

На правах рукописи



КОРОТЧЕНКО ИГОРЬ АНДРЕЕВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ТОНКОСТЕННЫХ ПРОТЯЖЁННЫХ ОТЛИВОК ИЗ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ  
СИЛУМИНОВ НА МАШИНАХ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ С  
ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ХОЛОДНОЙ КАМЕРОЙ ПРЕССОВАНИЯ**

Специальность: 2.6.3. Литейное производство  
(технические науки)

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва, 2024 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на кафедре «Литейные технологии».

- Научный руководитель: **Смыков Андрей Федорович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры 1101 ФГБОУ ВО  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)», г. Москва
- Официальные оппоненты: **Изотов Владимир Анатольевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры материаловедения литья и  
сварки ФГБОУ ВО «Рыбинский государствен-  
ный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск  
**Тимошкин Иван Юрьевич**,  
кандидат технических наук, доцент, доцент ка-  
федры «Литейные и высокоэффективные тех-  
нологии» ФГБОУ ВО «Самарский  
государственный технический университет»,  
г. Самара
- Ведущая организация: ФГБАУ ВО «Московский политехнический  
университет», г. Москва

Защита состоится «26» марта 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, ул. Оршанская, д.3, аудитория № 523А.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета и по электронной почте [paltievichar@mai.ru](mailto:paltievichar@mai.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на сайте по адресу: [https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT\\_ID=183613](https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=183613)

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.327.05, к.т.н., доцент



Палтиевич А.Р.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы:**

В современном литейном производстве одной из актуальных задач является изготовление тонкостенных протяженных отливок с заданными эксплуатационными свойствами, напрямую зависящими от выбранных проектных решений разработанного технологического процесса. Основными проектными решениями, определяющими ход и результаты технологического процесса, являются: тип и конфигурация литниковой системы (ЛС) и технологические параметры литья, позволяющие существенно увеличить стойкость оснастки и, как следствие, ресурс ее работы, что особенно актуально для сложных и дорогостоящих пресс-форм.

Для производства тонкостенных протяженных отливок из алюминиевых сплавов, в настоящее время, применяются преимущественно машины литья под давлением (ЛПД) с холодной горизонтальной камерой прессования. Следует отметить, что технологические характеристики машин ЛПД постоянно совершенствуются и, в этой связи, появляются новые возможности для получения более сложных по геометрии отливок. Однако, их внедрение ограничивается отсутствием достаточной методологической базы, связанной с решением трудноформализуемых задач проектирования процессов литья на машинах ЛПД тонкостенных протяженных отливок из эвтектических силуминов, например, выбора типа литниковой системы, определения количества питателей и мест их подвода к отливке, а так же задач расчета размеров элементов ЛС, температуры и скорости заливки расплава и других литейных параметров.

Существующие методики расчета параметров ЛС для заготовок, получаемых методом ЛПД, основаны на эмпирических зависимостях, сформированных для укрупненных групп отливок в середине 20-го века и в дальнейшем не претерпевших существенных изменений, несмотря на расширение возможностей машин ЛПД и усложнение геометрий изготавливаемых отливок. В результате такие способы проектирования для литья протяженных тонкостенных отливок не являются надежными и требуют корректировки полученных результатов, что приводит к неоправданному увеличению сроков технологической подготовки и материальных затрат. Кроме того, нет уверенности, что разработанные режимы литья являются рациональными.

В связи с этим, развитие теории и практики изготовления тонкостенных протяженных отливок из эвтектических силуминов на машинах ЛПД с горизонтальной холодной камерой прессования на основе изучения закономерностей теплообмена и течения расплава в каналах пресс-формы является актуальной задачей.

**Цель работы:** разработка методологии проектирования литниковых систем, обеспечивающих получение тонкостенных протяженных отливок из эвтектических силуминов на машинах литья под давлением с горизонтальной холодной камерой прессования без поверхностных дефектов типа неспай и неслитина.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи:**

- систематизировать типовые элементы для внешних литниковых систем, применяемых в литье под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования, в единый классификатор;
- обосновать выбор математической модели малой интенсивности охлаждения отливки в пресс-форме для проведения тепловых расчетов при литье под давлением тонкостенных протяженных литых заготовок;
- разработать алгоритм и на его основе программу расчета потерь перегрева расплава с учетом скорости движения расплава в каналах пресс-формы и выделения теплоты от сил трения расплава о стенки пресс-формы.
- определить границы применимости термина «протяжённость», в отношении тонкостенных каналов пресс-формы с учетом заполняемости их расплавом;
- определить характер течения и особенности теплообмена расплава эвтектического силумина при заполнении им тонкостенных протяженных каналов пресс-формы при литье под давлением;
- разработать методику расчета температуры заливки расплава и параметров элементов внешней литниковой системы при литье под давлением эвтектических силуминов на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования, обеспечивающих получение отливок без дефектов типа неспай и неслитина;
- разработать методику выбора места подвода расплава эвтектических силуминов к фасонным отливкам с тонкостенными протяженными элементами при литье под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования.

#### **Основные положения, которые выносятся на защиту:**

- Обоснованность применения модели малой интенсивности охлаждения отливки в литейной форме для решения задачи контактного теплообмена движущегося расплава эвтектического силумина в пресс-форме литья под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования.
- Обоснованность способа проектирования литниковых систем для изготовления фасонных тонкостенных отливок ЛПД на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования, основанного на новом аналитическом решении задачи расчета температуры заливки расплава и скорости расплава в питателе.
- Результаты расчетов численных исследований в системе компьютерного моделирования FLOW 3D по определению характера течения расплава эвтектического силумина и интенсивности его теплообмена с пресс-формой, в зависимости от толщины стенки отливки, скорости расплава в питателе и температуры заливки.
- Регрессионные зависимости для определения потерь перегрева расплава эвтектического силумина при заполнении полости пресс-формы, в зависимости от толщины стенки отливки и скорости расплава в питателе.

#### **Научная новизна:**

- Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден выбор модели малой интенсивности охлаждения отливки, учитывающий аккумулирующую способность формы, для расчетов тепловых потерь расплава эвтектического

силумина при заполнении тонкостенных протяженных каналов пресс-форм литьем под давлением.

– Разработана методика расчета потерь перегрева расплава эвтектического силумина при заполнении им каналов прессформы литьем под давлением с учетом характера движения расплава и выделения теплоты от сил трения.

– На основе модели малой интенсивности охлаждения отливки разработана методика проектирования литниковых систем для протяженных тонкостенных отливок, изготавливаемых литьем под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования из сплавов эвтектических силуминов, основанная на решении задач расхода и теплообмена расплава с пресс-формой на разных участках его движения, выбора вида литниковой системы, определения размеров и мест установки питателей к отливке.

– Для реализации методики проектирования литниковых систем протяженных тонкостенных отливок из сплавов эвтектических силуминов, решены следующие основные задачи:

- разработан классификатор литниковых систем, позволяющий однозначно идентифицировать возможные сочетания взаимных расположений подводящего канала, питателей и их геометрических параметров;
- получено уравнение регрессии, позволяющее определить границы применимости термина «протяжённость», в отношении тонкостенных каналов прессформы, в зависимости от сечений этих каналов и скорости течения расплава в них;
- разработана методика выбора мест установки питателей к отливке с учетом тепловой теории литья, обеспечивающая снижение перегрева расплава, подаваемого в пресс-форму;
- получено расчетное уравнение для модели малой интенсивности охлаждения отливки в литейной форме, позволяющее по заданным тепловым потерям расплава при заполнении полости прессформы определять значения температуры заливки и скорости впуска в питателе.

#### **Практическая значимость работы:**

– Предложена классификация внешних литниковых систем для изготовления отливок литьем под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования. Данная классификация позволяет идентифицировать тип литниковой системы по геометрическим характеристикам подводящего канала и питателя и используется при их автоматизированном проектировании.

– Разработан алгоритм и на его основе программа расчета суммарных потерь перегрева расплава эвтектического силумина при движении в каналах прессформы, оформляющих элементы литниковой системы. Данная программа предназначена для автоматизации тепловых расчетов при проектировании технологического процесса изготовления отливок литьем под давлением.

– Разработанная методика применена при проектировании литниковой системы отливки «Радиатор». Опытная партия отливок «Радиатор» изготовлена без поверхностных дефектов типа неспай и неслитина.

– Полученные в работе результаты используются в учебном процессе на кафедре «Литейные технологии» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана в лекционных курсах «Проектирование литейной оснастки», «Оборудование литейных цехов», а также в курсовом и дипломном проектировании.

#### **Методология и методы исследования:**

Работа выполнена с применением программы для моделирования процессов заполнения расплавом пресс-формы и кристаллизации отливки FLOW 3D. Обработка результатов моделирования и статистические расчеты проводились в программе MS Excel. Для изготовления пресс-формы применялись фрезерные и токарные станки с ЧПУ Micron UCP 800 Duro и Traub TNA 300. Для проведения экспериментов по заливке расплава в пресс-форму применялась машина ЛПД TST - 1200 К.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием современных методов исследований, анализа и статистической обработки экспериментальных данных, подтвержденных сравнительным анализом численных и натуральных экспериментов, а также практическим использованием результатов при разработке технологических процессов.

**Личный вклад** соискателя выражается в планировании, организации и проведении экспериментальных исследований, обработке, анализе и интерпретации полученных результатов.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертационной работы обсуждались на XVI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 19-22 сентября 2023 года); на XV международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 1-3 ноября 2023 года); на VIII международной научной конференции молодых ученых «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения» (Беларусь, Гродно, 30 мая 2024 года); на XVII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 24-27 сентября 2024 года); на XII Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 29 октября-1 ноября 2024 года).

**Публикации.** По теме диссертации автором опубликовано 11 научных работ, из них 6 работ в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 5 работ в сборниках научных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка из 125 наименований и приложений. Изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц и 64 рисунка.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность решаемой научно-технической проблемы получения качественных тонкостенных протяженных отливок из алюминиевых сплавов способом литья под давлением. Формулируется цель и

ставятся задачи исследований, излагается научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения и результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен литературный обзор по существующим методикам расчета литниковых систем (ЛС) для литья под давлением (ЛПД), а также по основным технологическим параметрам литья.

На качество отливок, получаемых литьем под давлением, а также на стойкость пресс-форм наибольшее влияние оказывают скорость впуска расплава в форму  $u_{\text{пит}}$  и температура заливки расплава  $T_{\text{зал}}$ . Причем, скорость впуска расплава в полость отливки через питатель  $u_{\text{пит}}$  будет оказывать влияние на характер движения расплава в полости пресс-формы: ламинарный, турбулентный, дисперсный.

Температура заливки расплава  $T_{\text{зал}}$  складывается из следующих составляющих потерь перегрева, которые добавляются к температуре ликвидус  $T_L$ : 1) охлаждение расплава от раздаточной печи до заливки в камеру прессования  $\Delta T_{\text{ковш}}$ ; 2) охлаждение расплава от заливки в камеру прессования до начала движения прессового поршня  $\Delta T_{\text{КП}}$ ; 3) охлаждение расплава при движении в каналах ЛС  $\Delta T_{\text{ЛС}}$ ; 4) охлаждение расплава при движении в полости отливки  $\Delta T_{\text{отл}}$ :

$$T_{\text{зал}} = \Delta T_{\text{ковш}} + \Delta T_{\text{КП}} + \Delta T_{\text{ЛС}} + \Delta T_{\text{отл}} + T_L \quad (1)$$

Существующие рекомендации по подбору температуры заливки расплава  $T_{\text{зал}}$  не учитывают четвертого слагаемого – потерь перегрева расплава при заполнении полости отливки в пресс-форме  $\Delta T_{\text{отл}}$ .

В литературе выделяют следующую классификацию ЛС для ЛПД: прямая, внутренняя и внешняя. Для ЛПД на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования в большинстве случаев применяют внешнюю ЛС. При этом, единая классификация и стандартизация конфигурации элементов ЛС отсутствует.

Существующие методики для расчета ЛС основаны на нахождении площади поперечного сечения питателя  $f_{\text{пит}}$ , исходя из объема отливки  $V_{\text{отл}}$ , времени заполнения расплавом пресс-формы  $t_{\text{зап}}$  и скорости впуска расплава в полость отливки через питатель  $u_{\text{пит}}$ :

$$f_{\text{пит}} = \frac{V_{\text{отл}}}{t_{\text{зап}} \cdot u_{\text{пит}}} \quad (2)$$

Время заполнения расплавом пресс-формы  $t_{\text{зап}}$  и скорость впуска расплава  $u_{\text{пит}}$  в формуле (2) определяются по эмпирическим коэффициентам, учитывающим конфигурацию отливки, давление расплава в отливке, материал отливки, толщину стенки. После нахождения площади поперечного сечения питателя  $f_{\text{пит}}$  находят площадь поперечного сечения других элементов ЛС.

Для нахождения общих потерь перегрева расплава  $\Delta T$ , что необходимо для назначения температуры заливки  $T_{\text{зал}}$ , существуют алгоритмические и аналитические математические модели. Алгоритмические математические модели основаны на системе дифференциальных уравнений в частных производных, таких как уравнения неразрывности (закон сохранения массы), уравнения движения

Навье-Стокса и уравнения теплопроводности Фурье. Для решения таких моделей используется специализированное программное обеспечение.

Одной из аналитических математических моделей решения задачи теплообмена между пресс-формой и движущимся потоком расплава, является модель малой интенсивности охлаждения отливки в форме. Данная модель является упрощением дифференциального уравнения теплопроводности Фурье для одномерной задачи:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

где:  $c$  - удельная теплоёмкость;  $\rho$  - плотность;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $T$  - температура;  $t$  - время;  $x$  - координата.

Это уравнение преобразуется в дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье для модели малой интенсивности охлаждения отливки:

$$-c\rho R_0 \frac{dT}{dt} = q \quad (4)$$

где:  $q$  - плотность теплового потока на границе контакта отливки и формы,  $R_0$  - приведённый размер отливки.

В зависимости от условий теплообмена уравнение теплопроводности Фурье может быть преобразовано для двух вариантов коэффициента теплообмена: с коэффициентом теплообмена  $\frac{b_\phi}{\sqrt{\pi t}}$  (для краткости в дальнейшем будем в тексте обозначать его как  $b_\phi$ ) и с коэффициентом теплообмена  $\beta$ . С коэффициентом  $b_\phi$  дифференциальное уравнение (4) преобразуется в уравнение (5):

$$-c\rho R_0 \frac{dT}{dt} = \frac{b_\phi}{\sqrt{\pi t}} (T_{\text{зал}} - T_\phi) \quad (5)$$

где:  $b_\phi$  - коэффициент тепловой аккумуляции формы;  $T_{\text{зал}}$  - температура заливки;  $T_\phi$  - температура формы.

С коэффициентом  $\beta$  дифференциальное уравнение (4) преобразуется в уравнение (6):

$$-c\rho R_0 \frac{dT}{dt} = \beta (T_{\text{зал}} - T_\phi) \quad (6)$$

где:  $\beta$  - коэффициент тепловой активности кокильной краски.

Коэффициент теплообмена  $b_\phi$  применяется, когда есть плотный контакт отливки и формы, при этом форма является массивной и не прогревается полностью по всему объёму. Коэффициент теплообмена  $\beta$  применяется, когда контакт отливки с формой происходит через слой краски, теплофизические свойства которой существенно отличаются от свойств формы, а сама форма не является массивной и прогревается по всему объёму.

Таким образом, модель малой интенсивности охлаждения отливки в форме позволяет решать упрощённую задачу теплообмена между движущимся расплавом и заполняемой им пресс-формой. Причем, когда моделируется конкретный способ литья, необходимо, определиться с выбором коэффициента теплообмена и в ряде случаев этот выбор совсем не очевиден.



Во второй главе была разработана классификация разновидностей ЛС для ЛПД, основанная на комбинации форм питателя и подводящего канала для одnogнездных и многогнездных пресс-форм. Предлагаемая классификация представлена на рисунке 1 и основана на принципе указания конфигурации питателя и подводящего канала. На базе данной классификации возможно автоматизировать технологические процессы при литье под давлением.

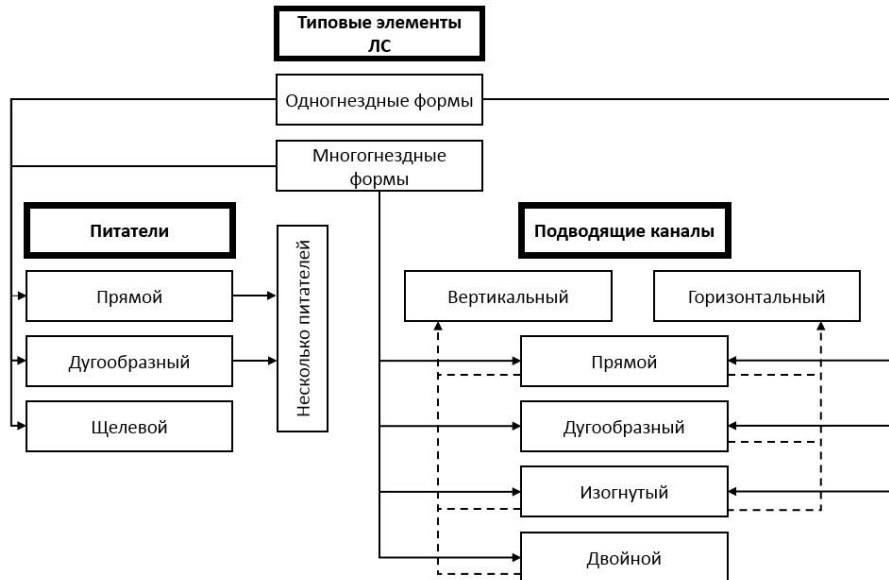


Рисунок 1 – Классификация типовых элементов ЛС

Также в работе проведен анализ применимости формул модели малой интенсивности охлаждения, для определения потерь перегрева при ЛПД.

Для этого было проведено моделирование заполнения расплавом пресс-формы в программе FLOW 3D для ЛС реальной отливки. Размеры элементов ЛС следующие: камера прессования диаметром 60 мм и длиной 100 мм; подводящий канал длиной 100 мм, шириной 70 мм, толщиной 8 мм; питатель длиной 10 мм, шириной 100 мм, толщиной 3 мм. Скорость движения прессового поршня  $u_{\text{ПП}}$  принята равной 3 м/с. Сплав АК12. Теплофизические свойства сплава следующие:  $c_1 = 1286 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ ,  $\rho_1 = 2200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  (индекс 1 соответствует жидкому состоянию сплава),  $T_L = 864 \text{ К}$ . Формообразующая вставка в пресс-форме выбрана из стали 4Х5МФС, тогда теплофизические свойства пресс-формы будут равны:  $b_{\text{ф}} = 10090 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}^{0,5}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$ ,  $T_{\text{ф}} = 443 \text{ К}$ . Толщина слоя смазки была выбрана равной 0,05 мм, а её коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{кр}} = 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ .

Результаты моделирования заполнения расплавом пресс-формы в разные временные интервалы показаны на рисунке 2.

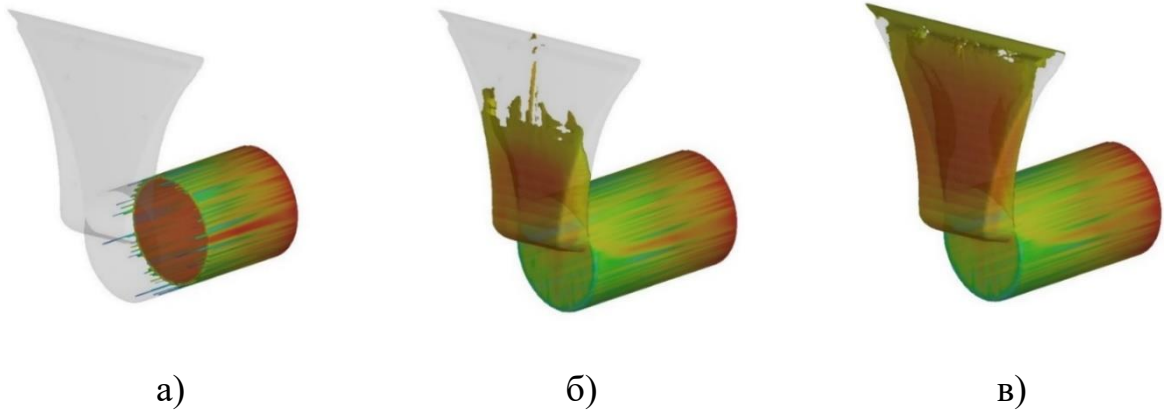


Рисунок 2 - Моделирование заполнения расплавом каналов ЛС

Аналитический расчёт проводился по следующим формулам с различными коэффициентами теплообмена.

По формуле

$$\Delta T = \frac{1,13 \cdot b_{\phi} \cdot (T_L - T_{\phi}) \cdot \sqrt{L}}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_0 \cdot \sqrt{u}} \quad (7)$$

где:  $\Delta T$  – потери перегрева расплава;  $b_{\phi}$  - коэффициент тепловой аккумуляции формы;  $T_L$  - температура ликвидус;  $T_{\phi}$  - температура формы;  $L$  - длина канала формы;  $u$  - скорость расплава в канале;  $c_1$  - удельная теплоёмкость расплава в жидком состоянии;  $\rho_1$  - плотность расплава в жидком состоянии;  $R_0$  - приведённый размер канала.

И по формуле

$$\Delta T = \frac{\beta \cdot (T_{\text{зал}} - T_{\phi}) \cdot L}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_0 \cdot u} \quad (8)$$

где:  $\beta$  – коэффициент тепловой активности кокильной краски;  $T_{\text{зал}}$  - температура заливки.

Результаты моделирования и аналитических расчетов по формулам (7) и (8) представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Потери перегрева в элементах ЛС

Элемент ЛС	Аналитический расчет		Вычислительное моделирование
	Коэффициент теплообмена		
	$b_{\phi}$	$\beta$	
	Значение потерь перегрева $\Delta T$ , град		
Камера прессования	20,7	1,4	30
Подводящий канал	15,9	1,2	10
Питатель	2,4	0,1	1

Результаты сравнения показывают, что для ЛПД следует проводить расчёты по формуле с коэффициентом теплообмена  $b_{\phi}$ , т.к. при аналитическом расчете и при моделировании во FLOW 3D получились схожие результаты. Если выбрать формулу с коэффициентом теплообмена  $\beta$ , то разница потерь перегрева с

вычислительным моделированием составляет сотни процентов и не может считаться удовлетворительной.

Также во второй главе был проведен анализ теплового взаимодействия пресс-формы с движущимся расплавом по каналам пресс-формы. Ряд исследователей обнаружили, что расплав претерпевает не только охлаждение при теплообмене с более холодной пресс-формой, но и дополнительный донагрев за счет сил трения о поверхность пресс-формы. Величина нагрева будет зависеть от геометрии каналов пресс-формы, от физических свойств расплава и от его скорости. На основе проведенного анализа был составлен алгоритм для определения потерь перегрева в пресс-форме по модели малой интенсивности охлаждения, с учетом нагрева за счет сил трения.

В работе было проведено моделирование заполнения расплавом каналов в пресс-форме различной толщины. Для этого были спроектированы две отливки в форме пластины одинакового объёма, но разных размеров. Первая отливка: длина 534 мм, ширина 25 мм, толщина 1,5 мм. Вторая отливка: длина 160 мм, ширина 25 мм, толщина 5 мм. Параметры литья: температура заливки 700 °С, скорость впуска 39 м/с.

Моделирование показало принципиально разный характер заполнения расплавом полости пресс-формы для тонкостенных и толстостенных отливок. Для тонкостенных отливок характерно заполнение сплошным фронтом, а для толстостенных отливок сначала формируется оболочка, после чего происходит заполнение центральной части.

При заполнении расплавом тонкостенных отливок на носике потока интенсивно образуется доля твердой фазы, которая может привести к преждевременной остановке потока, при слишком малых скоростях впуска и температуре заливки.

Теплообмен между расплавом и пресс-формой для тонкостенных отливок протекает гораздо более интенсивно, чем для толстостенных. Поэтому для тонкостенных отливок обязательным условием является учет потерь перегрева при заполнении расплавом полости пресс-формы, оформляющей конфигурацию отливки.

**В третьей главе** разработана новая методика для расчета значений элементов литниковой системы для тонкостенных протяженных отливок при литье под давлением.

Согласно модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме, отливка разбивается на ряд каналов простой формы. И для каждого канала считаются потери перегрева расплава  $\Delta T_i$ . Здесь индекс  $i$  обозначает порядковую нумерацию каналов: 1, 2, 3...  $n$ . Тогда исходное уравнение для расчёта потерь перегрева расплава  $\Delta T_i$  запишется в виде:

$$\Delta T_i = \frac{1,13 \cdot b_{\phi} \cdot (T_L - T_{\phi})}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{0i} \cdot \sqrt{u_i}} \cdot (\sqrt{L_1 + \dots + L_i} - \sqrt{L_1 + \dots + L_{i-1}}) \quad (9)$$

Помножим числитель и знаменатель на квадратный корень из площади поперечного сечения соответствующего канала  $\sqrt{f_i}$  и, обозначив для краткости в скобках разность корней длин каналов через  $\Delta L_i$ , получим:

$$\Delta T_i = \frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi) \sqrt{f_i}}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{0i} \cdot \sqrt{u_i} \sqrt{f_i}} \cdot \sqrt{\Delta L_i} \quad (10)$$

В знаменателе формулы (10) произведение скорости расплава в канале на площадь поперечного сечения канала под корнем дает расход расплава  $Q$ , который одинаков для всех каналов полости пресс-формы (допущение – рассматриваем каналы с заполненным поперечным сечением).

С учетом этого, дальнейшие преобразования формулы (10) позволяют вывести формулу для определения расхода расплава  $Q$  с учетом суммарных тепловых потерь расплава во всех каналах пресс-формы  $\sum_{i=1}^n \Delta T_i$

$$Q = \left[ \frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi)}{\sum_{i=1}^n \Delta T_i \cdot c_1 \cdot \rho_1} \left[ \frac{\sqrt{f_1}}{R_{01}} \sqrt{\Delta L_1} + \frac{\sqrt{f_2}}{R_{02}} \sqrt{\Delta L_2} + \dots + \frac{\sqrt{f_n}}{R_{0n}} \sqrt{\Delta L_n} \right] \right]^2 \quad (11)$$

Таким образом, уравнение (11) позволяет решить обратную тепловую задачу. Так, если по формуле (9) решается прямая тепловая задача – считаем потери перегрева расплава в канале  $\Delta T_i$ , в зависимости от теплофизических свойств расплава и формы. Тогда как в формуле (11) мы задаём суммарные потери перегрева во всех каналах отливки  $\sum_{i=1}^n \Delta T_i$ , а затем определяем расход расплава  $Q$ . Определив расход  $Q$ , рассчитывается площадь поперечного сечения питателя  $f_{\text{пит}}$  по формуле:

$$f_{\text{пит}} = \frac{Q}{u_{\text{пит}}} \quad (12)$$

Новая методика для расчета значений элементов ЛС, построенная на уравнении (11), содержит четыре шага. Шаг 1 – задаём «желаемые» (минимально возможные, исходя из практики литья) суммарные потери перегрева  $\sum_{i=1}^n \Delta T_i$ . Шаг 2 – вычисляем расход расплава  $Q$  по формуле (11). Шаг 3 – назначаем «желаемую» (минимально возможную, исходя из практики литья) скорость впуска расплава в полость отливки через питатель  $u_{\text{пит}}$ , и определяем площадь поперечного сечения питателя  $f_{\text{пит}}$  по формуле (12). Шаг 4 – считаем площади поперечных сечений остальных элементов литниковой системы.

Далее проводится моделирование заполнения расплавом полости пресс-формы. Если величина потерь перегрева, полученная при моделировании, соответствует заданным  $\sum_{i=1}^n \Delta T_i$ , расчет можно считать законченным. Если же потери перегрева при моделировании существенно выше, то расчеты по формуле (11) надо повторить, меняя способ подвода расплава к отливке или увеличивая скорость впуска в питателе.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет управлять такими параметрами как температура заливки  $T_{зал}$  и скорость впуска расплава в полость отливки через питатель  $u_{пит}$ , для получения тонкостенных протяжённых отливок без поверхностных дефектов и снижения негативного воздействия расплава на пресс-форму.

В работе было проведено сравнение расчета ЛС для тонкостенной протяженной отливки по существующим методикам и по предлагаемой новой методике. Для этого была спроектирована отливка: длина 300 мм, ширина 50 мм, толщина стенки 3 мм; три ребра отливки имеют толщину 3 мм, ширину 25 мм. Материал отливки – сплав АК12. теплофизические свойства сплава АК12 и формообразующих вставок пресс-формы из стали 4Х5МФС следующие:  $c_1 = 1130 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ ,  $\rho_1 = 2460 \frac{кг}{м^3}$ ,  $T_L = 856 К$ ,  $b_\phi = 10090 \frac{Вт \cdot с^{0,5}}{м^2 \cdot К}$ ,  $T_\phi = 473 К$ . Потери перегрева зададим  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для сравнения методик расчета ЛС примем  $u_{пит} = 33,4 \text{ м/с}$  (значение скорости получено по методике А.К. Белопухова).

Расчёт по методике А.К. Белопухова (формула (2)) дал следующие результаты. Площадь питателя -  $62 \text{ мм}^2$ , толщина питателя - 2,5 мм, ширина питателя - 25 мм. Расчёт по новой методике (формулы (11-12)) дал следующие результаты. Расход расплава  $Q - 0,0205 \text{ м}^3/\text{с}$ , площадь питателя -  $614 \text{ мм}^2$ , толщина питателя - 2,4 мм, ширина питателя - 256 мм.

Заполнение полости отливки расплавом для полученных двух различных литниковых систем было промоделировано в программе FLOW 3D. Результаты расчетов показаны на рисунках 3, 4. На цветовой шкале на рисунках показаны значения температуры расплава в градусах Кельвина.

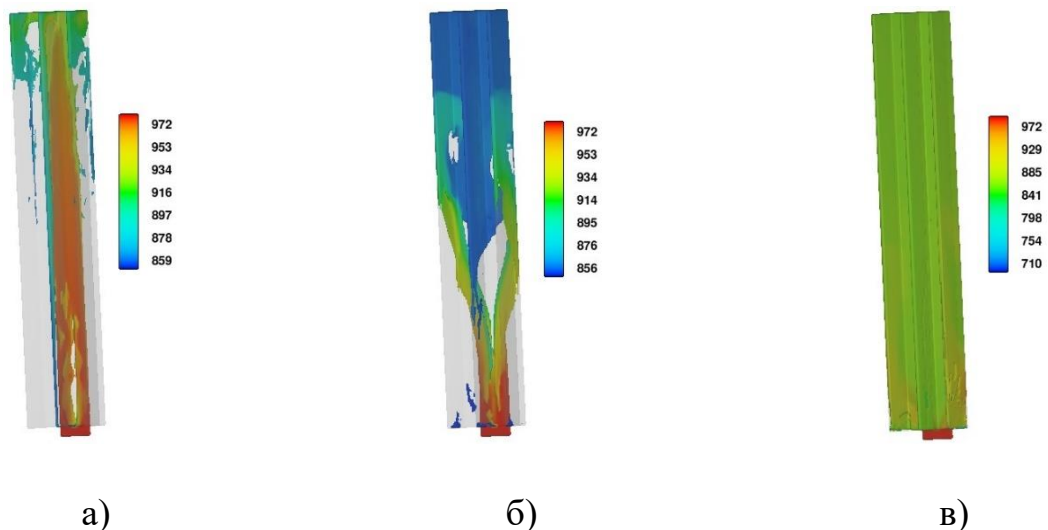


Рисунок 3 - Заполнение полости пресс-формы с ЛС, рассчитанной по существующей методике

Потери перегрева для ЛС посчитанной по методике А.К. Белопухова составляют больше  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наблюдаются литейные дефекты в виде неслитин и неспаев на трёх рёбрах внизу отливки.

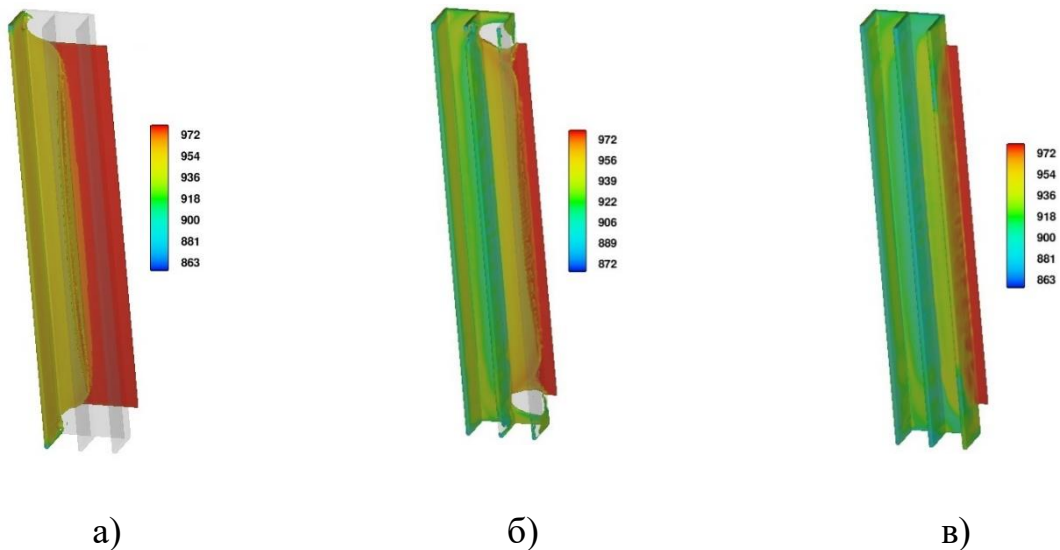


Рисунок 4 - Заполнение полости пресс-формы с ЛС, рассчитанной по новой предлагаемой методике

Потери перегрева для ЛС, посчитанной по новой методике, составляют 60-70 °С. Литейные дефекты в виде неслитин и неспаев отсутствуют. Таким образом, можно сделать вывод, что значения элементов ЛС, рассчитанных по существующим методикам, нуждаются в существенном уточнении, в отличие от значений элементов ЛС, рассчитанных по новой методике.

Для определения границ применимости предлагаемой новой методики расчета ЛС, основанной на решении обратной тепловой задачи, был проведен ряд экспериментов по моделированию заполнения расплавом каналов в пресс-форме различной толщины. Для этого были спроектированы отливки в форме плиты с разными питателями: толщиной 1 мм, 2 мм, 3 мм. Толщина отливки менялась по отношению к толщине питателя следующим образом: толщина отливки больше толщины питателя на 20%, 30%, 50%, 75%. Скорость впуска задавалась в зависимости от толщины питателя: 30 м/с, 20 м/с, 15 м/с.

Основной критерий оценки – заполнение расплавом полости пресс-формы сплошным потоком. Сравнив результаты моделирования, можно определиться с термином «тонкостенности». В результате, к тонкостенным отливкам можно отнести отливки толщиной менее 3 мм, у которых толщина стенки отливки равна толщине питателя или больше толщины питателя не более чем на 20%.

Для определения понятия «протяжённости» отливки было построено уравнение регрессии на основе полного двухфакторного эксперимента:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (13)$$

где:  $y$  - функция длины канала отливки  $L_{отл}$ , мм;  $X_1$  - первый фактор (толщина стенки отливки  $\delta_{отл}$ , мм);  $X_2$  - второй фактор (скорость впуска  $u_{пит}$ , м/с);  $b_0, b_1, b_2$  - коэффициенты уравнения регрессии.

В таблицах 2 и 3 представлены исходные данные и матрица планирования эксперимента.

Таблица 2 – Исходные данные

Характеристика	Фактор	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
Основной уровень	2	30
Интервал варьирования	1	15
Нижний уровень	1	15
Верхний уровень	3	45

Таблица 3 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Фактор		Результат
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	
1	+	+	545
2	+	-	298
3	-	+	465
4	-	-	210

По результатам проведенных экспериментов было построено уравнение регрессии для определения длины отливки, которую успеет заполнить расплав (до момента останова потока), в зависимости от толщины отливки и скорости выпуска расплава из питателя в полость отливки.

$$L_{\text{отл}} = 379 + 42 \cdot (\delta_{\text{отл}} - 2)/1 + 125 \cdot (u_{\text{пит}} - 30)/15 \quad (14)$$

Основной критерий оценки – надо ли учитывать потери перегрева при заполнении расплавом полости отливки. Пользуясь данным уравнением регрессии возможно, в зависимости от толщины отливки и скорости движения расплава, определять длину канала в отливке, которую сможет заполнить расплав, прежде чем на носике потока образуется критичная доля твердой фазы и расплав остановится. Таким образом, можно определиться с термином протяженности отливки.

Так, для отливки толщиной 1 мм, при скорости выпуска 30 м/с, длина канала, которую сможет заполнить расплав, согласно уравнению (14), составляет 337 мм. Т.е. отливки длиной более 337 мм для описанных исходных данных можно отнести к категории протяженных; т.е. для таких отливок необходимо учитывать потери перегрева при заполнении полости отливки.

В работе была создана методика по определению места подвода расплава к отливке. Для этого на основе вычислительного полного трехфакторного эксперимента получено уравнение регрессии, позволяющее определить длину заполненной части отливки в зависимости от толщины отливки, скорости выпуска и температуры заливки.

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 \quad (15)$$

где:  $y$  – функция заполненной длины канала отливки  $L_{\text{отл}}$ , мм;  $X_1$  – первый фактор (толщина стенки отливки  $\delta_{\text{отл}}$ , мм);  $X_2$  – второй фактор (скорость выпуска  $u_{\text{пит}}$ , м/с);  $X_3$  – третий фактор (температура заливки  $T_{\text{зал}}$ , К);  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты уравнения регрессии.

В таблицах 4 и 5 представлены исходные данные и матрица планирования эксперимента.

Таблица 4 – Исходные данные

Характеристика	Фактор		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
Основной уровень	2	30	943
Интервал варьирования	1	15	20
Нижний уровень	1	15	923
Верхний уровень	3	45	963

Таблица 5 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Фактор			Результат, мм
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	
1	+	+	+	921
2	+	-	+	504
3	-	+	+	818
4	-	-	+	357
5	+	+	-	709
6	+	-	-	387
7	-	+	-	629
8	-	-	-	274

По результатам экспериментов было построено уравнение регрессии.

$$L_{\text{отл}} = 575 + 55 \cdot \frac{(\delta_{\text{отл}} - 2)}{1} + 194 \cdot \frac{(u_{\text{пит}} - 30)}{15} + 75 \cdot (T_{\text{зал}} - 943)/20 \quad (16)$$

Пользуясь уравнением регрессии возможно выбирать различные варианты расположения питателя и определять, будет ли заполнена отливка расплавом при данном варианте и заданных параметрах литья.

Так, для примера отливки с толщиной стенки 2 мм, при скорости впуска 20 м/с и температуре заливки 650 °С (923 К) получим, что длина отливки, которую заполнит расплав, составит 371 мм. Т.е. если отливка в длину больше 371 мм и питатель располагать так, чтобы расплав проходил всю длину отливки, то для её заполнения необходимо будет менять либо скорость впуска, либо температуру заливки. Или менять место подвода питателя и его конфигурацию.

**В четвертой главе** представлены результаты практической применимости новой методики, основанной на решении обратной тепловой задачи, для расчета параметров ЛС для тонкостенной протяженной отливки. В качестве примера была выбрана отливка «Радиатор», материал отливки - сплав АК12, длина отливки 500 мм, толщина ребер 1,2 мм. Расчёты ЛС велись для двухгнездной пресс-формы. Свойства сплава АК12 и формообразующих вставок пресс-формы из стали 4Х5МФС следующие:  $c_1 = 1130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ ,  $\rho_1 = 2460 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $T_L = 856 \text{ К}$ ,  $b_\phi = 10090 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}^{0,5}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$ ,  $T_\phi = 473 \text{ К}$ .



Согласно новой методике, зададим потери перегрева  $\sum_{i=1}^n \Delta T_i$  равными 50 °С, а скорость впуска  $u_{\text{пит}} = 40$  м/с. Тогда, по формуле (11) значение расхода расплава  $Q$  получаем 0,025 м<sup>3</sup>/с. Площадь сечения питателя  $f_{\text{пит}}$  получаем 630 мм<sup>2</sup>. Площадь сечения подводящего канала  $F_{\text{пк}} = 490$  мм<sup>2</sup>.

Параметры разработанной ЛС для отливки «Радиатор», рассчитанные по новой предлагаемой методике отличаются от параметров ЛС, если ее считать по существующим методикам, ориентировочно, в три раза. На рисунках 5, 6 показаны 3-D модель отливки и спроектированная ЛС для данной отливки.

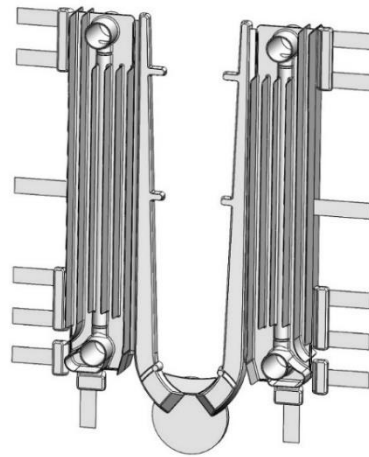
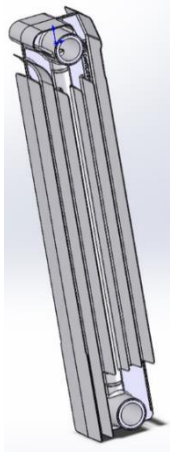


Рисунок 5 – Отливка «Радиатор»

Рисунок 6 – 3-D модель отливки с ЛС

На основе разработанной ЛС была спроектирована и изготовлена двухгнездная пресс-форма для машины ЛПД TST - 1200 К, с усилием запирания 12500 кН. На данной машине ЛПД были проведены 100 заливок и получены годные отливки. На рисунке 7 показана установленная на машину ЛПД пресс-форма, на рисунке 8 показана полученная годная отливка.



Рисунок 7 – Пресс-форма

Рисунок 8 – Отливка «Радиатор»

Полученные результаты практических испытаний подтвердили возможность применения формулы для расчета ЛС, основанной на решении обратной тепловой задачи, применительно к тонкостенным протяженным отливкам, получаемым литьем под давлением из алюминиевых сплавов.

Для автоматизации определения потерь перегрева в каналах ЛС, учитывая донагрев расплава за счет трения и гидравлических сопротивлений, была разработана прикладная программа, на базе классификации ЛС, предложенной в главе 2 (рисунок 1) и разработанного алгоритма расчёта потерь перегрева с учётом сил трения. Входными данными для программы являются данные по материалам сплава и пресс-формы, в зависимости от этого учитываются разные теплофизические свойства материалов. Также задаются геометрические размеры стандартных каналов ЛС: камеры прессования (пресс-остатка), подводящего канала и питателя, а также скорость расплава в питателе. Помимо этого, задается количество каналов, расположенных до питателя, и учитываются комбинация их геометрических параметров: размеры, повороты, углы поворотов, сужения, расширения, раструб.

Применимость разработанной программы была проверена на примере двух литниковых систем: ЛС с прямым вертикальным подводящим каналом и прямыми питателями, и ЛС с прямым горизонтальным подводящим каналом и прямыми питателями.

Результаты можно увидеть на рисунке 9.

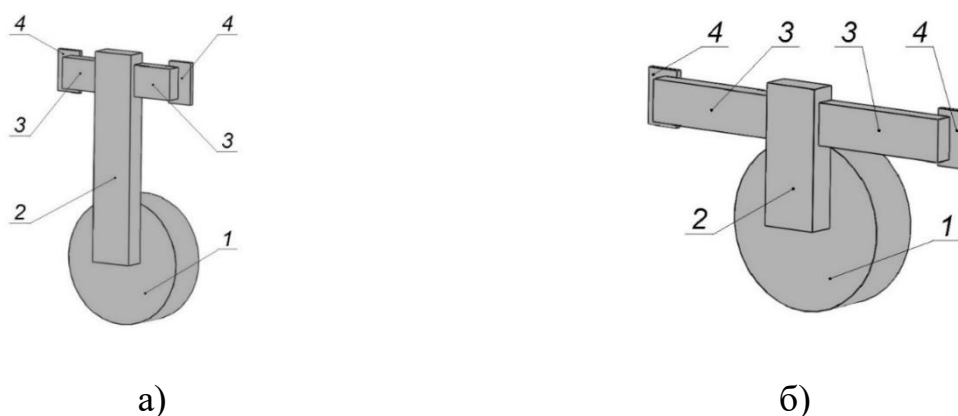


Рисунок 9 - Типовые ЛС для автоматизированных тепловых расчетов

На рисунке 9 а) показана ЛС с прямым вертикальным подводящим каналом и прямыми питателями. На рисунке 9 б) показана ЛС с прямым горизонтальным подводящим каналом и прямыми питателями. Цифрами на рисунке 9 обозначены: 1 – пресс-остаток, 2 – вертикальный канал, 3 – горизонтальные каналы, 4 – питатели.

Результаты расчетов потерь перегрева программой для ЛС, представленной на рисунке 9 а) составляют 28 градусов, а донагрев в каналах за счет сил трения составляют 2 градуса. Результаты расчетов потерь перегрева программой для ЛС, представленной на рисунке 9 б) составляют 27 градусов, а донагрев в каналах за счет сил трения составляют 3 градуса.

Для сравнения результатов вычисления потерь перегрева разработанной программой, было проведено моделирование заполнения расплавом полости формы в программе FLOW 3D. Сравнение результатов, полученных расчетом в разработанной программе и моделированием во FLOW 3D, показано в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение потерь перегрева в элементах ЛС

Разновидность ЛС	Значение потерь перегрева, град	
	Разработанная программа	FLOW 3D
С прямым вертикальным каналом	17	23
С прямым горизонтальным каналом	19	24

Результаты расчета потерь перегрева в разработанной программе дают схожие результаты с моделированием во FLOW 3D, с погрешностью 20-26%, но с существенно меньшими временными затратами, т.к. не надо строить 3-D модели и проводить моделирование процесса заполнения расплавом пресс-формы. Поэтому, в целом можно сказать, что разработанная программа может быть применима для автоматизации определения потерь перегрева в стандартных каналах ЛС для ЛПД.

### ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложена классификация литниковых систем для литья под давлением. Данная классификация позволяет идентифицировать тип литниковой системы по определенным геометрическим признакам подводящего канала и питателя. Для разных вариантов литниковых систем, указанных в предлагаемой классификации, приведены примеры их обоснованного выбора и применения к разным категориям отливок. Данная классификация может быть использована при автоматизированном проектировании технологического процесса литья под давлением.

2. На основе экспериментальных данных и теоретических выкладок доказана правомерность использования модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме для расчетов тепловых потерь при заполнении расплавом полости пресс-формы при литье под давлением. Аналитическим путем, подтвержденным результатами моделирования литейных процессов в специализированном программном обеспечении, подтверждена применимость формул теории формирования отливки, в частности, коэффициента тепловой аккумуляции формы, для тепловых расчетов при литье под давлением.

3. Разработан алгоритм для автоматизированного расчета суммарных потерь перегрева расплава при его движении в каналах пресс-формы, оформляющих элементы литниковой системы. Данный алгоритм может быть использован для дальнейшей автоматизации тепловых расчетов при проектировании технологического процесса изготовления отливок литьем под давлением.

4. Разработана новая методика для расчета значений элементов литниковой системы для тонкостенных протяженных отливок при литье под давлением. Новая методика создана на основе преобразованного уравнения малой интенсивности охлаждения отливки в форме, решение которого связано с решением обратной тепловой задачи. Применение новой методики расчета значений элементов ЛС позволяет существенно уменьшить время на поиск решений, обеспечивающих минимально возможные потери перегрева расплава при заполнении полости пресс-формы.

5. На основе вычислительных экспериментов определены геометрические соотношения и технологические параметры, при которых отливки можно отнести к классу «тонкостенных протяженных». Для такого класса отливок характерно заполнение полости пресс-формы сплошным фронтом расплава, с интенсивным теплообменом между расплавом и стенками пресс-формы.

6. Разработана методика выбора места подвода расплава к отливке. Методика основана на использовании уравнения регрессии, полученного на основе вычислительного полного трехфакторного эксперимента, которое позволяет оценить, будет ли заполнена отливка, при выбранном месте его подвода к отливке, в зависимости от геометрических соотношений отливки и выбранных значений параметров технологического процесса литья под давлением.

7. На основе разработанной новой методики расчета значений элементов литниковой системы и на основе разработанной методики выбора места подвода расплава к отливке была спроектирована литниковая система для отливки «радиатор». Результаты практических испытаний изготовленной пресс-формы для отливки «радиатор» показали адекватность расчетных данных практике. Опытная партия отливок «радиатор» получена без поверхностных дефектов типа неспай и неслитина. Изготовленная пресс-форма принята в производство.

8. Разработана программа для автоматизированного расчета потерь перегрева в различных литниковых системах. Алгоритм расчета основан на модели малой интенсивности охлаждения и помимо теплового взаимодействия отливки и пресс-формы учитывает дополнительный нагрев расплава и пресс-формы за счет сил трения. Программа позволяет получить более точный результат по сравнению с классическим тепловым расчетом и позволяет технологу сократить время на вычисление потерь перегрева, а также создать базу типовых литниковых систем с известными параметрами.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:**

1. Моделирование заполнения расплавом пресс-форм литья под давлением. Коротченко А.Ю., Зарубин А.М., Коротченко И.А. Литейщик России. 2007. № 12. С. 15-19.
2. Моделирование течения расплава в камере прессования при литье под давлением. Коротченко А.Ю., Коротченко И.А., Зарубин А.М. Литейщик России. 2008. № 12. С. 19-21.
3. Классификация литниковых систем для литья под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования. Коротченко И.А., Смыков А.Ф., Коротченко А.Ю. Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21. № 10. С. 435-440.
4. Расчет литниковых систем для отливок сложной конфигурации при литье под давлением. Коротченко И.А., Смыков А.Ф., Коротченко А.Ю. Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22. № 1. С. 3-6.

5. Оценка потерь перегрева расплава при литье под давлением. Коротченко И.А., Смыков А.Ф., Коротченко А.Ю. Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22. № 4. С. 147-151.

6. Сравнение методик расчета литниковых систем при литье под давлением. Коротченко И.А., Смыков А.Ф., Коротченко А.Ю. Литейное производство. 2024. № 4. С. 5-10.

#### **Материалы конференций:**

7. Коротченко И.А., Коротченко А.Ю. «Классификация литниковых систем для литья под давлением», в сборнике: Будущее машиностроения России. XVI всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием): сборник докладов. В 2-х томах. Москва, 2024. с. 49-52.

8. Коротченко И.А., Коротченко А.Ю., Смыков А.Ф. «Расчёт литниковых систем для получения тонкостенных протяженных отливок методом литья под давлением», в сборнике: Научные технологии в машиностроении. Материалы XV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. Москва, 2024, с. 133-137.

9. Коротченко И.А. «Особенности получения качественных алюминиевых отливок для машиностроения методом литья под давлением», сборник научных трудов VIII международной научной конференции молодых ученых «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения». г. Гродно: ГрГУ им. Янки Купалы, 2024, с. 52-59.

10. Коротченко И.А., Коротченко А.Ю. «Особенности получения тонкостенных протяженных отливок литьем под давлением», сборник научных трудов XVII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» - Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, сборник в редакции

11. Коротченко И.А., Коротченко А.Ю. «Потери перегрева в тонкостенных протяженных отливках при литье под давлением», сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии»: сборник докладов. Москва, 2024, с. 19-26.