

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 631.3:004.67

doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-12-19

МЕТАЭВРИСТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВА ПРЕСС-ФОРМ ЛИТЬЯ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Александр Владимирович Яровой^{1✉}, Александр Юрьевич Бекмешов^{2✉}

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

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

¹ ayarovoy@sfedu.ru

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

Аннотация. Рассмотрена актуальная проблема повышения эффективности и надежности проектирования пресс-форм для литья полимерных изделий. Традиционные методы инженерного расчета, основанные на последовательном переборе параметров, часто оказываются трудоемкими и не позволяют выйти на глобальный оптимум конструкции, особенно при наличии множества противоречивых критериев, таких как минимальная масса, максимальная жесткость, равномерность температурного поля и минимизация литейных дефектов. Целью исследования является повышение производительности и улучшение качества производства литья полимерных изделий. Задачей является оптимизация критериев эффективности проектирования пресс-форм для литья полимерных изделий. Методы исследования опираются на положения фундаментальных теорий геометрического моделирования, алгоритмов, биоинспирированной оптимизации: генетического алгоритма и метода роя частиц. Новизна работы заключается в адаптации операторов гибридизации, позволяющей интегрировать механизм направленного движения роя частиц в генетический поиск для преодоления преждевременной сходимости и скачкообразного исследования пространства проектных переменных. Результаты исследования демонстрируют, что предложенный гибридный алгоритм на 22 % эффективнее классического генетического алгоритма по скорости сходимости и позволяет получить Парето-фронт решений, обеспечивающих снижение массы инструмента на 15 % при одновременном снижении максимальных термических деформаций на 8 % по сравнению с исходным проектом. Выводы: разработанный гибридный алгоритм биоинспирированной оптимизации является эффективным инструментом для поддержки принятия решений на этапе конструкторского проектирования сложного литейного оборудования.

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

Для цитирования: Яровой А.В., Бекмешов А.Ю. Метаэвристическая оптимизация конструктива пресс-форм литья полимерных изделий // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2026. №1 (31). С. 12-19. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-12-19.

Original article

Open Access Article

METAHEURISTIC OPTIMIZATION OF POLYMER INJECTION MOLD DESIGN

Alexander V. Yarovoy^{1✉}, Alexander Yu. Bekmeshov^{2✉}

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

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

¹ ayarovoy@sfedu.ru

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

Abstract. The paper addresses the relevant issue of enhancing the efficiency and reliability of mold design for polymer injection molding. Traditional engineering calculation methods, relying on sequential parameter search, often prove labour-intensive and unable to achieve a global optimum of the design, particularly when dealing with multiple conflicting criteria such as minimal weight, maximal rigidity, uniform temperature distribution, and minimization of casting defects. The aim of the study is to improve productivity and enhance the quality of polymer injection molding production. The objective is to optimize the effectiveness criteria of mold design for polymer injection molding. The research methods rely on the principles of fundamental theories of geometric modeling, bio-inspired optimization algorithms, genetic algorithms, and particle swarm optimization. The novelty of the work lies in adapting hybridization operators, enabling the incorporation of the directed movement mechanism of particle swarms into genetic search to overcome premature convergence and facilitate abrupt exploration of the design variable space. The study results demonstrate that the proposed hybrid algorithm is 22 % faster in convergence speed compared to classical genetic algorithms and yields Pareto-optimal front solutions, achieving a 15% reduction in tool mass and simultaneously decreasing maximum thermal deformations by 8 % compared to the original design. The findings state that the developed

hybrid algorithm of bio-inspired optimization proves to be an effective tool for supporting decision-making during the conceptual design of complex casting equipment.

Keywords: mold, injection molding, design optimization, genetic algorithm, particle swarm optimization, metaheuristics

For citation: Yarovoy A.V., Bekmeshov A.Yu. Metaheuristic Optimization of Polymer Injection Mold Design. Automation and modeling in design and management, 2026, no. 1 (31). pp. 12-19. doi: 10.30987/2658-6436-2026-1-12-19.

Введение

Современное производство полимерных изделий предъявляет высокие требования к точности, воспроизводимости и экономической эффективности процессов, ключевым элементом которых является пресс-форма. Конструктив пресс-формы, включая геометрию литниковой системы, систему термостатирования, схему выталкивания и конструкцию разъемов, определяет не только качество конечного изделия, но и ресурс самого инструмента, энергопотребление и трудоемкость его обслуживания. Проблема оптимального проектирования усугубляется многокритериальностью задачи, где необходимо одновременно минимизировать массу (следовательно, стоимость материала), максимизировать жесткость и равномерность прогрева, избегая при этом возникновения концентраторов напряжений и критических деформаций.

Актуальность решения данной задачи обусловлена постоянным ужесточением рыночных условий, требующих сокращения сроков проектирования и снижения себестоимости продукции без ущерба для ее качества. Традиционные подходы, основанные на интуиции и опыте конструктора с последующей итерационной проверкой методом конечных элементов, не являются системными и часто приводят к субоптимальным, избыточно материалоемким решениям.

В качестве математического аппарата для решения подобных сложных многокритериальных задач с нелинейными ограничениями хорошо зарекомендовали себя метаэвристические методы, в частности, генетические алгоритмы (ГА) и метод роя частиц (*PSO*). Генетические алгоритмы эффективно исследуют глобальное пространство поиска за счет операторов кроссовера и мутации, но могут медленно сходиться в окрестности оптимума. Метод роя частиц, напротив, обладает высокой скоростью сходимости благодаря механизму запоминания и коллективного интеллекта, но склонен к застреванию в локальных оптимумах при сложном ландшафте функции. Таким образом, синтез этих методов в гибридный алгоритм представляется логичным путем для нивелирования их индивидуальных недостатков и создания мощного оптимизационного инструментария для задач инженерного проектирования.

Материалы, модели, эксперименты и методы

Объектом исследования настоящей работы является трехмерная модель двухместной блочной пресс-формы (рис. 1) для литья изделия крышка корпуса из стеклонаполненного полиамида-66 (рис. 2).

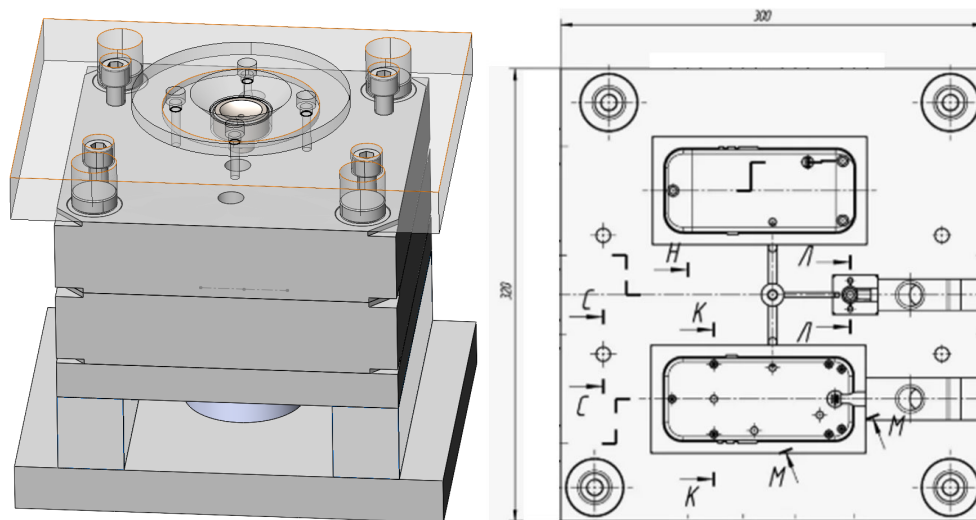


Рис. 1. Трехмерная модель двухместной пресс-формы и проекционный вид формообразующей поверхности сборочного чертежа пресс-формы для литья изделия крышка корпуса

Fig. 1. Three-dimensional model of a double mold and projection view of the forming surface of the assembly drawing of the mold for casting the product cover of the case.

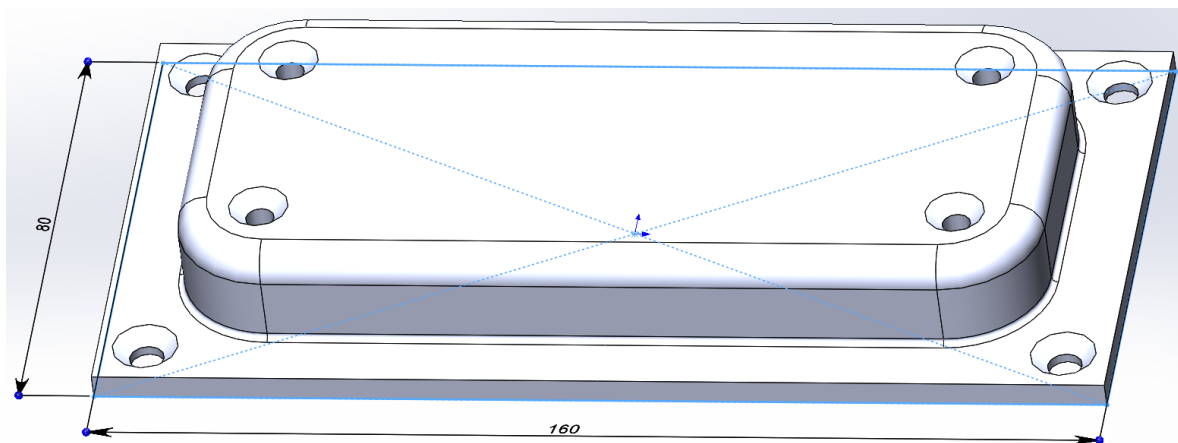


Рис. 2. Трехмерная модель изделия крышка корпуса
 Fig. 2. Three-dimensional model of the product cover

В качестве проектных переменных были выбраны семь ключевых параметров: толщина опорных плит (A , B), диаметр охлаждающих каналов (C , D), расстояние от канала до поверхности формы (E , F) и диаметр литника (G). Ограничения выступили: максимальное напряжение по Мизесу < 250 МПа, максимальная деформация $< 0,3$ мм, перепад температуры на поверхности формы < 15 °С.

Целевыми функциями для минимизации были определены: $F1(X)$ – общая масса пресс-формы; $F2(X)$ – максимальная деформация плит под *clamping force*; $F3(X)$ – стандартное отклонение температуры на рабочей поверхности формы.

План исследования составлен из трех этапов.

1. Параметризация и симуляция. *CAD*-модель была параметризирована в *Siemens NX*. Для каждого набора параметров X автоматически запускался последовательный расчет в программе *Moldex3D* (анализ заполнения и охлаждения) и *ANSYS* (структурный статический анализ). Результаты обрабатывались встроенным программным модулем для расчета значений $F1$, $F2$, $F3$.

2. Реализация алгоритмов. Был реализован классический ГА (рис. 3) с бинарной кодировкой, турнирной селекцией и двухточечным кроссовером. В классическом *PSO* методе (рис. 4) реализованы параметры инерционного веса в диапазоне от 0,9 до 0,4, когнитивный и социальный коэффициент равны 2. Далее был создан гибридный алгоритм *GA-PSO* (представлен на рис. 5).

В настоящей работе суть произведенной модификации заключается в том, что после каждой 5-й итерации работы ГА 20 % наименее приспособленных особей заменяются не случайным образом, а новыми частицами, положение которых рассчитывается по закону движения *PSO* на основе лучших значений локальных и глобальных переменных позиций из текущей популяции. Это позволило внести направленный, а не случайный поиск в процесс эволюции.

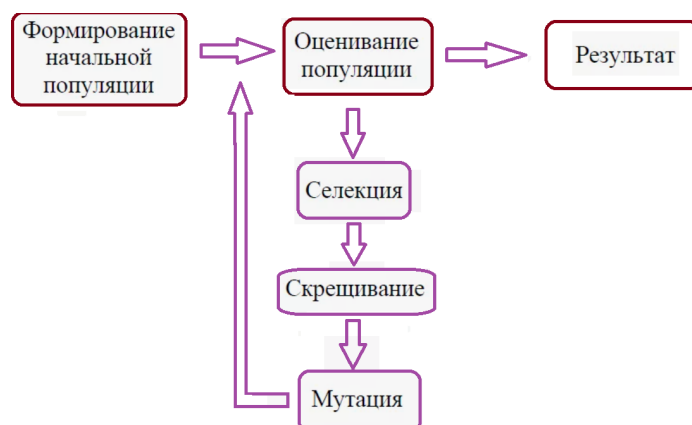


Рис. 3. Базовая структурная схема классического генетического алгоритма
 Fig. 3. Basic structure of a classical genetic algorithm

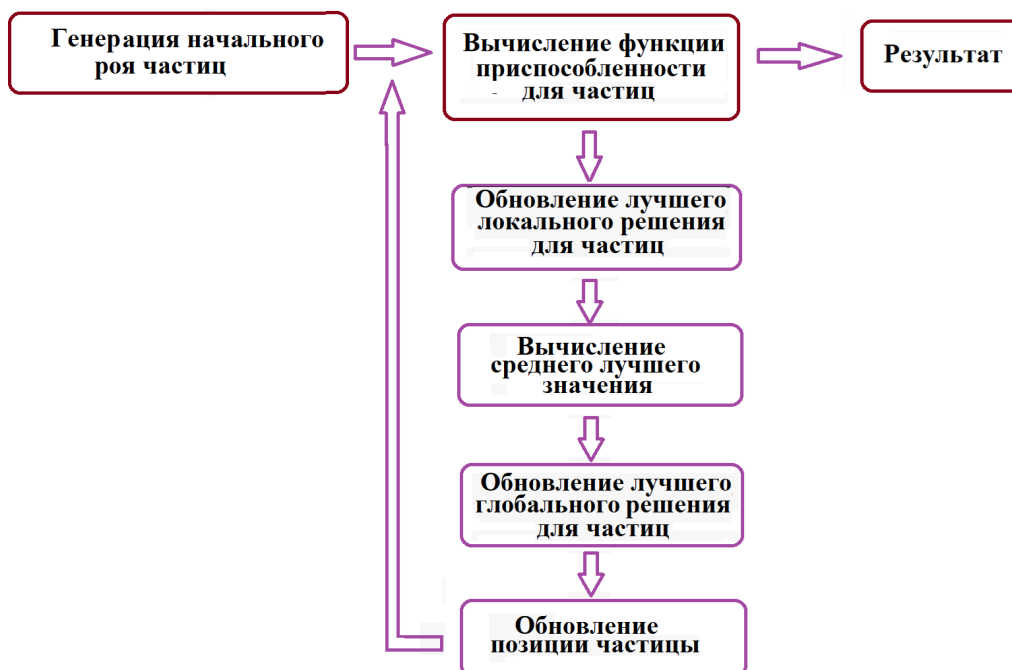


Рис. 4. Базовая структурная схема метода роя частиц
 Fig. 4. The basic block diagram of the particle swarm method

3. Вычислительный эксперимент. Все три алгоритма были запущены с одинаковым лимитом вычислений: 500 вычислений целевых функций. Размером популяции/роя был одинаков и составил 40 особей. Критерием эффективности служила скорость сходимости к известному из предварительных исследований Парето-фронту и разнообразие полученных решений.

Описание работы разработанного гибридного алгоритма GA-PSO. В базовой структурной схеме гибридного алгоритма *GA-PSO* (см. рис. 5) реализован следующий порядок выполнения действий и вычислений.

1. Инициализация популяции. Создается начальная популяция случайных решений (особей), каждая из которых представляет собой набор параметров конструкции (например, толщины плит, диаметры каналов и т.д.).

2. Оценка приспособленности. Для каждой особи запускается цикл моделирования для расчета значений целевых функций: массы, деформации, неравномерности температуры.

3. Проверка критерия останова. Если достигнуто максимальное число итераций или вычислений целевой функции (например, 500), то алгоритм завершается.

4. Условное ветвление. Если номер текущей итерации кратен 5, выполняется шаг *PSO*, иначе – стандартный шаг генетического алгоритма.

5. Шаг выполнения алгоритма *PSO* (каждые 5 итераций). На этом этапе выбираются 20 % наименее приспособленных особей. Для каждой из них генерируется новая частица по правилам выполнения работы классического алгоритма *PSO*:

– новая позиция частицы вычисляется как текущая позиция частицы плюс скорость частицы;

– скорость обновляется с учетом значения переменной *global best* (лучшее решение в популяции) и *personal best* (лучшее решение для данной частицы).

Эти новые частицы заменяют худшие особи в популяции.

6. Шаг генетического алгоритма. На этом этапе применяются стандартные операторы:

– селекция (допускается способы турнирная или рулетка);

– кроссинговер (двухточечный);

– мутация (случайное изменение параметров).

7. Формирование новой популяции. Обновленная популяция возвращается на шаг оценки приспособленности.

8. Конец работы. По достижении критерия останова возвращается лучшее найденное решение или множество Парето-оптимальных решений.

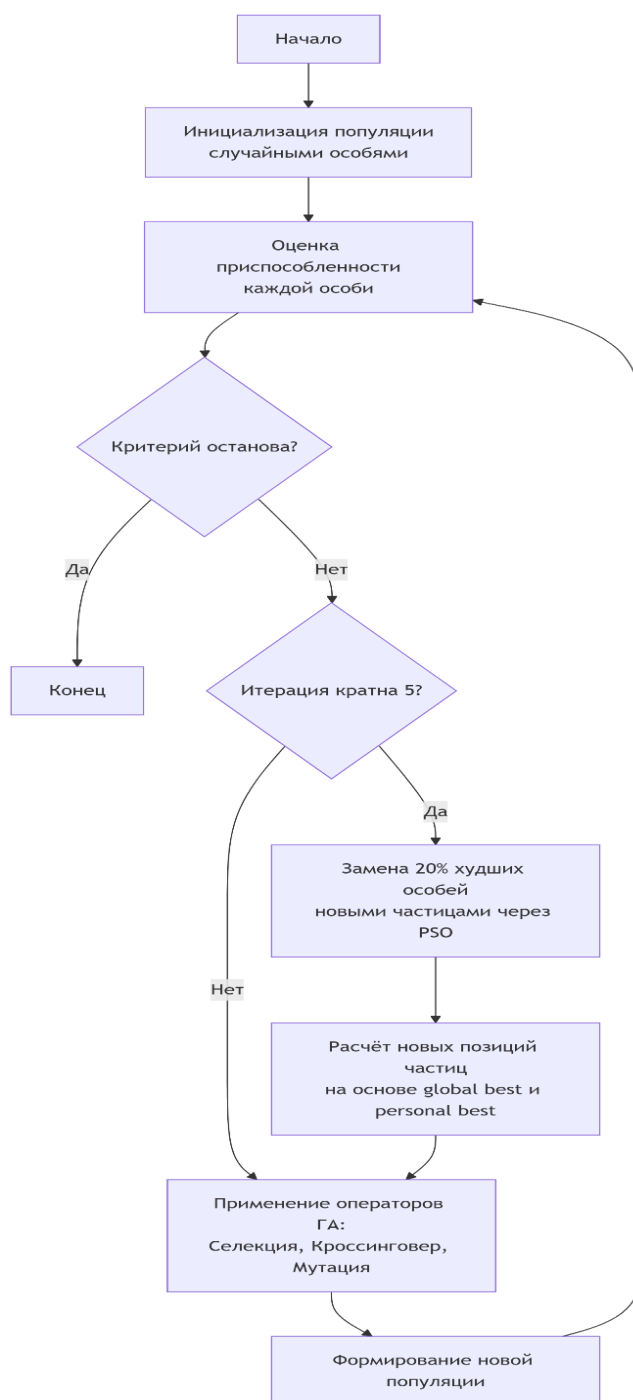


Рис. 5. Базовая структурная схема гибридного алгоритма GA-PSO
Fig. 5. Basic structure of the GA-PSO hybrid algorithm

Результаты

Результаты проведения вычислительного эксперимента данного исследования показали существенное преимущество разработанного гибридного алгоритма. Это подтверждают данные сравнения Парето-фронт, полученных разными алгоритмами и результаты сходимости значений доминирующей целевой функции в гиперобъеме.

На графике (рис. 6) представлены множества Парето оптимальных решений, полученные тремя алгоритмами, в проекции на плоскость двух целевых функций: $F1$ (масса пресс-формы) и $F2$ (максимальная деформация).

Гибридный алгоритм *GA-PSO* формирует самый продвинутый Парето-фронт, решения которого доминируют над решениями других алгоритмов. Точки фронта расположены ближе к началу координат, что свидетельствует о одновременной минимизации массы и деформации. Решения, найденные *PSO*, образуют компактный кластер, но уступают по качеству ги-

бридному алгоритму – имеют большую массу при деформации или большую деформацию при массе. Генетический алгоритм демонстрирует наибольшее разнообразие решений, но при этом Парето-фронт расположен правее и выше, что указывает на худшие значения обеих целевых функций по сравнению с гибридным подходом. Анализ формы кривых Парето-фронт выявляет явный компромиссный характер между целевыми функциями $F1$ и $F2$: уменьшение массы конструкции приводит к увеличению деформации, и наоборот. Гибридный алгоритм находит наилучший компромисс между этими противоречивыми требованиями.

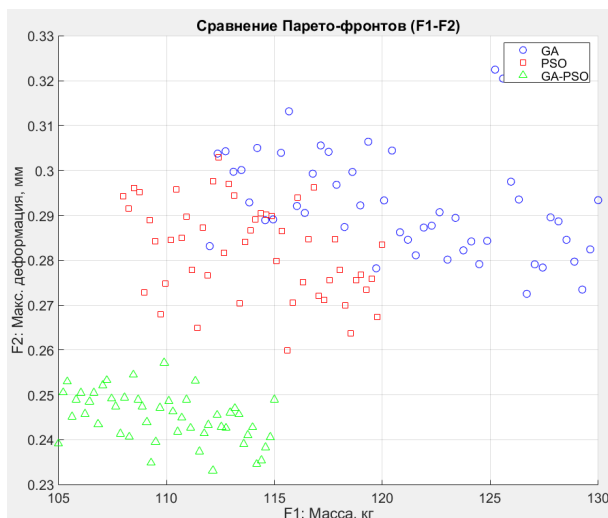


Рис. 6. Сравнение Парето-фронт, полученных разными алгоритмами (по параметрам $F1$ - $F2$)
Fig. 6. Comparison of Pareto fronts obtained by different algorithms (in $F1$ - $F2$ section)

На графике (рис. 7) представлена динамика изменения гиперобъема – показателя качества *Pareto*-фронта – в зависимости от количества вычислений целевой функции для трех алгоритмов оптимизации: классического генетического алгоритма (*GA*), метода роя частиц (*PSO*) и гибридного алгоритма *GA-PSO*.

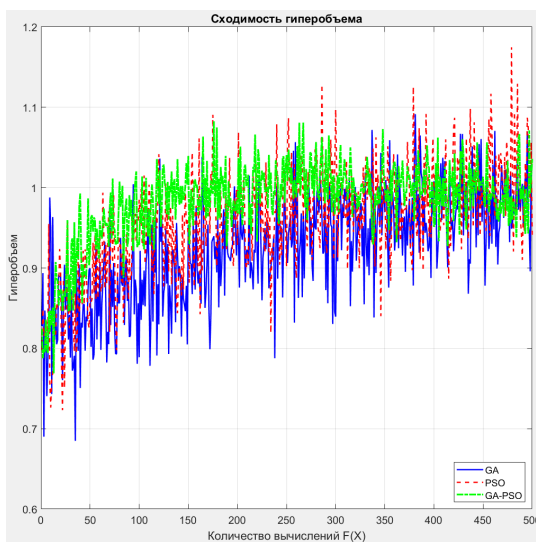


Рис. 7. График сходимости значений доминирующей целевой функции (гиперобъем)
Fig. 7. Convergence plot of the dominant objective function value (hypervolume)

Гибридный алгоритм *GA-PSO* демонстрирует наиболее быструю и стабильную сходимость. Уже после 150...200 вычислений целевой функции значение гиперобъема достигает плато, что свидетельствует о нахождении качественного Парето-фронта. Метод *PSO* показывает быстрый начальный рост гиперобъема (в первые 50...100 вычислений), однако затем процесс оптимизации стагнирует – алгоритм застревает в локальном оптимуме и не способен существенно улучшить решение после 150 вычислений. Генетический алгоритм характеризуется медленной, но устойчивой сходимостью. Хотя ГА требует большего количества вычислений (около 400) для достижения стабильных значений гиперобъема, он демонстрирует лучшую способность к исследованию пространства поиска по сравнению с *PSO*.

Конечное значение гиперобъема для гибридного алгоритма превышает значения обоих базовых методов, что подтверждает его эффективность в нахождении более качественных решений.

Таблица 1
Table 1

Сравнительные характеристики решений, найденных разными алгоритмами
Comparative characteristics of solutions found by different algorithms

Параметр / Алгоритм	Исходный проект	Классический <i>GA</i>	Классический <i>PSO</i>	Гибридный <i>GA-PSO</i>
Масса, кг (<i>F1</i>)	124,5	112,0	108,5	105,8
Макс. деформация, мм (<i>F2</i>)	0,28	0,26	0,27	0,25
<i>Std.</i> температуры, °C (<i>F3</i>)	8,9	7,1	6,8	6,5
Количество вычислений <i>F(X)</i> до стабилизации	-	420	310	240

Заключение

Анализ Парето-фронта (см. рис. 6) и данных табл. 1 подтверждает, что решения, найденные гибридным алгоритмом, доминируют над решениями, полученными другими методами. Найденный конструктив позволяет значительно снизить материалоемкость и, как следствие, стоимость изготовления пресс-формы, без ущерба для ее эксплуатационных характеристик. Напротив, наблюдается улучшение по ключевым технологическим параметрам: снижение деформаций повышает стабильность размеров отливки, а выравнивание температурного поля снижает риск возникновения дефектов, таких как утяжки и коробление.

Полученные результаты убедительно демонстрируют эффективность предложенного гибридного подхода. Как видно на рис. 7, гибридный алгоритм *GA-PSO* демонстрирует наиболее быструю и стабильную сходимость. Классический *PSO* быстро находит хорошее решение, но затем стагнирует, *trapped* в локальном оптимуме. Генетический алгоритм сходится медленнее, но показывает лучшее разнообразие решений. Гибридный алгоритм наследует достоинства обоих: он использует быстрый старт *PSO* и глобальные исследовательские способности ГА.

Таким образом, цель исследования достигнута. Разработан и успешно апробирован модифицированный метаэвристический алгоритм, доказавший свою эффективность для задач многокритериальной оптимизации конструктива пресс-форм. Внедрение данной методики в практику конструкторских бюро позволит перейти от эмпирико-итерационного проектирования к системному компьютерному синтезу оптимальных конструкций, что дает значительный экономический и технологический эффект. Дальнейшие исследования планируется направить на интеграцию алгоритма в специализированные *CAE*-платформы и учет большего числа технологических ограничений.

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. – № 3. – С. 51-79.
- 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 2024г. – Уфа: Аэтерна, 2024. – 14-19 С.

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 Bioinspired Optimization Algorithms. *Cybernetics and Programming*. 2017;(3):51-79.
- 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. 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. Agaev E.T., Karlova T.V., Bekmeshov A.Y., Batirov M.U., Konstantyan V.N., Girs R.A. Automation of the Selection of Components Placement Surfaces Using 3D Drawings // 2023 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS), Petrozavodsk, Russian Federation, 2023, pp. 9-13.

9. Агаев Э.Т., Бекмешов А.Ю. Повышение качества автоматизированного проектирования в машиностроении на основе введения 3D чертежа // Качество. Инновации. Образование. – 2021. – № 5(175). – С. 32-38.

10. 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.

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. Agaev ET, Karlova TV, Bekmeshov AY, et al. Automation of the Selection of Components Placement Surfaces Using 3D Drawings. In: Proceedings of the 2023 International Conference on Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS); Petrozavodsk, Russian Federation; 2023. p. 9-13.

9. Agaev E.T., Bekmeshov A.Y. The Current State of Affairs in 3d Modeling of Machine-Building Profile Parts. Quality. Innovation. Education. 2021;5(175):32-38.

10. 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, ORCID 0000-0001-8091-0722.

Information about the authors:

Yarovoy Alexander Vladimirovich

Postgraduate Student at the Department of Computer Aided Design named after V.M. Kureichik of Southern Federal University.

Bekmeshov Alexander Yurievich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Institute for Computer-Aided Design of the Russian Academy of Sciences, ORCID: 0000-0001-8091-0722.

**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 15.11.2025; одобрена после рецензирования 14.12.2025; принята к публикации 21.12.2025.

The article was submitted 15.11.2025; approved after reviewing 14.12.2025; accepted for publication 21.12.2025.

Рецензент – Малаханова А.Г., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhanova A.G., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.