

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 678

doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-34-41

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В СЕЧЕНИЯХ МАЛЫХ КАНАЛОВ

Олег Викторович Петраков^{1✉}, Александр Владимирович Хандожко², Андрей Николаевич Щербаков³, Нина Юрьевна Лакалина⁴

^{1,2,3,4} Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

¹ typeofpeople@mail.ru

² chandosh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0604-8537>

³ taiga78@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1485-0415>

⁴ ninalakalina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4947-2431>

Аннотация

Рассмотрены проблемы моделирования течения полимеров в каналах небольшим сечением при производстве изделий общим объемом порядка 2-3 см³. Описано влияние габаритов каналов на движение реактопласта в подобных каналах. Аргументирована необходимость внимательного контроля проходных сечений каналов небольшого сечения при производстве полимерных изделий. Проведено моделирование запрессовки реактопластом небольшого изделия в пресс-форме, с установлен-

ным закладным элементом. Расположение закладного элемента позволит наиболее близко к действительности оценить характер движения фронта потока в полости формы. Сделана попытка анализа влияния условий запрессовки на получение качественного изделия и поведение закладного элемента в полости формы.

Ключевые слова: реактопласт, моделирование, горячее прессование.

Ссылка для цитирования:

Петраков О.В. Моделирование течения полимеров в сечениях малых каналов / О.В. Петраков, А.В. Хандожко, А.Н. Щербаков, Н.Ю. Лакалина // Транспортное машиностроение. – 2023. – № 11. – С. 34-41. doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-34-41.

Original article

Open Access Article

MODELING OF POLYMER FLOW IN SECTIONS OF SMALL CHANNELS

Oleg Viktorovich Petrakov^{1✉}, Aleksandr Vladimirovich Khandozhko², Andrey Nikolaevich Shcherbakov³, Nina Yuryevna Lakalina⁴

^{1,2,3,4} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ typeofpeople@mail.ru

² chandosh@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0604-8537>

³ taiga78@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1485-0415>

⁴ ninalakalina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4947-2431>

Abstract

The problems of modeling the flow of polymers in channels with a small section in the overall production of about 2-3 cm³ are considered. The influence of channel dimensions on the thermosetting plastic movement in such channels is described. The arguments are given to prove necessity of careful control of the flow sections of small channels in the production of polymer products. A simulation of pressing a small product with the thermosetting plastic in a mold with a

built-in filling element is carried out. The location of the filling element will allow to assess the nature of the flow front movement in the mold cavity most closely to reality. An attempt is made to analyze the influence of pressing conditions on obtaining a high-quality product and the behavior of the filling element in the mold cavity.

Keywords: thermosetting plastic, modeling, hot pressing.

Reference for citing:

Petrakov OV, Khandozhko AV, Shcherbakov AN, Lakalina NYu. Modeling of polymer flow in sections of small channels. *Transport Engineering*. 2023; 11:34-41. doi: 10.30987/2782-5957-2023-11-34-41.

В промышленности используют полимеры двух типов: термопласты и реактопласты. Они одновременно обладают многими различиями и сходством. Постараемся рассмотреть их с точки зрения технологических параметров. Термопласты изменяют свои физико-механические свойства при воздействии температуры, реактопласты – температуры и времени. Термопласты могут быть частично возвращены во вторичное использование, реактопласты – нет. И те и другие нашли свои ниши в промышленном производстве.

Обычно изделия из полимеров могут быть получены одним из следующих способов: литьем под давлением, экструдированием, горячим прессованием. В каждом конкретном случае имеются свои технологические особенности получения бездефектных изделий.

Определенный интерес представляет процесс изготовления изделий небольшого размера, до $2...3 \text{ см}^3$, из реактопластов при горячем прессовании. Дело в том, что в научной и справочной литературе рассмотрено получение, в основном, изделий в десятки и даже сотни см^3 . Соответственно рекомендации по сечениям каналов, рассмотренные физические процессы взаимодействия потока с формой описаны для больших объемов. Однако, в промышленности существуют производства, где требуется получение изделий объемом не более $2...3 \text{ см}^3$. Естественно, уменьшение размеров детали требует уменьшения размеров элементов литниковой системы, в том числе впускных каналов. В ряде случаев появляются жесткие требования по минимизации сечений впусков, что может усложнять процесс заполнения формы пресс-массой.

В этих условиях простое масштабирование литниковой системы не всегда корректно. Реактопласты при моделировании можно рассматривать как неньютоновские жидкости с достаточно высокими коэффициентами внутреннего трения. Ситуация усложняется тем, что при сниже-

нии температуры потока вязкость повышается, кроме того со временем начинаются необратимые процессы полимеризации, что еще значительно увеличивает внутреннее трение в потоке и изменяет характер движения потока полимера в каналах и полости формы.

Из теплофизики известно, что каналы круглого сечения имеют минимальную площадь охлаждения для максимально возможного объема. В то же время технологически наиболее эффективным является изготовление каналов в форме трапеции. Соответственно в таких каналах создаются условия для более ускоренного охлаждения потока, по сравнению с круглым каналом. В то же время даже незначительное изменение габаритов литникового канала приводит к значительному изменению относительных значений охлаждающей стенки и объема полимера. (рис. 1).

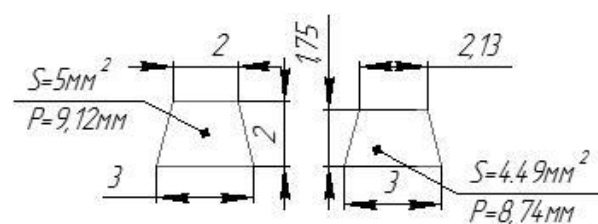


Рис. 1. Изменение основных соотношений в каналах небольшого сечения при изменении размеров каналов
Fig.1. Changing the basic ratios in channels of small section when changing the dimensions of channels

Изменение поперечной площади канала на 11 % повлекло изменение периметра этой площади всего на 5 %, что привело не к пропорциональному изменению в теплоотводящей способности канала. И, как следствие, к изменениям в вязкости потока при движении по этим каналам.

Кроме того, в круглых сечениях и в сечениях трапецевидных происходит различное вовлечение в движение потока по причине наличия трения в пристеночных объемах (рис. 2).

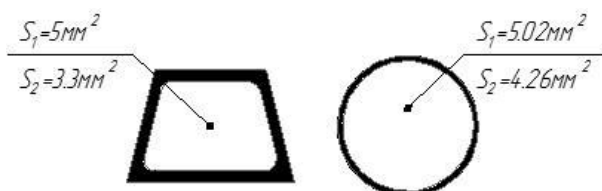


Рис. 2. Изменение проходного сечения канала при наличии поверхностной пленки толщиной 0,2 мм в каналах круглого и трапециевидного сечения

Fig. 2. Change in the flow section of the channel if there is 0.2 mm thick surface film in round and trapezoidal channels

В итоге при движении реактопласта по каналам небольшого сечения, становятся очень значимы даже небольшие изменения геометрии каналов.

При изготовлении изделий методом горячего прессования важными являются такие технологические свойства как: жидкотекучесть и усадка полимера. Оба эти свойства оказывают значительное влияние на качество будущего изделия. А именно способность полимера при данных условиях заполнить полость формы и получить требуемую объемную конфигурацию изделия после полимеризации и охлаждения изделия.

Жидкотекучесть – способность полимера заполнять полость формы и воспроизводить её очертания. Усадка – свойства полимера изменять свой объем при полимеризации и охлаждении с температуры прессования.

Усложняет ситуацию формирование на свободной поверхности потока пленки из полимеризовавшегося вещества, что значительно изменяет гидродинамику движения потока как в каналах формы, так и в полости формы.

Для изделий большого объема изменения в жидкотекучести потока по мере его движения по пресс-форме можно компенсировать увеличением общего давления прессования. Для маленьких изделий это не всегда возможно, поскольку в пресс-форме часто присутствуют закладные элементы, способные деформироваться из-за усилий прессования. Поэтому становится еще более важным суметь правильно рассчитать движение потока в каналах и полости формы с целью определе-

ния эффективных параметров запрессовки: температуры, давления, площади и длины литниковых каналов, места подвода потока в полость изделия. Реальная задача дополнительно усложняется наличием нескольких рабочих полостей на пресс-форме. Отличия длин питающих каналов от центрального питателя до впускных сечений определяет и разные условия заполнения этих полостей. Разная скорость заполнения в сочетании с изменением свойств пресс-массы из-за остывания и полимеризации усложняет получение изделий стабильного качества в разных рабочих гнездах.

Аналитические методы уточнения расчета литниковой системы для таких условий отсутствуют. Альтернативой может быть использование численного моделирования процесса заполнения рабочих полостей пресс-массой.

С этой целью было проведено моделирование горячего прессования изделия с закладным элементом в виде пластины с прорезями (рис. 3.). Моделирование проводилось на трехмерной модели, выполненной в CAD-системе.

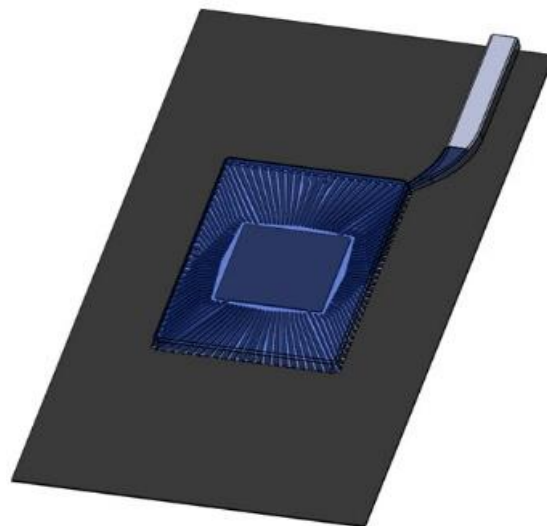


Рис. 3. Внешний вид полости формы и закладного элемента
Fig. 3. External view of the mold cavity and the filling element

В используемой модели прорези в пластине были учтены, в том числе с учетом дополнительного возникающего сопротивления движению потока пресс-массы.

Чаще всего при прессовании используются полимеры на основе эпоксидных или полиэфирных смол. Для моделирования был выбран реактопласт *EMC Nitto Denko/MP190M*. Это хорошо известный полимер с высокими электроизолирующими свойствами и низкой теплопроводностью. В модели были учтены основные технологические свойства полимера, которые показаны на рис. 4 и в табл. 1.

Условия проведения запрессовки были приняты согласно требованиями производителя и реализуемые на современном технологическом оборудовании. Эти условия приведены в табл. 2. Таким образом, была сделана попытка приближения параметров моделирования к реальным условиям запрессовки.

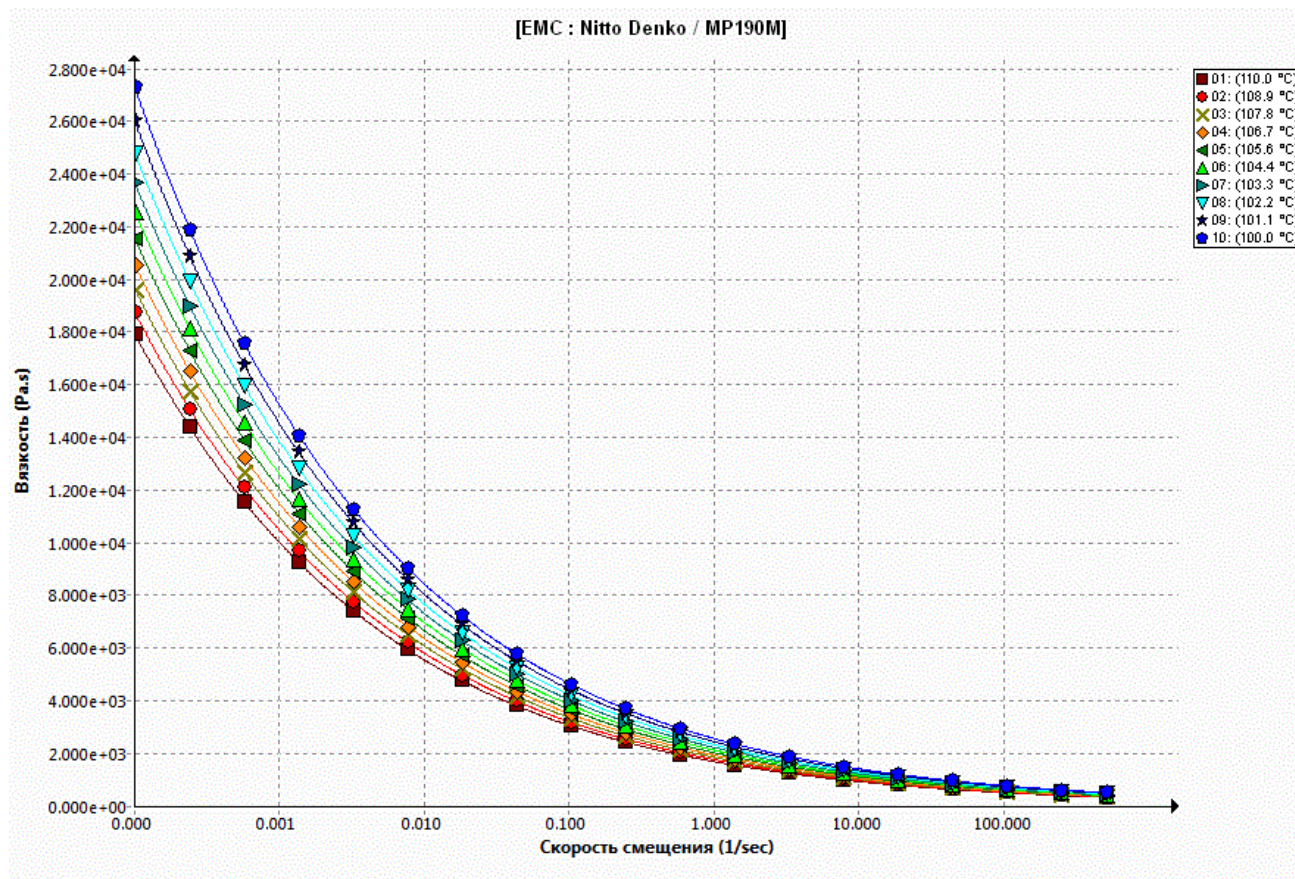


Рис. 4. Зависимость вязкости от скорости смещения потока
Fig. 4. Dependence of viscosity on the flow displacement rate

Технологические свойства полимера

Таблица 1

Technological properties of the polymer

Table 1

Свойство	Значение, °C
Температура плавления	50
Макс. температура плавления	120
Мин. температура плавления	25
Температура пресс-формы	160
Макс. температура пресс-формы	180
Мин. температура пресс-формы	140
Температура перехода	105

Parameters of pressing

Параметр	Значение
Время заполнения	0,55 с
Температура плавления	50 °С
Температура пресс-формы	175 °С
Макс. давление инъекции	60 МПа
Сила сжатия пресс-формы	100 тонн
Время выдержки под давлением	2,1 с
Полное время охлаждения	57,9 с
Температура окружающей среды	30 °С
Материал пресс-формы	20X13

Для уточнения правильности конструктивных решений литниковой системы пресс-формы был проведен ряд численных экспериментов.

В этих экспериментах варьировались геометрические параметры (длины и сечения) отдельных элементов литниковой системы, в первую очередь впусков. В модели варьировалось также направление впускного канала относительно поверхностей формирующих полостей и закладных элементов. Кроме того, исследовалось влияние давления прессования. В результате проведенного моделирования были получены данные по движению фронта потока полимера в полости пресс-формы, давлению в них.

Расчетная среда дает возможность рассматривать процесс по стадиям заполнения рабочих полостей в любой момент цикла. Графическое отображение процесса заполнения полостей сопровождается числовыми значениями температуры и давления по всему объему пресс-массы и по фронту её движения.

Некоторые результаты моделирования представлены в виде рисунков, на которых запечатлены в различные моменты времени данные, характеризующие расположение фронта потока движущегося полимера и его температуры (рис. 5-7).

Последовательность состояния пресс-массы в формирующих полостях в ходе процесса запрессовки позволяет судить о характере движения потока полимера,

его температуре, давлении, равномерности заполнения каждой полости и всех полостей пресс-формы.

Из представленных на рисунках данных видно, что пристеночное трение потока тормозит крайние области потока. При этом формируется эллипсообразный фронт потока. Таким образом в полости формы уже через 1,5 с. создаются объем пресс-массы с большим перепадом температур и давлений. Анализ последовательно следующих состояний пресс-массы в форме позволил решить в первом приближении несколько практических задач.

Моделирование позволило дать рекомендации по направлению впускного канала. Рекомендованное направление обеспечивает равномерное заполнение рабочих полостей с вытеснением воздуха и газов из них в имеющиеся выпоры.

Для определения минимально допустимых размеров впускных каналов, обеспечивающих нормальное заполнение рабочих полостей, была проведена серия численных экспериментов с варьированием этого параметра. Несмотря на некоторое расхождение с результатами реальных запрессовок моделирование оказалось полезным для уточнения имеющихся в справочной литературе рекомендаций.

Еще одним направлением для моделирования были исследования деформаций закладных элементов, возможных при прессовании.

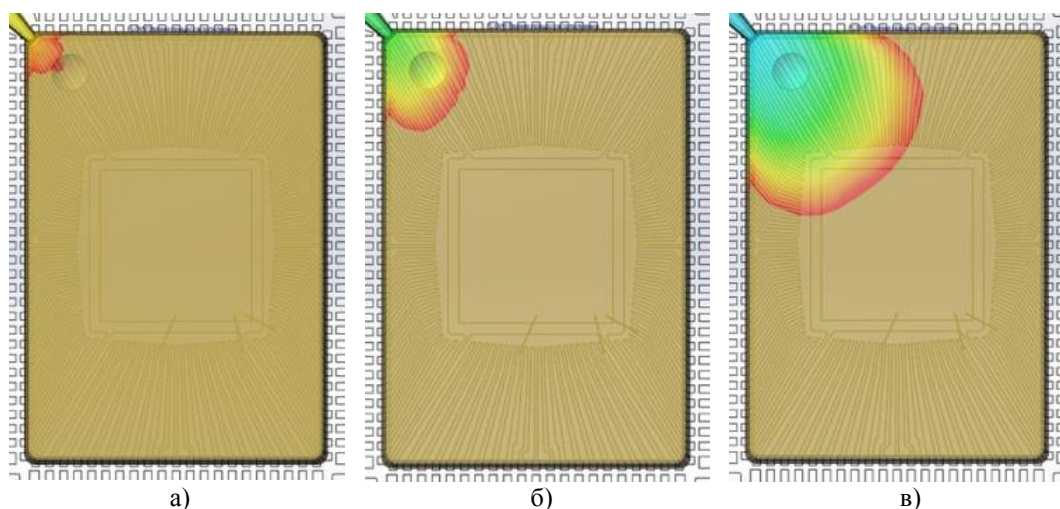


Рис. 5. Движение фронта пластической массы в полости пресс-формы в моменты времени:
 а – 0,8 с; б – 0,96 с; в – 1,85 с
Fig. 5. Movement of the plastic front in the mold cavity at time points:
 а – 0.8 s; б – 0.96 s; в – 1.85 s

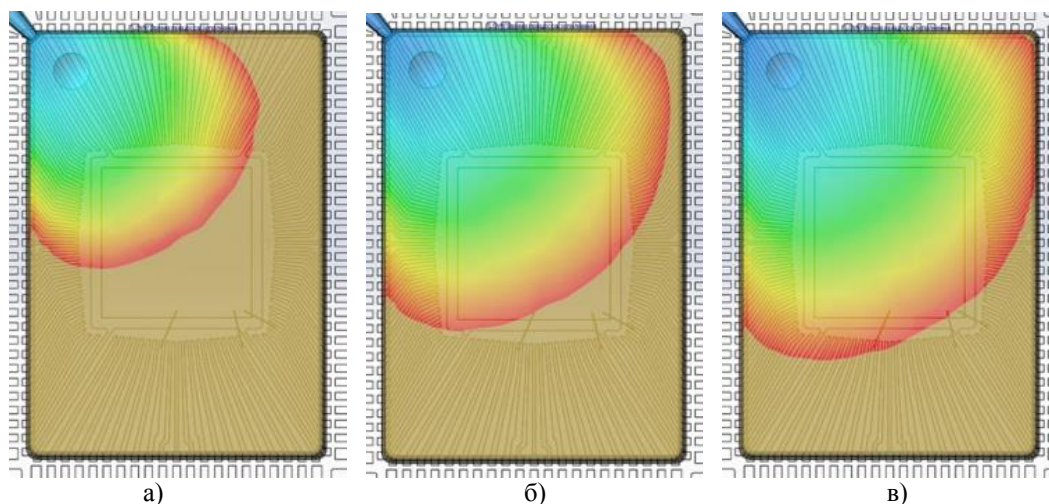


Рис. 6. Движение фронта пластической массы в полости пресс-формы в моменты времени:
 а – 3,4 с; б – 4,6 с; в – 5,2 с
Fig. 6. Movement of the plastic front in the mold cavity at time points:
 а – 3.4 s; б – 4.6 s; в – 5.2 s

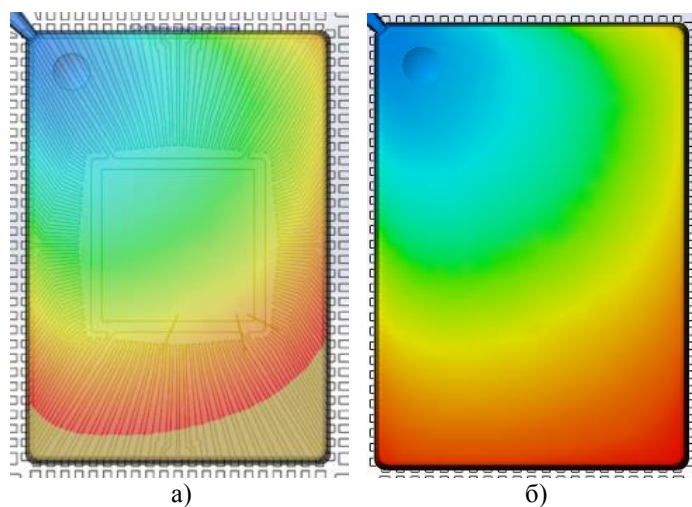


Рис. 7. Движение фронта пластической массы в полости пресс-формы в моменты времени:
 а – 6,2 с; б – 6,4 с
Fig. 7. Movement of the plastic front in the mold cavity at time points:
 а – 6.2 s; б – 6.4 s

Понимание механизма формирования потока в полости формы позволило оценить поведение закладных элементов в форме. В ходе этого эксперимента была

Заключение

Численное моделирование процесса прессования полимеров представляет интерес для инженерной практики и научных исследований. Даже с учетом имеющихся количественных ошибок в результатах моделирования наблюдение за процессом заполнения пресс-формы, изменением тепловых полей, давления в рабочих полостях дает много информации для проектирования пресс-форм. Особенно это важно, когда проектирование выполняется для условий прессования, которые встречаются достаточно редко и не отражены в справочной литературе. Проведенные численные эксперименты

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Филатов В.И., Корсаков В.Д. Технологическая подготовка процессов формования изделий из

REFERENCES

1. Filatov VI, Korsakov VD. Technological preparation of molding processes of plastics. Lenin-

Информация об авторах:

Петраков Олег Викторович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Материаловедение и машиностроение» Брянского государственного технического университета, e-mail: typeofpeople@mail.ru, тел. +7(980)306-47-32.

Хандожко Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, e-mail: chandosh@yandex.ru, тел. +7(929)023-01-23.

Petrakov Oleg Viktorovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Science and Mechanical Engineering at Bryansk State Technical University, e-mail: typeofpeople@mail.ru; phone: +7(980)306-47-32.

Khandozhko Alexander Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal-cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, e-mail: chandosh@yandex.ru; phone: +7(929)023-01-23.

оценена вероятность деформации закладного элемента, а также возникновение дефектов изделия в виде пузырей воздуха, спаев.

для формирования изделий малого объема и размерами впускных каналов менее рекомендованных справочной литературой позволили решить ряд практических конструкторских задач. В частности, были уточнены размеры впускных каналов, их направления, проверена вероятность возникновения деформации закладных элементов. Актуальной задачей является совершенствование модели заполнения пресс-формы для повышения её точности и возможности перехода от качественного к количественному описанию процесса прессования.

пластмасс. Ленинград: Политехника, 1991. 352 с. ISBN 5-7325-0146-0.

grad: Polytekhnika, 1991. 352 p. ISBN 5-7325-0146-0.

Щербakov Андрей Николаевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, email: taiga78@list.ru.

Лакалина Нина Юрьевна – доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Брянского государственного технического университета, email: ninalakalina@yandex.ru.

Shcherbakov Andrey Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department Metal-cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, email: taiga78@list.ru.

Lakalina Nina Yuryevna – Associate Professor of the Department of Metal-cutting Machines and Tools at Bryansk State Technical University, email: ninalakalina@yandex.ru.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 15.10.2023; одобрена после рецензирования 24.10.2023; принята к публикации 27.10.2023. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 15.10.2023; approved after review on 24.10.2023; accepted for publication on 27.10.2023. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.