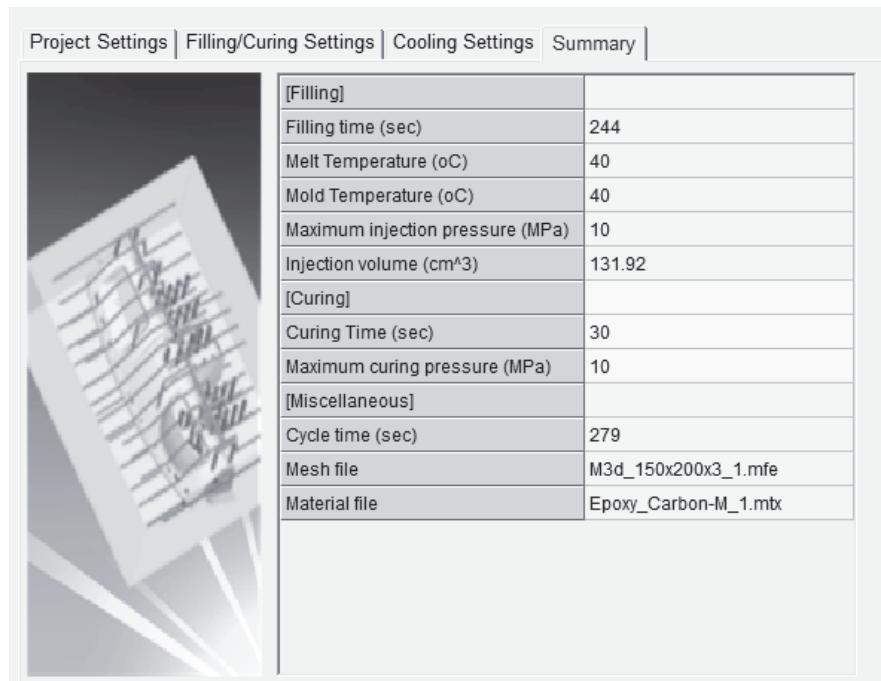


Рис. 5. Установка литьевой оснастки в термокамере сервогидравлической машины MTS 793:  
а – общий вид; б – заполнение полимером литьевого цилиндра



**Рис. 6.** Параметры процесса литья: давление и времена выдержки

## 5. УЧЕТ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПРИ ЛИТЬЕ РЕАКТОПЛАСТОВ

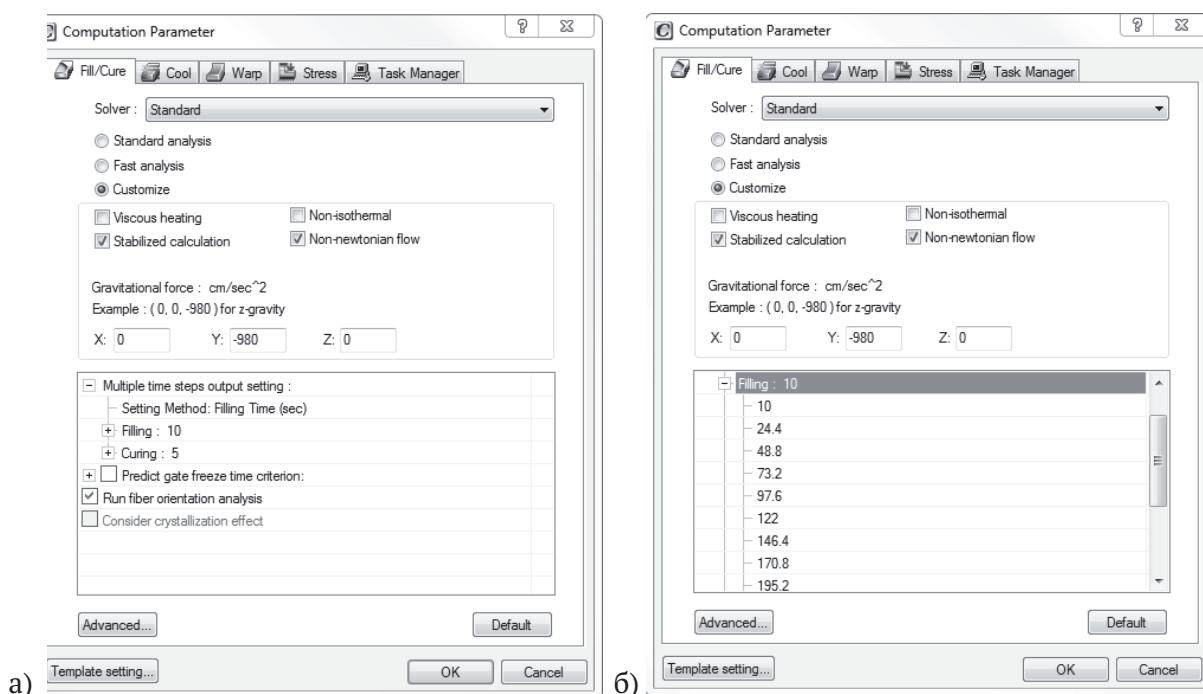
Для приближения моделирования литьевого процесса необходимо учесть силу тяжести, направленную по оси заполнения формы расплавом. Учет силы тяжести в Moldex3D представлен на рис. рис. 7а. Для отслеживания результатов в процессе заполнения литьевой формы перед запуском расчета необходимо указать контрольные отрезки времени (рис. рис. 7б).

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

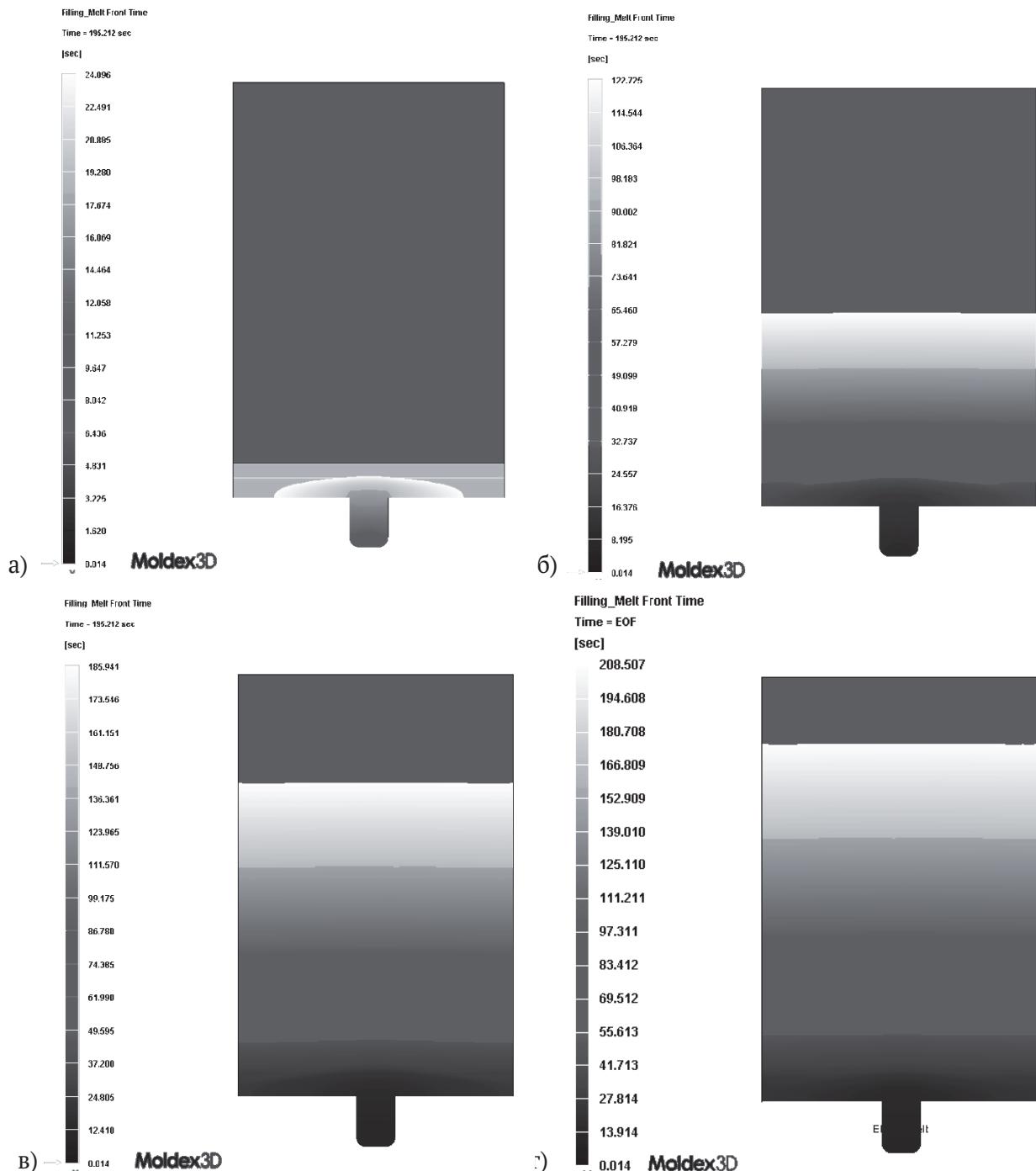
В результате моделирования процесса литья пластины получено полное прохождение фронта литья. Время заполнения пластины 245 секунд. Фронт литья представлен на рис. 8.

Фронт литья, полученный при проведении проливок в термокамере, представлен на рис. 9.

Графические результаты гидродинамического расчета предоставляют подробную информа-



**Рис. 7.** Задание расчетных параметров:  
а – учёт силы тяжести в Moldex3D; б – задание контрольных отрезков времени



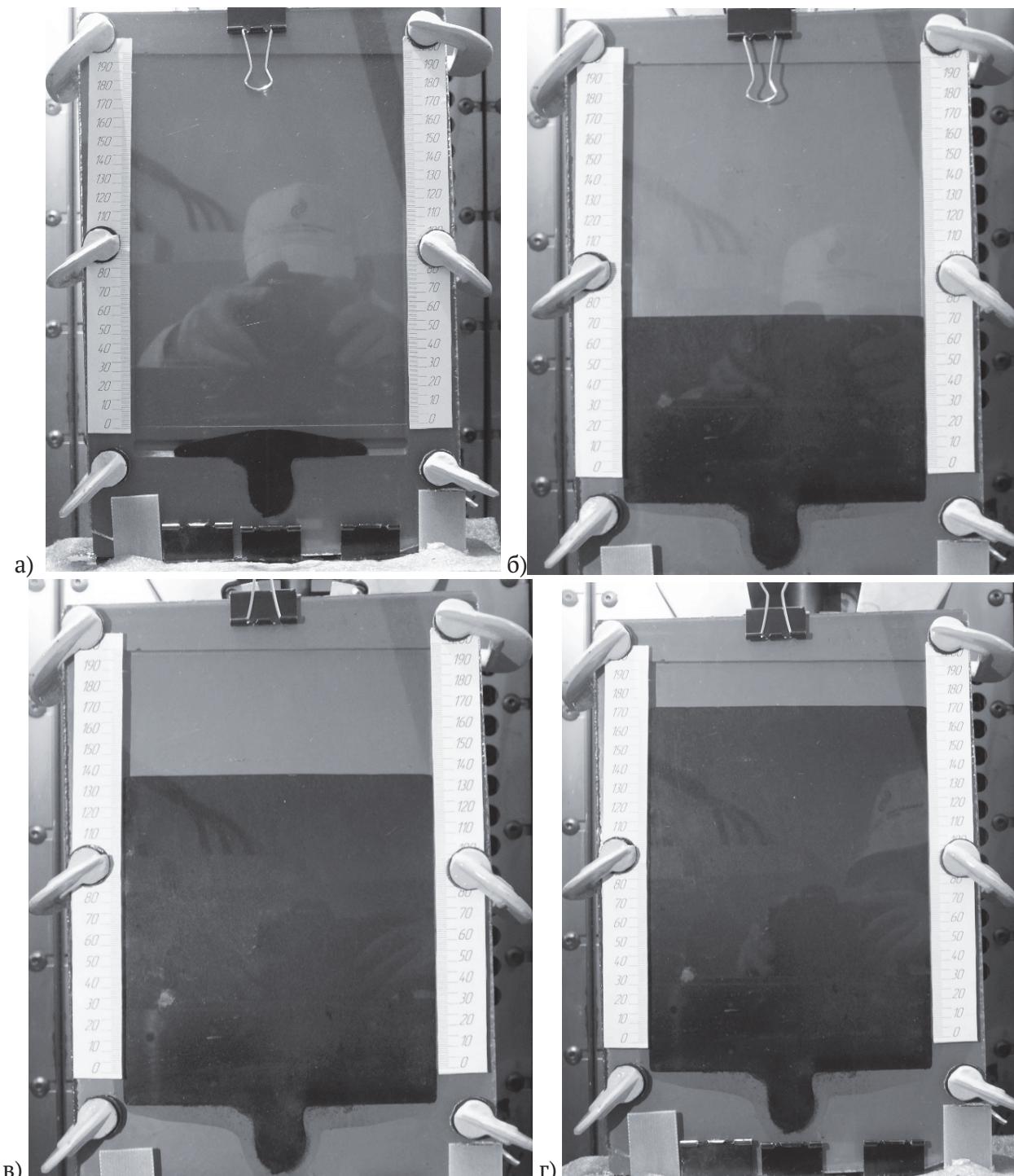
**Рис. 8.** Фронт литья:  
а – 24 секунда; б – 123 секунда; в – 196 секунда; г – 209 секунда

цию о процессе заполнения литьевой формы, в том числе распределение температуры и давления расплава, напряжения и скорости сдвига, линейную скорость течения, толщину застывшего приственного слоя, время охлаждения, вязкость, плотность, а также зависимости давления, температуры от времени (рис. 10).

Моделирование производится с учетом модуля Fiber в Moldex 3D . Данный модуль позволяет смоделировать разрушение жесткого волокнистого углеродного наполнителя в материальном цилиндре на стадии пластикации и в литьевой

форме на стадии заполнения — под действием 3D-течения расплава. Он позволяет моделировать ориентацию волокон в пластине на стадиях заполнения и уплотнения. Модуль Fiber позволяет рассчитать анизотропные механические (продольный и перечный модули упругости и пр.) и теплофизические свойства композита. Ориентация по осям представлена на рис. 11.

С помощью команды Slicing была получена ориентация волокон при рассечении плоскостью по оси z. Картинны распределения ориентации волокон показаны на рис. 12.



**Рис. 9.** Фронт литья, полученный при проливках в термокамере:  
а – 24 секунда; б – 123 секунда; в – 196 секунда; г – 209 секунда

## ВЫВОДЫ

Исследовано литье пластины из реактопласта Этал-Карбон-М, армированного 3% угольных волокон длиной 0,3 мм с помощью гидроцилиндра, установленного в универсальную сервогидравлическую машину MTS 793. Гидродинамический расчет литья материала EtalCarbon\_EPCF3\_0,3 с учетом силы тяжести в программном комплексе Moldex3D при температуре 40°C. Расчет показал полное прохождение фронта литья, время за-

полнения формы составило 245 секунд. Верификация построенной модели проведена путем сравнения результатов прохождения фронта литья полученных теоретически и экспериментально. Получено моделирование ориентации волокон в процессе заполнения формы. Результаты расчета ориентации волокон сохранены в файл ориентации \*.o2d, позволяющий учитывать ориентацию волокон при прочностном анализе изготавливаемых из рассмотренного материала образцов и изделий.

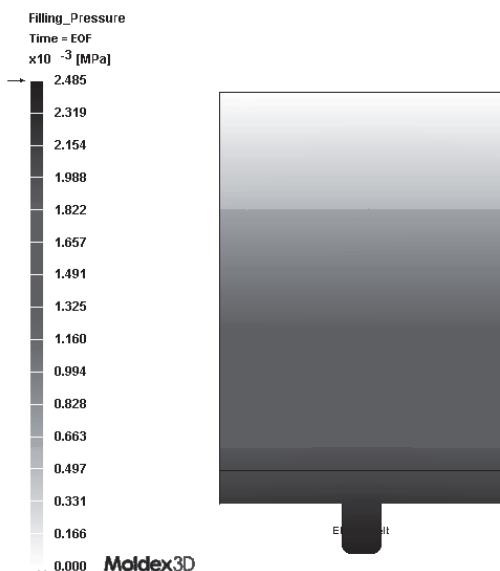


Рис. 10. Распределение давления литья

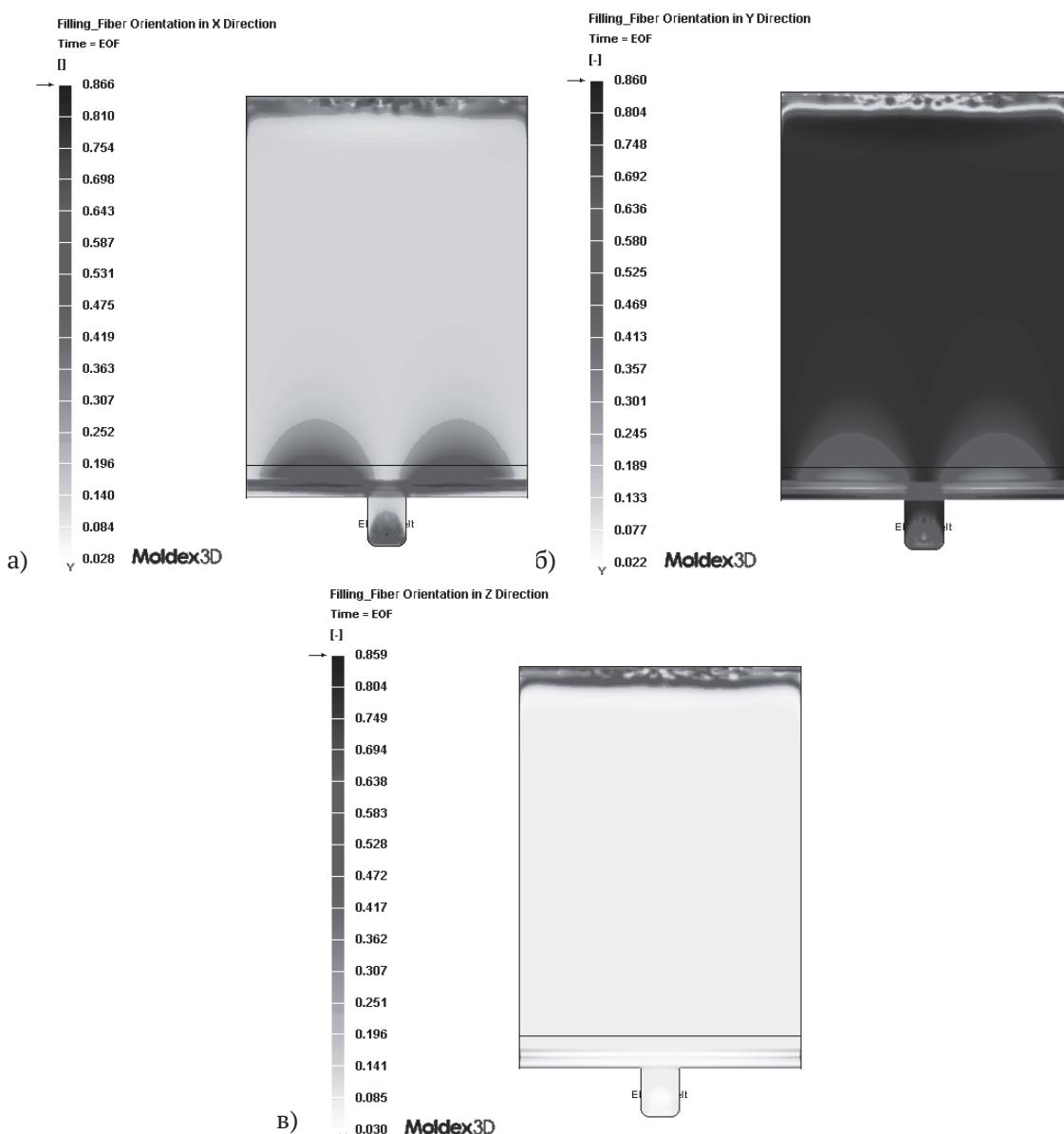
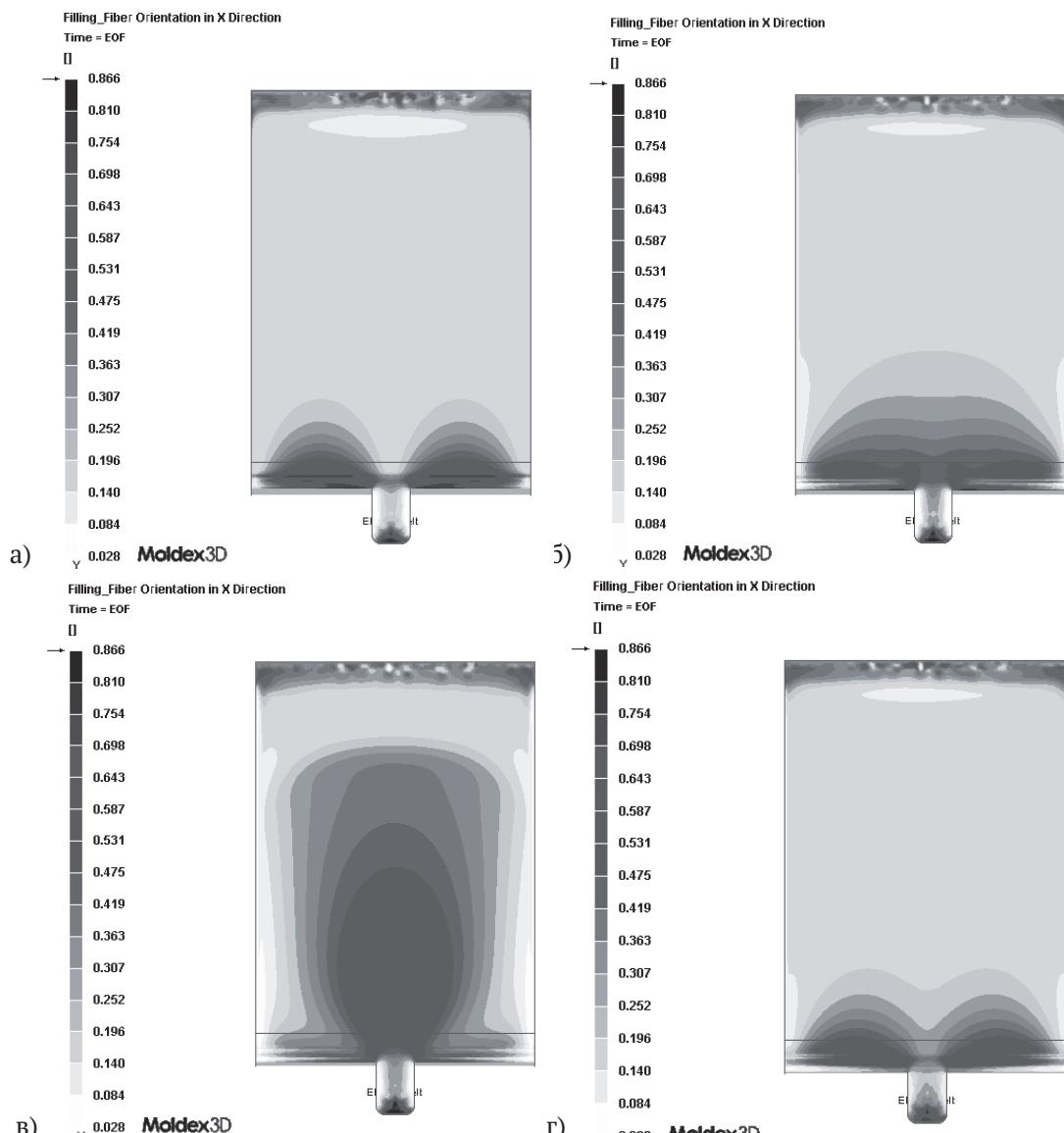


Рис. 11. Ориентация волокон:  
а – по оси х; б – по оси у; в – по оси z



**Рис. 12.** Ориентация волокон при рассечении плоскостью по оси Z на расстоянии:  
а – 0,5 мм; б – 1,5 мм; в – 2,5 мм; г – 3,5 мм

### EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL RESEARCH OF FLOW OF THERMOSET COMPOSITE REINFORCED WITH SHORT COAL FIBERS

© 2016 E.I. Kurkin, V.O. Sadykova, R.V. Charkviani

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

The paper investigates the molding of plate from thermoset composite Etal-Carbon-M reinforced with coal fibers (3%) 0,3 mm long. Molding is carried out by means of the hydraulic cylinder established on universal servohydraulic machine MTS 793 in the heat chamber MTS Environmental Chamber. Modeling of molding is carried out in Moldex3D system taking into account gravity effect. Values of pressure distribution, front time and direction of orientation of reinforcing fibers are received. Verification of model is carried out by comparison of arrangement of the front of molding for number of values of time received theoretically and experimentally. Information about orientation of reinforcing fibers allows to consider anisotropy of mechanical characteristics of samples and products made from plate.

**Keywords:** molding, reinforcing, short fibers, thermoset composite, experiment, model.

Evgeny Kurkin, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor at the Aircraft Construction and Design Department.

E-mail: eugene.kurkin@mail.ru

Vladislava Sadykova, Graduate Student of Institute of Aeronautical Engineering. E-mail: vladislaava.s@yandex.ru

Ramaz Charkviani, Postgraduate Student of Institute of Aeronautical Engineering. E-mail: oneram@yandex.ru