



УДК 621.74

Поступила 12.02.2016

РАСЧЕТ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ CALCULATION OF THE VERTICAL GATING SYSTEMS WITH USAGE OF STANDARD ELEMENTS

А. А. ТОНКОВИЧ, А. А. СКВОРЦОВ, научный руководитель В. А. Скворцов, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр-т Независимости, 65

A. A. TONKOVICH, A. A. SKVORTSOV, research supervisor V. A. Skvortsov, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65 Nezavisimosti ave.

В статье приведена методика расчета вертикальных литниковых систем для автоматических линий DISA с использованием стандартизованных элементов. Приведен пример расчета литниковой системы для конкретной детали и представлены результаты моделирования разработанной литниковой системы с использованием пакетов прикладных программ ProCast, Poligon. Приведен пример выбора стандартной питающей прибыли по модулю охлаждения.

Methodology of the calculation of the vertical gating systems for DISA automatic lines with use of the standardized elements is given in the article. The example of calculation of the gating system for a concrete article and results of modeling of the developed gating system with use of packages of the applied programs ProCast, Poligon are presented. The example of a choice of the standard feeder on the cooling module is given.

Ключевые слова. Вертикальная литниковая система для автоматической линии DISA, стандартизованные элементы литниковой системы, моделирование литниковой системы, расчет прибыли, дефекты отливки.

Keywords. Vertical gating system for the DISA automatic line, the standardized elements of gating system, modeling of gating system, calculation of feeder, defects of casting.

Расчет вертикальных напорных литниковых систем для автоматических формовочных линий с вертикальной плоскостью разреза отличается от расчета горизонтальных тем, что ферростатическое давление на каждом уровне подвода металла к полостям литейной формы различное [1]. Для таких литниковых систем необходимо осуществлять принцип одновременного заполнения всех полостей формы. Такой расчет сводится к определению площади сечения питателя, подводных литниковых каналов и выбору номера и размеров литниковой чаши. Площадь сечения питателя ($F_{\text{п}}$) находится по формуле [2]:

$$F_{\text{п}} = \frac{1036G}{tm\sqrt{H_{\text{расч}}}}, \quad (1)$$

где G – масса отливки, кг; t – время заполнения одной полости формы расплавом, с; m – коэффициент трения; $H_{\text{расч}}$ – высота ферростатического давления, мм.

Время наполнения полости формы (t) расплавленным металлом необходимо выбирать на 4 с короче цикла работы формовочной машины, чтобы не задерживать процесс формообразования. Продолжительность цикла зависит от типа машины, производительности, толщины формы и наличия стержней. Толщина формы, в свою очередь, зависит от максимальных высот моделей на плитах давления и противодавления и минимальной толщины слоя формовочной смеси между моделями, которая берется равной 70 мм (рис. 1) и определяется из выражения

$$h_{\text{ф}} = h_1 + h_2 + 70, \quad (2)$$

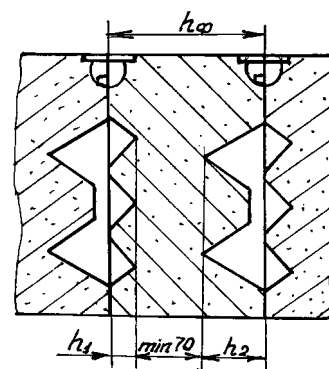


Рис. 1. Схема к определению толщины формы

где h_1, h_2 – соответственно максимальная высота модели на плитах противодействия и давления, мм.

Значения G, h_1 и h_2 выбираются на основании литейно-модельных указаний, нанесенных на чертеж детали.

Максимальная производительность для автоматической линии Дисаматик 2013МК5-А с размерами формы – шириной 600 мм и высотой 480 мм приведена в табл. 1, а для автоматической линии 2013МК5-Б с размерами формы – шириной 650 мм и высотой 535 мм – в табл. 2.

Т а б л и ц а 1. Максимальная производительность линии 2013МК5-А в зависимости от толщины формы и наличия стержней

Толщина формы, мм	120	150	200	250	300	330
Производительность, форм/ч отливки без стержней	370	370	370	365	350	330
Производительность, форм/ч отливки со стержнями	355	355	355	348	333	317

Т а б л и ц а 2. Максимальная производительность линии 2013МК5-Б в зависимости от толщины формы и наличия стержней

Толщина формы, мм	120	150	200	250	300	350
Производительность, форм/ч отливки без стержней	350	350	350	335	323	308
Производительность, форм/ч отливки со стержнями	330	330	330	319	307	295

Значения продолжительности цикла изготовления формы приведены в табл. 3, 4.

Т а б л и ц а 3. Продолжительность цикла формовочной машины Дисаматик 2013МК5-А

Производительность, форм/ч	220	240	260	280	300	320	340	360
Продолжительность цикла, с	16,3	15,0	13,8	12,8	12,0	11,2	10,6	10,0

Т а б л и ц а 4. Продолжительность цикла формовочной машины Дисаматик 2013МК5-Б

Производительность, форм/ч	220	240	260	280	300	320	330
Продолжительность цикла, с	16,4	15,0	13,9	13,0	12,0	11,3	10,9

Коэффициент потерь (μ) зависит от температуры заливки, геометрии литниковой системы, газового давления в полости формы и рекомендуется выбирать при толщине питателя до 3 мм – 0,4; 4 мм – 0,5 и 5 мм – 0,6.

Высота ферростатического давления металла в литниковой системе (H_p) зависит от расположения питателей от уровня металла в литниковой чаше. Для определения H_p составляется схема расположения моделей на подмодельных плитах (рис. 2) с учетом необходимых минимальных толщин формовочной смеси верхней, нижней и боковых кромок формы, зависящих от толщины стенок отливки и тотальной высоты модели (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Значения минимальных толщин формовочной смеси на различных участках формы

Толщина стенки отливки, мм	Тотальная высота модели, мм	Верхняя кромка А, мм	Боковая кромка В, мм	Нижняя кромка С, мм
0–15	0–50	70	30	30
	50–100		40	40
	100–150		50	50
	150–200		60	60
	200–250		70	70
	250–300		80	80
15–25	0–50	70	60	50
	50–100		70	60
	100–150		80	70
	150–200		90	80
	200–250		100	90
	250–300		110	100

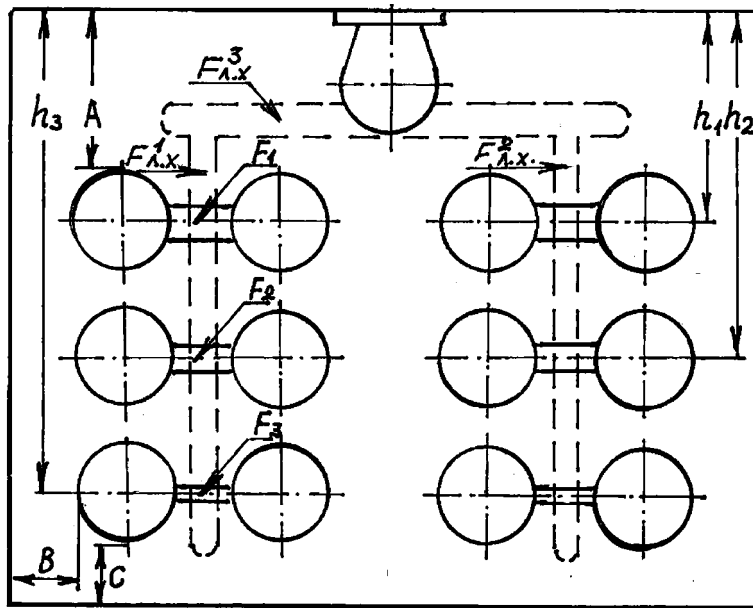


Рис. 2. Схема расположения моделей на подмодельной плите

После нахождения площадей питателей (F_{Π}) определяются площади сечений литниковых ходов ($F_{л.х}$):

$$F_{л.х.} = \sum F_{\Pi} \cdot 1,2, \quad (3)$$

где $\sum F_{\Pi}$ – сумма площадей питателей, отходящих от литникового хода.

Для приведенной схемы (рис. 2) площадь сечения литникового хода 1 рассчитывается по формуле:

$$F_{л.х.}^1 = (2F_1 + 2F_2 + 2F_3) \cdot 1,2.$$

Поскольку литниковые ходы 1 и 2 питают одинаковое количество отливок, то их площади будут равны. Литниковые ходы 1 и 2 можно делать ступенчатыми (рис. 3, а) или коническими (рис. 3, б), постепенно уменьшая их сечение по мере снижения количества питаемых отливок. Уменьшение сечения литникового хода осуществляется за счет изменения его высоты при одинаковом размере нижнего основания (рис. 3, а) или изменения размеров всех сечений с сохранением отношений нижнего и верхнего оснований и высоты (рис. 3, б). Такая конструкция вертикальных литниковых ходов позволяет создавать

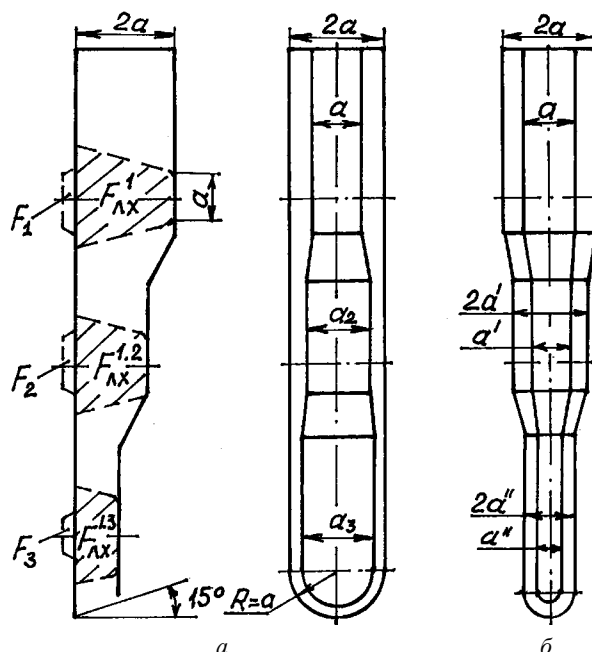
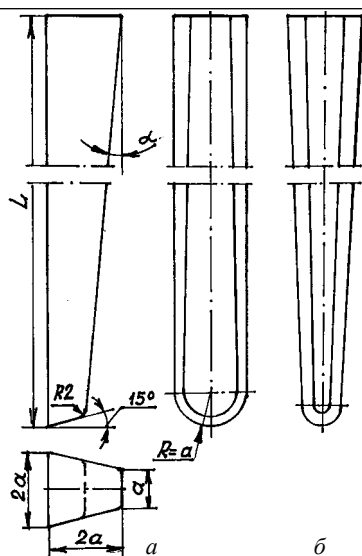


Рис. 3. Формы ступенчатого литникового хода: а – с постоянными размерами основания и переменной высотой; б – с постоянным отношением верхнего и нижнего основания



Номер литникового хода	<i>a</i> , мм	<i>F</i> , мм ²
1	5	75
2	6	108
3	7	147
4	8	192
5	9	243
6	10	300
7	11	363
8	12	432
9	13	507
10	14	588
11	15	675
12	16	768
13	17	867
14	18	972
15	19	1063
16	20	1200

Рис. 4. Формы и размеры стандартных конических литниковых ходов: *a* – с постоянным размером основания; *б* – с постоянным отношением верхнего и нижнего основания

давление в подводящем канале и сокращать время наращивания ферростатического напора путем уменьшения времени, необходимого для заполнения металлом литниковой системы. Формы и размеры стандартных литниковых ходов приведены на рис. 4.

Площадь сечения литникового хода 3, который подводит металл к литниковому ходу 1, определяется путем увеличения площади литникового хода 1 ($F_{л.х.}^1$) на 20%:

$$F_{л.х.}^3 = F_{л.х.}^1 \cdot 1,2.$$

Литниковый ход 3 имеет трапециевидальное сечение с размерами: верхнее основание – *a*, нижнее основание – *2a* и высота – *2a*. Размер *a* рассчитывается из выражения:

$$a = \sqrt{\frac{F}{3}}, \text{ мм.} \tag{4}$$

Из рис. 2 находится длина питателей, литниковых ходов и определяется масса литниковой системы:

$$G_{л.с.} = G_{пит} + G_{л.х.} + G_{л.ч.}, \tag{5}$$

где $G_{пит}$, $G_{л.х.}$, $G_{л.ч.}$ – соответственно масса питателей, литниковых ходов, литниковой чаши, кг.

Масса питателей и литникового хода определяется как произведение их площади на длину и плотность заливаемого сплава. Массовая скорость заливки металла в форму определяется следующим образом:

$$m_{\tau} = \frac{G_{\phi}}{\tau}, \tag{6}$$

где G_{ϕ} – масса металла в форме, кг.

По табл. 6 выбираются номер, размеры и масса стандартной литниковой чаши. Схема литниковой чаши показана на рис. 5.

Таблица 6. Размеры литниковых чаш

Номер чаши	Размеры, мм										Скорость заливки, кг/с	Масса, кг
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>J</i>	<i>K</i>		
1	8	33	66	86	8	16	50	58	46	25	1	1
2	11	36	72	92	10	20	54	66	53	28	2	1,6
3	14	39	78	98	12	24	58	74	60	31	3	2,0
4	17	42	84	104	14	28	62	82	67	34	4	2,7
5	20	45	92	110	16	32	68	90	74	37	5	3,3
6	23	48	100	116	18	36	74	98	81	40	6	4,2
7	26	51	108	122	20	40	80	104	86	42	7	4,9
8	29	54	116	128	22	44	86	112	91	45	8	5,6
9	32	57	124	134	24	48	92	120	96	48	9	6,4
10	35	60	132	140	26	52	98	128	101	50	10	7,0

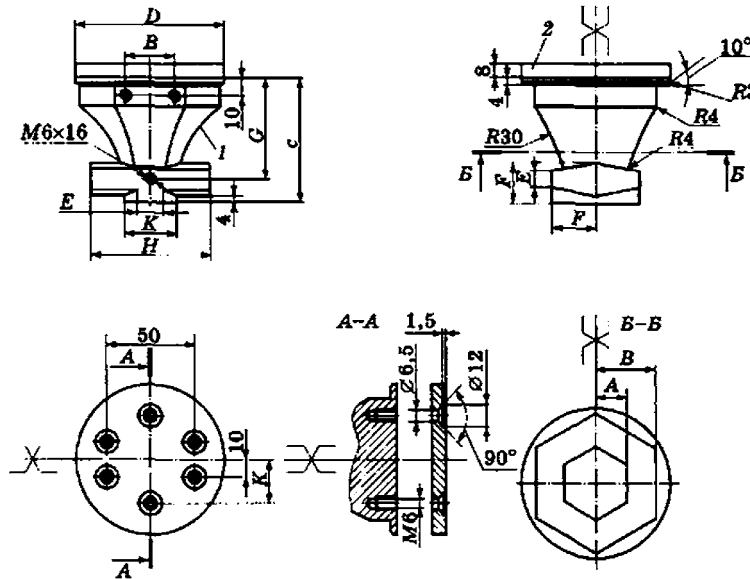


Рис. 5. Схема литниковой чаши

Для форм с вертикальной плоскостью разреза наиболее эффективным является метод определения объема прибыли по модулю охлаждения термического узла отливки. Для расчета узла отливки, который затвердевает в последнюю очередь, необходимо знать модуль охлаждения (M_c), равный:

$$M_c = \frac{V_c}{A_c}, \tag{7}$$

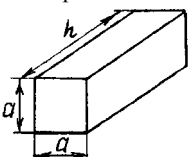
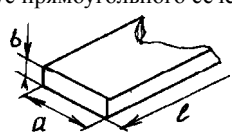
где M_c – модуль отливки, см; V_c – объем отливки, см³; A_c – площадь охлаждаемой поверхности отливки, см².

Объем и площадь охлаждаемой поверхности отливки можно определить с использованием программы Solid Works 2012 или расчетным путем, разбивая поверхность на элементарные участки.

В табл. 7 приведены формулы для расчета модуля охлаждения для питаемых узлов различной конструкции. Питаемый узел может быть аппроксимирован к одной или нескольким геометрическим формам, чтобы получить оценку величины модуля охлаждения.

Таблица 7. Формулы для расчета модуля охлаждения

Геометрическая форма	Модуль охлаждения M_R , см	Геометрическая форма	Модуль охлаждения M_R , см
<p>Шар</p>	$D/6$	<p>Брус с трапецидальным сечением</p>	0,43a
<p>Цилиндр</p>	$\frac{Rh}{2(R+h)}$ или $\frac{Dh}{2(D+2h)}$	<p>Кольцо</p>	$\frac{ah}{2(a+h)}$
<p>Цилиндр с неопределенной высотой</p>	$D/4$	<p>Кольцо с неопределенной высотой</p>	a/2
<p>Куб</p>	a/6	<p>Плита</p>	С неопределенными длиной (a) и шириной (b) T/2, с постоянными длиной (a) и шириной (b) $\frac{abT}{2(ab+aT+bT)}$

Геометрическая форма	Модуль охлаждения M_R , см	Геометрическая форма	Модуль охлаждения M_R , см
Брус квадратного сечения 	$\frac{ah}{2(a+h)}$	Брус прямоугольного сечения 	С неопределенной длиной $\frac{ab}{2(a+b)}$, с постоянной длиной (l) $\frac{abl}{2(ab+al+bl)}$

Для определения размеров прибыли необходимо найти модуль охлаждения прибыли (M_F), который зависит от модуля охлаждения питаемой части отливки, вида сплава и рассчитывается как произведение модуля отливки и коэффициента критерия модуля. Модуль прибыли отливки, зависящий от коэффициента критерия модуля K_M , определяем по выражению

$$M_F \geq K_M M_C. \quad (8)$$

Значение коэффициента K_M зависит от марки заливаемого сплава и выбирается в следующих пределах: 0,6–1,0 – для эвтектического серого чугуна; 1,8–1,1 – для ферритного железа; 1,2–1,4 – для ковкого чугуна; 1,2–1,4 – для стали; 1,2–1,4 – для медных сплавов; 0,8–1,1 – для алюминиевых сплавов.

Знак неравенства в формуле (8) указывает на то, что размеры прибыли должны быть всегда немного больше теоретического объема узла питания. Это обусловлено тем, что поверхностный слой прибыли затвердевает и не является объемом питания.

Фирма DISA разработала две стандартные формы прибыли: цилиндрическую и сферическую для форм с вертикальной плоскостью разреза (табл. 8, 9). По значению M_F выбираем номер и определяем размеры прибыли.

Таблица 8. Стандартные цилиндрические прибыли

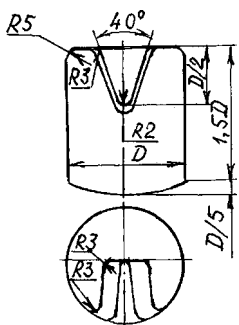
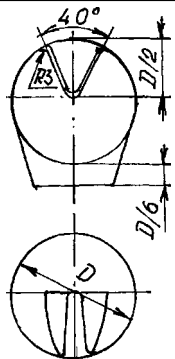
	Номер прибыли	Диаметр D_R , мм	Объем V_F , см ³	Модуль M_F , см
	1	20	9,4	0,37
2	25	18,4	0,47	
3	30	31,8	0,56	
4	35	50,5	0,66	
5	40	75,4	0,75	
6	45	107,3	0,84	
7	50	147,3	0,94	
8	55	196,0	1,03	
9	60	254,5	1,13	
10	65	323,5	1,22	
11	70	404,0	1,31	
12	75	497,0	1,41	
13	80	603,0	1,50	
14	85	723,0	1,59	
15	90	859,0	1,69	
16	95	1010,0	1,78	
17	100	1178,0	1,89	

Таблица 9. Стандартные сферические прибыли

	Номер прибыли	Диаметр D_R , мм	Объем V_F , см ³	Модуль M_F , см
	1	20	4,2	0,33
2	25	8,1	0,42	
3	30	14,0	0,50	
4	35	22,3	0,58	
5	40	33,3	0,67	
6	45	47,4	0,75	
7	50	65,0	0,83	
8	55	86,5	0,92	
9	60	112,3	1,00	
10	65	142,8	1,08	
11	70	178,4	1,17	

	Номер прибыли	Диаметр D_R , мм	Объем V_F , см ³	Модуль M_F , см
	12	75	219,4	1,25
	13	80	266,2	1,33
	14	85	319,3	1,42
	15	90	379,1	1,50
	16	95	445,8	1,58
	17	100	520,0	1,67

Рассмотрим в качестве примера расчет литниковой системы для получения отливки детали «Корпус» (рис. 6) на автоматической формовочной линии Дисаматик 2013МК5-А с размерами формы – ширина 600 мм, высота 480 мм.

Материал детали – СЧ20, масса детали – 9,7 кг.

Для определения массы отливки на чертеж детали наносим литейно-модельные указания (рис. 7): припуски на механическую обработку в соответствии с ГОСТ 26645-85; уклоны, стержневые знаки и зазоры между формой и стержнем по ГОСТ 3212-92; чертеж отливки делаем в соответствии с ГОСТ 3.1125-88. Определяем массу отливки, габаритные размеры и высоту моделей. Масса отливки составляет $G = 10$ кг, габаритный размер модели с учетом размеров стержневых знаков, припусков на механическую обработку и зазоров – 85×275 мм, высота модели плиты давления $h_1 = 74,7$ мм, плиты противодействия $h_2 = 59,7$ мм. Принимаем $h_1 = 75$ мм, $h_2 = 60$ мм.

После нанесения литейно-модельных указаний, строим 3-мерную модель отливки «Корпус» с использованием пакета Solid Works 2012 (рис. 8), 3D-модели отливок с литниково-питающей системой (рис. 9), монтаж моделей плиты противодействия на подмодельной плите (рис. 10), монтаж моделей

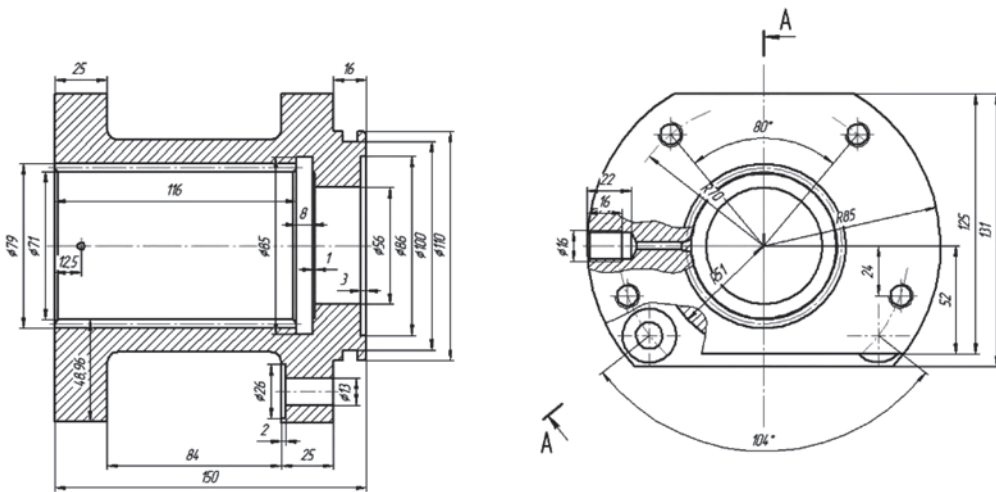


Рис. 6. Схема детали «Корпус»

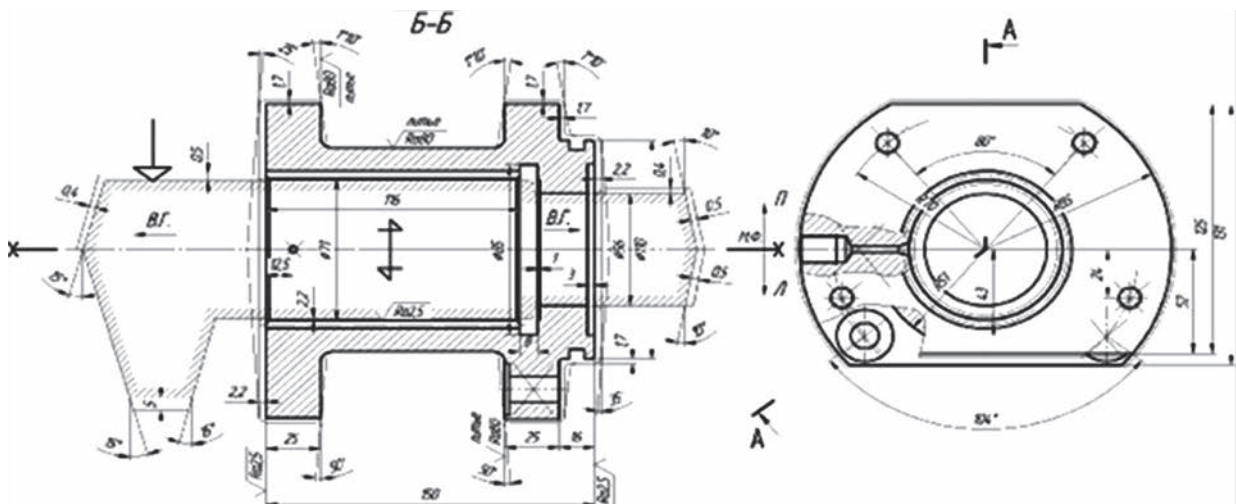


Рис. 7. Чертеж детали «Корпус» с литейно-модельными указаниями

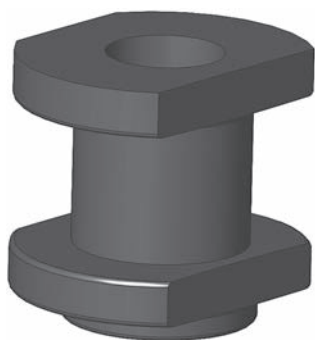


Рис. 8. 3D-модель отливки «Корпус»

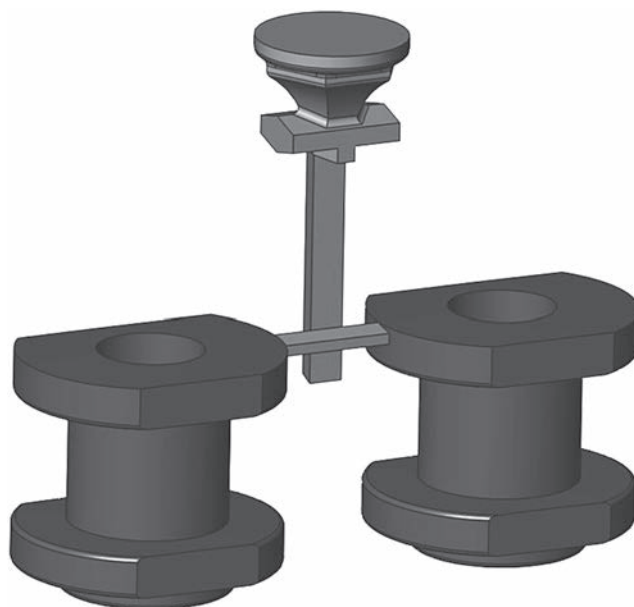
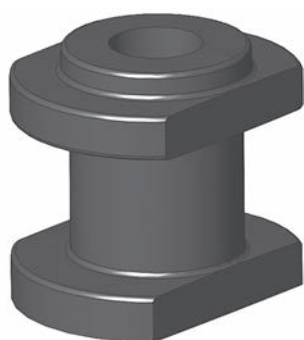


Рис. 9. Отливки «Корпус» с литниковой системой

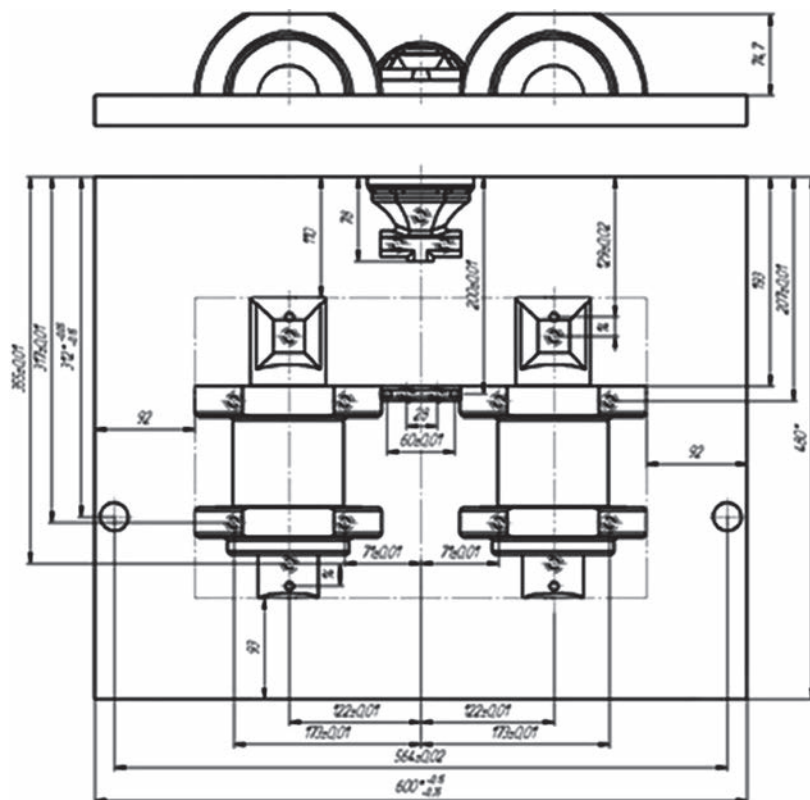


Рис. 10. Монтаж моделей плиты противодействия

плиты давления на подмодельной плите (рис. 11) и формы в сборе (рис. 12), которые необходимы для выполнения моделирования литейных процессов при заливке формы расплавленным металлом.

Правильная конструкция литниковой системы должна обеспечивать непрерывную подачу расплава в форму по кратчайшему пути; спокойное и плавное ее заполнение; улавливание шлака и других неметаллических включений; создание направленного затвердевания отливки; минимальный расход металла на литниковую систему; не вызывать местных разрушений формы вследствие большой скорости и неправильного направления потока металла.

Для изготовления данного типа отливок применяем принцип вертикального литника, так как управляемая давлением литниковая система дает большие технические и экономические преимущества:

- производство доброкачественных отливок;
- высокая степень использования плит;

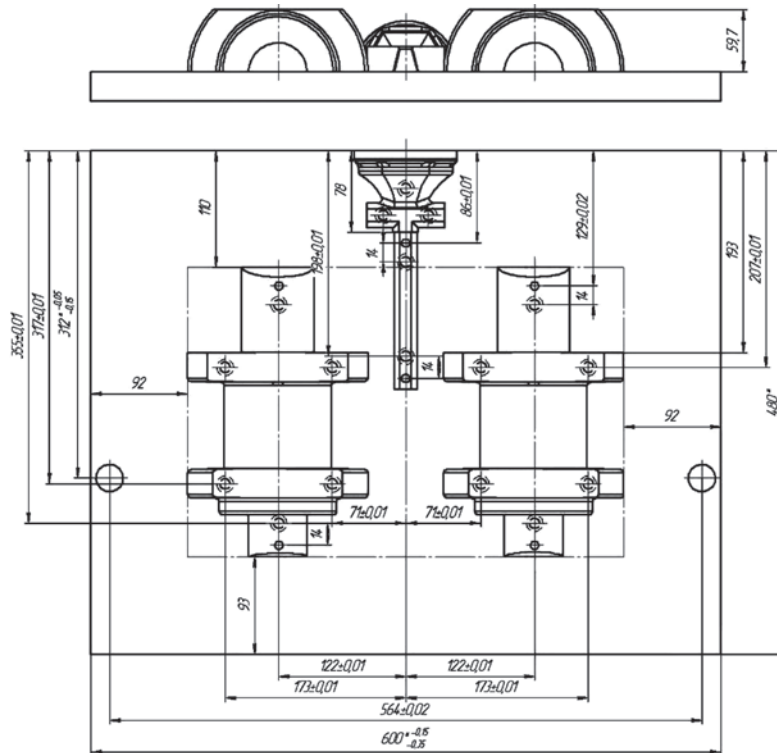


Рис. 11. Монтаж моделей плиты давления

- максимальный выпуск отливок;
- наибольшая производительность;
- однородная микроструктура в отливках;
- ограниченные размерные допуски;
- литниковая система, которую можно использовать для всех типов металла.

После определения конструкции литниковой системы располагаем модели на подмодельной плите с учетом минимальных толщин формовочной смеси (см. табл. 5) и минимальной длины питателей.

Для отливки с толщиной стенки 25 мм и общей высотой модели 75 мм верхняя кромка должна быть не менее $A = 70$ мм, боковая $B = 70$ мм, нижняя $C = 60$ мм. Выполняя эти требования и условие минимальной длины питателей, располагаем модели от бокового края подмодельной плиты на расстоянии 92 мм, верхней плоскости – 70 мм и нижней – 93 мм.

Подставляя в формулу (1) массу отливки $G = 10$ кг; коэффициент трения $m = 0,5$; время заливки $t = 10$ с; среднюю величину ферростатического давления $H_{расч} = 195$ мм, находим площадь питателя:

$$F_{п} = \frac{1036 \cdot 10}{10 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{195}} = 148,38 \text{ мм}^2.$$

Принимаем $F_{п} = 149 \text{ мм}^2$.

Площадь сечения подводных литниковых каналов определяется суммой площадей сечений питателей, работающих от литникового канала: с увеличением площади на 20%, чтобы создать в литниковой системе избыточное давление:

$$\sum F = F_{п1} + F_{п2} = 149 + 149 = 298 \text{ мм}^2,$$

$$F_{л.х.} = 1,2 \sum F = 1,2 \cdot 298 = 357,6 \text{ мм}^2.$$

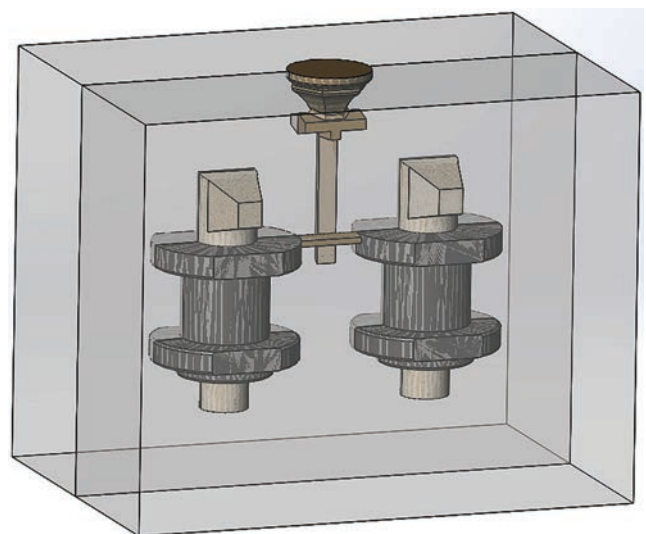


Рис. 12. Форма в сборе

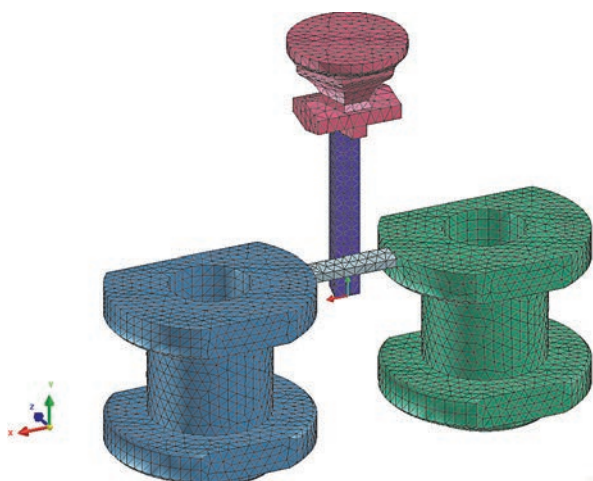


Рис. 13. Процесс генерации конечно-элементной сетки отливки «Корпус» с ЛПС (в программе Visual-Mesh)

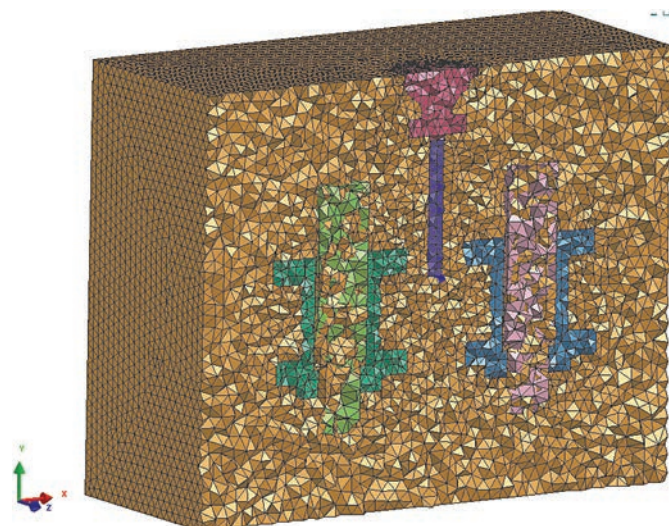


Рис. 14. Процесс генерации конечно-элементной сетки формы (в программе Visual-Mesh)

Так как ближайшее значение площади поперечного сечения литникового хода $F_{л.х.} = 363 \text{ мм}^2$, то принимаем литниковый ход № 7 ($a = 11 \text{ мм}$) из таблицы рис. 4.

Стандартные размеры чаш классифицируются в соответствии с расходом жидкого расплава (кг/с), который они могут обеспечить. Для определения нужного размера чаши, полную массу расплава (G_{ϕ}), заливаемого в форму, необходимо разделить на полное время заливки (t). Масса литниковой системы составляет 6,6 кг.

Общую массу залитого чугуна на одну форму определяем по формуле (5):

$$G_{\phi} = G + G_{лс} = 20 + 6,6 = 26,6 \text{ кг},$$

так как полное время заливки было равно $t = 10 \text{ с}$.

Необходимый расход наливной чаши составляет:

$$\frac{G_{\phi}}{t} = \frac{26,6}{10} = 2,66 \text{ кг/с}.$$

Выбираем наливную чашу № 3 по данным табл. 6.

На основании чертежей монтажа моделей на плитах давления и противодействия делаем эскиз формы в сборе, необходимый для выполнения процесса моделирования.

Разбиение на сетку производим в программе ProCast, при этом сохраняем отливку в Solid Works с расширением Parasolid (.x_t). Разбиваем на конечно-элементные сетки в системе Visual-Mesh. Задаем значение с размером тетраэдров 8 мм (рис. 13), затем строим форму и разбиваем ее на сетку с размером тетраэдров 8 мм (рис. 14). После получения удовлетворительного результата разбиения сетки модель отливки и формы готова для ввода исходных данных и запуска моделирования процесса литья. Файл с расширением «.mesh» используем для моделирования в ProCast и переименовываем на файл с расширением «.pro» для дальнейшей работы в программе Poligon. В программе LVMFlow есть свой генератор сетки. Параметры конечно-элементной сетки приведены ниже.

Количество элементов	Количество узлов	Размеры тетраэдров
479783	92612	8 мм

Моделирование литейных процессов проводили с использованием пакетов СКМ «Полигон», ESI ProCast, LVMFlow, которые позволяют моделировать следующие процессы: тепловые процессы при затвердевании, образование усадочных раковин, макро- и микропористости, гидродинамические процессы при заливке. Кроме того, формирование и расчет любых «критериев качества» для прогноза структуры, пригара, размыва формы, механических свойств, напряжений, трещин и др. Базовые модели (затвердевание, усадка и др.), опираясь на реальную физику процессов, максимально универсальны по сплавам и способам литья. Сплавы – алюминиевые, магниевые, медные, чугуны, стали, никелевые и др. Способы – в разовые литейные формы, в кокиль (в том числе водоохлаждаемый), ЛВМ, ВПФ, ЛПД, ЛНД,

жидкая штамповка, направленное затвердевание и др. В программных пакетах СКМ «Полигон», ESI ProCast используется метод конечных элементов, а в LVMFlow – конечных объемов.

В трех программных пакетах задавались идентичные начальные и граничные условия. Начальные и граничные условия, использованные при моделировании литейных процессов технологии изготовления отливки «Корпус», приведены в табл. 10–12.

Т а б л и ц а 10. Теплофизические свойства литейной формы

Материал литейной формы	Теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Песчано-глинистая смесь с влажностью 3,5%	1400,0–1400,360	0,6–1,5

Т а б л и ц а 11. Теплофизические свойства СЧ20

Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплота затвердевания	$T_{лик}$, °С	$T_{сол}$, °С
7100	480	54	238000	1180	1080

Т а б л и ц а 12. Начальные условия

Температура заливки, °С	Температура литейной формы, °С	Линейная скорость заливки, м/с	Коэффициент температуропроводности через границу контакта отливка/форма, Вт/(м ² ·К)
1320	20	0,0594	500

При расчете процессов кристаллизации использованы данные о распределении температуры в литейной форме и отливках, полученные при моделировании процесса заполнения. Результаты моделирования приведены на рис. 15.

В результате моделирования установлено, что время затвердевания до температуры $T_{сол}$ составляет 700 с. Анализ усадочных дефектов в трех программных пакетах показал (рис. 15), что усадочные раковины образуются в теле отливки, глубина усадки до 20 мм, а вероятность образования более 90%. Таким образом, разработанная на первом этапе конструкция литниковой системы не позволяет изготавливать годные отливки «Корпус».

Для устранения выявленных недостатков необходимо предусмотреть в конструкции ЛПС установку питающих бобышек. С учетом объема образующейся усадочной раковины следует выполнить расчет геометрических размеров питающей бобышки, обеспечивающей изготовление бездефектной отливки «Корпус», и повторный расчет ЛПС.

Так как выбранному материалу СЧ20 (ГОСТ 1412-85) отливки «Корпус» характерна объемная усадка в размере 1,2%, расчет начинаем с узла питания и прибыли отливки.

Расчет модуля отливки M_c выполняем по формуле (7):

$$M_c = \frac{V_c}{A_c} = 0,95 \text{ см.}$$

Объем и площадь поверхности отливки определяем с использованием программы Solid Works 2012.

Модуль питателя отливки, который зависит от коэффициента критерия модуля K_M , рассчитываем по выражению (8):

$$M_F \geq 1,0 \cdot 0,95.$$

Из табл. 8 стандартных форм и размеров прибылей в зависимости от рассчитанного модуля питателя ($M_F = 0,95$ см) определяем размеры цилиндрической прибыли, которые соответствуют № 8.

Тогда диаметр прибыли (D_R) будет равен 55 мм.

Площадь сечения шейки прибыли вычисляется следующим образом:

диаметр шейки прибыли:

$$D_N \geq \frac{D_R}{3} = \frac{55}{3} = 18,3 \text{ мм,}$$

площадь круглого сечения шейки:

$$A_N = \frac{\pi D_N^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 18,3^2}{4} = 263,85 \text{ мм}^2.$$

Выбираем форму шейки трапецеидальную, стороны которой равны: $a = 9,4$ мм; $b = 18,8$ мм; $c = 18,8$ мм.

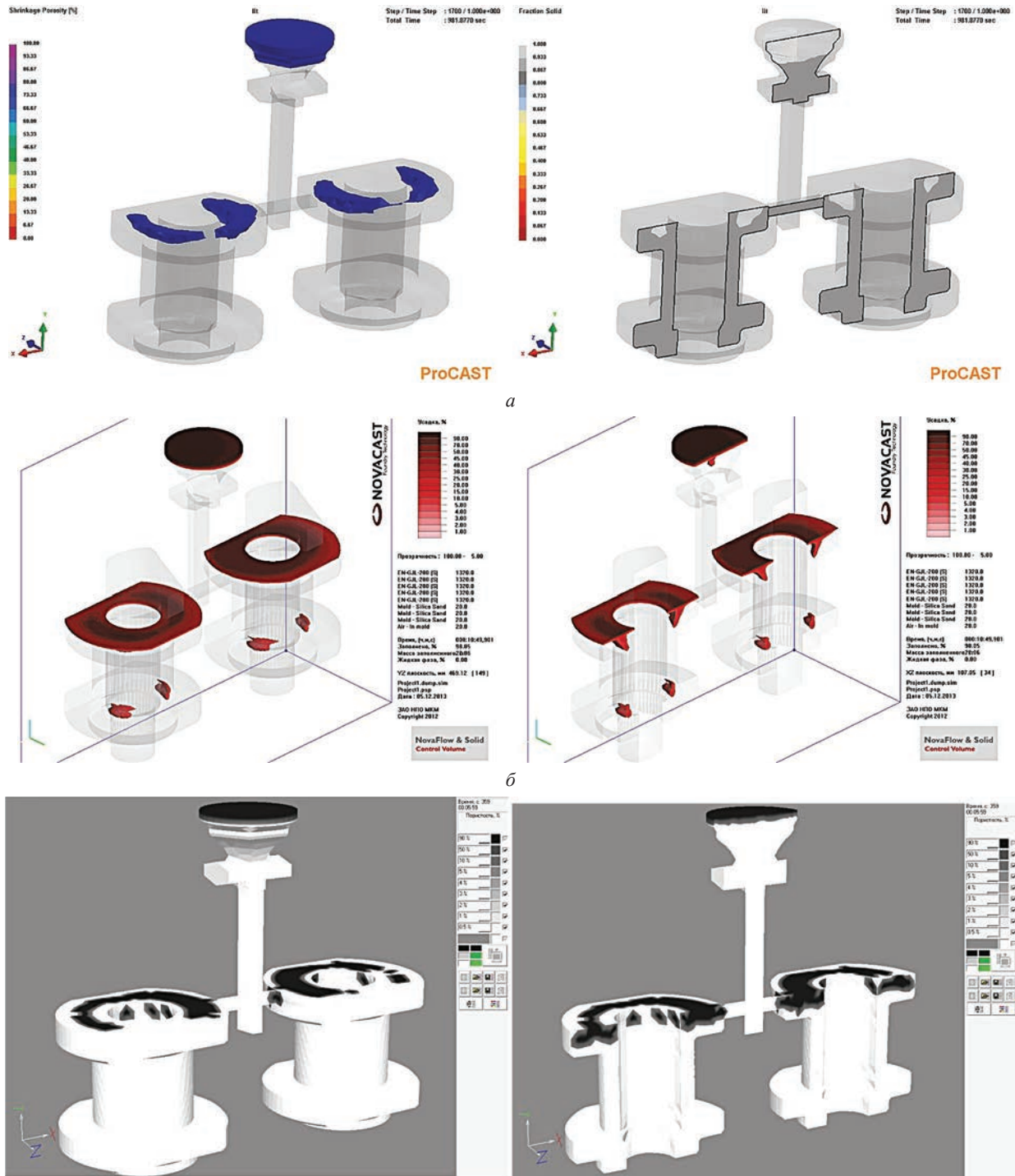


Рис. 15. Результаты моделирования в 3-х программных пакетах: а – ProCast; б – LVMFlow; в – Poligon

В связи с горизонтальным расположением отливки в литейной форме и боковым расположением прибыли (рис. 16) для обеспечения лучшего питания отливки необходимо применить напорный тип литниковой системы.

Так как впускные питатели прибыли (F_1 и F_2) находятся под давлением, для расчета их площади используем формулу:

$$F_{II} = \frac{1036(G + G_{np})}{Tm\sqrt{H_m}}, \quad (10)$$

где $G = 10$ кг – масса отливки; $G_{np} = 1,4$ кг – масса прибыли; $M = 0,5$ – фактор потерь; $T = 14 - 4 = 10$ с – время заливки; $H_m = 195$ мм – средняя величина ферростатического давления:

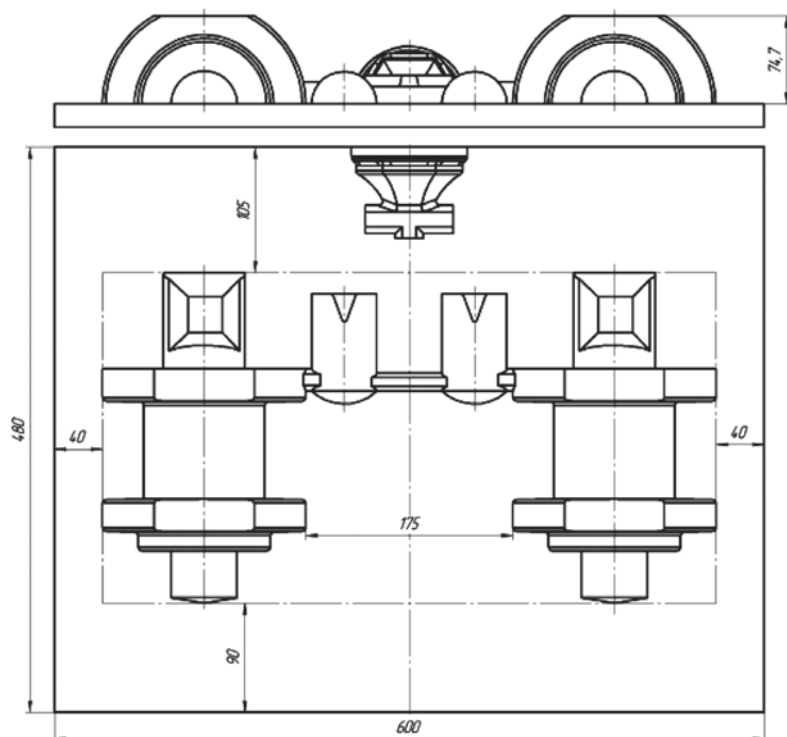


Рис. 16. Монтаж моделей с питающими бобышками на подмодельной плите

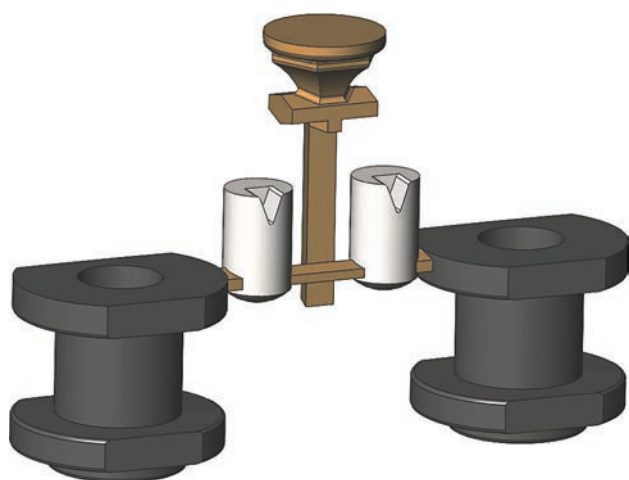


Рис. 17. Отливки «Корпус» с литниково-питающей системой

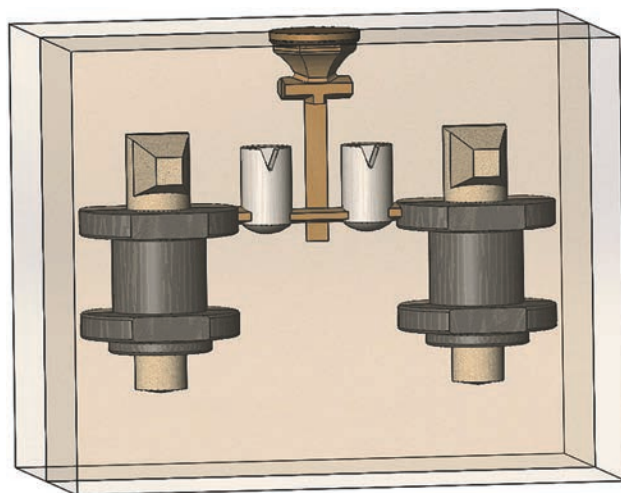


Рис. 18. Форма в сборе

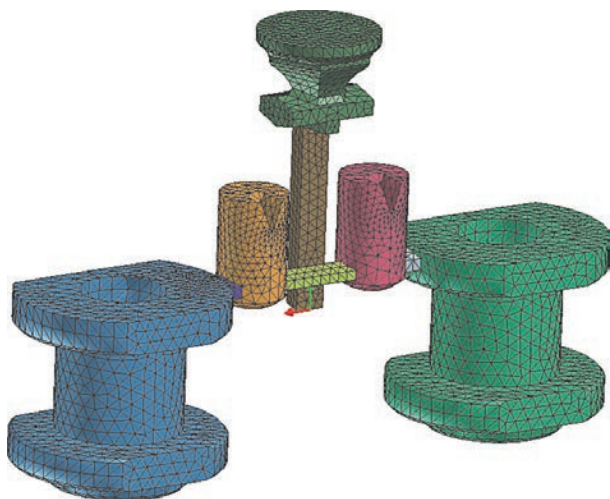


Рис. 19. Процесс генерации конечно-элементной сетки отливок с ЛПС (в программе Visual-Mesh)

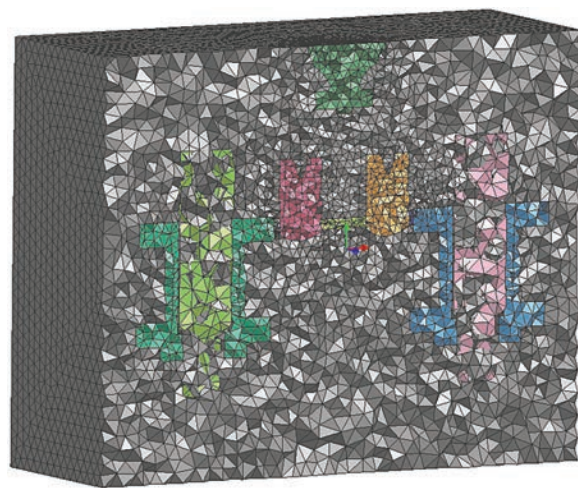


Рис. 20. Процесс генерации конечно-элементной сетки формы (в программе Visual-Mesh)

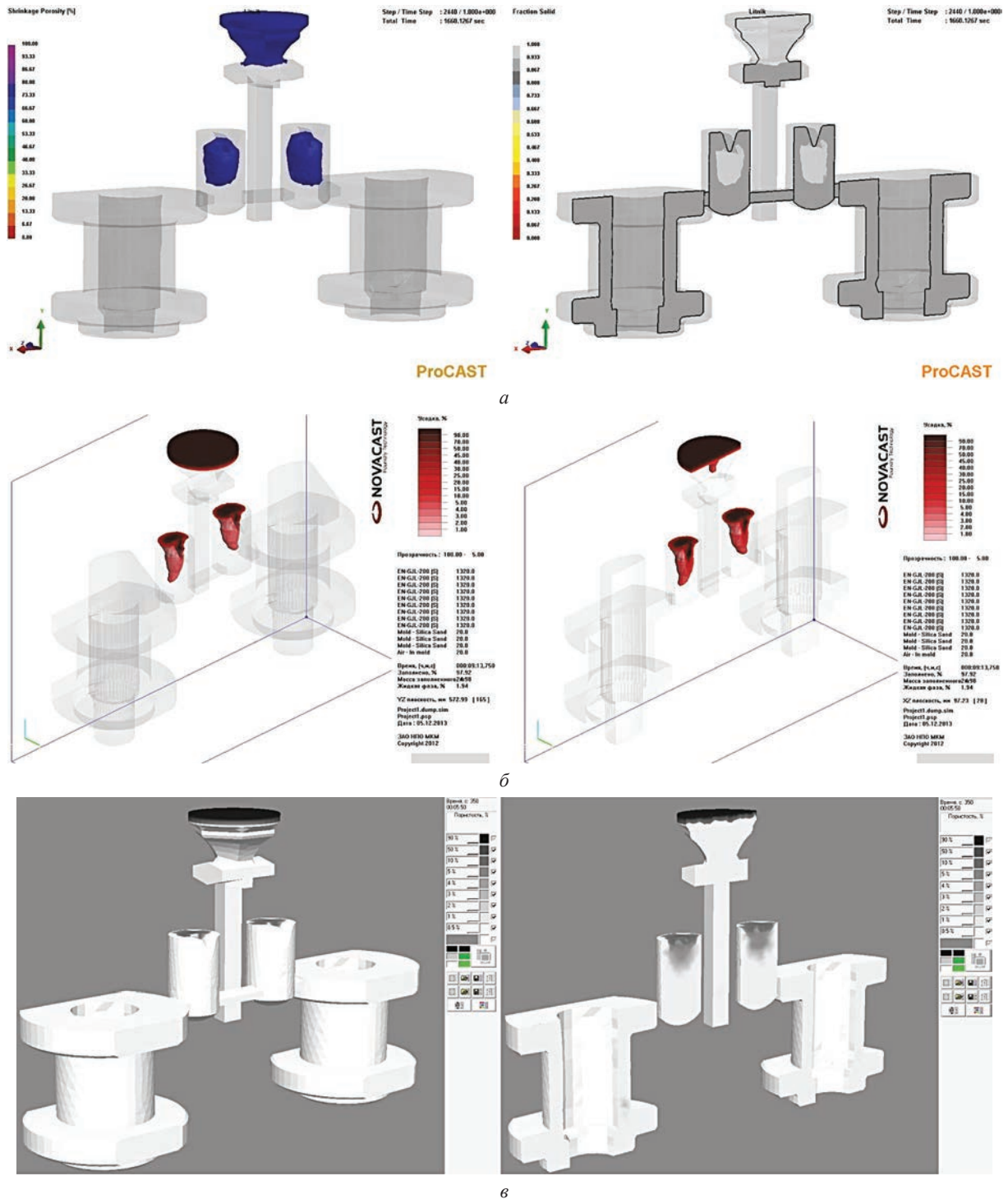


Рис. 21. Результаты моделирования в 3-х программных пакетах: а – ProCast; б – LVMFlow; в – Poligon

$$F_{\Pi} = \frac{1036(10+1,4)}{10 \cdot 0,5\sqrt{195}} = 169,15 \text{ мм}^2;$$

Принимаем $F_{\Pi} = 170 \text{ мм}^2$.

Площадь сечения подводных литниковых каналов определяется суммой площадей сечений питателей, работающих от литникового канала: с увеличением площади на 20%, чтобы создать в литниковой системе избыточное давление:

$$\sum F = F_{\Pi_1} + F_{\Pi_2} = 170 + 170 = 340 \text{ мм}^2,$$

$$F_{\text{л.х.}} = 1,2 \sum F = 1,2 \cdot 340 = 408 \text{ мм}^2.$$

Так как ближайшее значение площади поперечного сечения литникового хода $F_{л.х.} = 432 \text{ мм}^2$, то принимаем литниковый ход № 8 ($A = 12 \text{ мм}$) из таблицы рис. 4.

Для определения нужного размера чаши полную массу расплава в форме необходимо разделить на полное время заливки.

Принимаем, что подача (в рабочую полость) сплава из формы составляет приблизительно 75%, а общая масса отливок и прибылей в нашем случае равна $G = 20 \text{ кг}$; $G_{пр} = 2,8 \text{ кг}$.

Общая масса залитого чугуна на одну форму:

$$G_2 = G \cdot 1,33 = (20 + 2,8) \cdot 1,33 = 30,2 \text{ кг.}$$

Необходимый расход наливной чаши :

$$\frac{G_2}{T_2} = \frac{30,2}{10} = 3,02 \text{ кг/с.}$$

Выбираем наливную чашу № 4 по табл. 6.

На основании полученных результатов расчетов были построены 3D-модели отливок с литниково-питающей системой (рис. 17) и формы в сборе (рис. 18), которые необходимы для выполнения моделирования литейных процессов.

Начальные и граничные условия, использованные при моделировании литейных процессов технологии изготовления отливки «Корпус», приведены в табл. 10–12.

Результаты разбиения сетки, модель отливки и формы приведены на рис. 19, 20, а параметры конечно-элементной сетки – ниже.

Количество элементов	Количества узлов	Размеры тетраэдров
320121	63190	8–10 мм

При расчете процессов кристаллизации использованы данные о распределении температуры в литейной форме и отливках, полученные при моделировании процесса заполнения. Результаты моделирования приведены на рис. 21.

В результате моделирования установлено, что время затвердевания до температуры $T_{сол}$ составляет 730 с. В последнюю очередь расплав кристаллизуется в прибылях, что говорит о высокой эффективности рассчитанных прибылей, которые полностью выполняют функцию питания отливки расплавом. Анализ усадочных дефектов показал, что усадочные раковины образуются в прибылях, глубина усадки составляет до 40 мм, а вероятность образования более 90%.

Применение расчетов вертикальных литниковых систем с использованием стандартизованных элементов позволяет значительно сокращать время, затрачиваемое на разработку технологического процесса изготовления отливки.

Литература

1. Теория и технология литейного производства / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, Н. В. Андрианов. В 2-х ч. Ч. 2. Технология изготовления отливок в разовых формах. Минск: Новое знание; М: ИНФА-М, 2011, 406 с.
2. Справочник DISA. Приложение к инструкции по эксплуатации безопасной автоматической линии DISA.

References

1. Kukuj D. M., Skvorcov V. A., Andrianov N. V. *Teorija i tehnologija litejnogo proizvodstva* [Theory and Technology foundry]. V 2-h ch. Ch. 2. *Tehnologija izgotovlenija otlivok v razovyh formah* [The technology of manufacture of castings in one-off forms]. Minsk: Novoe znanie Publ., Moscow, INFA-M Publ., 2011, 406 p.
2. *Spravochnik DISA*. Prilozhenie k instrukcii po jekspluatácii bezopachnoj avtomaticheskoi linii DISA [DISA directory. Appendix to the operating flaskless automatic DISA line instructions].