

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 001.891.57

doi: 10.30987/2658-6436-2025-4-19-23

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОЛИМЕРОВ В ПРЕССФОРМАХ

Александр Владимирович Яровой¹, Александр Юрьевич Бекмешов²

¹ Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

² Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук, г. Москва, Россия

¹ ayarovoy@sfnu.ru

² b-a-y-555@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8091-0722>

Аннотация. *Представлена разработка и апробация параметрической модели процесса литья под давлением полимерных изделий, которая направлена на формализацию взаимосвязей между критическими технологическими параметрами, такими как температура расплава и пресс-формы, давление впрыска, скорость литья и время выдержки под давлением. Модель позволяет анализировать ключевые выходные характеристики готового изделия, включая усадку, остаточные напряжения и равномерность плотности. Кроме того, рассматривается актуальная проблема повышения эффективности и надежности проектирования пресс-форм, так как традиционные методы инженерного расчета основаны на последовательном переборе параметров. Целью исследования является повышение производительности и улучшение качества производства литья полимерных изделий. Задачей является построение, верификация и практическая апробация комплексной параметрической модели, интегрирующей физические аспекты течения, теплообмена и отверждения полимерного расплава в полости пресс-формы. В исследовании применялись реологическое моделирование неньютоновских жидкостей, методы планирования вычислительных экспериментов. Методы исследования опираются на положения фундаментальных теорий геометрического моделирования, алгоритмов, биоинспирированной оптимизации: генетического алгоритма и метода роя частиц. Новизна работы заключается в создании целостной параметрической модели, которая в отличие от узкоспециализированных коммерческих пакетов САЕ, представляет универсальный инструмент для быстрого моделирования процесса литья, анализа чувствительности и определения оптимального соотношения «затраты-качество» на ранних стадиях проектирования. В результате разработана параметрическая модель, представленная в виде структурной схемы. Проведены серии вычислительных экспериментов, позволившие установить зоны стабильности процесса для различных комбинаций материалов и геометрий изделий. Предложенная параметрическая модель является эффективным инструментом для прогнозного анализа и оптимизации процесса литья под давлением. Ее использование способствует сокращению времени настройки оборудования, минимизации брака и повышению ресурса пресс-формы.*

Ключевые слова: пресс-форма, литье под давлением, оптимизация конструкции, генетический алгоритм, метод роя частиц, метаэвристика

Для цитирования: Яровой А.В., Бекмешов А.Ю. Параметрическое моделирование процесса литья полимеров в прессформах // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №4 (30). С. 19-23. doi: 10.30987/2658-6436-2025-4-19-23.

Original article

Open Access Article

PARAMETRIC MODELLING OF POLYMER INJECTION MOLDING PROCESS

Alexander V. Yarovoy¹, Alexander Yu. Bekmeshov²

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

²Institute for Computer-Aided Design of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

¹ ayarovoy@sfnu.ru

² b-a-y-555@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8091-0722>

Abstract. *This paper presents the development and validation of a parametric model for injection molding of polymer products. The model formalizes the interrelationships between critical technological parameters such as melt temperature, mold temperature, injection pressure, casting speed, and holding time. It allows analysing key output characteristics of finished items, including shrinkage, residual stresses, and density uniformity. The study addresses the urgent problem of improving press-form design efficiency and reliability, as conventional engineering calculations rely heavily on sequential trial-and-error parameter adjustment. The research aims to increase productivity and enhance*

the quality of polymer injection molding production. The objective is to construct, verify, and test a comprehensive parametric model that integrates the physical aspects of flow, heat exchange, and polymer melt solidification within the mold cavity. The study incorporates rheological modelling of non-Newtonian fluids and computational experiment planning methods. The research methods draw on geometric modelling fundamental theories, bioinspired optimization algorithms, namely genetic algorithm and particle swarm optimization. The novelty of the work lies in creating an integrated parametric model, which unlike specialized commercial CAE packages, provides a universal tool for rapid simulation of the injection molding process, sensitivity analysis, and cost-quality ratio optimization at early design stages. The result is a parametric model presented as a structural diagram. Computational experiments reveal the process stability zones for various combinations of materials and geometries of items. The proposed parametric model serves as an effective predictive analysis and optimization tool for injection molding, facilitating reduced equipment setup time, minimized defect rates, and increased mold durability.

Keywords: mold, injection molding, design optimization, genetic algorithm, particle swarm optimization, meta-heuristic

For citation: Yarovoy A.V., Bekmeshov A.Yu. Parametric Modelling of Polymer Injection Molding Process. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 4 (30). pp. 19-23. doi: 10.30987/2658-6436-2025-4-19-23.

Введение

Современное производство полимерных изделий методом литья под давлением характеризуется высокой сложностью и многопараметричностью. Неоптимальный выбор технологических режимов приводит к таким дефектам, как коробление, утяжины, несплошности и высокие остаточные напряжения, что напрямую влияет на себестоимость и качество продукции. Актуальность задачи заключается в необходимости перехода от эмпирического подхода к настройке пресс-форм к научно обоснованному, прогнозному моделированию, основанному на глубоком понимании физики процесса.

Существующие системы компьютерного инжиниринга (CAE) для симуляции литья, такие как *Moldex3D* или *Autodesk Moldflow*, предоставляют детальные результаты, но часто требуют значительных вычислительных ресурсов и высокой квалификации пользователя для интерпретации данных. Это создает потребность в более простых, но достаточно точных инструментах для предварительного анализа и быстрой оценки влияния ключевых параметров.

В данной работе предлагается параметрическая модель, которая абстрагирует фундаментальные физические принципы в набор управляемых переменных и их взаимосвязей. Модель служит мостом между теоретическими основами технологии литья и практическими потребностями инженера-технолога, позволяя проводить быстрые итерации по поиску рациональных режимов без проведения полномасштабных CAE-расчетов на начальных этапах.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Исследование проводилось в несколько этапов. На первом этапе был проведен анализ физико-химических основ процесса литья под давлением, что позволило идентифицировать ключевые управляющие параметры ($X_1 \dots X_n$) и выходные отклики ($Y_1 \dots Y_n$). К управляющим параметрам отнесены: температура расплава, температура формы, давление впрыска, скорость впрыска, время выдержки под давлением, время охлаждения. Выходными параметрами выбраны: линейная усадка, величина остаточных напряжений, равномерность плотности по сечению изделия.

На втором этапе разработана структурная схема параметрической модели, отображающая причинно-следственные связи между параметрами. Модель построена на основе системы уравнений, включающей: уравнение неразрывности, уравнение движения неньютоновской жидкости (с аппроксимацией степенным законом), уравнение теплопроводности с учетом фазового перехода и кинетики отверждения.

Для верификации модели использовались данные натуральных экспериментов для конкретного материала (полипропилен, PP) и типовой геометрии изделия. Планирование вычислительных экспериментов и анализ чувствительности проводились с использованием методов регрессионного анализа.

Результаты

Основным результатом работы является структурная схема параметрической модели, которая визуализирует комплекс взаимосвязей между входными и выходными параметрами процесса. Схема позволяет наглядно оценить влияние изменения любого из технологических параметров на конечное качество изделия (рис. 1).

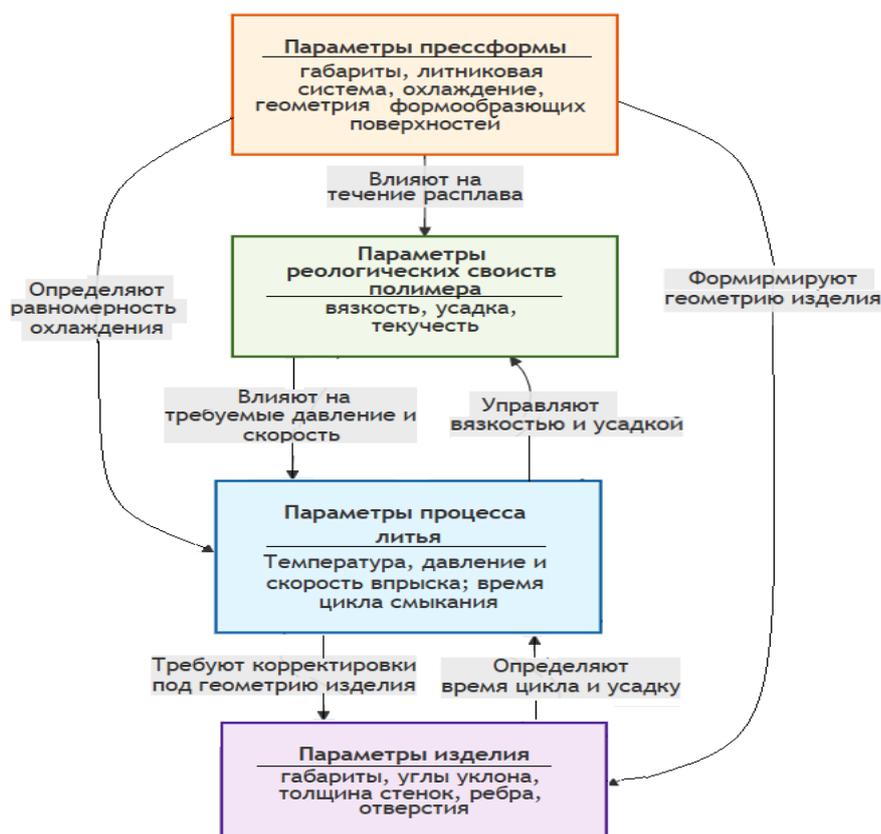


Рис. 1. Структурная схема параметрической модели процесса литья под давлением
Fig. 1. Structural diagram of the parametric model of the injection molding process

Говоря о свойствах разработанной модели, стоит отметить ключевые аспекты характеризующие взаимодействия ее элементов:

- вязкость полимерного расплава напрямую определяет, насколько легко материал заполнит тонкие и сложные участки пресс-формы;
- температура расплава управляет этой вязкостью, а её чрезмерное повышение рискует вызвать термическое разложение материала;
- давление выдержки является ключевым параметром для компенсации объёмной усадки полимера при остывании;
- от величины давления выдержки напрямую зависят итоговая плотность и масса готового изделия;
- равномерность охлаждения, задаваемая системой каналов в форме, критически влияет на отсутствие коробления и внутренних напряжений;
- время охлаждения должно быть достаточным для стабилизации размеров изделия до его извлечения из формы;
- расположение и размер литниковой системы задают направление течения расплава и точки образования сварных линий;
- геометрия изделия, особенно резкие перепады толщин стенок, создаёт неравномерную усадку, ведущую к деформациям;
- температура самой пресс-формы напрямую влияет на качество поверхности: высокая температура даёт глянец, а низкая – матовость;
- скорость впрыска формирует ориентацию макромолекул полимера, что создаёт анизотропию механических свойств;
- правильная вентиляция полости формы необходима для предотвращения дефектов, вызванных сгоранием или сжатием воздуха;
- влажность гранулята перед переработкой напрямую сказывается на появлении таких дефектов, как серебрение и пузыри.

Таким образом, все параметры взаимосвязаны, и конечные свойства изделия являются результатом тонкого баланса между характеристиками материала, настройками процесса и конструкцией оснастки. Данные положения могут быть эффективно использованы при подготовке литьевого производства на предприятиях. Далее это показано в табл. 1.

Влияние параметров на свойства изделия
Effect of parameters on product properties

Параметр	Влияние на процесс	Влияние на свойства изделия
Температура расплава ↑	Вязкость ↓, легче заполнение	Прочность литевых линий ↑, меньше остаточные напряжения, но риск деградации
Температура формы ↑	Время цикла ↑, легче заполнение	Глянec поверхности ↑, прочность сварных линий ↑, остаточные напряжения ↓, но усадка ↑
Давление выдержки ↑	-	Плотность ↑, усадка ↓, масса изделия ↑, меньше западин (раковин)
Скорость впрыска ↑	Заполнение легче, риск джеттинга	Прочность сварных линий ↑, анизотропия свойств ↑ (ориентация молекул), риск застывших напряжений
Время выдержки ↑	-	Масса/плотность ↑ до предела, усадка ↓, меньше западин
Время охлаждения ↑	Производительность ↓	Стабильность размеров ↑, коробление ↓, риск переохлаждения и напряжений

На основе модели были построены поверхности отклика, демонстрирующие зоны оптимальных значений технологических параметров для достижения заданных критериев качества. В табл. 2 представлен пример анализа влияния температуры расплава и давления на величину усадки.

Таблица 2
Table 2

Влияние температуры расплава и давления впрыска на линейную усадку изделия
Influence of melt temperature and injection pressure on the linear shrinkage of the product

Температура расплава, °С	Давление впрыска, МПа	Линейная усадка, %
220	60	1,8
240	60	1,6
220	80	1,5
240	80	1,3

Заключение

Разработанная параметрическая модель показала свою адекватность при сопоставлении с экспериментальными данными. Полученные результаты свидетельствуют о том, что модель корректно отражает нелинейный характер влияния технологических параметров на выходные характеристики. Наибольшее влияние на равномерность усадки и величину остаточных напряжений оказывают сочетание температуры пресс-формы и времени выдержки под давлением, что согласуется с известными теоретическими положениями.

Практическая ценность модели заключается в ее способности служить основой для создания систем поддержки принятия решений при проектировании технологических процессов литья. Использование модели на этапе подготовки производства позволяет сократить количество дорогостоящих пробных отливок и ускорить выход на стабильный производственный режим.

Перспективы дальнейших исследований видятся в углублении модели за счет учета более сложных реологических моделей полимеров, а также в ее интеграции с системами промышленного интернета вещей (*IIoT*) для адаптивного управления процессом в реальном времени на основе прогнозов модели.

Список источников:

- Zaruba D., Zaporozhets D., Kuliev E. Parametric optimization based on bacterial foraging optimization // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2017. – Т. 573. – С. 54-63.
- Интеллектуальные системы: модели и методы метаэвристической оптимизации: Монография / Л.А. Гладков, Ю.А. Кравченко, В.В. Курейчик, С.И. Родзин. – Чебоксары: ООО «Издательский дом «Среда», 2024. – 228 с.
- Родзин С.И., Курейчик В.В. Теоретические вопросы и современные проблемы развития когнитивных биоинспирированных алгоритмов оптимизации (обзор) // *Кибернетика и программирование*. – 2017. – Т. – 3 – С. 51-79.

References:

- Zaruba D., Zaporozhets D., Kuliev E. Parametric Optimization Based on Bacterial Foraging Optimization. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017;573:54-63.
- Gladkov LA, Kravchenko YA, Kureichik VV, et al. *Intelligent Systems: Models and Methods of Metaheuristic Optimization*. Cheboksary: Sreda; 2024.
- Rodzin S.I., Kureichik V.V. Theoretical Issues and Current Problems in the Development of Cognitive Bio-inspired Optimization Algorithms. *Cybernetics and Programming*. 2017;(3):51-79.

4. Яровой А.В. Методы и средства трехмерного моделирования в САПР // Теоретические и практические основы научного прогресса в современном обществе: сборник статей Международной научно-практической конференции, г. Новосибирск, РФ, 20 сентября 2024 г. – Уфа: Аэтерна, 2024. – С. 14-19.

5. Яровой А.В. Стратегии использования стандартных конструктивных элементов блочных прессформ для литья полимерных изделий // Актуальные вопросы современной науки и образования: Сборник статей XLIX Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Пенза, 15 августа 2025 года. – Пенза: Наука и Просвещение, 2025. – С. 72-75.

6. Яровой А.В. Метаэвристические методы в параметрическом и трехмерном моделировании прессформ для литья полимерных изделий // Актуальные вопросы совершенствования научной деятельности: теоретический и практический подход: Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Иркутск, 19 августа 2025 года. – Стерлитамак, 2025. – С. 113-116.

7. Лопатов М.Г., Чукичев А.В., Тимофеева О.С. Методика проектирования формообразующих деталей литьевых форм с использованием информационных технологий // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2023. – Т. 66, № 3. – С. 241-246.

8. Авдеев В.С., Ковалев С.П. САПР технологических процессов переработки пластмасс. – СПб.: Профессия, 2017. – 320 с.

9. Gao Y., Wang X. An effective warpage optimization method in injection molding based on the Kriging model // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 37. – P. 953-960.

10. Карлова Т.В., Кузнецова Н.М., Бекмешов А.Ю. Оптимизация доступа к информационным ресурсам в промышленности // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 3(47). – С. 135-138.

11. Касьянов С.В., Карлова Т.В. Жизненный цикл деталей машины как непрерывный поток // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 7(80). – С. 18-22.

12. Карлова Т.В., Бекмешов А.Ю., Шептунов С.А. Модель межуровневого взаимодействия в управлении робототехническими производствами // Качество. Инновации. Образование. – 2016. – № S2(129). – С. 171-176.

4. Yarovoy AV. Methods and Tools for Three-Dimensional CAD Modelling. In: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference on Theoretical and Practical Foundations of Scientific Progress in Modern Society; 2024 Sept 20; Novosibirsk. Ufa: Aerterna; 2024. p. 14-19.

5. Yarovoy AV. Strategies for Using Standard Structural Elements of Block Molds for Casting Polymer Products. In: Proceedings of the 49th International Scientific-Practical Conference on Current Issues of Modern Science and Education; 2025 Aug 15; Penza: Science and Education; 2025. p. 72-75.

6. Yarovoy AV. Metaheuristic Methods in Parameterized and Three-Dimensional Mold Design for Casting Polymer Products. In: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference on Current Issues of Scientific Activity Improvement: Theoretical and Practical Approach. 2025 Aug 19; Irkutsk. Sterlitamak: 2025. p. 113-116.

7. Lopatov M.G., Chukichev A.V., Timofeeva O.S. Methodology for Designing Forming Parts of Injection Molds Using Information Technologies. Journal of Instrument Engineering. 2023;66(3):241-246.

8. Avdeev V.S., Kovalev S.P. CAD Systems for Plastic Processing Technology. Saint Petersburg: Professija; 2017.

9. Gao Y., Wang X. An Effective Warpage Optimization Method in Injection Molding Based on the Kriging Model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2008;37:953-960.

10. Karlova T.V., Kuznetsova N.M., Bekmeshov A.Y. Optimization of Access to Information Resources in Industry. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2015;(3)(47):135-138.

11. Kasyanov S.V., Karlova T.V. Machinery Life as a Continuous Flow of Technologies. Bulletin of Bryansk State Technical University. 2019;7(80):18-22.

12. Karlova T.V., Bekmeshov A.Y., Sheptunov S.A. Model Inter-Layer Interaction in the Management of Robotics Industries. Quality. Innovation. Education. 2016;S2(129):171-176.

Информация об авторах:

Яровой Александр Владимирович
аспирант кафедры САПР им. В.М. Курейчика
Южного Федерального Университета.

Бекмешов Александр Юрьевич
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник Института конструкторско-
технологической информатики Российской академии
наук.

**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 поступила в редакцию 25.10.2025; одобрена после рецензирования 25.10.2025; принята к публикации 07.11.2025.

The article was submitted 25.10.2025; approved after reviewing 25.10.2025; accepted for publication 07.11.2025.

Рецензент – Бутарев И.Ю., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Butarev I.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.