

УДК 53.084.823

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ФОРМЫ

Ларичев Николай Сергеевич

*Студент 6 курса,
кафедра «Литейные технологии»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Коротченко А.Ю.,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Литейные технологии»*

Анализ задачи

Основными функциями литниково-питающих систем являются:

- ✓ заполнение формы за расчетное время с минимальными тепловыми потерями;
- ✓ обеспечение рационального распределения температуры в отливке к концу заполнения формы;

На сегодняшний день существует несколько подходов к построению ЛПС для отливки «балка надрессорная» (рис. 1).

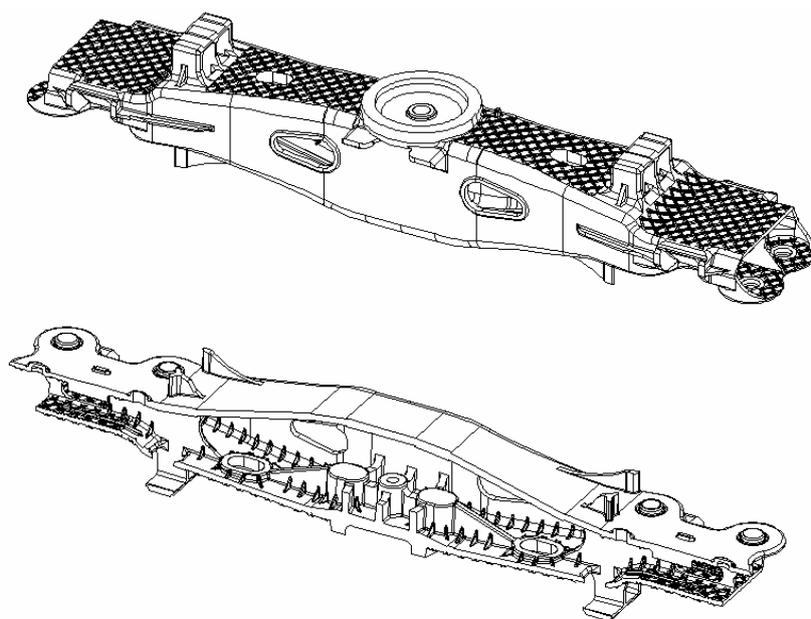


Рис. 1. 3D модель отливки «Балка надрессорная»

Первый подход основывается на возможно быстром заполнении формы. При этом для устранения дефектов во время затвердевания, предусматривается установка большого количества прибылей, что в свою очередь увеличивает стоимость отливки.

Другая точка зрения на эту проблему заключается в создании условий направленной кристаллизации отливки. При этом время заливки увеличивается.

В статье будет рассматриваться второй вариант, так как его реализация позволит получить отливки вероятнее всего без дополнительных прибылей.

Так же следует отметить, что для расчета размеров ЛПС существует несколько методик. В связи с этим требуется произвести по ним расчет, проанализировать полученные результаты и сравнить их с действительными размерами на производстве.

1. Расчет параметров литниково-питающих систем

Отливка «балка» изготавливается из стали 20ГЛ. При этом сама отливка относится к крупному литью. Поэтому применяются расширяющиеся литниково-питающие системы [3, стр. 129]. Самым узким местом такой системы является стояк. Значит для анализа достаточно рассчитать площадь стояка, поскольку площади остальных элементов определяются из пропорции.

Исходные данные для расчета:

Геометрия отливки (3D модель):

Объем одной отливки: $V_0 = 70929,23917 \text{ см}^3$;

Количество отливок в форме: 2 шт;

Объем теплового узла $V_{\text{ту}} = 2544,86675 \text{ см}^3$;

Площадь охлаждаемой поверхности теплового узла $S_{\text{ту}} = 970,4188 \text{ см}^2$;

Свойства расплава ([6, стр. 307, 309]):

Заливаемый металл: сталь 20ГЛ (техническое задание);

Плотность стали в жидком состоянии $\rho_1 = 7000 \text{ кг/м}^3$;

Плотность стали в твердом состоянии $\rho_3 = 7500 \text{ кг/м}^3$;

Теплоемкость жидкого металла $c_1 = 920 \text{ Дж/(кг*К)}$;

Температура ликвидуса $T_L = 1785 \text{ К}$;

Температура солидуса $T_S = 1747 \text{ К}$;

Температура заливки $T_{\text{зал}} = T_L + 120 \text{ К} = 1905 \text{ К}$;

Удельная теплота кристаллизации $L = 264 \text{ кДж/кг}$;

Свойства формы ([6, стр. 311]):

Температура формы $T_{\text{ф}} = 298 \text{ К}$;

Коэффициент теплоаккумуляции формы $b_{\text{ф}} = 1628 \text{ Вт*с}^{1/2}/(\text{м}^2*\text{К})$.

1.1. Определение размеров ЛПС по книге Трухова Ю.А.[1]

Определение времени заливки, $\tau_{\text{зал}}$, с ([1], стр. 313-317):

– эмпирическая формула определения времени

$$\tau_{\text{зал}}' = A \cdot (\Sigma m_0)^{0,38}, \quad (1)$$

где A – постоянный множитель, для углеродистой стали равен 2,4 ([1], стр. 316);

Σm_0 – масса отливок в форме, кг.

$$m_0 = \rho_3 \cdot V_0 = 7,5 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 70929,23917 \text{ см}^3 = 531,97 \text{ кг}.$$

Подставим значения в формулу (1):

$$\tau_{\text{зал}}' = A \cdot (\Sigma m_0)^{0,38} = 2,4 \cdot (2 \cdot 531,97 \text{ кг})^{0,38} = 33,918 \text{ с}.$$

– теоретическая формула определения времени (Баландин Г.Ф.) ([1], стр. 315):

$$\tau_{\text{зал}}'' = R^2 \left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot (T_{\text{зал}} - T_L)}{1,13 \cdot b_{\text{ф}} \cdot (T_L - T_{\text{ф}})} \right]^2, \quad (2)$$

где R – приведенный размер отливки или массивного теплового узла, м; c_1 и ρ_1 – соответственно теплоемкость, Дж/(кг*К), и плотность, кг/м³, жидкого металла; $T_{\text{зал}}$, T_L и $T_{\text{ф}}$ – соответственно температура заливки, ликвидуса и формы, К; $b_{\text{ф}}$ – коэффициент теплоаккумуляции формы, Вт*с^{1/2}/(м²*К).

Приведенный размер отливки определим через массивный тепловой узел. Он расположен по центру отливки.

$$R = \frac{V_{\text{ту}}}{S_{\text{ту}}} = \frac{2544,86675 \text{ мм}^3}{970,4188 \text{ мм}^2} = 0,0262 \text{ м}.$$

Подставим значения в формулу (2):

$$\tau_{\text{зал}}'' = R^2 \left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot (T_{\text{зал}} - T_L)}{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi)} \right]^2 = 0,0262^2 \left[\frac{920 \cdot 7000_1 \cdot (1905 - 1785)}{1,13 \cdot 1628 \cdot (1785 - 298)} \right]^2 = 45,81 \text{ с}.$$

Определение площади стояка, $\Sigma F_{\text{юз}}$, см^2 ([1], стр. 313):

$$\Sigma F_{\text{юз}} = \frac{1000 \cdot m_\phi}{\mu \cdot \rho_1 \cdot \tau_{\text{зал}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}}, \quad (3)$$

где m_ϕ – металлоемкость формы, кг; μ – коэффициент расхода металла; ρ_1 – плотность жидкого металла, г/см^3 ; $\tau_{\text{зал}}$ – продолжительность заливки формы, с; g – ускорение свободного падения, $g = 981 \text{ см/с}^2$; H_p – расчетный металлостатический напор, м.

Коэффициент расхода металла принимаем $\mu = 0,4$ для сложных систем ([1], стр. 317).

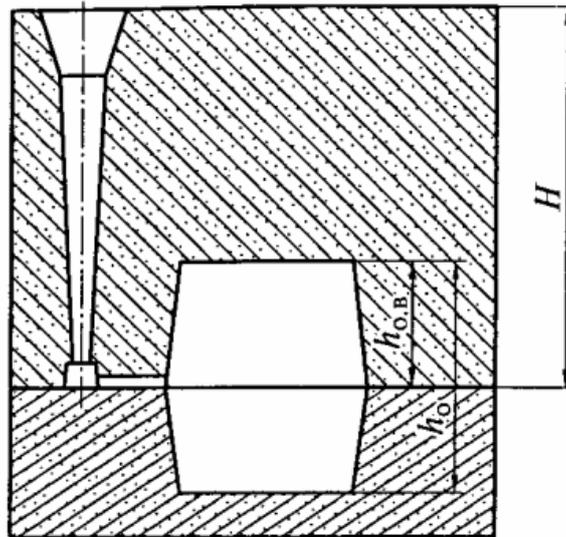


Рис 2. Эскиз формы для расчета литниковых систем

Расчетный напор H_p определяется из условия равенства работы по уравнению ([1], стр. 316):

$$H_p = \frac{1}{m_0} \cdot (m_{0н} \cdot H + m_{0в} \cdot H - m_{0в} \cdot \frac{h_{0в}}{2}), \quad (4)$$

где m_0 , $m_{0н}$, $m_{0в}$ – соответственно масса всей отливки, масса отливки в нижней и верхней полуформах, кг; H – металлостатический напор, см; $h_{0в}$ – высота отливки в верхней полуформе, см.

По технологии $H = 58 \text{ см}$, $h_{0в} = 45,8 \text{ см}$.

Преобразуем формулу (4), вынеся плотность за скобки:

$$\begin{aligned} H_p &= \frac{1}{m_0} \cdot (m_{0н} \cdot H + m_{0в} \cdot H - m_{0в} \cdot \frac{h_{0в}}{2}) = \frac{\rho_1}{\rho_1 \cdot V_0} \cdot (V_{0н} \cdot H + V_{0в} \cdot H - V_{0в} \cdot \frac{h_{0в}}{2}) = \\ &= \frac{1}{V_0} \cdot (V_{0н} \cdot H + V_{0в} \cdot H - V_{0в} \cdot \frac{h_{0в}}{2}) \end{aligned}, \quad (5)$$

где V_0 , $V_{0н}$, $V_{0в}$ – соответственно объем всей отливки, объемы отливки в нижней и верхней полуформах, мм^3 . Значения $V_{0н}$, $V_{0в}$ найдем из 3D модели:

$$V_{0н} = 28288,49996 \text{ см}^3;$$

$$V_{0в} = 42641,91252 \text{ см}^3.$$

Подставим значения в формулу (5):

$$H_p = \frac{1}{V_0} \cdot (V_{0н} \cdot H + V_{0с} \cdot H - V_{0с} \cdot \frac{h_{0с}}{2}) = \frac{1}{70929,23917} \cdot (28288,49996 \cdot 58 + 42641,91252 \cdot 58 - 42641,912,52 \cdot \frac{45,8}{2}) = 44,2337 \text{ см}$$

Поскольку имеется два определения времени, то рассчитаем площадь стояка для двух разных времен заполнения формы.

$$\Sigma F'_{уз} = \frac{1000 \cdot m_{\phi}}{\mu \cdot \rho_1 \cdot \tau_{зал}' \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}} = \frac{1000 \cdot 2 \cdot 531,97}{0,4 \cdot 7,5 \cdot 33,918 \cdot \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 44,2337}} = 38,0335 \text{ мм}^2$$

$$\Sigma F''_{уз} = \frac{1000 \cdot m_{\phi}}{\mu \cdot \rho_1 \cdot \tau_{зал}'' \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}} = \frac{1000 \cdot 2 \cdot 531,97}{0,4 \cdot 7,5 \cdot 45,81 \cdot \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 44,2337}} = 28,16 \text{ мм}^2$$

Диаметр стояка:

$$d_{см}' = \sqrt{\frac{4 \cdot F'_{уз}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 38,0335}{\pi}} = 6,96 \text{ мм}$$

$$d_{см}'' = \sqrt{\frac{4 \cdot F''_{уз}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 28,16}{\pi}} = 5,988 \text{ мм}$$

1.2. Определение размеров ЛПС по книге Чуркина Б.С.[2]

Определение времени заливки, $\tau_{опт}$, с ([2], стр. 121-150):

Опыт показывает что оптимальная продолжительность заполнения $\tau_{зал}$ формы удовлетворяет неравенству ([2], стр. 121)

$$\tau_{min} \leq \tau_{зал} \leq \tau_{max} \quad (6)$$

Отливка получается качественной в некотором интервале времени заливки: при отклонении $\tau_{зал}$ от оптимального времени в большую или меньшую сторону на 20%. По данным Г.М. Дубицкого, время заливки должно удовлетворять неравенству ([2], стр. 125):

$$\tau_{опт}/1,2 \leq \tau_{зал} \leq 1,2\tau_{опт} \quad (7)$$

В практике расчетов широко используется эмпирическая формула Г.М. Дубицкого ([2], стр. 122):

$$\tau_{опт} = S_1 \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot G}, \quad (8)$$

где S_1 – коэффициент продолжительности заливки, зависящий от температуры жидкого металла, рода сплава, места его подвода, материала формы; δ – преобладающая толщина стенки отливки, мм; G – масса жидкого металла в форме, приходящегося на одну отливку, кг.

Значение S_1 определяется по таблице ([2], стр. 123): для стальных отливок с нормальной температурой сплава и подводом металла на половине высоты или ступенчатым подводом $S_1 = 1,4$.

Преобладающая толщина стенки отливки $\delta = 15$ мм.

Масса жидкого металла в форме, приходящегося на одну отливку:

$$G = \rho_1 \cdot V_0 = 7,0 \cdot 70929,23917 = 496,504 \text{ кг}$$

Подставим значения в формулу (8):

$$\tau_{опт} = S_1 \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot G} = 1,4 \cdot \sqrt[3]{15 \cdot 496,504} = 27,34 \text{ с.}$$

Определение площади стояка, $\Sigma F_{уз}$, см² ([2], стр. 125):

$$\Sigma F_{уз} = \frac{G_{ж}}{\mu \cdot \rho_1 \cdot \tau_{опт} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}}, \quad (9)$$

где $G_{ж}$ – масса жидкого сплава, залитого в форму через литниковую систему, г; μ – коэффициент расхода литниковой системы; ρ_1 – плотность жидкого металла, г/см³;

$\tau_{\text{онт}}$ – продолжительность заливки формы, с; g – ускорение свободного падения, $g = 981 \text{ см/с}^2$; H_p – действующий напор, м.

Коэффициент расхода литниковой системы принимаем $\mu = 0,38$ для стальных отливок при заливке в сухую форму со средним сопротивлением формы.

$$G_{\text{а}} = 2 \cdot G = 496.504 \cdot 2 = 993 \text{ кг}.$$

Подставим значения в формулу (9):

$$\Sigma F_{\text{уз}} = \frac{G_{\text{ж}}}{\mu \cdot \rho_1 \cdot \tau_{\text{онт}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}} = \frac{993000}{0,38 \cdot 7,0 \cdot 27,34 \cdot \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 44,2337}} = 46,357 \text{ см}^2.$$

Диаметр стояка:

$$d_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{уз}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 46,357}{\pi}} = 7,68 \text{ мм}$$

1.3. Определение размеров ЛПС по книге Галдина Н.М.[3]

Определение времени заливки, $\tau_{\text{зал}}$, с ([3], стр. 123-130):

Продолжительность заливки обычно определяют по формуле ([3], стр. 124):

$$\tau_{\text{зал}} = S \cdot \sqrt[3]{\delta_0 \cdot G}, \quad (10)$$

где S – коэффициент, учитывающий продолжительность заливки металла; δ_0 – толщина стенки отливки, мм; G – масса жидкого металла, расходуемая на заливку формы, кг.

Масса жидкого металла, расходуемая на заливку формы:

$$G = 2 \cdot \rho_1 \cdot V_0 = 2 \cdot 7,0 \cdot 70929,23917 = 993 \text{ кг}$$

Преобладающая толщина стенки отливки $\delta = 15$ мм.

Значение S определяется по таблице ([3], стр. 124): для стальных отливок первой технологической группы (отливки особо ответственного назначения), массой от 500 до 1000 кг, при толщине стенки отливки от 15 до 30 мм $S = 1,0$.

Подставим значения в формулу (10):

$$\tau_{\text{зал}} = S_1 \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot G} = 1,0 \cdot \sqrt[3]{15 \cdot 993} = 19,528 \text{ с}.$$

Определение площади стояка, $\Sigma F_{\text{уз}}$, см^2 ([3], стр. 125):

$$\Sigma F_{\text{уз}} = \frac{G_0}{0,32 \cdot \mu \cdot \tau_{\text{зал}} \cdot \sqrt{H_p} \cdot K_{\text{суж}}}, \quad (11)$$

где G_0 – масса отливки, г; μ – коэффициент расхода; $\tau_{\text{зал}}$ – продолжительность заливки формы, с; H_p – расчетный средний металлостатический напор, м; $K_{\text{суж}}$ – коэффициент сужения.

Проанализировав структуру формулы (11), нетрудно увидеть, что она отличается от формулы (9) только наличием коэффициента 0,32, полученного $\frac{1000}{\rho_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g}} = 0,32$. Но чтобы соблюсти точность расчетов и не запутаться в размерности,

преобразуем формулу (11) до (3):

$$\Sigma F_{\text{уз}} = \frac{G_0}{0,32 \cdot \mu \cdot \tau_{\text{зал}} \cdot \sqrt{H_p} \cdot K_{\text{суж}}} = \frac{1000 \cdot G_0}{\mu \cdot \rho_1 \cdot \tau_{\text{зал}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}}$$

Коэффициент расхода литниковой системы принимаем $\mu = 0,38$ для стальных отливок при заливке в сухую форму со средним сопротивлением формы.

Коэффициент сужения $K_{\text{суж}} = 1$.

$$G_0 = 2 \cdot G = 496.504 \cdot 2 = 993 \text{ кг}$$

Подставим значения в формулу (11):

$$\Sigma F_{yz} = \frac{1000 \cdot G_0}{\mu \cdot \rho_1 \cdot \tau_{зал} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}} = \frac{993000}{0,38 \cdot 7,0 \cdot 19,528 \cdot \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 44,2337}} = 64,9 \text{ см}^2.$$

Диаметр стояка:

$$d_{cm} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{yz}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 64,9}{\pi}} = 9,09 \text{ мм}$$

1.4. Определение размеров ЛПС по книге Рабиновича Б.В.[4]

Определение времени заливки, $\tau_{зал}$, с ([4], стр. 380-399):

– эмпирическая формула определения времени

Продолжительность заливки стали определяют по формуле Б.Б. Гуляева и М.В. Зотова ([4], стр. 382):

$$\tau_{зал}' = S \cdot \delta^2 \cdot \sqrt{\Delta t}, \quad (12)$$

где S – коэффициент при заливке стали в песчаные формы с каналами с плоскими стенками, равный 0,5; δ – толщина стенки отливки, см; Δt – перегрев в °С.

Перегрев металла по техническим условиям равен $\Delta t = 120^\circ\text{C}$.

Преобладающая толщина стенки отливки $\delta = 1,5$ см.

Подставим значения в формулу (12):

$$\tau_{зал}' = S \cdot \delta^2 \cdot \sqrt{\Delta t} = 0,5 \cdot 1,5^2 \cdot \sqrt{120} = 12,323 \text{ с}.$$

– теоретическая формула определения времени ([4], стр. 385):

Формула А.А. Рыжкова и А.Ф. Спасского:

$$\tau_{зал}'' = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \rho_1^2}{4 \cdot b_\phi^2} \cdot \left[5,3 \cdot c_1^2 \cdot \lg^2 \left(\frac{T_{зал} - T_\phi}{T_L - T_\phi} \right) + \frac{N^2 \cdot L^2}{(T_L - T_\phi)^2} \right], \quad (13)$$

где R – приведенный размер отливки или массивного теплового узла, м; c_1 и ρ_1 – соответственно теплоемкость, Дж/(кг*К), и плотность, кг/м³, жидкого металла; $T_{зал}$, T_L и T_ϕ – соответственно температура заливки, ликвидуса и формы, К; b_ϕ – коэффициент теплоаккумуляции формы, Вт*с^{1/2}/(м²*К); N – критическая доля твердой фазы, при которой поток полностью останавливается; L – удельная теплота кристаллизации.

Для стали критическая доля твердой фазы $N = 0,2$.

Подставим значения в формулу (13):

$$\begin{aligned} \tau_{зал}'' &= \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \rho_1^2}{4 \cdot b_\phi^2} \cdot \left[5,3 \cdot c_1^2 \cdot \lg^2 \left(\frac{T_{зал} - T_\phi}{T_L - T_\phi} \right) + \frac{N^2 \cdot L^2}{(T_L - T_\phi)^2} \right] = \frac{\pi \cdot 2,62^2 \cdot 7,0^2}{4 \cdot 1628^2} \times \\ &\times \left[5,3 \cdot 920^2 \cdot \lg^2 \left(\frac{1905 - 298}{1785 - 298} \right) + \frac{0,2^2 \cdot 264000^2}{(1785 - 298)^2} \right] = 63,067 \end{aligned}$$

Определение площади стояка, ΣF_{yz} , см² ([4], стр. 394):

$$\Sigma F_{yz}' = \frac{V}{\mu \cdot \tau_{зал}' \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}}, \quad (14)$$

где V – объем отливки, г; μ – коэффициент расхода; $\tau_{зал}'$ – продолжительность заливки формы, с; H_p – расчетный средний металлостатический напор, м.

Коэффициент расхода литниковой системы принимаем $\mu = 0,38$ для стальных отливок при заливке в сухую форму со средним сопротивлением формы.

$$V = 2 \cdot V_0 = 2 \cdot 70929,23917 = 141858,47834 \text{ см}^3.$$

Подставим значения в формулу (14):

$$\Sigma F_{yz}' = \frac{V}{\mu \cdot \tau_{зал}' \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}} = \frac{141858,47834}{0,38 \cdot 12,323 \cdot \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 44,2337}} = 102,843 \text{ см}^2.$$

$$\Sigma F''_{уз} = \frac{V}{\mu \cdot \tau_{зал}'' \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_p}} = \frac{141858,47834}{0,38 \cdot 63,067 \cdot \sqrt{2 \cdot 981 \cdot 44,2337}} = 20,096 \text{ см}^2.$$

Диаметр стояка:

$$d_{cm}' = \sqrt{\frac{4 \cdot F'_{уз}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 102,843}{\pi}} = 11,44 \text{ мм}$$

$$d_{cm}'' = \sqrt{\frac{4 \cdot F''_{уз}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 20,096}{\pi}} = 5,058 \text{ мм}$$

1.5. Определение размеров ЛПС по книге Машенко А.Ф. [5]

Определение времени заливки, $\tau_{зал}$, с ([5], стр. 1-16):

$$\tau_{зал} = K_2 \cdot S \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot G}, \quad (15)$$

где K_2 – поправочный коэффициент к значению S , учитывающий жидкотекучесть стали; S – коэффициент, учитывающий особенности конструкции отливок и марку стали; δ – преобладающая или средняя толщина стенки отливки, мм; G – масса отливки, кг.

Масса отливки $G = G_{отл} + G_{лс}$.

$G_{отл} = 993$ кг. Тогда по таблице 4 ([5], стр. 4) определяем $G_{лс}$: для отливок массой от 101 до 1000 кг $G_{лс} = 8$ кг.

Тогда $G = G_{отл} + G_{лс} = 993 + 8 = 1001$ кг.

Технологическая группа определяется по таблице 1 ([5], стр. 2): для формовки по-сухому и отливки с развитыми тонкостенными частями на разных уровнях формы соответствует 2 технологическая группа.

Для второй технологической группы при массе отливки от 1001 до 5000 кг и средней толщине стенки отливки 15 мм, значение коэффициента $S = 1,3$ ([5], стр. 2).

Значение поправочного коэффициента $K_2 = 1,0$ для углеродистой стали ([5], стр. 3)

Подставим значения в формулу (15):

$$\tau_{зал} = K_2 \cdot S \cdot \sqrt[3]{\delta \cdot G} = 1,0 \cdot 1,3 \cdot \sqrt[3]{15 \cdot 1001} = 32,071 \text{ с}.$$

Определение площади стояка, $\Sigma F_{уз}$, см² ([5], стр. 5):

$$\Sigma F_{уз} = K_4 \cdot \frac{W}{0,31 \sqrt{H_p}}, \quad (16)$$

где K_4 – коэффициент, зависящий от конструкции ЛПС; W – истинная массовая скорость, кг/с; H_p – гидростатический напор в форме, мм.

Коэффициент K_4 для литниковых систем с тремя поворотами потока стали в литниковых каналах при формовке по-сухому, с сифонным способом подвода питателей и с закрытыми прибылями равен $K_4 = 2,2$ ([5], стр. 5).

Истинная массовая скорость заливки определяется по формуле ([5], стр. 4-5):

$$W = K_1 \cdot K_3 \cdot W_{усл} = K_1 \cdot K_3 \cdot G / \tau_{зал}, \quad (17)$$

где K_1 и K_3 – коэффициенты, учитывающие соответственно положение отливки в форме при заливке и материал облицовочного слоя формы и стержней.

Для горизонтального расположения отливки $K_1 = 1,2$ ([5], стр. 3).

Для песчано-глинистой смеси как материала облицовочной смеси $K_3 = 0,9$ ([5], стр. 3).

Подставим значения в формулу (17):

$$W = K_1 \cdot K_3 \cdot W_{усл} = K_1 \cdot K_3 \cdot G / \tau_{зал} = 1,2 \cdot 0,9 \cdot 1001 / 32,071 = 33,708 \text{ кг/с}.$$

Подставим значения в формулу (16):

$$\Sigma F_{уз} = K_4 \cdot \frac{W}{0,31 \sqrt{H_p}} = 2,2 \cdot \frac{33,708}{0,31 \sqrt{442,337}} = 11,374 \text{ см}^2.$$

Диаметр стояка:

$$d_{ст} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{уз}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11,374}{\pi}} = 3,805 \text{ мм}$$

Анализ полученных результатов

Занесем все полученные значения в одну таблицу, отсортировав по времени заливки в порядке возрастания.

Таблица 1. Результаты расчетов

Методики	Время заливки $\tau_{зал}$, с	Площадь стояка $F_{ст}$, см ²	Диаметр стояка $d_{ст}$, см
Эмпирическая модель (Гуляев Б.Б. и Зотов М.В.) [4]	12,323	102,843	11,44
Дубицкий Г.М.[3]	19,528	64,9	9,09
Дубицкий Г.М.[2]	27,34	46,357	7,68
Машенко А.Ф.[5]	32,071	11,374	3,805
Эмпирическая модель [1]	33,918	38,0335	6,96
Теоретическая модель (Баландин Г.Ф.) [1]	45,81	28,16	5,988
Теоретическая модель (Рыжиков А.А. и Спасский А.Ф.) [4]	60,067	20,096	5,058
Действующие размеры	35-50	28,274	6,0

При анализе полученных данных следует отбросить крайние значения по времени. Это эмпирическая модель Гуляева-Зотова, Дубицкого по книге Галдина и модель Рыжикова-Спасского; и по площади стояка – Машенко.

Таблица 2. Результаты расчетов

Методики	Время заливки $\tau_{зал}$, с	Площадь стояка $F_{ст}$, см ²	Диаметр стояка $d_{ст}$, см
Дубицкий Г.М.[2]	27,34	46,357	7,68
Эмпирическая модель [1]	33,918	38,0335	6,96
Теоретическая модель (Баландин Г.Ф.) [1]	45,81	28,16	5,988
Действующие размеры	35-50	28,274	6,0

Очевидно, что действующие размеры укладываются в результаты расчетов. Поэтому для дальнейшего анализа будем использовать диаметр стояка 60мм, чтобы проанализировать влияние конструкции ЛПС на процесс заливки.

Вывод по результатам расчетов:

В результате выполнения расчетов получены данные по времени заливки формы и площади стояка. Причем каждая из рассматриваемых методик дает свои, отличные от других, результаты. Это объясняется тем, что все теории и эмпирические модели учитывают разные входные параметры и допущения, чем объясняется отличительность выходных параметров. Единой системы, которая могла бы учесть влияние сразу всех факторов, на сегодня не существует, и это вызывает необходимость проведения нескольких расчетов по разным методикам и выявление «золотой середины». Стоит отметить, что возможность учета всех факторов может вызвать большие трудности, и куда более простым и оптимальным решением задачи расчета ЛПС может служить указанный поиск «золотой середины».

2. Анализ конструкции ЛПС

Для моделирования процесса заливки к 3D модели были построены литниково-питающие системы, и эти модели использовались в пакете программ «Flow 3D».

2.1. Анализ работы заводской ЛПС

А. Следует отметить неоправданно сложную конструкцию шлакоуловителя с криволинейными переходами, которые довольно трудно изобразить в трехмерном виде, и тем более трудно изготовить в дальнейшем модель для формовки (рис. 3).

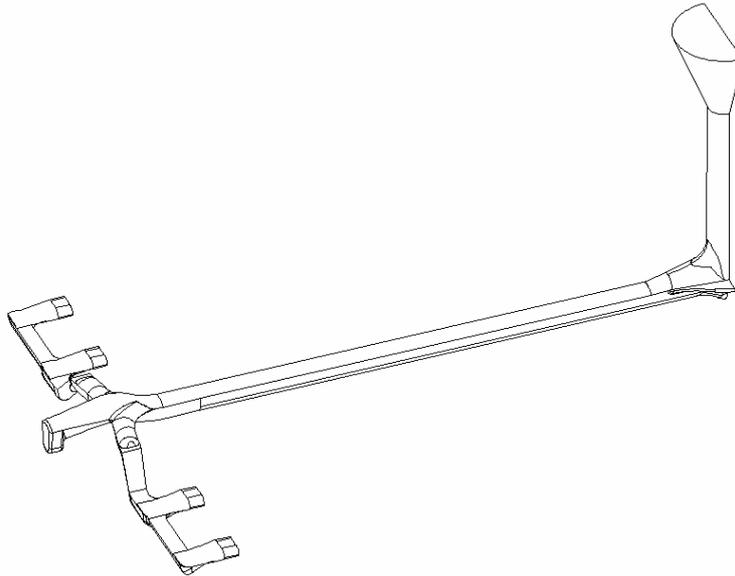


Рис. 3. Конструкция действующей ЛПС

Б. Расчеты показали, что питатели работают неодинаково. Наибольший расход у дальнего питателя, у ближнего к литниковой системе питателя расход минимальный. Это приводит к нарушению сплошности потока при заполнении полости формы, что в свою очередь неизбежно вызывает захват воздуха движущимся расплавом и образование окислов при столкновении нескольких потоков. Картина заполнения приведена на рис. 4.

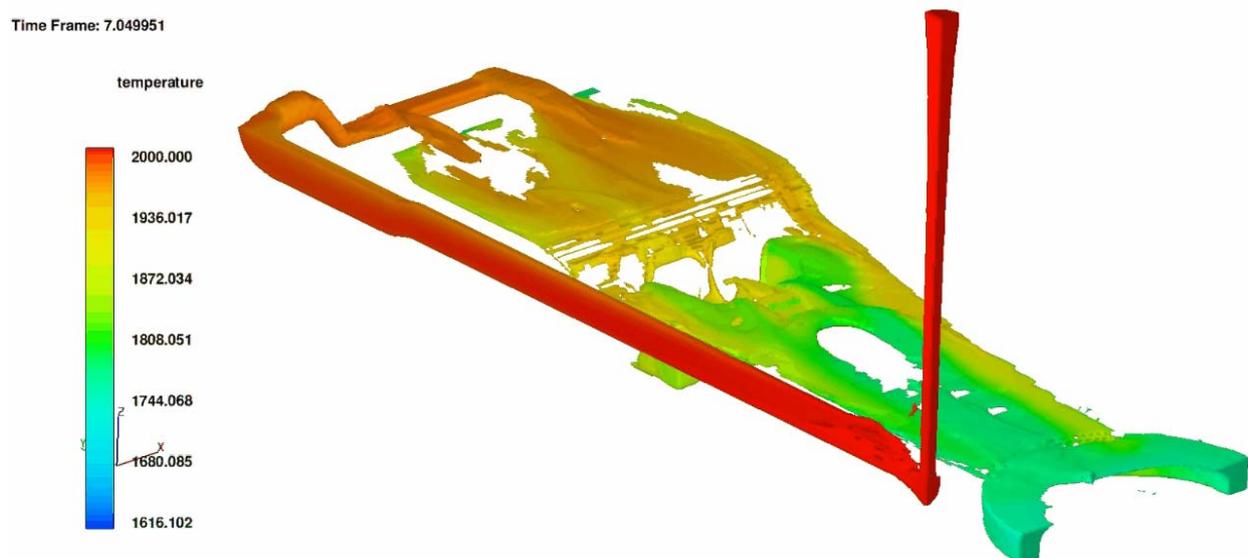


Рис. 4. Неравномерность работы питателей

В. Так же наблюдается пережим в месте перехода от шлакоуловителя к питателям. В результате наблюдается увеличение скорости потока и нарушен принцип

расширения от входа к питателям. Картина распределения скорости приведена на рис. 5.

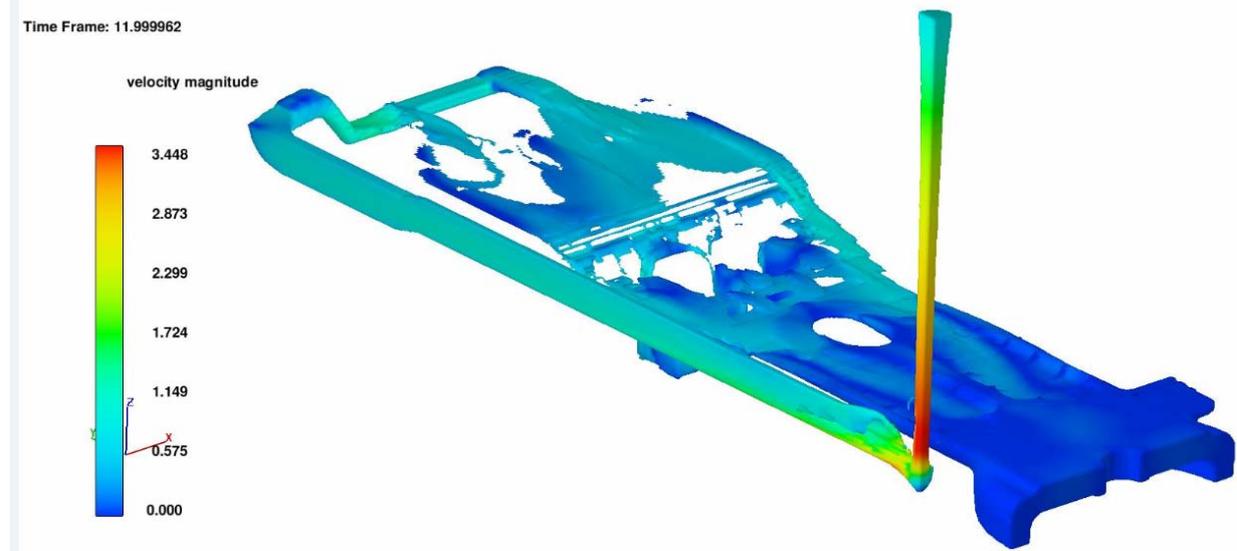


Рис. 5. Распределение скоростей расплава в процессе заливки

Г. В конце процесса заливки мы получили, что металл в прибыли имеет температуру, ниже температуры $T_S = 1747\text{K}$, что физически невозможно (рис. 6).

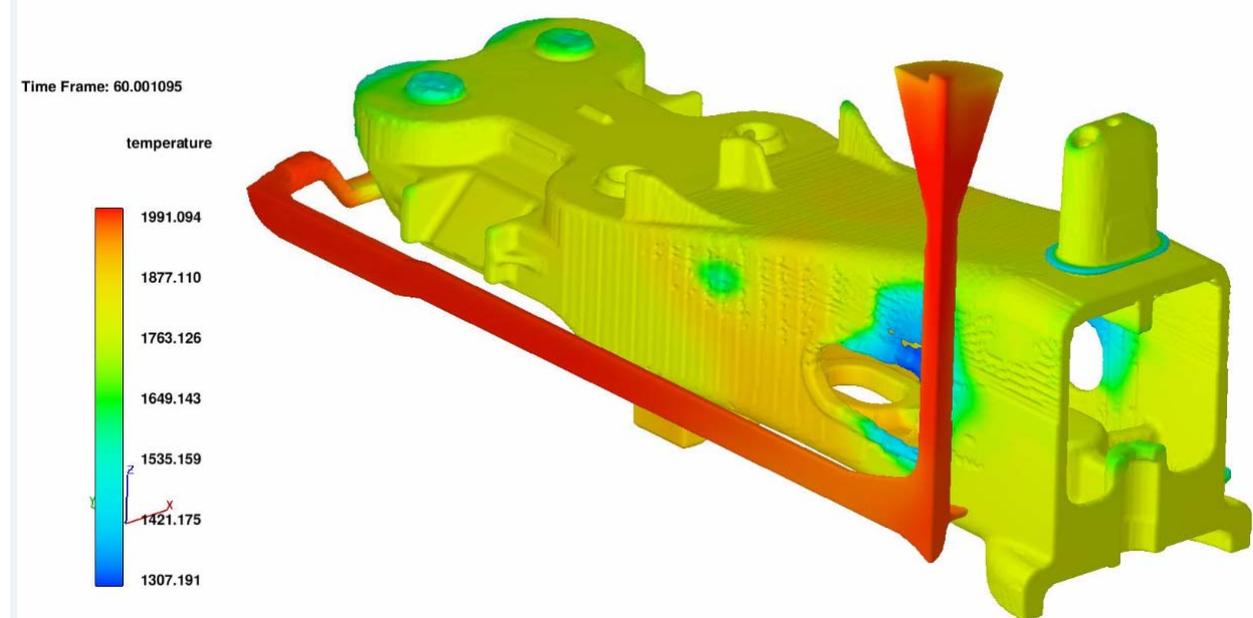


Рис. 6. Распределение температуры в конце заливки

Вывод: литниковую систему необходимо переработать с целью обеспечения плавного заполнения расплавом формы, благоприятного распределения температур и простоты ее конструкции.

2.2. Анализ работы новой ЛПС

А. Для обеспечения простоты изготовления литниково-питающей системы, каналы были выполнены перпендикулярно друг другу и имеют трапециевидальную форму (рис. 7).

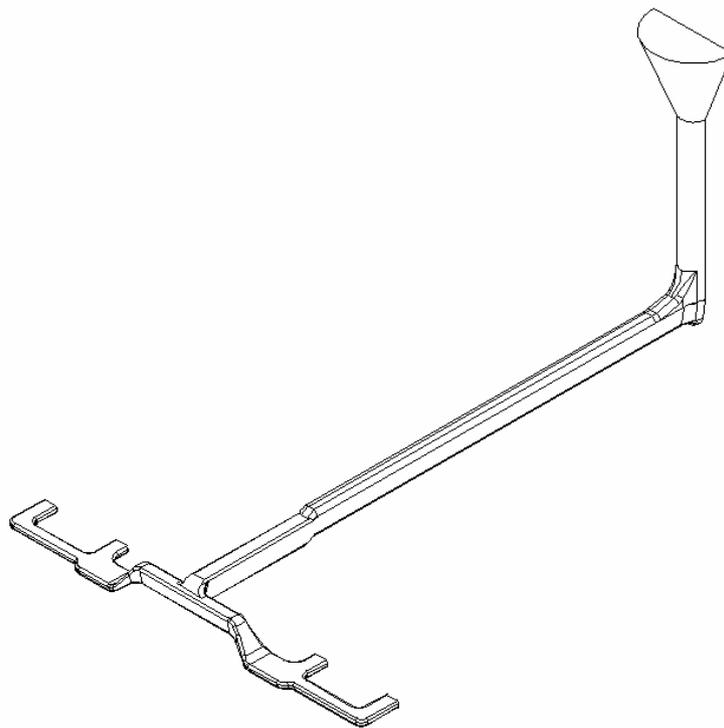


Рис. 7. Конструкция разработанной ЛПС

Б. Расчеты показали, что питатели работают примерно одинаково. Картина заполнения приведена на рис. 8.

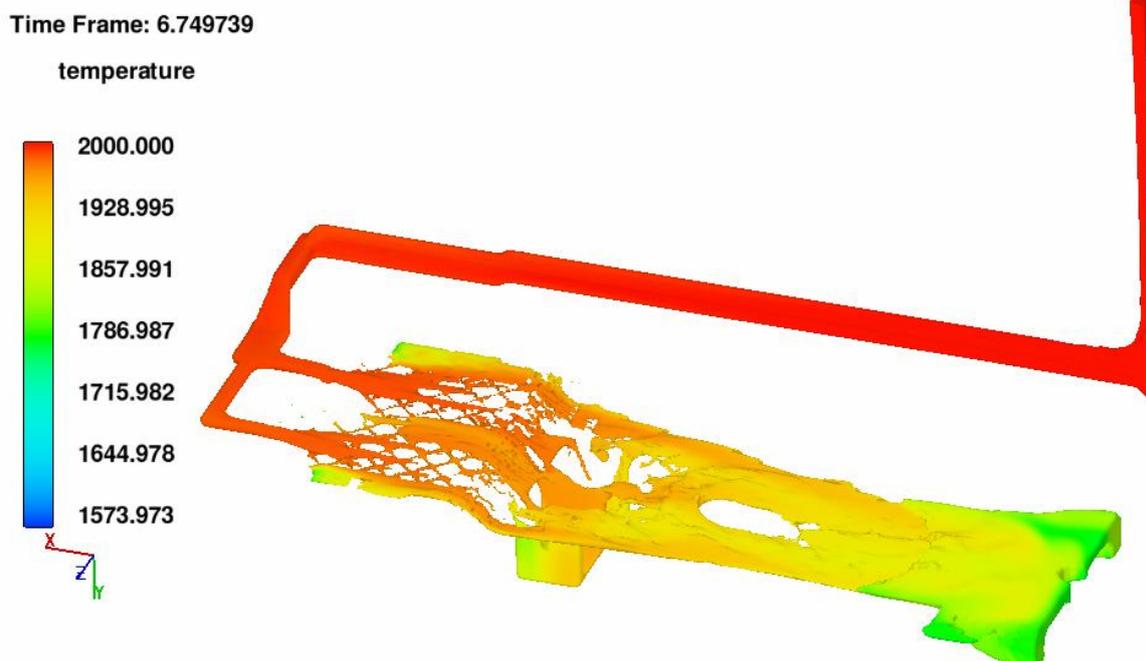


Рис. 8. Равномерность работы питателей

В. Картина распределения скорости приведена на рис. 9.

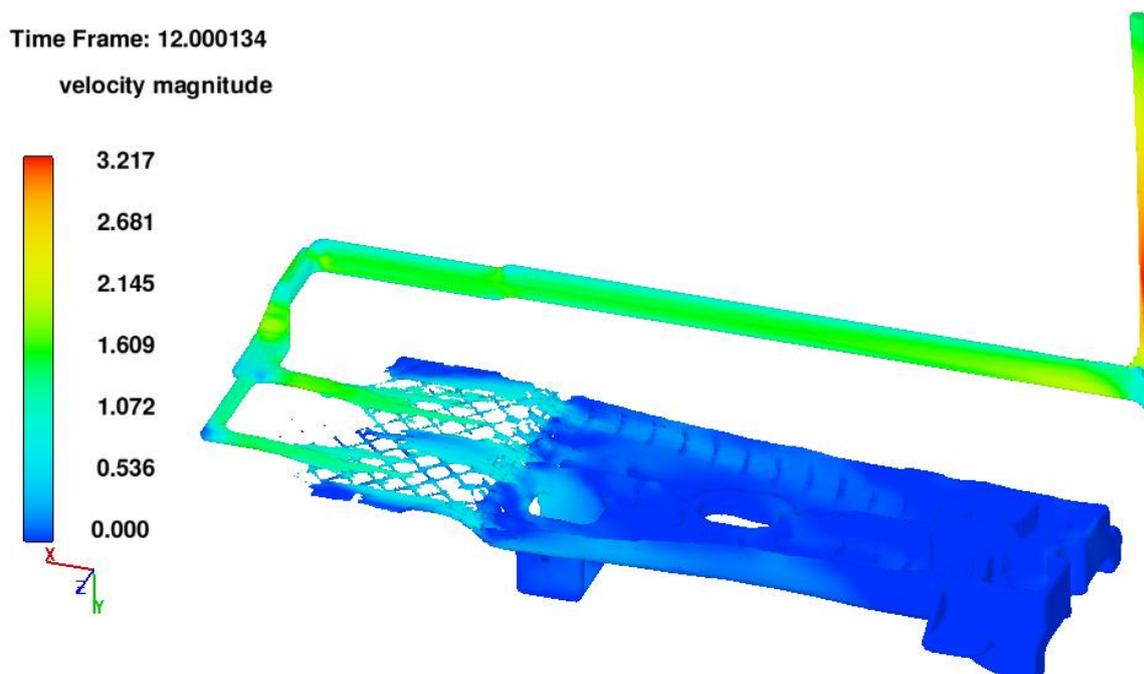


Рис. 9. Распределение скоростей расплава в процессе заливки

Г. В конце процесса заливки мы получили, что расплав в прибыли имеет температуру, $T = 1790\text{K}$, что близко к температуре ликвидуса (рис. 10).

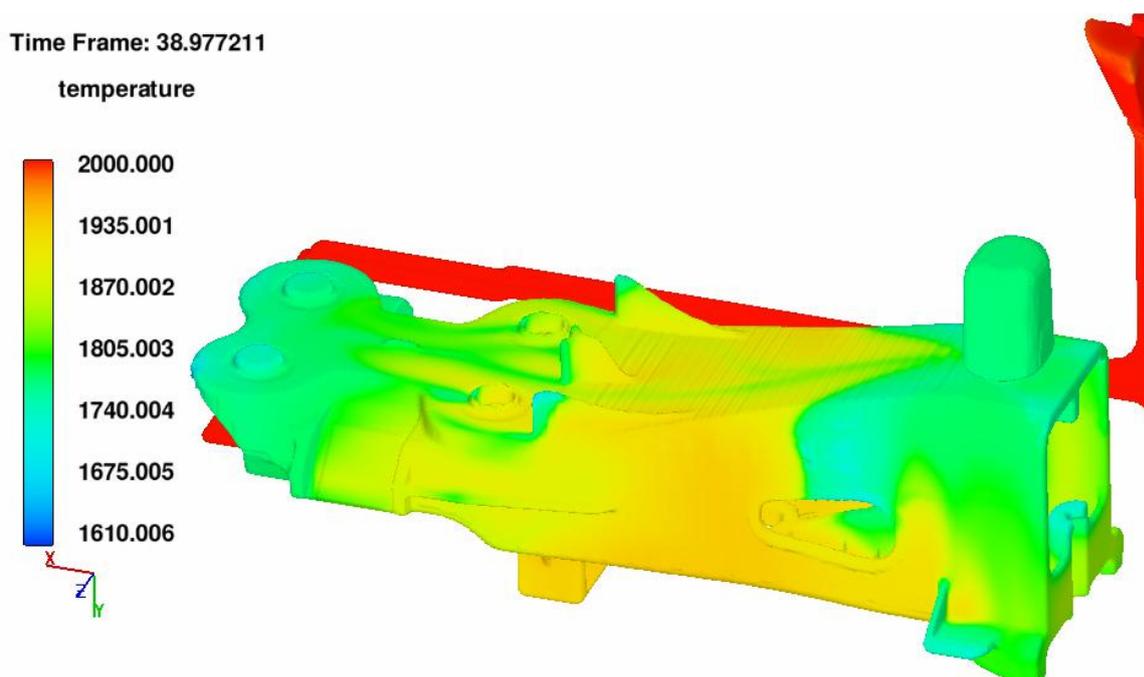


Рис. 10. Распределение температуры в конце заливки

Вывод: литниковая система удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям.

3. варианты дальнейшей работы

В данной работе исследовались литниковые системы с двумя питателями. В дальнейшем будут так же исследованы системы с тремя и четырьмя питателями (рис. 11).

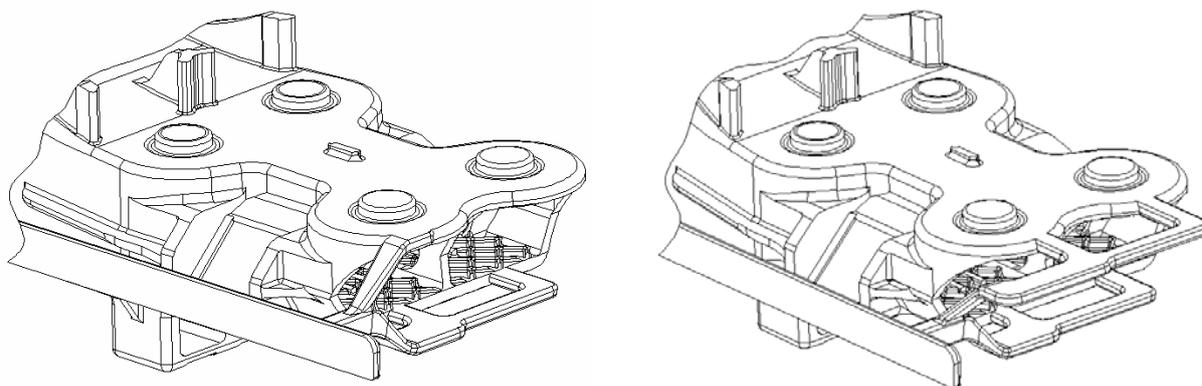


Рис. 11. Литниковые системы с тремя и четырьмя питателями

Так же будет проведено исследование влияния материала формы и конструкции стержней (использование опустошенных стержней) на процесс заливки и последующего затвердевания.

Вывод

Таблица 3. Выводы

Параметр	Действующий вариант	Предлагаемая конструкция
Потери перегрева	В конце заливки температура прибыли ниже температуры $T_S = 1747K$	В конце заливки температура прибыли $T = 1790K$, что близко к температуре ликвидуса
	Предлагаемая конструкция позволяет получить меньшие потери перегрева.	
Вероятность замешивания воздуха при заполнении	Питатели работают неодинаково. Наибольший расход у дальнего питателя, у ближнего к литниковой системе питателя расход минимальный. Это приводит к нарушению сплошности потока при заполнении полости формы, что в свою очередь неизбежно вызывает захват воздуха движущимся расплавом и образование окислов при столкновении нескольких потоков.	Питатели работают примерно одинаково. Но за счет учета рифления отливки, нарушается сплошность потока при заполнении полости формы. Поэтому неизбежен захват воздуха движущимся потоком.
	Поскольку в действующей конструкции не учтено рифление, то к неравномерности работы питателей следует прибавить и влияние рифления. Замешивание воздуха более вероятно в первом варианте.	
Вероятность размыва формы	За счет использования литниковой системы с большим числом скруглений, поток будет двигаться более плавно,	За счет перпендикулярности элементов литниковой системы друг относительно друга, вероятность размыва

	что уменьшит размыв формы.	формы увеличивается, хотя все определяется величиной скорости.
Обеспечение направленного затвердевания	Распределение температур по отливке в момент окончания заливки показывает примерно одинаковую температуру по всей длине отливки, за исключением области вокруг окон, где уже произошло затвердевание. Направленное затвердевание невозможно.	При заполнении удалось создать такое распределение температур, что центральная массивная часть отливки к моменту окончания заполнения формы имеет температуру ниже, чем тонкостенные стенки. Это способствует созданию условий для направленной кристаллизации.
Отсутствие местного перегрева формы	За счет большего времени заливки в первом варианте (60с) относительно второго (39с), возможны местные перегревы формы в месте подвода металла.	

Литература

1. Технология литейного производства: Литье в песчаные формы: Учебник для студ. учеб. заведений / *А.П. Трухов, Ю.А. Сорокин, М.Ю. Ершов* и др.; Под ред. *А.П. Трухова*. — М.: Издательский центр «Академия», 2005. — 528 с.
2. Технология литейного производства: Учеб. / *Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман, С.Г. Майзель, А.В. Афонаскин, В.М. Миляев, А.Б. Чуркин, А.А. Филиппенков*; Под ред. *Б.С. Чуркина*. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2000. 662с.
3. Литниковые системы и прибыли для фасонных отливок / *Н.М. Галдин, В.В. Чистяков, А.А. Шатульский*; Под общ. ред. *В.В. Чистякова*. — М.: Машиностроение, 1992. — 256с.: ил.
4. Введение в литейную гидравлику. Свойства сплавов. Особенности течения. Литниковые системы. *Б.В. Рабинович* — М., «Машиностроение», 1966.
5. УДК 621. 7 Расчет литниковых систем для отливок из стали. Методические указания к практической работе для студентов IV курса специальности 110400 «Литейное производство черных и цветных металлов» дневной формы обучения. / Сост. *А.Ф. Мащенко, А.В. Щекин* — Хабаровск, Хабар. Гос. Техн. Ун-т, 1998.
6. *Баландин Г.Ф.* Основы теории формирования отливки. В 2-х частях. Ч. 1. Тепловые основы теории. Затвердевание и охлаждение отливки. Учебное пособие для машиностроительных вузов по специальности «Машины и технология литейного производства». М., «Машиностроение», 1976.