

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирский федеральный университет»

Авторы:
Мамина Людмила Ивановна
Синичкин Александр Михайлович
Гильманшина Татьяна Ренатовна

«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА»

(название дисциплины)

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ЦИКЛУ
ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

Красноярск
2009

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	3
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1	6
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗАПОЛНЕНИЯ ФОРМ РАСПЛАВОМ И ЭЛЕМЕНТОВ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ	6
Цель работы	6
Задачи лабораторной работы.....	6
Требования к отчету по практической работе	16
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №2	17
ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ «ОТЛИВКА–ФОРМА»	17
Цель работы	17
Задачи лабораторной работы.....	17
Требования к отчету по практической работе	23
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №3	24
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗОВОЙ ФОРМЫ	24
Цель работы	24
Задачи лабораторной работы.....	24
Требования к отчету по практической работе	60
ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4	62
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗАПОЛНЕНИЯ УСАДКИ И ПРИБЫЛЕЙ ДЛЯ КОНКРЕТНОЙ ОТЛИВКИ	62
Цель работы	62
Задачи лабораторной работы.....	62
Требования к отчету по практической работе	71
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	72
.....	72

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Настоящий практикум предназначен для проведения практических работ по курсу «Теоретические основы литейного производства». Этот курс предусматривает проведения практических работ при подготовке магистров по направлению 150100 «Металлургия». Согласно учебной программе дисциплины практические работы проводятся во втором семестре.

Целью практических работ, предусмотренных по дисциплине «Теоретические основы литейного производства», является освоение студентами методов расчета параметров заполнения форм расплавом, тепловых процессов в литейной форме, параметров усадки при кристаллизации и охлаждении отливок, т.к. точность протекания этих процессов определяет качество готовых отливок.

Задачи практических работ:

- приобретение навыков выбора метода расчета и освоение универсального метода расчета литниковой системы для любых отливок;

- изучение методики составления теплового баланса и расчета параметров тепло- и массопереноса в системе «расплав–форма» отдельно для расплава и формы, а также освоение универсального инженерного метода расчета тепловых параметров и построения температурного поля «металл–форма»;

- приобретение навыков компьютерного моделирования нестационарных процессов протекающих в литейной форме: кристаллизация, теплоперенос, затвердевание и усадка для конкретных условий, имитирующих производственные условия, позволяющие достигать заданные структуры в литых изделиях;

- освоение принципов выбора питающих узлов, компенсирующих усадку сплавов при кристаллизации и затвердевании отливок в зависимости от конструктивных особенностей отливок и технологических параметров их литья с расчетами конкретных параметров теплового узла, скорости кристаллизации и прибыли.

Трудоемкость практической работы 0,28 зачетных единиц (10 ч). При изучении данной дисциплины студент выполняет четыре практической работы.

Для получения высококачественных отливок при разработке технологического процесса выполняются расчеты, определяющие параметры истечения расплава из ковша и заполнения литейной формы, геометрические размеры и конструкционные особенности различных ковшей и элементов литейных форм, условия кристаллизации и охлаждения отливок, теплообмен между отливкой и формой.

В настоящее время одним из наиболее эффективных путей снижения себестоимости продукции и уменьшения сроков разработки изделия являются

автоматизация деятельности предприятия на основе современных CAD/CAM/CAE-систем, реализующих концепцию комплексной автоматизации производства. Современное проектирование литейной технологии с помощью CAD-систем включает в себя построение трехмерных (3D) геометрических моделей детали, отливки с литниковой системой, а также литейной оснастки и изготовление по ним чертежной документации. Но для отработки литейной технологии на стадии проектирования без дорогостоящих натуральных экспериментов, а также для оптимизации уже имеющейся технологии, например конфигурации литниковой системы, прибылей, температуры и режима заливки и т.д., необходимо использовать CAE-системы компьютерного моделирования литейных процессов.

Практикум «Теоретические основы литейных цехов» содержит четыре практические работы по основным разделам дисциплины «Теоретические основы литейного производства». Перед выполнением практических работ студент самостоятельно изучает ее содержание. По окончании работы оформляет отчет и защищает его преподавателю.

График выполнения практических работ приведен ниже:

Семестр	Число аудиторных занятий	Недели учебного процесса семестра																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
2	8	ВПР1				ВП Р2 ЗПР 1				ВПР 3 ЗПР 2				ВПР 4 ЗПР3				ЗП Р4

Примечание. ВПР – выполнение практической работы; ЗПР – защита практической работы.

В соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению 150100 – Metallurgy задачами дисциплины являются формирование знаний, умений и навыков, отражающих различные компетенции:

ИК-1 – Уметь проводить расчеты основных параметров технологического процесса получения литых заготовок.

ОПК-2 – Владеть навыками выбора материалов, оборудования и технологических операций для изготовления изделий различного назначения;

СПК-1 – Уметь анализировать технологический процесс получения литых изделий, определяющее качество металлопродукции, энерго- и ресурсосбережение.

СПК-2 – Уметь обосновать выбранный технологический процесс формирования качественной структуры отливки.

СПК-3 – Уметь анализировать и прогнозировать получение высококачественных отливок, основываясь на полученных знаниях по теории литейных процессов.

Практическая работа №1

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗАПОЛНЕНИЯ ФОРМ РАСПЛАВОМ И ЭЛЕМЕНТОВ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Цель работы

Изучение методики и приобретение навыков расчета литниковых систем.

Задачи лабораторной работы

- Изучить основные понятия раздела «Литниковые системы и заполнение форм расплавом».
- Приобретение навыков выбора метода расчета и освоение универсального метода расчета литниковой системы для любых отливок.

Краткие теоретические сведения

Методики расчета литниковых систем основаны на определении оптимальной продолжительности заливки форм расплавом и площади самого узкого сечения литниковой системы, обеспечивающей это требуемое время заполнения форм металлом.

Расчет литниковой системы начинается с определения оптимальной продолжительности заполнения формы. При этом необходимо учитывать уровень металла в месте подвода сплава. При подводе снизу при прочих равных условиях продолжительность заливки должна быть меньше, чем при подводе сверху. При подводе в тонкие части большая продолжительность заливки будет способствовать меньшим внутренним напряжениям в отливке.

Для оптимальной продолжительности заливки форм должно выполняться неравенство:

$$\tau_{\min} < \tau_{\text{опт}} < \tau_{\max},$$

где $\tau_{\text{опт}}$ – оптимальная продолжительность заливки форм, с; τ_{\min} – минимально допустимая продолжительность заливки форм, с; τ_{\max} – максимально допустимая продолжительность заливки форм, с.

Аналитическое определение τ_{\min} и τ_{\max} в настоящее время затруднительно. Поэтому в практике расчетов широко используются эмпирические зависимости. Наиболее широко известна формула Г.М. Дубицкого:

$$\tau_{\text{опт}} = S_1 \sqrt[3]{\delta \cdot G_{\text{ж}} \cdot 1000}, \quad (1.1)$$

где S_1 – коэффициент продолжительности заливки; δ – преобладающая толщина стенки отливки, м; $G_{ж}$ – масса жидкого металла, приходящегося на одну отливку в форме, кг.

Коэффициент продолжительности заливки зависит от температуры сплава, рода сплава, места подвода, материала формы и т.д. Значения S_1 приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Значения коэффициента S_1

Технологические факторы	Сталь	Чугун		Алюминиевые сплавы	Медные сплавы
		серый	ковкий		
Температура сплава:					
нормальная	1,3-1,6	–	–	–	–
повышенная	1,4-1,8	–	–	–	–
пониженная	–	1,7-1,9	–	–	–
Форма:					
песчаная	–	2,0	2,05	1,7-3,0	1,9-2,1
металлическая	меньше на 0,1–0,2	меньше на 0,1–0,2	меньше на 0,1–0,2	2,4-4,0	1,3-1,5

Под преобладающей толщиной стенки понимается толщина стенки, наиболее удаленной от питателей и находящейся в наиболее неблагоприятных с точки зрения заливки условиях. При этом δ не всегда совпадает с геометрической толщиной стенки. Масса заливаемого в форму сплава:

$$G_{ж} = N \cdot G_{отл} + G_{приб} + G_{л.с.}, \quad (1.2)$$

где N – количество отливок в форме, шт; $G_{отл}$ – черновая масса отливки, кг; $G_{приб}$, $G_{л.с.}$ – масса прибылей и литниковой системы (принимается 25–30 % и 3–10 %, соответственно от $G_{отл}$), кг.

Для получения качественной отливки допускается отклонение времени заполнения ($\tau_{зал}$) от рассчитанного $\tau_{опт}$ в большую или меньшую сторону не более чем на 20 %.

Чтобы в отливках отсутствовали спай и недоливы, средняя скорость подъема уровня металла в форме должна быть больше минимальной величины (табл. 1.2).

Определяют среднюю скорость подъема уровня металла в форме по формуле:

$$v_{ср} = h_{отл} / \tau_{опт}, \quad (1.3)$$

где $h_{отл}$ – высота отливки, м.

После расчета $\tau_{\text{опт}}$, определяют площадь наименьшего (лимитирующего) сечения с последующим определением остальных элементов.

Таблица 1.2

Значения средней скорости заливки

Толщина стенки, мм	Средняя скорость заливки, мм/с	
	чугун	сталь
1,5–4,0	100–30	–
4,0–10,0	30–20	20
10–40	20–10	20–10
более 40	10–8	10–8

Для расчета размеров сечения узкого места предложено множество формул, таблиц, номограмм, которые корректируют применительно к конкретным отливкам. В расчетах учитывают тип ковша для разлива сплавов (поворотный, стопорный), способ подвода расплава (на одном или нескольких уровнях) и другие факторы.

Расчет площади узкого места производится по формуле:

$$F_{\text{уз}} = \frac{G_{\text{ж}}}{\mu \cdot \tau_{\text{опт}} \cdot \rho \cdot \sqrt{2gH_p}}, \quad (1.4)$$

где μ – коэффициент расхода литниковой системы; ρ – плотность сплава, кг/м³; $g = 9,8$ м/с²; H_p – металлостатический напор, м

Металлостатический напор определяется по формуле:

$$H_p = h_{\text{ст}} - \frac{P^2}{2\psi h_{\text{отл}}}, \quad (1.5)$$

(2-3.)

где H_0 – высота уровня расплава над уровнем подвода металла в форму, м; $h_{\text{отл}}$ – максимальный размер отливки по высоте, м; P – расстояние от уровня подвода металла до верхней точки полости формы по отливку, м; $h_{\text{ст}}$ – высота стояка, м.

Значения H_p , P , $h_{\text{ст}}$ выбирают в зависимости от типа литниковой системы (рис. 1.1).

Высота стояка рассчитывается по формуле:

- при боковой системе: $h_{\text{ст}} = P + \frac{1}{2} \cdot h_{\text{отл}}$;
- при верхней системе: $h_{\text{ст}} = \frac{1}{2} \cdot h_{\text{отл}}$;
- при нижней системе: $h_{\text{ст}} = 1\frac{1}{2} \cdot h_{\text{отл}}$,

где $\frac{1}{2} \cdot h_{\text{отл}}$ – рекомендуемая толщина слоя смеси над полостью формы под отливку, м.

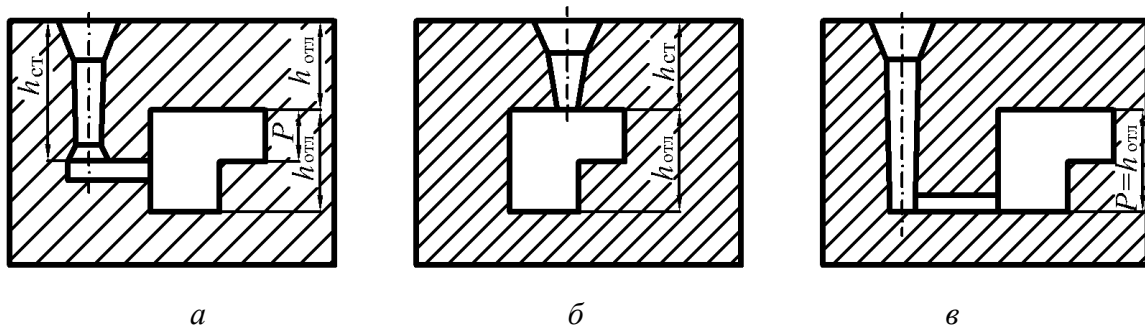


Рис. 1.1. Типы литниковых систем: а – боковая; б – верхняя; в – нижняя

Коэффициент расхода литниковой системы (μ) определяется суммой потерь, складывающихся из потерь напора на повороты каналов, резких изменений сечений каналов, потерь на трения и т.д. Значение коэффициента μ выбирают из табл. 1.3–1.4.

Таблица 1.3

Значения коэффициента μ для чугунных и стальных отливок

Сплав, заливка	Сопротивление формы		
	большое	среднее	малое
Чугун:			
в сырую	0,35	0,42	0,30
в сухую	0,41	0,48	0,70
Сталь			
в сырую	0,25	0,20	0,40
в сухую	0,30	0,38	0,50

Таблица 1.4

Значения коэффициента μ для цветных сплавов

Сплав, расчетное сечение узкого места	Заливка	Значение
Алюминиевые:		
стояка вверх	в подогретые кокили	$0,75 \pm 0,1$
стояка вниз	в подогретые кокили	$0,64 \pm 0,1$
питателей	в песчаные формы и подогретые кокили	$0,55 \pm 0,1$
Магниевые:		
стояка вверх	—	$0,80 \pm 0,1$
стояка вниз	—	$0,70 \pm 0,1$
шлакоуловителя	—	$0,60 \pm 0,1$
питателей	—	$0,55 \pm 0,1$
Медные:		
стояка вверх	—	$0,40 \pm 0,1$
	—	$0,35 \pm 0,1$

стояка внизу
питателей

–

0,30–0,45

Посла расчета площади узкого места литниковой системы площади сечений остальных элементов выбирают из соотношений:

- для чугунных отливок: $F_{\text{пит}} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 1 : 1,2 : 1,4$;
- для стальных отливок: $F_{\text{пит}} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 1 : 1,5 : 1,3$;
- для алюминиевых и магниевых отливок:

$$F_{\text{ст.в.}} : F_{\text{ст.н.}} : F_{\text{шл}} : F_{\text{пит}} = (1,7-1,5) : 1 : 2 : (2-3);$$

- для медных отливок: $F_{\text{ст.в.}} : F_{\text{ст.н.}} : F_{\text{шл}} : F_{\text{пит}} = 2 : 1,6 : 1,3 : 1$,

где $F_{\text{пит}}$ суммарная площадь сечения питателей, м^2 ; $F_{\text{шл}}$ площадь сечения шлакоуловителя, м^2 ; $F_{\text{ст}}$ – площадь сечения стояка, м^2 ; $F_{\text{ст.н}}$ – площадь сечения внизу стояка, м^2 ; $F_{\text{ст.в}}$ – площадь сечения вверх стояка, м^2 .

Для обеспечения шлакоудаления и более спокойного заполнения формы применяют литейные чаши (рис. 1.2, а).

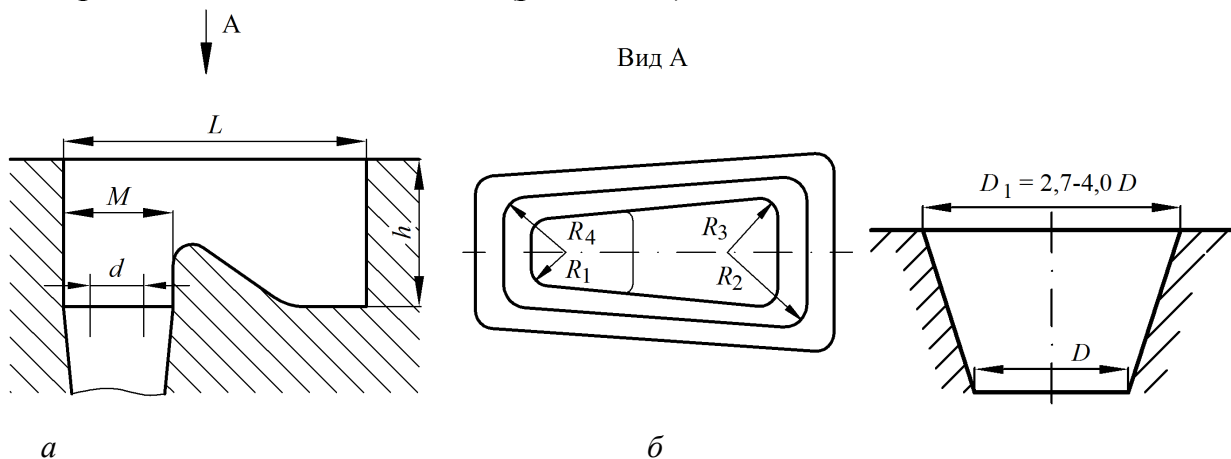


Рис. 1.2. Литейные чаши (а) и воронки (б)

Однако при использовании чаши значительно снижается выход годного. Поэтому для небольших отливок желательно использовать литниковые воронки (рис. 1.2, б) Их следует применять для массового расхода сплава 4,5 кг/с. При пересчете на равный объем данные размеры чаши (табл. 1.5) можно использовать для отливок из цветных сплавов.

Масса сплава в чаше ($G_{\text{ч}}$), кг:

$$G_{\text{ч}} = \frac{m \cdot G_{\text{отл}}}{\tau_{\text{опт}}}, \quad (1.6)$$

где m – коэффициент металлоемкости литейной чаши, выбирается в зависимости от массы отливки (табл. 1.6).

Таблица 1.5

Размеры литейных чаш (см. рис. 1.2)

Расход чугуна, кг/с	Емкость чаши, кг	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>Π</i>	<i>R</i> ₁	<i>R</i> ₂	<i>R</i> ₃	<i>R</i> ₄
1,3–2,0	2	105	35	60	20	25	35	30
2,0–2,5	3	110	40	65	20	25	35	30
2,6–3,0	4	120	40	70	20	25	35	30
3,0–4,0	5	130	45	80	25	30	40	35
4,0–5,0	6	140	50	90	25	30	40	35
5,0–7,0	9	160	60	100	30	35	45	40
7,0–11,0	13	180	70	110	35	40	50	45
11,0–13,0	19	200	80	130	40	45	60	55
13,0–17,0	28	220	90	150	45	50	70	65
17,0–21,0	37	240	95	170	45	50	75	70
21,0–27,0	52	260	100	200	60	65	85	80
27,0–35,0	70	300	100	200	60	65	95	90

Примечание: *d* на рис. 1.2 – диаметр стояка внизу

Таблица 1.6

Значения коэффициента *m*

<i>G</i> _{отл} , кг	до 100	100–500	500–1000	1000–5000
<i>m</i>	3	4	6	8

Из площади сечения стояка (*F*_{ст}) находят диаметр нижней его части, м:

$$d_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{ст}}}{\pi}}. \quad (1.7)$$

Тогда из табл. 1.7 можно определить конусность стояка в зависимости от его высоты.

Таблица 1.7

Конусность стояков

Высота стояка, мм	<i>D</i> – <i>d</i> , мм	Высота стояка, мм	<i>D</i> – <i>d</i> , мм
100	2	900	9
200	3	1000	10
300	4	1200	12
400	4	1400	14
500	5	1600	16
600	6	1800	18
700	7	2000	20
800	8		

Для отливок из магниевых и алюминиевых сплавов применяют цилиндрические или плоские изогнутые змеевидные стояки.

Внизу под стояком устраивают зумпф – углубление, уменьшающее опасность разрушения формы в этом месте.

В практике шлакоуловители и питатели, чаще всего, применяют трапециевидные. Сечение шлакоуловителя по его длине при замкнутой системе следует оставлять постоянным. После прохождения последнего питателя шлакоуловитель несколько продолжают, чтобы образовать тупик, в котором будут скапливаться неметаллические включения.

Рекомендуемые соотношения размеров сечения шлакоуловителя и питателей приведены на рис. 1.3.

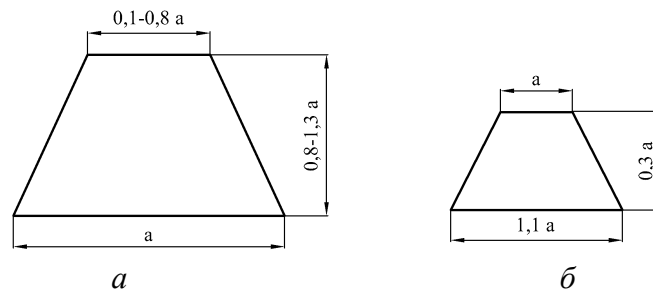


Рис. 1.3. Рекомендуемые соотношения размеров сечения шлакоуловителя (а) и питателя (б)

Количество питателей зависит от массы и средней толщины стенки отливки. Пример выбора питателей для чугунных отливок приведен в табл. 1.8. При пересчете на равный объем эти данные могут быть использованы в отливках из цветных сплавов.

Ход работы

Получите вариант задания у преподавателя (табл. 1.9).

Рассчитайте основные элементы литниковой системы, используя формы 1.1-1.7.

Результаты расчетов представьте в табличном виде (табл. 1.10).

Изобразите элементы литниковой системы с указанием размеров.

Таблица 1.8

Количество питателей для чугунных отливок

Масса отливки кг	Преобладающая толщина стенок, мм			
	3–5	5–8	8–12	12–20
3–5	2	2	1	1
5–15	–	3	2–3	2–3
25–50	–	3	2–3	2–3
50–100	–	5–7	5–6	3–4
100–200	–	7–9	7–8	4–6

200-400	-	7-9	8-9	6-7
400-700	-	9-10	8-9	6-7

Таблица 1.9

Варианты заданий для практической работы №1

Вариант	Сплав	Плотность сплава, кг/м ³	Температура заливки, °С	Масса отливки, кг	Преобладающая толщина стенки, м	Количество отливок в форме, шт	Высота отливки, м	Высота стояка, м	Расстояние от уровня подвода металла до верхней точки в полости формы, м	Коэффициент продолжительности заливки	Коэффициент расхода литниковой системы	Коэффициент емкости литнейной чаши
1	сталь	7800	1540	115,0	0,020	1	0,250	определяют по рис. 1.1: 1–6 варианты – боковая; 7–13 варианты – нижняя; 14–18 варианты – верхняя	выбирают из табл. 1.1	выбирают из табл. 1.3–1.4	выбирают из табл. 1.8	
2	сталь	7800	1520	56,0	0,100	2	0,120					
3	сталь	7800	1580	4,5	0,050	4	0,050					
4	серый чугун	7600	1250	400,0	0,150	1	0,100					
5	серый чугун	7600	1350	65,0	0,010	1	0,200					
6	серый чугун	7600	1180	630,0	0,300	1	0,650					
7	ковкий чугун	7800	1460	2,4	0,008	6	0,015					
8	ковкий чугун	7800	1390	87,0	0,020	2	0,180					
9	ковкий чугун	7800	1420	45,0	0,015	1	0,100					
10	алюминиевый	2700	680	75,0	0,080	1	0,150					
11	алюминиевый	2700	750	55,0	0,050	2	0,180					
12	алюминиевый	2700	710	38,0	0,030	2	0,090					
13	медный	8900	1100	25,0	0,020	4	0,070					
14	медный	8900	1200	50,0	0,040	1	0,190					

15	медный	8900	1050	20,0	0,020	2	0,080				
16	магниевый	1700	770	3,0	0,007	6	0,020				
17	магниевый	1700	750	12,0	0,010	2	0,090				
18	магниевый	1700	730	22,0	0,060	1	0,120				

Пример расчета на ЭВМ параметров заполнения формы расплавом

Параметр	Обозначения	Значения
Вводимые параметры		
1. Сплав	—	сталь
2. Плотность сплава, кг/м ³	ρ	7799,9
3. Температура заливки, °С	$T_{\text{зал}}$	1440
4. Масса отливки, кг	$G_{\text{отл}}$	114,1
5. Преобладающая толщина стенки, м	b	0,0220
6. Количество отливок в форме, шт	N	1
7. Высота отливки, м	$h_{\text{отл}}$	0,2860
8. Высота стояка плюс высота уровня металла в чаше, м	$h_{\text{ст}}$	0,24
9. Расстояние от уровня подвода металла до верхней точки в полости формы под отливку, м	H_p	0,1860
10. Коэффициент продолжительности заливки	S_1	1,4
11. Коэффициент расхода литниковой системы	P	0,47
12. Коэффициент металлоемкости литейной чаши	m	4,0
13. Соотношение площадей сечений питателя : шлакоуловителя : стояка	$F_{\text{пит}} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}}$	1,0 : 1,2 : 1,4
Результаты расчета		
1. Вес прибыли, кг	$G_{\text{приб}}$	28,53
2. Вес литниковой системы, кг	$G_{\text{л.с.}}$	11,41
3. Вес жидкого металла, кг	G	154,04
4. Оптимальное время заливки, сек	$\tau_{\text{опт}}$	21,03
5. Средняя скорость подъема сплава, м/с	$v_{\text{ср}}$	0,014
6. Площадь сечения питателей, м ²	$F_{\text{пит}}$	0,0011
7. Площадь сечения шлакоуловителя, м ²	$F_{\text{шл}}$	0,0013
8. Площадь сечения стояка, м ²	$F_{\text{ст}}$	0,0015
9. Диаметр стояка внизу, м	$d_{\text{ст}}$	0,0436
10. Емкость литейной чаши, кг	$G_{\text{ч}}$	21,71

Требования к отчету по практической работе

В отчете указывается цель работы, дается краткое изложение теории, приводится расчет литниковой системы, результаты расчета необходимо свести в таблицу (табл. 1.2). По полученным данным строится литниковая система в аксонометрии.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое литниковая система?
2. Перечислите основные элементы литниковой системы.
3. Что понимают под преобладающей стенкой отливки?
4. На чем основана методика расчета литниковой системы?
5. Расскажите последовательность расчета литниковой системы.

Практическая работа №2

ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И ПОСТРОЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ «ОТЛИВКА–ФОРМА»

Цель работы

Изучение методики и приобретение навыков расчета и построения температурного поля «металл–форма».

Задачи лабораторной работы

– Изучить основные понятия раздела «Тепловые процессы в литейной форме».

– Изучение методики составления теплового баланса и расчета параметров тепло– и массопереноса в системе «расплав–форма» отдельно для расплава и формы, а также освоение универсального инженерного метода расчета тепловых параметров и построения температурного поля «металл–форма».

Краткие теоретические сведения

Обычные для практики технологические условия формирования отливок могут быть учтены по методу Н.Г. Гиршовича, Ю.А. Нехендзи и Б.Б. Гуляева, который состоит в том, что первоначально расчет ведут по строгим формулам классического решения, а затем в него вводят поправки на влияние технологических факторов. При этом классическое решение представляют в критериальном виде.

Наибольшее значение имеют следующие критерии теплового подобия:

1) $K_L = \frac{L}{c\Theta_3}$ – критерий скрытой теплоты затвердевания, характеризующий относительную тепловую мощность процесса (L – скрытая теплота затвердевания; c – теплоемкость твердого металла; Θ_3 – теплоемкость твердого тела: $\Theta_3 = t_3 - t_{0,ф}$, где t_3 – температура кристаллизации и $t_{0,ф}$ – начальная температура формы до закалки);

2) $K_B = \frac{b_\Phi}{b_M}$ – критерий тепловой активности, представляющий отношение коэффициентов теплоаккумуляции формы и металла, т.е. $b = \sqrt{\lambda c \gamma}$ (λ – коэффициент теплопроводности; γ – плотность). M и Φ обозначают соответственно металл и форму. Критерий K_B характеризует интенсивность теплообмена между отливкой и формой;

3) $K_K = \frac{K}{\sqrt{a}}$ – критерий коэффициента затвердевания (K – коэффициент затвердевания; a – коэффициент температуропроводности металла).

Основное уравнение классического решения записывают через эти критерии следующим образом:

Основное уравнение классического решения записывают через эти критерии следующим образом:

$$K_k = \frac{1 + K_B \operatorname{erf}(1/2K_k)}{\exp(-1/4K_k^2)} \cdot \frac{2K_B}{\sqrt{\pi} \cdot 4K_L}, \quad (2.2)$$

что согласуется с законом квадратного корня затвердевания (формула (2.1)).

Применение формулы (2.2) ограничивают в случае затвердевания металла, кристаллизующегося при определенной постоянной температуре, залитого без перегрева и без термического сопротивления зазора. Ее можно применять для плоских отливок, затвердевающих в формах ограниченной протяженности при следующих условиях:

а) длина и ширина плоской отливки должны быть достаточно велики по сравнению с ее толщиной, чтобы торцы отливки не оказывали существенного влияния на ее теплообмен с формой;

б) толщина слоя формы должна быть достаточно большой, чтобы за время затвердевания отливки наружная поверхность формы не прогрелась заметно.

Принимается, что теплофизические свойства металла и материала не зависят от температуры.

Формула 2.2, главным образом, применяется для определения величины K_k по заданным значениям K_L и K_B . По его значению находят коэффициент затвердевания $K = K_k \sqrt{a}$ и далее по формуле (2.1) скорость нарастания затвердевшего слоя металла, т.е. кинетику затвердевания или полную продолжительность затвердевания отливки τ_3 .

Для этого следует положить:

$$x = \frac{\delta}{2} = R = \frac{V}{F},$$

где δ – абсолютная толщина плоской отливки; R – ее приведенная толщина; V – ее объем; F – площадь поверхности охлаждения.

Откуда:

$$RK = \sqrt{\tau_3}.$$

Трансцендентное уравнение (2.2) удобнее всего решается с помощью графического построения $K_k = f(K_B)$ для значения критерия K_L , характеризующих определенные металлы.

Например, для стали по табл. 2.1 находим $K_L = 0,25$ и принимаем для K_k ряд произвольных значений: 0,5; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5. Для каждого из этих значений K_k (во всех случаях $K_L = 0,25$) с помощью табл. 2.1 находим по форму-

ле (2.2) соответствующее значение K_B : 0,12; 0,25; 0,33; 0,55; 1,0 – и строим график (рис. 2.1).

Таблица 2.1

Ориентировочные значения теплофизических констант металлов и критериев K_L и K_B

Константа и критерий	Сви- нец	Алю- миний	Медь	Чугун	Никель	Сталь	Титан
L , кДж/кг \cdot 4,187	6,3	93	49	80*	74	75*	90
c , кДж/(кг \cdot град) \cdot 4,187	0,03	0,26	0,13	0,18	0,15	0,20	0,18
t_3 , $^{\circ}$ C	327	660	1063	1130	1520	1520	1670
K_L	0,68	0,57	0,32	0,40	0,35	0,25	0,31
λ , кДж/(м \cdot град)	14	190	280	20	58	20	11
γ , кг/м 3 **	10300	2600	8300	7000	8450	7200	4100
a , м 2 /ч	0,06	0,30	0,26	0,014	0,045	0,014	0,015
b_m , кДж/(м 2 градч)	65	350	550	170	270	170	90
b_ϕ , кДж/(м 2 градч)	12	15	18	18	21	22	–
K_B (песчаная форма)	0,18	0,043	0,033	0,10	0,08	0,13	–
K_B (чугунная форма)	0,38	0,03	0,03	1,00	0,63	1,00	–
K_K (при $K_B \rightarrow \infty$)	1,50	1,60	1,80	1,70	–	1,90	–

* Указаны значения полной теплоты затвердевания, включающей в себя скрытую теплоту затвердевания и теплоту интервала кристаллизации.

** Значения γ относятся к твердожидкому состоянию сплавов и к температурам, близким к t_3 для чистых металлов.

*** Приведены разные значения b_ϕ для песчаной формы в зависимости от температуры затвердевания заливаемого металла.

Графические зависимости $K_K = f(K_B)$ для других металлов представлены на рис. 6, каждая из которых асимптотически приближается к определенному значению K_K , отвечающему бесконечно большой интенсивности теплообмена ($K_B = \infty$), например, когда металл затвердевает в водоохлаждаемом кристаллизаторе.

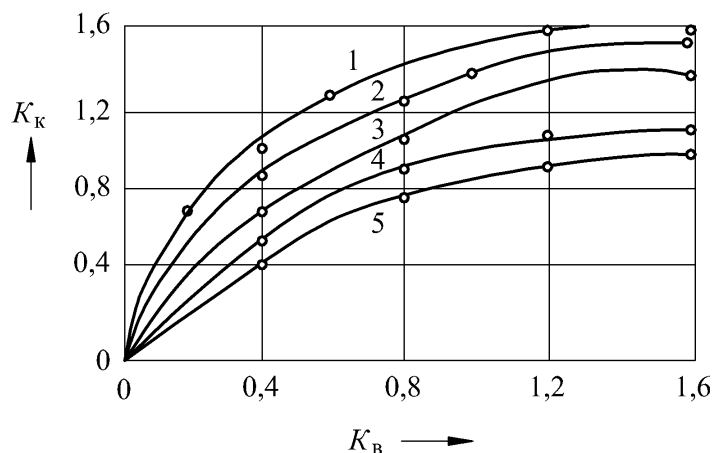


Рис. 6. График для определения критерия K_L по значениям критериев K_B и K_K : 1 – для стали при $K_L = 0,25$; 2 – для меди при $K_L = 0,32$; 3 – для чугуна при $K_L = 0,4$; 4 – для алюминия

при $K_L = 0,57$; 5 – для свинца при $K_L = 0,68$

Для расчета температурных полей отливки и формы (для периода затвердевания отливки) воспользуемся классическим решением, представленным следующими формулами:

$$\frac{\Theta_3}{\Theta_{\text{п}}} = 1 + K_{\text{в}} \operatorname{erf} \frac{1}{2} K_{\text{к}} \frac{L}{\tau}, \quad (2.3)$$

$$\Delta t_{\text{з}} = t_{\text{ф}} - \Theta_{\text{п}} = \Theta_{\text{п}} \operatorname{erf} \frac{x_{\text{м}}}{2\sqrt{Q_{\text{м}} \tau}}, \quad (2.4)$$

$$\Theta_{\text{ф}} = \Theta_{\text{п}} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x_{\text{ф}}}{2\sqrt{Q_{\text{ф}} \tau}} \right), \quad (2.5)$$

где Θ – «избыточная» температура над начальной температурой формы, т.е. $\Theta = t - t_{\text{о.ф}}$ (t – данная температура); индексы «п», «м», «ф» обозначают поверхность отливки, металл и форму соответственно; x – расстояние рассматриваемых точек в металле, отсчитанное от поверхности отливки; τ – время от момента заливки (предполагается, что металл заполняет форму мгновенно).

Для определения температуры поверхности отливок, затвердевающих в форме, задаемся родом сплава, видом формы, температурой заливки металла (t) и формы ($t_{\text{о.ф}}$). По табл. 2.1 определяем значение критерия $K_{\text{в}}$, затем по рис. 2.1 по кривой для случая K_L (данный сплав) находим соответствующее значение $K_{\text{к}}$. Расчет ведем по формуле 3, которая входит как составная часть в программу.

Для построения температурного поля плоской отливки, затвердевающей в форме в пределах продолжительности затвердевания отливки, произвольно выделяем моменты времени, для которых будем строить изохроны. Для ряда задаваемых значений толщины отливки $x_{\text{м}}$ по формуле (2.4) определяем $\Delta t_{\text{м}}$.

Для условий, определенных выше, рассчитываем температурное поле металла и формы по формуле (2.5).

На рис. 2.2 представлена изохрона температурного поля металла и формы, где выделены основные величины, входящие в формулы (2.3–2.5).

Формула (2.3) дает возможность определить температуру поверхности затвердевающей отливки, которую нужно знать при расчетах температурных полей отливки и формы.

Ход работы

Получите у преподавателя вариант задания (табл. 2.2).
 Рассчитайте значения изохорн для следующих промежутков времени 5, 10, 20 и 30 мин., используя формулы 2.1-2.5.

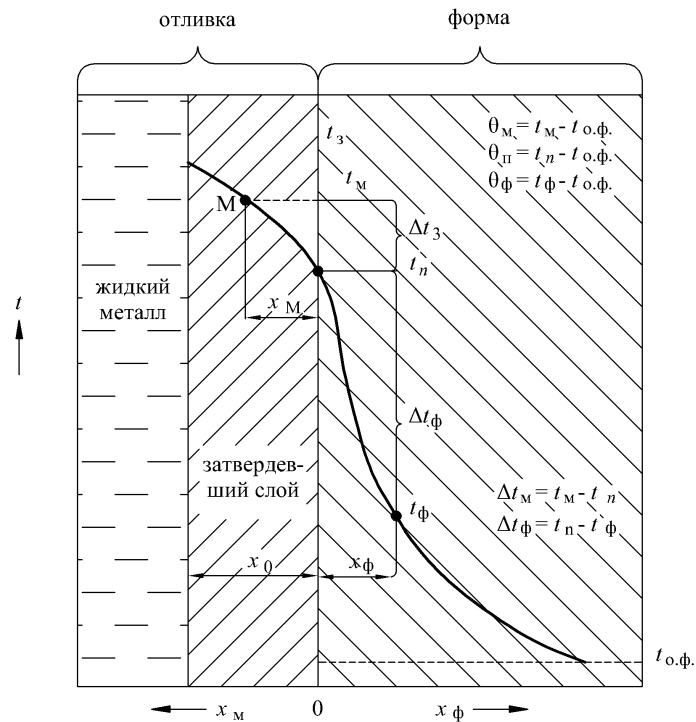


Рис. 2.2. Схема изохорны температурного поля отливки

Исходные и расчетные данные представьте в табличном виде (табл. 2.3).

Постройте температурное поле «металл–форма» (рис. 2.3). Значения толщины отливки и формы: 0, 10, 20, 30, 40 и 50 мм.

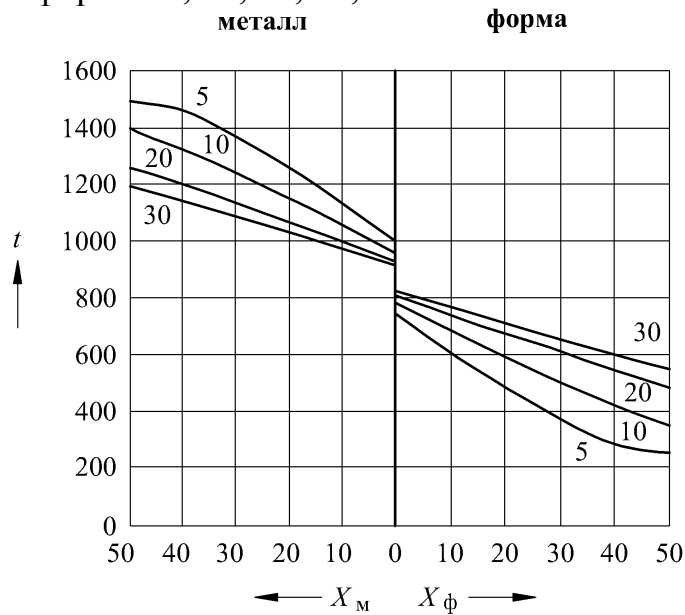


Рис. 2.3. Температурное поле «металл – форма»

Таблица 2.2

Варианты заданий для тепловых расчетов (практическая работа №2)

Вариант	Сплав	Форма	Температура заливки, °С	Начальная температура формы, °С	Коэффициент температуропроводности сплава, м ² /ч	Коэффициент температуропроводности формы, м ² /ч·10 ⁻²	Критерий тепловой активности (К _В) и коэффициент затвердевания (К _К)
1	сталь	песчаная	1490	20	из табл. 2.1	1,70	из табл. 2.1
2	сталь	чугунная	1490	20		2,76	
3	чугун	песчаная	1400	20		1,70	
4	чугун	чугунная	1250	20		2,76	
5	алюминиевый	песчаная	780	20		1,70	
6	алюминиевый	чугунная	710	20		2,76	
7	медный	песчаная	1050	20		1,70	
8	медный	чугунная	1700	20		2,76	
9	свинцовый	песчаная	230	20		1,70	
10	свинцовый	чугунная	200	20		2,76	
11	сталь	песчаная	1520	20		1,70	
12	сталь	чугунная	1580	150		2,76	
13	чугун	песчаная	1200	70		1,70	
14	чугун	чугунная	1350	150		2,76	
15	алюминиевый	песчаная	700	70		1,70	
16	алюминиевый	чугунная	750	150		2,76	
17	медный	песчаная	1100	70		1,70	
18	медный	чугунная	1150	150		2,76	
19	свинцовый	песчаная	250	70		1,70	
20	свинцовый	чугунная	210	150		2,76	

Таблица 2.3

Пример расчета на ЭВМ температурного поля «отливка-форма»

Параметр		Обозначения	Значения	
Вводимые параметры				
1. Сплав		–	сталь	
2. Температура заливки, °С		$T_{\text{зал}}$	1440	
3. Коэффициент температуропроводности сплава, м ² /ч		$Q_{\text{Ме}}$	0,014	
4. Вид формы		–	чугунная	
5. Начальная температура формы, °С		$t_{\text{н.ф.}}$	20	
6. Коэффициент температуропроводности формы, м ² /ч		$Q_{\text{Ф}}$	0,014	
7. Критерий тепловой активности		$K_{\text{В}}$	1,0	
8. Критерий коэффициента затвердевания		$K_{\text{к}}$	1,5	
Результаты расчета ($t_{\text{Ф}}$, $t_{\text{Ме}}$)				
$x_{\text{м}} = x_{\text{ф}}$	Форма	Металл	Форма	Металл
	5 мин		20 мин	
0	738	999	808	929
10	603	1134	738	999
20	479	1259	669	1068
30	370	1367	609	1134
40	278	1459	539	1198
50	247	1490	479	1258
	10 мин		30 мин	
0	779	959	821	916
10	681	1056	765	974
20	587	1150	707	1031
30	499	1238	651	1086
40	418	1319	597	1140
50	346	1391	545	1192

Требования к отчету по практической работе

В отчете указывается цель работы, дается краткое изложение теории, приводится расчет температурного поля в виде таблицы (табл. 2.3) и графика (рис. 2.3).

Контрольные вопросы

1. Какие нестационарные тепловые процессы происходят при затвердевании и охлаждении отливок в форме?
2. Расскажите об инженерном методе тепловых расчетов.
3. Расскажите методику построения теплового поля.
4. Какие критерии используются при построении температурного поля «металл–форма»?
5. Какие теплофизические свойства материала формы и металла необходимо знать для построения температурного поля «металл–форма»?

Практическая работа №3

МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗОВОЙ ФОРМЫ

Цель работы

Изучение методики и приобретение навыков прогнозирования получения качественной отливки в разовой форме.

Задачи лабораторной работы

– Изучить основные понятия разделов «Первичная кристаллизация металлов и сплавов» и «Процессы формирования структуры в отливках».

– Приобретение навыков компьютерного моделирования нестационарных процессов протекающих в литейной форме: кристаллизация, теплоперенос, затвердевание и усадка для конкретных условий, имитирующих производственные условия, позволяющие достигать заданные структуры в литых изделиях.

Краткие теоретические сведения

Пакет программ LVMFlow – это система компьютерного моделирования тепловых и гидродинамических процессов литья, ориентированная на платформу PC с Windows 98/NT/2000/XP. Ядром пакета являются уравнения теплопереноса.

В основе модели кристаллизации сплавов в пакете прикладных программ LVMFlow лежит макроскопическая феноменологическая теория квазиравновесной двухфазной зоны. Главное предположение этой теории то, что состояние двухфазной зоны можно описать с помощью макроскопических функций аналогично полям температуры, скорости и так далее.

Уравнения модели решаются методом FDM (конечных разностей) на регулярной прямоугольной разностной сетке. При этом решаются не сами уравнения, а их конечно разностные аналоги.

При рассмотрении пакета в скобках с названием функции приводится внешний вид кнопки, позволяющей ее активировать.

Моделирование затвердевания. В основе модели кристаллизации сплавов пакета LVMFlow лежит квазиравновесная теория. Это макроскопическо-феноменологическая теория. В отличие от чистых металлов сплавы кристаллизуются в температурном интервале от температуры ликвидуса до температуры солидуса. В этой зоне, называемой двухфазной зоной, присутствуют как жидкая так и твердая фаза. При этом образующаяся твердая фаза находится в равновесии с жидкой фазой. Низкие значения коэффициентов диффузии элементов в сравнении с коэффициентом

температуропроводности сплавов и слабость конвективного смешивания позволяют пренебречь процессами диффузии в твердой и в жидкой фазах.

Вследствие недостатка данных по фазовым диаграммам для многокомпонентных систем и также для упрощения модели, как базовая была принята модель двухкомпонентного сплава (Fe–C, Al–Si, Fe–Cr, Fe–Ni, Cr–Ni классы и т.д.) с его базовой двухкомпонентной диаграммой состояний.

Оставшиеся компоненты сплава учитываются по их модифицированию базовой диаграммы – опорные точки смещаются линейно в зависимости от концентрации компонент сплава.

Конвективным теплопереносом можно пренебречь для небольших отливок, где тепловая конвекция не может развиваться в результате охлаждения металла, и нагревания формы во время заполнения формы пренебрежимо малы.

Модель образования усадочных дефектов основана на теории перколяции.

Если локализованное жидкое ядро содержит литниковую точку, тогда считается, что эта зона питается расплавом через литниковую точку и усадочные полости не образуются в этой зоне (бесконечная поставка питающего металла).

Теплоперенос на границе. Для учета в моделировании теплопереноса на границе «отливка–форма» нажмите кнопку **«ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР»** верхней панели инструментов.

Теплоперенос на границе «отливка–форма» оказывает значительное влияние при литье в постоянную форму на конечный результат. Граничный теплоперенос сильно зависит от свойств границы, оказывающей сопротивление, изменяющееся со временем и температурой, потоку тепла от горячей отливки к более холодной форме. При теоретическом решении это сопротивление удобно разделить на три части:

- покрытие формы применяется только при гравитационном литье;
- сопротивление контакта включает грубость поверхности как пленки газа на границе;
- воздушный зазор вызывается усадкой затвердевания и тепловым сжатием отливки.

Покрытие формы обычно состоит из высокодисперсной керамической пудры, связанной связующим веществом (обычно жидкое стекло). Желательные свойства покрытия – это высокая точка плавления для того чтобы избежать химических реакций или спекания с литым металлом, и низкая теплопроводность для обеспечения полного заполнения формы до начала затвердевания.

Сопротивление контакта вызывается не согласующимся контактом между двумя смежными телами, из которых, по крайней мере, одно находится в твердом состоянии. Если оба тела твердые, сопротивление контакта будет функцией профиля поверхности и давления на контакте.

Когда одно из тел жидкое, как в случае отливки, поверхностное натяжение представляет дополнительный параметр. Рассмотрим ситуацию. Поверхность формы, покрытая пористым покрытием, подвергается воздействию жидкого металла, первоначально на несколько сотен градусов теплее формы. Воздух, заключенный в пустотах покрытия, нагревается и увеличивается в объеме. Избыточный объем воздуха, вероятно, образует тонкую газовую пленку на границе. Экспериментальные результаты подтверждают теорию, что газовая пленка создает термосопротивление контакта при литье в постоянные формы.

Воздушный зазор образуется относительным перемещением затвердевающего металла и формы, вызванным тепловым расширением формы и усадкой затвердевания литого металла. Было обнаружено, что образование воздушного зазора начинается, как только поверхность отливки полностью затвердеет. Образование воздушного зазора более важно в алюминиевых отливках, чем в отливках из серого чугуна и сильно зависит от геометрии.

В LVMFlow предусмотрены две модели теплопереноса, одну из которых необходимо выбрать: воздушных зазор и теплоперенос.

Воздушный зазор. Необходимо учитывать, что моделируемый воздушный зазор – коэффициент теплопереноса рассчитывается по величине реального воздушного зазора.

Чтобы включить образование воздушного зазора в моделирование должны быть введены следующие параметры:

- температура образования воздушного зазора – по умолчанию устанавливается температура солидуса ($T_{sol} = 60\text{ °C}$);

- контактный зазор – толщина образовавшейся газовой пленки;

- коэффициенты: верхний, боковой, нижний. Эти коэффициенты используются для подгонки образующихся воздушных зазоров. Размер воздушного зазора вычисляется в программе. Полученное значение величины воздушного зазора умножается на соответствующий коэффициент (например, если задано значение коэффициента 100 %, то в вычислениях будет использоваться полученная величина воздушного зазора, т.е. размер1). Галочка перед коэффициентом означает, что воздушный зазор на этой поверхности образуется.

Теплоперенос на поверхности – температурная зависимость коэффициентов теплопереноса будет взята из Material.mdb.

Параметры модели усадки. В диалоговом окне «**МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ДЕФЕКТОВ**» отметьте мышкой модель расчета усадочных дефектов, которую Вы хотите использовать при моделировании отливки:

- «**БЕЗ УСАДКИ**» (Without shrinkage). Моделирование заполнения и затвердевания отливки будет производиться без расчета усадки. Эта модель используется для функции «**РАСЧЕТ РАЗМЕРА ПИТАТЕЛЯ**», предназначенной для определения положения тепловых узлов в отливке;

- «**МОДЕЛЬ 1**» – выполняется расчет усадки.

Для настройки влияния гравитации в модели расчета используйте любой из представленных инструментов: либо переключатель с тремя значениями («СЛАБАЯ ГРАВИТАЦИЯ», «СРЕДНЯЯ ГРАВИТАЦИЯ», «СИЛЬНАЯ ГРАВИТАЦИИ»), бегунок, «КОЭФФИЦИЕНТ ВЛИЯНИЯ».

Коэффициент влияния гравитации не используется в модели «Без усадки».

Параметры модели усадки для гравитационного литья. К основным параметрам модели усадки для гравитационного литья можно отнести следующие:

– **порог текучести** – это значение доли жидкой фазы, выше которого работает уравнение Навье-Стокс; кристаллы, образовавшиеся в объеме расплава жидкости свободно текут вместе с ним;

– **порог текучести–порог протекания** – между ними работает уравнение Дарси. Часть твердой фазы становится неподвижной и оказывает сопротивление движению расплава;

– **порог протекания** – это значение доли жидкой фазы, ниже которой нет течения расплава при отсутствии пластической деформации;

– **порог продавливания** – при гравитационном литье этот параметр не работает, его значение по умолчанию совпадает с порогом протекания;

– **порог Niyama** – это значение доли жидкой фазы для расчета критерия Niyama. Критерий Niyama используется для предсказания усадочной пористости в отливке. Во время расчета затвердевания отливки критерий Niyama считается в узлах, где доля жидкой фазы достигла значение CLFN.

Параметры модели усадки для литья под давлением. Основные параметры модели усадки для литья под давлением следующие:

– порог текучести;

– порог текучести–порог протекания;

– порог протекания;

– порог Niyama;

– **порог продавливания** – это температура, выше которой происходит течение металла за счет пластической деформации. По умолчанию этот параметр равен температуре, при которой доля жидкой фазы равна порогу протекания, и вычисляется автоматически в модуле «НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ», что соответствует литью без давления. При литье под давлением порог продавливания снизится и его значение зависит от пластических свойств материала и прикладываемого давления подпрессовки. Таким образом, порог продавливания при литье под давлением следует задавать ниже, чем температура соответствующая порогу протекания (значение по умолчанию). Необходимо отметить, что порог продавливания – это температура, при которой значение предела текучести материала равно давлению подпрессовки. Для литья под высоким давлением эти значения находятся ниже температуры солидуса. Порог текучести и порог протекания определяются по доле

жидкой фазы. Этот параметр работает только в случае задания питающей точки;

– **порог протекания–порог продавливания** – между ними возможна только пластическая деформация. Течение жидкой и твердой фазы возможно только за счет пластической деформации (при литье под давлением) путем задания питающие точки;

– **давление подпрессовки**. При литье под давлением плотность расплава увеличивается с ростом прикладываемого давления.

После того как питание отливки прекращается, т.е. появится область между отливкой и поршнем (там, где стоит питающая точка), в которой температура будет меньше порога продавливания. Вначале давление в расплаве будет равно давлению подпрессовки, а значит и плотность жидкости будет выше плотности жидкости при нормальных условиях. С понижением температуры расплава, а также кристаллизации, будет происходить изменение плотности в замкнутой зоне, давление будет снижаться, а расплав будет занимать всю полость внутри твердой фазы за счет изменения плотности при понижении давления. Однако влияние температуры на плотность гораздо сильнее, чем влияние давления, поэтому такая ситуация продолжается недолго. Температурное изменение плотности приводит к снижению давления до отрицательных величин, расплав разрывается, и начинают образовываться газо-усадочные раковины. Время, в течение которого раковины не образуются, зависит от давления подпрессовки, сжимаемости и коэффициента термического объемного (или линейного) расширения. Это время тем больше, чем больше Δp и χ , и чем меньше коэффициент объемного расширения.

Необходимо отметить, что в данной программе нельзя задать значение сжимаемости растворенных газов в металле (1/Mbar), которое зависит от свойств расплава, в частности от содержания газа в расплаве. По умолчанию принимается некоторое усредненное значение из литературы.

Объяснение кривых плотности в LVMFlow. Поведение кривой плотности очень важно для достижения хорошего прогнозирования образования и размеров внешней и внутренней усадок при моделировании затвердевания.

Кривая плотности состоит из трех частей:

– **первая часть** – это уменьшение плотности в жидком состоянии, т.е. от температуры заливки до температуры ликвидуса. Для большинства сплавов уменьшение объема между 1 и 1,5 % на 100 °С. Поэтому низкая температура заливки естественно уменьшит необходимость для подпитки металлом. Во время этого этапа форма начинает разогреваться. Первоначально может произойти незначительное движение формы вовнутрь;

– **вторая часть** кривой – это изменение плотности между ликвидусом и солидусом (конец затвердевания, EOF). Для большинства сплавов эта часть также связана с *уменьшением* в объеме, т.е. увеличением плотности. Для сплавов, которые могут расширяться во время затвердевания, возможно, нет

увеличения плотности совсем или даже уменьшение плотности. Это случай с серым чугуном, чугуном с шаровидным и компактным графитом, особенно если углеродный эквивалент близок к эвтектическому составу. Расширение может теоретически быть до величины порядка 5 % (соответственно выделению около 2 % эвтектического графита). В сжимаемой форме, такой как влажный песок, это вызовет движение стенок формы и таким образом увеличение объема полости отливки и компенсация расширения. Если чугун заливается в «жесткую форму» т.е. фуран или цементитный песок тогда не происходит движения стенок формы и расширение может полностью компенсировать усадку аустенита;

– *третья часть* кривой это изменения плотности в твердом состоянии. Это то, что называется «допуск производителей образцов» – для серого чугуна это порядка 1 %. Это может влиять на усадку, поскольку уменьшает объем частей отливки, которые затвердевают на ранней стадии.

Кривые плотности в LVMFlow должны представлять влияние всех этих воздействий, т.е. кривые плотности является комбинацией сжатия металла, явлений расширения, движения стенок формы и т.д. Кривая плотности является.

Разница между плотностью при температуре заливки и плотностью при температуре – это объем усадки.

В этой области происходит расширение. Такое расширение происходит в сером чугуне, чугуне с шаровидным и компактным графитом во время эвтектического затвердевания. В LVMFlow это может быть представлено горизонтальной линией. Если используется «жесткая» форма (т.е. фуран или цемент), размер полости отливки может слегка уменьшиться. Это представлено на последней диаграмме. Заметим, что горизонтальная линия начинается при температуре примерно на 15 °C выше, чем температура ликвидуса. Это означает, что уменьшение полости компенсирует сжатие металла уже до достижения температуры ликвидуса. В таких случаях, возможно производить тяжелые отливки (объемный модуль, т.е. отношение объем тела и его поверхности, более 1,5 см) без добавления каких либо питателей поскольку используется низкая температура заливки. Альтернативно может быть достаточно небольших питателей, которые могут поставлять питающий металл во время сжатия жидкости. В LVMFlow можно легко изменить значения плотности при различных температурах, т.е. можно изменять предсказанный объем усадки путем модифицирования кривой плотности для соответствия фактическому поведению металла и формы во время затвердевания.

Средства повышения эффективности питания – это группа продуктов, помогающих улучшить исполнение питания литейной конфигурации, что дает большой запас надежности относительно оптимальной температуры заливки и направленного затвердевания. Использование средств повышения эффективности питания может увеличивать выпуск продукции примерно на

10-50 % в зависимости от типа заливаемого сплава.

Средства повышения эффективности питания можно сгруппировать в четыре главные категории:

- изоляционные оплетки (Insulating sleeves);
- средне- или низкоэнергетические экзотермические вставки;
- экзотермические/высокоэнергетические экзотермические вставки;
- засыпной порошок.

Закрытые экзотермические вставки производятся вставными или вдавливаемыми, имеющими меньшие размеры при максимальном объемном модуле около 3,5 мм. Этот тип вставок дает технологу-литейщику возможность использовать их внутри бокса изложницы.

Открытые экзотермические или низкоэнергетические экзотермические вставки обычно производятся при объемных модулях от 2,2 см до максимального значения порядка 15 см. Для лучшего использования этого типа продукта должен применяться изоляционный или экзотермический расширяющийся порошок. Некоторые литейные предприятия используют сухой песок, но это менее эффективно.

Открытые изоляционные оплетки охватывают объемный модуль питателя от 1 и до ≈ 9 см в зависимости от толщины продукта. Большое количество дешевых оплеток производится с толщиной стенок 8–20 мм (оплетка диаметром (D) от 37 до 400 мм), тогда как более эффективная толщина стенок 12-15 мм (оплетка диаметром (D) от 37 до 500 мм). Большинство открытых оплеток производится вакуумной формовкой, их состав состоит на более чем 80 % из волокон окиси алюминия. Для питателей диаметром большим, чем 600 мм литейные предприятия могут использовать различные типы продуктов: изолирующие кирпичи различной плотности, гибкие волоконные пластинки, порошковые продукты, смешанные с водой.

В зависимости от используемого продукта в LVMFlow имеется выбор изоляции, волокна или кирпичи, среднеэнергетический экзотермик, высокоэнергетический экзотермик и экзотермические материалы.

Для использования предварительно созданных изоляционных оплеток, необходимо выбрать «**ИЗОЛЯЦИОННОЕ ВОЛОКНО**». Предварительно в САД модели задается толщина оплетки, после чего она экспортируется в отдельный *STL*-файл.

Изоляционные кирпичи, как правило, шамот, используются обычно для питателей с диаметром больше чем 500 мм. Это также должно быть смоделировано в САД программе и экспортировано как отдельный *STL*-файл.

Выбор экзотермического материала незначительно сложнее. Для предварительно подготовленных продуктов с низкой плотностью (< 900 кг/м³) и питателя с объемным модулем до 3,5 см нужно использовать высокоэнергетический экзотермик. Для питателя с объемным модулем больше чем 3,5 см – среднеэнергетический экзотермик. При моделировании высокоплотных экзотермических продуктов можно использовать материал

«ЭКЗОТЕРМИК», Средняя плотность экзотермического материала приблизительно от 1500 до 2000 кг/м³ после того как вставка прекратила горение. Любую вставку нужно смоделировать отдельно в САД программе и экспортировать как *STL*-файл.

Засыпка выбирается для моделирования геометрии и рекомендуется выбирать изоляционное волокно, до появления в базе подходящих теплофизических данных для засыпки. Экзотермическая реакция в основном состоит из трех фаз: воспламенение, горение и изоляция или охлаждение, если используется песчаная форма. Третьей фазой является изоляция для продуктов волоконных оплеток, что в некоторой степени это также верно для легких пескометных стержневых продуктов. Высокоплотные пескометные стержневые продукты дают охлаждающий эффект после периода горения.

Приведенные в программе данные являются компромиссом между некоторыми продуктами, имеющимися сегодня на рынке.

Для уменьшения времени воспламенения необходимо снизить температуру горения (не ниже 200 °С). Если нужна более высокая выходная температура тогда необходимо увеличить значение теплоты горения (не превышать 2000 кДж/кг). Теоретически экзотермическая реакция может создать теплоту приблизительно 2200 кДж/кг. Последний параметр показывает, как долго продолжается экзотермическая реакция. Нормальное время горения для экзотермических вставок высоких свойств составляет от 70 до 150 секунд, для среднеэнергетического экзотермика – от 120 до 600 секунд. Все значения частично зависят от объема материала питателя, который требуется для горения. Необходимо отметить, что если понижается температура горения и в тоже время увеличивается теплота горения, то необходимо понизить время горения для получения правильной совместимости продукта.

Два цвета для экзотермиков. Экзотермические материалы назначаются в модуле «НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ» соответствующим телам литейной конфигурации.

При открытии файла отливки с экзотермическими материалами в любом модуле моделирования количество экзотермических материалов в списке материалов формы удваивается. На поле сетки эти дополнительные экзотермические материалы не отображаются.

Второй дополнительный цвет назначается каждому экзотермику автоматически. Этот цвет предназначен для отображения на поле сетки сгоревшего экзотермика. До начала экзотермической реакции весь экзотермик несгоревший и поэтому на поле сетки второй экзотермик отсутствует. В процессе моделирования, в определенный момент, начинается экзотермическая реакция и на поле сетки появляется сгоревший экзотермик. Соотношение цветов сгоревшего и несгоревшего экзотермика позволяет судить о степени завершенности экзотермической реакции.

Краткое описание шага моделирования по времени. Автоматически

выбираемый шаг интегрирования уравнений теплопроводности не может превышать максимального шага расчета. Увеличение максимального шага расчета по времени, например в 100 раз, может сократить время счета не больше чем в 100 раз или вообще не изменится, т.к. не на всех отливках в процессе моделирования автоматически выбранный шаг расчета достигает максимального значения. На это влияют и геометрия отливки, и теплофизика сплава.

Максимальный шаг модели предназначен для интегрирования уравнений теплопроводности. Во время заполнения шаг интегрирования уравнений определяется скоростями и никак не зависит от максимального шага. Максимальный шаг расчета начинает учитываться, когда заканчивается заполнение.

Модель LVMFlow. При расчетах течения расплав металла в очень хорошем приближении можно считать несжимаемой жидкостью. Если принять, что жидкий металл по своим свойствам близок к идеальной жидкости, то при заливке металла в форму характерное безразмерное число Рейнольдса имеет очень большие значения, для которых при определенных условиях может наблюдаться весьма развитая турбулентность. Турбулентность развивается с границ, особенно с негладких.

Решения уравнения Навье-Стокса для ламинарного течения теряют устойчивость при $Re \sim 100-1000$ и при больших значениях Re нужно решать усредненные уравнения для корреляционных функций, например $k - \epsilon$ модели.

Тем не менее, на практике можно наблюдать почти ламинарные течения и при больших числах Re , в областях с гладкой геометрией. Поэтому сначала необходимо понять, какие характеристики течения и при каких условиях будем рассчитывать, а какими можно пренебречь.

Для процесса заливки металла в форму существенны два момента:

- 1) характер течения металла (турбулентный или ламинарный) по литниково-питающей системе и в отливке;
- 2) потери тепла металлом и прогрев формы в процессе заливки.

Для первого момента оптимальная технология должна приводить к спокойному ламинарному течению металла в форме, без образования застойных областей, без захвата газа и размытия формы. Вязкое течение будет только пристеночным течением и может учитываться как уменьшение геометрических размеров полости.

Пакет LVMFlow рассчитывает ламинарное течение металла «вблизи» к оптимальной технологии в приближении идеальной несжимаемой жидкости, вязкость которой учитывается только как добавка.

Системные установки. Модуль «СИСТЕМНЫЕ УСТАНОВКИ» предназначен для настройки пакета LVMFlow на конфигурацию и требования пользователя. Окно установок состоит из двух частей:

- слева – названия модулей параметров, необходимых для работы

пакета;

– справа – сами параметры пакета.

Для просмотра и редактирования параметров установите подсветку на нужную строку в левой части окна и щелкните левой кнопкой мыши.

Г л о б а л ь н ы е. В данном модуле задаются системные установки, используемые всеми модулями пакета. В процессе работы в каждом модуле все эти установки, кроме языка интерфейса, можно изменять:

– язык для системного интерфейса («**РУССКИЙ**», «**АНГЛИЙСКИЙ**» и т.д.). Язык интерфейса для всех модулей пакета задается только здесь;

– система единиц измерения: «**МЕТРИЧЕСКАЯ**» или «**АНГЛИЙСКАЯ**»

– вывод поля: устанавливается способ вывода изображения отливки при запуске каждого модуля;

– функции мыши: задается функция мыши, применяемая по умолчанию, для каждого программного модуля, например «**БАНК МАТЕРИАЛОВ**»;

– шкала пользователя – это новая шкала, заданная пользователем в графиках из моделирований.

– последний проект: при выборе параметра «**АВТОЗАГРУЗКА**» работу необходимо начинать с модуля «**3D-ИМПОРТ**». При запуске всех других модулей моделирования будут автоматически открываться файлы, связанные с FLT-файлом, сохраненным в этом модуле;

– цвет фона: выбирается цвет для рабочего окна во всех модулях программы;

– точность: задается точность отображение параметров заливки и для отображения параметров в модуле «**PQ-ДИАГРАММА**».

Маршруты. В данной группе необходимо задавать основные маршруты нахождения и сохранения различных файлов, необходимых для работы:

– файлы с теплофизическими свойствами материалов формы;

– файлы с геометрией отливок;

– файлы с результатами моделирования;

– *AVI*-файлы.

В и з у а л и з а ц и я. Подстройка параметров визуализации позволяет подстроить картинки расчетных полей для лучшего изображения на индивидуальных условиях экрана.

С е т к а и п р о с м о т р. Эти модули позволяет задать по умолчанию сеточное разбиение и минимальную толщину формы вокруг отливки, которые обычно задаются в модуле «**НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ**».

В модуле «**ПРОСМОТР**» находится два параметра:

– шаг задержки – время смены на экране записей расчетного поля, установленного для просмотра.

– сохранить 3D температуру в двоичном формате – эта функция позволяет использовать поле двоичной температуры во внешних приложениях (например, для расчета напряжений).

Запись AVI. Для создания AVI-файла необходимо установить следующие параметры:

– *размер видео.* Использование данного параметра позволяет задать площадь выводимой картинкой. Площадь можно выбрать из выпадающего списка или задать свой (при выборе закладки «ПРОИЗВОЛЬНЫЙ»);

– *создание AVI-файл.* В данном параметре указывается, какой AVI-файл будет создаваться: «AVI-ФАЙЛ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ» или просто «AVI-ФАЙЛ». Чтобы сохранить полученные данные в последнем случае необходимо отметить строку «СОЗДАТЬ AVI ФАЙЛ»;

– *сохранение в AVI-файл.* В данном параметре указывается, в каком виде будет сохранен AVI-файл. Существует два типа сохранения:

а) «СОХРАНЯТЬ В AVI-ФАЙЛ ТОЛЬКО ВЫДЕЛЕННЫЕ ЗАПИСИ» – эта опция выборочного (по записям) создания AVI-файла, позволяющая уменьшить его размер. Таким способом только значимые записи сохраняются для дальнейшего просмотра;

б) «СОХРАНЯТЬ В AVI-ФАЙЛ ВСЕ ЗАПИСИ» – эта опция позволяет сохранять все записи;

– *добавить logo в AVI-файл* – данный параметр позволяет вставлять BMP-файлы с logo. Для этого необходимо указать путь его расположения;

– *codec* – данная опция позволяет выбирать *codec*, который будет использоваться для сжатия AVI-файлов.

Материалы. В данном параметре задаются сплав отливки и материал формы с начальными температурами. Для сокращения списков выпадающего меню имеется возможность выбора группы классов сплавов для работы и сплавов внутри выбранного класса.

Моделирование. В данном модуле задаются тип литья (с давлением или без давления) и максимальное давление.

Параметр «МАКСИМАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ», введенный для литья под давлением, – это максимальное давление, которое может произвести машина литья под давлением.

Параметр «РЕШАТЕЛЬ» позволяет учитывать конвенцию, прилипимость расплава к твердой стенке, гравитацию и тип решателя, а также сформировать данные для *Stress*-анализа.

– *учитывать конвекцию.* При заливке формы этот пункт не задействован. Алгоритм учета конвекции начинает работать только после заполнения формы. Конвекция не рассчитывается в областях с долей жидкой фазы меньше порога текучести;

– *учитывать прилипание расплава к твердой стенке.* Этот параметр начинает учитываться (если отмечено) как только доля жидкой фазы вблизи

стенки достигает порога текучести, при этом тангенциальные составляющие скорости становятся равными нулю;

– *формирование данных для Stress-анализа (анализ напряжений)*.

При использовании данного параметра предусмотрено два варианта дальнейшей работы:

а) **строка отмечена галочкой**. При завершении работы модуля «НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ», проверяется наличие данных по механическим свойствам для сплавов и материалов формы, назначенных в литейную модель. Если механические свойства не найдены, то выдается информационное сообщение. Вместе с файлом паспорта для отливки создается файл с расширением *.str для дальнейшей работы с модулем «АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ»;

б) **строка не отмечена галочкой**. Проверка наличия данных по механическим свойствам не выполняется. Файл, с расширением *.str, не создается. В дальнейшем, при запуске модуля «АНАЛИЗ НАПРЯЖЕНИЙ» получите сообщение, говорящее, что файл с расширением *.str найден. Никакой расчет напряжений на этой отливке не возможен;

– *тип решателя*. Применяется две схемы решателя:

а) **Решатель 0** использует наиболее устойчивую, но менее точную схему решения;

б) **Решатель 1** это аналог решателей, использованных в версиях 2.72 и 2.5. Единственное различие с теми версиями это выбор шага по времени.

Смена решателя приводит к смене вычислительной схемы решения уравнения теплопроводности. Вычислительная схема решения уравнений гидродинамики не зависит от выбора решателя. Шаги расчета по времени и время, затраченное на моделирование, будут отличаться при выборе разных решателей;

– *влияние гравитации*. Предоставлена возможность для настройки влияния гравитации на распределение усадки.

А в т о С о х р а н е н и е. Для того, чтобы задать автосохранение, необходимо отметить мышкой критерии для автоматического сохранения результатов вычислений в паспорт отливки.

АвтоСохранение включает в себя два параметра: «КРИТЕРИИ» и «ДАННЫЕ».

Для того, чтобы расчетные поля были записаны в паспорт отливки при выполнении заданных критериев автосохранения, необходимо их отметить галочкой.

3D импорт. Для связи с системами геометрического моделирования в пакете LVMFlow имеется конвертор (модуль «3D ИМПОРТ»), преобразующий файлы формата *.stl во внутренний формат LVMFlow. Конвертор также выполняет и следующие функции:

1. изменение ориентации отливки в пространстве. В процессе отладки технологии бывает необходимо менять ориентацию отливки относительно поля тяжести. Для поворота отливки предусмотрены два варианта:

– числовое задание углов Эйлера;
– вращение отливки при помощи устройства «мышь» с визуальным контролем за ее ориентацией;

2. масштабирование геометрического образа отливки. 3D импорта позволяет изменить масштаб геометрического образа отливки посредством выбора системы единиц измерения (мм, см, дюймы,...);

3. сборка конструкции из геометрических образов, хранящихся в различных файлах. Например, имея в отдельных файлах геометрию отливок, литниково-питающих систем, прибылей, можно реализовать различные компоновки элементов и создавать различные конструкции;

4. задание цветов телам отливки. Цвета вводятся для последующего (в модуле **«НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ»**) назначения материалов телам отливки.

Начальные установки. Файлы, подготовленные модулем **«КОНВЕРТОР»**, могут быть загружены модулем **«НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ»**.

В модуле **«НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ»** задаются материалы литейной конфигурации, начальные значения теплофизических параметров, технологическая оснастка, формируется разностная сетка, создается или редактируется существующий паспорт для сохранения результатов моделирования.

Доступные действия в модуле: открытие файла с геометрией отливки; задание сетки; редактирование сетки; задание симметрии; функция изменения; вращение отливки; граничные условия; материалы формы; выбор вида отливки; задание литниковых точек; задание питающих точек; задание датчиков; теплоперенос на границе; задание покрытий; построение оболочки; задание материалов; просмотр Базы данных; каналы нагрева/охлаждения; задание каналов.

Формирование сетки. В процессе моделирования все расчеты выполняются на разностной сетке, накладываемой на отливку. Для задания сетки нажмите кнопку **«СОЗДАТЬ СЕТЬ»**.

При задании сетки определяется размер элементов в моделировании и задается размер формы. От заданного количества элементов разностной сетки зависит точность вычислений при моделировании, время моделирования и детальность отображения отливки.

Для симметричных отливок для экономии времени счета и требуемой памяти можно промоделировать только половину отливки, если задать плоскость симметрии. Для задания плоскости симметрии необходимо:

– установить сечение отливки, которое должно быть плоскостью симметрии;

– открыть окно **«ПОСТРОИТЬ СЕТКУ»**;

– выбрать закладку **«УСТАНОВИТЬ»** в строке **«УСТАНОВИТЬ ТЕКУЩЕЕ СЕЧЕНИЕ КАК ПЛ. СИММЕТРИИ»**

– нажать кнопки «**ПРИМЕНИТЬ**» и «**ДА**» в нижней части окна.

Разностная сетка должна быть достаточно плотной для обеспечения адекватных результатов в областях, где отливка имеет минимальную толщину. Не допускается использование сети с ячейками, превышающими по размерам толщину самой тонкой стенки отливки. Для обеспечения питания металлом самая тонкая стенка отливки должна состоять как минимум из трех ячеек. После задания числа ячеек нажмите кнопку «**ПРИМЕНИТЬ**» в нижней части окна, тогда в информационных строках высветится уточненная величина необходимой памяти и вычисленное количество узлов отливки.

В разделе «**УСТАНОВКА**» можно просмотреть справочную информацию о том, какое количество узлов сети можно задавать, т.к. превышение рекомендуемых значений разработчиками программы может вызвать большие проблемы.

Для изменения разностной сетки необходимо нажать кнопку «**СОЗДАТЬ СЕТЬ И ЗАДАЙТЕ ДРУГУЮ СЕТЬ**».

Наложение сетки на сечение отливки (ВКЛ/ВЫКЛ). Для просмотра сечения отливки с наложенной разностной сеткой, щелкните показанную выше кнопку. Если после нажатия кнопки сетка еще не видна, щелкните правой кнопкой мыши на картинке отливки, и воспользуйтесь функцией «**ОКНО**» (**ZOOM**) для увеличения картинки. Эта опция применима только на поле «**СЕТКА**» (*Mesh*).

Желательно начинать работу с достаточно грубой сети, при вычислениях на которой не требуется много времени для получения результатов. Практически двух ячеек в самом тонком сечении бывает в большинстве случаев, достаточно для выдачи приемлемых результатов. Затем задается другая более плотная сетка для уточнения результатов.

Граничные условия. Для установки или просмотра граничных условий нажмите кнопку «**СОЗДАТЬ СЕТЬ**» верхней панели инструментов.

Нажмите закладку «**ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ**» в появившемся диалоговом окне.

Различные слои, для которых вы задаете граничные условия, строятся следующим образом: XU нижн. Например имеет слой 0 в Z направлении и XU верх. имеет максимальный слой в Z направлении. Задание граничных условий -это способ управления некоторыми параметрами. Возможные граничные условия перечислены ниже:

– постоянная температура. Применяется, когда на поверхности поддерживается постоянная температура. При этом подразумевается, что это начальная температура бокса;

– плоскость симметрии. Применяется для симметричных объектов, где достаточно смоделировать только часть объекта. Тепловой поток через эту поверхность равен нулю;

– нормальные условия. Применяется, когда расчетная область представляет собой только часть формы с отливкой. Моделируется тепловой

поток через эту поверхность с «отрезанной» частью.

Необходимо отметить, что граничное условие «ИЗЛУЧЕНИЕ» в сплывающем меню применяется при использовании открытых питателей. В этом случае поверхность граничит с воздухом, и теплообмен происходит путем излучения и конвекции.

М а т е р и а л ы ф о р м ы. Чтобы высветить список материалов формы нажмите закладку «**ФОРМА**» боковой панели инструментов. Для перемещения по списку материалов формы используйте клавиши «**UP**» и «**DOWN**» или мышь.

Чтобы высветить изометрическую модель необходимого материала формы отметьте его галочкой в списке материалов и установите «**ИЗОМЕТРИЧЕСКИЙ**» вид отливки.

Для установки или замены материала формы смотрите следующий раздел.

З а д а н и е м а т е р и а л о в. Для задания или замены сплава или материала формы щелкните на нем левой кнопкой мыши (для подсветки) и воспользуйтесь одним из следующих трех способов:

- дважды щелкните на названии материала левой кнопкой мыши;
- нажмите кнопку «**УСТАНОВИТЬ МАТЕРИАЛ**» верхней панели инструментов.

Кнопки «**БАЗА ДАННЫХ**», «**УСТАНОВИТЬ МАТЕРИАЛ**» находятся на верхней панели инструментов.

- выберите команду меню «**СЕТКА**» и подкоманду меню «**УСТАНОВИТЬ МАТЕРИАЛ**».

Во всех случаях будет высвечено одно из следующих диалоговых окон.

Для сплавов в модуле «**ТЕСТ**» вычисляется параметр «**Е-СТЕПЕНЬ КВАЗИРАВНОВЕСНОСТИ**», характеризующий степень равновесности концентрации примеси в твердой фазе по отношению к концентрации примеси в расплаве, и изменяющийся в пределах от 0 до 1.

Если $E = 1$ – концентрация примеси в твердой фазе находится в равновесии с концентрацией примеси в жидкой фазе и процесс кристаллизации является равновесным. Кристаллизация заканчивается при температуре равновесного солидуса.

Если $E = 0$ – концентрация примеси только в выделяющейся твердой фазе находится в равновесии с расплавом, т.е. полностью пренебрегается диффузией примеси в твердой фазе. В таком случае оказывается, что любая кристаллизация заканчивается при температуре эвтектики.

Промежуточные значения E соответствуют некоторому учету диффузии примесей в твердой фазе. Кристаллизация реальных сплавов происходит согласно промежуточной модели. Кристаллизация заканчивается при температуре выше эвтектики и ниже температуры равновесного солидуса.

От значения E будет зависеть квазиравновесный солидус (чем меньше E , тем ниже квазиравновесный солидус). Значение T_{sol} , показываемое в

диалоговых окнах, является равновесным солидусом и соответствует $E = 1$.

Выберите необходимый материал и задайте для него запрошенные параметры. Для замены нажмите кнопку «ОК» этого же окна. Для отказа от замены материала нажмите кнопку «ОТМЕНА».

Для расчета объема и массы различных компонентов модели выберите команду меню «СЕТКА» и подкоманду меню «ОБЪЕМЫ».

Задание литниковых точек. Функция «Литниковая точка» используется для маркировки областей через которые металл поступает в полость формы. Литниковые точки можно задавать как на границе бокса (расчетной области) так и внутри бокса «на границе ОТЛИВКА-ФОРМА». По умолчанию маркируется вся замкнутая область в сечении, где установлена литниковая точка. Желательно располагать литниковую точку в центре замкнутой области, поскольку при моделировании течения, струя будет формироваться вокруг этой точки.

Для задания литниковых точек необходимо выполнить следующие действия:

– нажмите кнопку «ЛИТНИКОВЫЕ ТОЧКИ» на панели инструментов. На экране появится диалоговое окно для задания литниковых точек;

– выведите сечение отливки в режиме вывода отливки «СЕЧЕНИЕ» где должна быть установлена литниковая точка;

– задайте литниковую точку. Предлагаются два способа задания литниковых точек:

а) введите координаты литниковой точки с клавиатуры в поля ввода диалогового окна, затем нажмите кнопку «ДОБАВИТЬ» того же окна для ввода новой точки в список литниковых точек;

б) укажите мышью положение литниковой точки на выбранном сечении. При этом необходимо нажать клавишу «SHIFT» и щелкнуть левой кнопкой мыши.

– выберите литниковую область, центром которой является литниковая точка, и задайте ее размеры:

а) размеры a и b прямоугольной области;

б) диаметр d круглого сечения;

в) задается вся замкнутая область вокруг центральной точки.

– после изменения литниковой области и/или задания ее размеров нажмите кнопку «ИЗМЕНИТЬ» для того, чтобы увидеть отображение сделанных изменений в таблице со списком литниковых точек.

На сечении отливки литниковые области изображаются стрелками. Текущая литниковая область имеет красный цвет.

– для удаления литниковой точки выделите ее в списке и нажмите кнопку «УДАЛИТЬ» диалогового окна.

Литниковая область выбранной формы строится в материале формы, примыкающем к отливке. Если литник был задан на границе бокса, тогда ничего не достраивается, вся замкнутая область вокруг указанной точки

маркируется как литниковая, форма струи задается по выбору типа литья в любом модуле моделирования течения.

Задание питающих точек. Функция **«ПИТАЮЩАЯ ТОЧКА»** используется для имитации питания тела отливки металлом за счет частей литниково-питающей системы, находящихся за пределами бокса, или для специальных технологий, использующих доливку металла. Эта функция работает после окончания заливки во время затвердевания. К сожалению, в настоящее время не удастся учесть в полной мере процесс усадки металла и деформации формы при затвердевании. И поэтому максимальную величину питания или доливки мы полагаем равной усадке металла при затвердевании.

Для задания питающие точки установите необходимое поперечное сечение отливки и нажмите кнопку **«ПИТАЮЩАЯ ТОЧКА»** на панели инструментов. Воспользуйтесь одним из двух способов задания точки:

– введите координаты питающей точки непосредственно в высвеченном диалоговом окне;

– укажите мышью положение питающей точки на выбранном сечении и нажмите клавишу **«SHIFT»** и щелкните левой кнопкой мыши».

Координаты заданных питающих точек отображаются в диалоговом окне. Текущая питающая точка имеет красный цвет.

Для удаления ненужной питающей точки установите ее текущей и нажмите кнопку **«УДАЛИТЬ»** диалогового окна.

В диалоговом окне под координатами точек питания высвечивается поле **«ПАРАМЕТРЫ ПИТАТЕЛЯ»**. Для моделирования питания существуют три функции. Выберите подходящую функцию питания для каждой заданной питающей точки:

– непрерывное питание. Эта функция питания выбирается, если жидкое ядро металла с долей жидкой фазы больше Порога текучести содержит питающую точку, то усадка металла в этом ядре компенсируется питанием, поступающим металлом через питающую точку;

– **ограниченное время питания** – питание жидкого ядра, содержащего питающую точку, будет поддерживаться только заданное время (сек) от конца заливки;

– **ограниченная масса питания** – питание жидкого ядра, содержащего питающую точку, будут поддерживаться только до тех пор, пока масса металла для питания не превысит заданную массу.

Задание датчиков. Задание датчиков позволяет в процессе моделирования заливки и затвердевания отслеживать поведение расчетных полей (скорости, давления, температуры, скорости охлаждения, доли жидкой фазы) в различных областях отливки. Датчики можно задавать в отливке, в форме и в любом другом материале, включенном в моделирование. После моделирования, при записи результатов на датчиках в паспорт отливки, Вы можете сравнить записи датчиков на реальных отливках со смоделированными временными кривыми расчетных полей.

Для задания датчика установите необходимое поперечное сечение и нажмите кнопку «**ДАТЧИКИ**» панели инструментов.

Можно ввести координаты датчика непосредственно в появившемся диалоговом окне. Другой способ задания датчиков – это указание положения датчика на сечении мышью и нажатие одновременно клавишу «**SHIFT**» и щелчок левой кнопкой мыши. Координаты введенного датчика появятся в диалоговом окне. На сечении отливки датчики отображаются кружками со стрелками. Номер текущего датчика выделен подсветкой в списке и на сечении отливки датчик показан красным цветом. Для удаления ненужного датчика щелкните левой кнопкой мыши на его номере (для выделения номера подсветкой) и затем нажмите кнопку «**УДАЛИТЬ**». Для сохранения сделанных изменений необходимо нажать кнопку «**ОК**», для отказа от сделанных изменений – кнопку «**ОТМЕНА**».

Задание покрытий. Функция покрытия – это способ задания покрытий между отливкой и другими материалами. Эту функцию также можно использовать для задания значения теплопроводности между различными материалами.

Для того чтобы вызвать окно «**ЗАДАНИЕ ПРОТИВОПРИГАРНОГО ПОКРЫТИЯ**», нажмите кнопку «**ПОКРЫТИЕ**» на панели инструментов и введите запрошенные данные в высвеченное диалоговое окно.

Красочные покрытия можно задавать на каждой границе сплав–материал формы.

Построение оболочки. Оболочковые формы, используемые в литейном процессе, не должны создаваться в САД-системе. Оболочки для оболочковых форм можно задавать непосредственно в *LVMFlow*. Для этого нужно просто ввести толщину оболочки и указать тело, вокруг которого она будет создаваться. Если созданная оболочка отвечает поставленным требованиям, тогда выберите материал для оболочки из «**БАЗЫ ДАННЫХ**».

Для начала построения оболочки нажмите кнопку «**ОБОЛОЧКА**» на панели инструментов.

Окно может быть и пустым, если оболочки еще не созданы. Кнопки окна работают следующим образом:

- «**ДОБАВИТЬ**» – построение новой оболочки;
- «**ИЗМЕНИТЬ**» – редактирование оболочки, выделенной подсветкой;
- «**УДАЛИТЬ**» – удаление выделенной оболочки. Следует отметить, что все оболочки, связанные с удаленной оболочкой, будут также удалены;
- «**ВОССТАНОВИТЬ**» – восстановление всех, показанных оболочек, на момент открытия диалога «Оболочки».

Нажатие любой из вышеприведенных кнопок открывает второе диалоговое окно.

Отметьте галочкой в верхнем списке материалы, которые будут окружены оболочкой. В нижнем списке появятся материалы, за счет которых оболочка может быть создана. В нижнем списке выделите подсветкой

материал, который будет замещен оболочкой, и введите значение для толщины оболочки. При нажатии кнопки «ОК» заданная оболочка будет создана. Если введенная оболочка не видна на сечении отливки даже при увеличении, нажмите кнопку «ИЗМЕНИТЬ» первого диалогового окна и введите большее значение для толщины оболочки.

Последняя введенная оболочка замещает все ранее введенные оболочки при их пересечениях.

П р о с м о т р Б а з ы д а н н ы х. Для просмотра теплофизических данных сплавов и материалов формы, хранящихся в «БАЗЕ ДАННЫХ» или для замены при необходимости сплава отливки или материала формы:

- нажмите кнопку «БАЗА ДАННЫХ» верхней панели инструментов;
- выберите команду меню «Модель» и подкоманду меню «БАЗА ДАННЫХ»;
- нажмите закладку «БАНК» боковой панели инструментов.

Кнопки «БАЗА ДАННЫХ» и «ЗАМЕНИТЬ МАТЕРИАЛ» находятся на верхней панели инструментов.

Для работы с Базой Данных необходимо выполнить следующие действия. Установите из выпадающих списков, появившихся на экране справа, необходимый класс сплавов или материалов формы и сплав/материал формы из этого класса. Выберите теплофизическое свойство из списка имеющихся данных для просмотра. Отметьте также данные для вывода: экспериментальные или экстраполированные. График температурной зависимости выбранного свойства будет высвечен в рабочем окне.

Возможен одновременный, в нескольких окнах, просмотр имеющейся информации в «БАЗЕ ДАННЫХ» по выбранному сплаву. Информация о сплаве и материалах формы, входящих в модель отливки, высвечивается после задания сетки. Для замены текущего (подсвеченного) материала модели отливки на выбранный материал или сплав из «БАЗЫ ДАННЫХ» нажмите кнопку «ЗАМЕНИТЬ НА».

З а д а н и е к а н а л о в. Для задания каналов установите поле «СЕТКА» и режим вывода «СЕЧЕНИЕ». Нажмите кнопку «КАНАЛЫ» панели инструментов. Появится диалоговое окно со списком введенных каналов и их параметров. Введенные 3D каналы будут показаны контурами на поле «СЕТКА».

Для построения геометрии 3D канала нажмите кнопку «НОВЫЙ, 3D». На граничной поверхности расчетной области щелкните левой кнопкой мыши при нажатой клавише «SHIFT» на начало канала, принадлежащее текущему контуру. Оставшиеся узлы канала будут построены автоматически. Программа проверяет, чтобы начало канала находилось внутри контура задаваемого канала. Теперь можно сохранить канал в таком виде или отредактировать его как обычный одномерный канал, описанный ниже.

Для задания параметров канала нажмите кнопку «ПАРАМЕТРЫ». Для каналов необходимо задать следующие параметры:

- «**НОМЕР**» текущего канала;
- «**ТИП**» канала: ТЭН, Холодильник. По умолчанию тип канала не определен и это поле списка может быть пустым;
- «**ДЛИНА**» канала рассчитывается после построения канала, т.е. будет построен его одномерный аналог;
- в «**3D КОНТУР**» поле высвечивается надпись, которая показывает, что одномерный аналог, согласно 3D контуру канала, построен или не построен. Для каналов, построенных без вспомогательных 3D контуров это поле пустое;
- «**ДИАМЕТР**» канала. Этот параметр требуется только для моделирования холодильников. При создании 3D каналов он рассчитывается автоматически, исходя из длины и площади поверхности канала, и может корректироваться при задании параметров.

– «**ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ**» задается только для каналов охлаждения и по умолчанию это поле пустое. Для задания теплоносителя необходимо сделать следующее. Выберите «**ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ**» из предложенного списка. Содержание списка сформировано из материалов, введенных в «**БАЗУ ДАННЫХ**» в класс «**МАТЕРИАЛЫ ФОРМ**» с типом «**ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ**» (в списке материалов они показаны голубым цветом).

Для построения одномерного объекта вдоль заданного контура, укажите на требуемый контур в списке (одновременно он будет показан красным цветом на сечении сетки) и нажмите кнопку «**НОВЫЙ, 3D**» или кнопку «**ИЗМЕНИТЬ**» для корректировки канала.

Для построения одномерного канала без вспомогательного контура нажмите кнопку «**НОВЫЙ**». Одномерный канал представляет собой набор узлов, связанных друг с другом линиями. Узлы канала вводятся на сечении сетки. Можно ввести координаты узлов канала непосредственно в высвеченном диалоговом окне. Другой способ использовать мышь. Нажмите кнопку «**SHIFT**» и щелкните левой кнопкой мыши для задания узла. Введенные узлы будут показаны в рабочем окне на сечении кружками и списком координат в диалоговом окне. Текущий узел изображается красным цветом. Для удаления канала высветите его в списке и нажмите кнопку «**УДАЛИТЬ**». При этом одномерный канал будет удален из списка, а 3D канал будет отмечен как непостроенный. Непостроенные 3D каналы не записываются ни в паспорт отливки, ни в *SIM* файл.

Программа проверяет, удовлетворяют ли введенные узлы канала следующим условиям:

- канал должен начинаться и кончатся на граничной плоскости;
- канал не должен начинаться и кончатся на плоскости симметрии;
- канал не может лежать на граничной плоскости;
- пересечение каналов не разрешается;
- канал не может проходить через отливку;

- точки канала должны быть внутри бокса;
- не допускается нулевой интервал между узлами канала;
- угол поворота канала должен быть меньше 120 градусов;
- канал не может касаться отливки.

Редактирование введенных узлов одномерного канала проводится следующим образом:

– для удаления ненужного узла канала установите его текущим и нажмите кнопку **«УДАЛИТЬ»** диалогового окна;

– **новый узел канала** вводится после текущего узла. Поэтому, если желательно передвинуть узел канала, то лучше установить его текущим, ввести новый узел с необходимыми координатами и дальше, в случае необходимости, удалить ненужную точку.

– **для сохранения** введенного канала – нажмите кнопку **«ОК»**.

Моделирование заполнения формы. Пакет прикладных программ LVMFlow разработан как практический инструмент технолога-литейщика для анализа процессов заполнения формы и затвердевания. Моделирование течения расплава по литниковой системе показывает последовательность заполнения полости отливки, выявляет процессы, действительно происходящие при заливке, позволяет исследовать влияние различных конструкций литниковых систем на последовательность заполнения формы и образование литейных дефектов, часто порождаемых неподходящей конструкцией литниковой системы.

В LVMFlow можно моделировать заполнение формы двумя способами:

1. Модуль **«МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА»** предназначен для изучения характера течения жидкого металла при заполнении полости отливки. Это подходящий метод для случаев, когда можно пренебречь влиянием теплового потока в форму;

2. **«МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА»** – это моделирование заполнения формы с учетом конвективного и кондуктивного теплообмена. Моделирование останавливается при полностью заполненной форме.

Для непрерывного моделирования, включая также полностью процесс затвердевания вызовите программу **«МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА & ЗАТВЕРДЕВАНИЕ»**.

Доступные действия в модуле: открыть файл для моделирования заполнения; загрузка/запись параметров; начальные установки для моделирования заполнения; задание параметров для заполнения; задание фильтров; задание неметаллических частиц; выполнение расчета заполнения; окончание заливки; запись в паспорт отливки; выполнение расчета; высвечивание расчетных полей; создание контрольной точки; советы по моделированию заполнения.

Начальные установки для моделирования заполнения. Моделирование заполнения начинается с положения в литниковой системе, которое было определено как «литниковая точка». При начале моделирования

затвердевания, система предполагает, что все части литниковой системы от литниковой воронки до отливки заполнены металлом.

Для изучения течения и в литниковой воронке, добавьте небольшой цилиндр как тело в верхней части литниковой воронки. Диаметр цилиндра равен диаметру струи расплава. (PH) – это напор (высота падения струи расплава), определяется как расстояние между уровнем металла в ковше и литниковой точкой.

З а д а н и е п а р а м е т р о в з а л и в к и. Перед выполнением моделирования заполнения необходимо задать параметры заполнения. Выберите команду меню «ПРЕПРОЦЕСС» и подкоманду меню «ПАРАМЕТРЫ ЗАЛИВКИ».

Можно задавать более одной литниковой точки, что означает, что можно заливать форму, используя, например, два ковша. Для каждой литниковой точки задаются свои отдельные параметры заполнения. В верхней части окна диалога «ПАРАМЕТРЫ ЗАЛИВКИ» приводится список литниковых точек моделируемой отливки. Для каждой литниковой точки показаны ее параметры:

– *сечение входа* – площадь сечения (например, в стояке) где расположена литниковая точка. Площадь считается автоматически и показывается для информации;

– *сечение струи* – также автоматически рассчитывается и может быть пересчитано позднее в соответствии с выбранным типом литья и введенными значениями.

В настоящее время в пакете LVMFlow реализовано моделирование нескольких типов литья, часть из которых показана в списке выпадающего меню окна диалога. Всего в программе предусмотрено семь типов литья: литье из ковша; гравитационное литье; гравитационное литье (струя); литье под давлением (время заполнения); литье под давлением (поток-время); литье под давлением (поток-триггеры); литье с противодавлением (под низким давлением).

Для каждого типа литья задаются определенные параметры, необходимые для выполнения моделирования.

Литье из ковша (ковши разливки через днище). Эта функция для использования больших ковшей разливки через днище при производстве, например, стальных отливок. Задача промоделировать изменение потока из ковша, происходящее при изменении высоты расплава в ковше. Уменьшившаяся высота расплава в ковше разливки снизу вызывает уменьшение скорости потока и увеличивает время заполнения.

Основные параметры заливки:

– *диаметр выходного отверстия ковша* – диаметр потока металла, определенный пользователем. Заданное значение не может быть больше максимального диаметра, заданного как *площадь сечения*. Если такое произойдет, то выдается сообщение, что поток металла не соответствует

площади литника;

– **напор** – это эффективная высота давления, которая используется для расчета начального потока металла через сечение литниковой системы, где установлена литниковая точка, т.е. это расстояние с которого идет процесс заполнения. Уровень, до которого расплав может подняться – это положение литниковой точки. Стояк не может быть наполнен выше этого максимального уровня и, таким образом, регулируется входящий поток. Если стояк начинает переполняться, то поток уменьшается;

– **коэффициент сопротивления** – это обычно используемый коэффициент сопротивления течению. Он отражает сопротивление в литниковой системе в направлении выбранной литниковой точки – отливка. Обычно значения выбираются в интервале 0,8-0,9;

– **течение** описывает течение металла в области поперечного сечения, где установлен литник. Значение рассчитывается автоматически или может быть задано как данное значение для подгонки других параметров в процессе заполнения.

Задание временной зависимости входного потока:

– первая точка **нулевое время** не может быть изменена или удалена;
– для того чтобы **добавить новую временную точку** введите новое значение времени и сместите курсор ввода в любое другое поле ввода (например, «ТЕЧЕНИЕ»). Тогда кнопка «ДОБАВИТЬ» станет активной. Нажмите ее. В таблице будет показана новая строка;

– для того чтобы **изменить временную точку** выделите подсветкой нужную строку в таблице ниже. Значения времени и течения из выделенной строки появятся в соответствующих полях ввода. Введите нужные новые значения времени и течения и нажмите кнопку «ИЗМЕНИТЬ»;

– для того чтобы **удалить временную точку**, выделите эту строку в таблице ниже. Нажмите кнопку «УДАЛИТЬ».

Действие кнопок в верхней части окна:

– «ДА» – закрытие окна с сохранением введенных временных точек, показанных в таблице;

– «ОТМЕНА» – закрытие окна и отказ от всех сделанных изменений параметров.

При гравитационном литье скорость течения определяется напором, коэффициентом трения и площадью сечения отливки, содержащего литниковую точку. При заполненной литниковой системе скорость течения является функцией геометрии литниковой системы и отливки также как и конкретных данных по течению расплава сплава.

Ниже перечислены параметры литника для данного способа литья:

– сечение входа;

– **сечение струи** – равно сечению входа.

Параметры, необходимые для моделирования гравитационного литья:

– напор;

- коэффициент сопротивления;
- течение.

Задание временной зависимости входного потока:

- первая точка **нулевое время** не может быть изменена или удалена;
- для того чтобы **добавить новую временную точку** введите новое значение времени и сместите курсор ввода в любое другое поле ввода (например, напор). Тогда кнопка «ДОБАВИТЬ» станет активной, нажмите ее. В таблице будет показана новая строка;

– для того чтобы **изменить временную точку** выделите подсветкой нужную строку в таблице ниже. Значение времени из выделенной строки появятся в поле ввода «ВРЕМЯ». Введите новое значение времени и нажмите кнопку «ИЗМЕНИТЬ»;

– для того чтобы **удалить временную точку**, выделите эту строку в таблице ниже и нажмите кнопку «УДАЛИТЬ»;

– для того чтобы **изменить значение течения** выделите подсветкой строку с этой временной точкой в таблице. Значение течения рассчитывается автоматически по заданному значению параметра «НАПОР». Задайте новое значение для «НАПОРА» и нажмите кнопку «ИЗМЕНИТЬ». Новое пересчитанное значение течения будет показано в таблице.

Действие кнопок в верхней части окна такое же, как при литье из ковша.

Разливка через носок. Параметры, задание которых необходимо для моделирования разливки через носок:

- напор;
- **поток** – значение потока расплава, выходящего из носика ковша;
- **угол $teta$** – угол, образуемый струей металла с нормалью к плоскости входного отверстия (поверхность бокса) литниковой точки;
- **угол Fi** – угол проекции струи металла на оставшуюся плоскость с осью X;
- коэффициент сопротивления;
- **диаметр струи** – средний диаметр падающей струи металла;
- течение.

Параметры, относящиеся к литниковой точке:

- сечение входа;
- **сечение струи** – площадь сечения струи, расположенного перпендикулярно направлению струи, рассчитывается автоматически по заданным значениям потока и углам $Teta$ и Fi .

Задание временной зависимости входного потока:

- первая точка **нулевое время** не может быть изменена или удалена;
- поля ввода «ТЕЧЕНИЕ» и «ДИАМЕТР СТРУИ» связаны друг с другом. Изменение значения одного из них вызывает пересчет значения другого поля при сдвиге курсора ввода. В таблице временных точек показано значение только параметра «ТЕЧЕНИЕ»;

– для того чтобы **добавить новую временную точку** введите новое значение времени и сместите курсор ввода в любое другое активное поле ввода (например, «ТЕЧЕНИЕ»). Тогда кнопка «ДОБАВИТЬ» станет активной, нажмите ее. В таблице будет показана новая строка;

– для того чтобы **изменить временную точку** выделите подсветкой нужную строку в таблице ниже. Значения времени и течения из выделенной строки появятся в соответствующих полях ввода. Введите новые значения времени и течения и нажмите кнопку «ИЗМЕНИТЬ»;

– для того чтобы **удалить временную точку**, выделите эту строку в таблице ниже. Нажмите кнопку «УДАЛИТЬ».

Все выполненные изменения с временными точками будут отображены в таблице.

Действие кнопок в верхней части окна такое же, как при литье из ковша.

Литье под давлением (время заполнения). Для каждой литниковой точки задаются свои отдельные параметры заполнения:

– сечение входа;

– **сечение струи** – рассчитывается автоматически и может быть пересчитано позднее в соответствии с выбранным типом литья и введенными значениями;

– **общее время заполнения** – использование этой опции обозначает общее время заполнения, начиная от литниковой точки;

– значение «ТЕЧЕНИЯ» рассчитывается автоматически как масса отливки, деленная на общее время заполнения;

– **максимальное давление** ($P_{\text{макс}}$) – это максимальное давление, которое может создать машина литья под высоким давлением. По умолчанию выставляется среднее значение из справочника-литейщика. Здесь можно задать максимальное давление конкретной машины литья под давлением. Пока давление в расплаве возле поршня меньше $P_{\text{макс}}$, поршень движется с заданной скоростью. Как только давление превысит $P_{\text{макс}}$ скорость поршня уменьшается таким образом, чтобы среднее давление на поршне не превысило $P_{\text{мах}}$.

Загрузка параметров течения из модуля «LVMSHOT» производится при нажатии кнопок «МАКСИМАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ» и «ОБЩЕЕ ВРЕМЯ ЗАПОЛНЕНИЯ», которые берутся из модуля «LVMSHOT».

Действие кнопок в верхней части окна такое же, как при литье из ковша.

Литье под давлением (поток-триггеры). Для каждой литниковой точки задаются свои отдельные параметры заполнения:

– сечение входа;

– **сечение струи**: рассчитывается автоматически и может быть пересчитано позднее в соответствии с выбранным типом литья и введенными значениями.

При выборе типа литья «**ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**» металл входит в литниковую систему с заданным значением «**ПОТОКА**» (кг/сек). В программе предусмотрена возможность управления потоком расплава. Для этой цели задаются триггеры внутри отливки. В точках-триггерах задаются значения потока и скорости поршня. При прохождении расплавом этих точек-триггеров значение входного потока изменяется в соответствии с заданными значениями.

Задание пространственной зависимости входного потока:

– один триггер, помещенный в ту же точку, что и литниковая точка, обычно задается по умолчанию. Значения потока и скорости поршня, показанные в полях ввода, относятся к этому триггеру;

– для ввода нового триггера установите необходимое сечение отливки в рабочем окне, нажмите клавишу «**SHIFT**» и одновременно щелкните левой кнопкой мыши на сечении сетки или другого поля. Введенный триггер образует новую строку в таблице ниже;

– для изменения или задания «**ПОТОКА**» или «**СКОРОСТИ ПОРШНЯ**» или «**ДИАМЕТРА ПОРШНЯ**» (для первого триггера только), установите подсветку на Триггер в списке и введите новое значение в соответствующее поле ввода. Значение во втором поле (или третьем для первого триггера только) будет автоматически пересчитано при сдвиге курсора ввода. Затем нажмите кнопку «**ИЗМЕНИТЬ**» ниже. Введенные значения отображаются в таблице;

– для удаления триггерной точки нажмите кнопку «**УДАЛИТЬ**»;

– максимальное давление.

Загрузка параметров течения из модуля «**LVMSHOT**» производится при нажатии кнопок «**МАКСИМАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ**», «**ДИАМЕТР ПОРШНЯ**» и «**СКОРОСТЬ ПОРШНЯ ИЗ 2-Й ФАЗЫ**», которые берутся из модуля «**LVMSHOT**» в случае если задана только одна триггерная точка. Если количество триггерных точек больше одной, тогда «**СКОРОСТЬ ПОРШНЯ ИЗ 1-Й ФАЗЫ**», берется для первой триггерной точки и «**СКОРОСТЬ ПОРШНЯ ИЗ 2-Й ФАЗЫ**» берется для второй точки триггера.

Действие кнопок в верхней части окна такое же, как при литье из ковша.

Литье методом противодействия. Объединяющим технологическим признаком литья под регулируемым перепадом газового давления является заливка формы выдавливанием жидкого металла снизу вверх из тигля установки через металлопровод под действием создаваемого в них перепада газового давления.

3. Способ литья вакуумным всасыванием (ЛВВ) основан на прямо противоположном эффекте – устранении противодействия газа в полости формы путем ее вакуумирования и достижения соотношения.

Скорость заполнения форм жидким металлом во всех вышеописанных

способах литья зависит от скорости нарастания (ΔP) во времени.

Заполнение зависит от того как быстро поднимается поверхность металла в форме. Скорость подъема является функцией градиента давления и также зависит от геометрии полости отливки. Поэтому для моделирования важное значение имеет течение в кг/сек во время заполнения. Определенное минимальное давление P_{min} необходимо для подъема металла в металлопроводе до нижней части полости отливки.

В диалоговом окне имеется три группы параметров:

- входные параметры, показанные на белом поле;
- информационные параметры, показанные на сером поле и которые не могут редактироваться;
- временные точки.

Задание входных параметров:

- введите «**ЖЕЛАЕМОЕ ВРЕМЯ ЗАЛИВКИ**»;
- в зависимости от массы отливки, которая показана справа для информации, будет установлен необходимый *средний поток*, равный массе отливки, деленной на желаемое время заливки. Если ввести сначала значение среднего потока тогда желаемое время заливки будет пересчитано;
- введите геометрическую информацию металлопровода.

Задание информационных параметров:

- **P_{min}** – это минимальное противодействие (разница между давлением газа над зеркалом расплава в тигле и в форме), необходимое для подъема расплава в металлопроводе до нижней части полости отливки;
- **P_{fill}** – противодействие (разница между давлением газа над зеркалом расплава в тигле и в форме), необходимое для заполнения полости отливки. Если последнее значение противодействия будет меньше чем P_{fill} , тогда полость отливки не заполнится полностью.

– **V_{min}** – это начальная скорость для заполнения и равна половине среднего потока деленной на площадь сечения металлопровода.

Задание временной зависимости противодействия ($\Delta P = P_T - P_\Phi$) начинается с введения значения временных точек в поля ввода над таблицей. Две временные точки рассчитываются автоматически по заданным и рассчитанным параметрам;

– для *изменения существующей точки* – выделите подсветкой строку для изменения в таблице. Значения времени и противодействия покажутся в полях ввода выше. Введите необходимые новые значения. Нажмите кнопку «**ИЗМЕНИТЬ**»;

– для *удаления существующей точки* – выделите строку для удаления в таблице. Нажмите кнопку «**УДАЛИТЬ**»;

– для *добавления новой точки* введите новое значение в поле «**ВРЕМЯ**». После сдвига курсора ввода кнопка «**ДОБАВИТЬ**» станет активной. Введите новое значение противодействия.

Все выполненные изменения с временными точками отображаются в

таблице. Первую временную точку нельзя удалить.

Действие кнопок в верхней части окна такое же, как при литье из ковша.

З а д а н и е ф и л ь т р о в. Фильтры задаются до начала моделирования заполнения. Воспользуйтесь меню «ПРЕПРОЦЕСС» и выберите команду выпадающего меню «ФИЛЬТРЫ».

На поле сетки установите сечение отливки, где должен быть помещен фильтр. Нажмите клавишу «*SHIFT*» и щелкните левой кнопкой мыши для задания слоя фильтра. Освободите «*SHIFT*» и нажмите кнопку «ДОБАВИТЬ» из диалогового окна.

Координаты центра сечения с заданным фильтром будут показаны в диалоговом окне. Слой с фильтром имеет ярко-голубой цвет.

Фильтр оказывает сопротивление потоку жидкости, проходящему через него, и характеризуется общим сопротивлением: *коэффициентом фильтра* (R , м/сек), который определяет скорость стационарного потока жидкости через фильтр при заданном перепаде давления на фильтре (перепад давления, вязкость жидкости).

Например, если $R = 1$ м/с, тогда при перепаде давления 1 кПа и плотности расплава 8000 кг/м³, скорость стационарного течения жидкости через фильтр будет $V = 0,125$ м/с.

З а д а н и е н е м е т а л л и ч е с к и х ч а с т и ц. Неметаллические включения (например, пузырьки воздуха, частицы шлака) различных размеров и плотностей можно ввести в моделирование во всех модулях, моделирующих заполнение, и проследить их поведение во время заполнения формы. С помощью этого способа можно, например, увидеть места скопления частиц определенных размеров и плотностей.

Для задания частиц выберите меню «ПРЕПРОЦЕСС» и команду выпадающего меню «ШЛАКОВЫЕ ЧАСТИЦЫ» в любой момент процесса моделирования заполнения. Появится диалоговое окно со списком введенных частиц и их параметров. Задайте требуемые параметры для вновь вводимой частицы. Данные по введенным частицам высвечиваются в списке диалогового окна.

Параметры, которые нужно задать для частиц:

- D – диаметр частиц;
- R – плотность частицы. В окне по умолчанию, высвечивается плотность расплава;
- *цвет*. Можно задать отдельный цвет для каждой частицы или задать один и тот же цвет для идентичных частиц;
- *время между выпуском частиц* – это время, которое действует на всю группу заданных частиц. По истечении этого интервала времени количество частиц удваивается.

Для задания частицы установите нужное сечение отливки в режиме вывода «СЕЧЕНИЕ» (для увеличения сечения воспользуйтесь функцией

«**ZOOM**») и после этого, для указания положения частицы шлака нажмите клавишу «**SHIFT**» и щелкните левую кнопку мыши.

Для того чтобы увидеть движение частиц выберите меню «**ПРЕПРОЦЕСС**» и команду выпадающего меню «**ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ**».

Выполнение расчета заполнения. Для начала моделирования заполнения нажмите кнопку «**ПЕСОЧНЫЕ ЧАСЫ**» на верхней панели инструментов, для остановки моделирования освободите эту кнопку. При моделировании заполнения рассчитываются дополнительные поля «**ДАВЛЕНИЕ**» и «**СКОРОСТЬ**», которые также могут выводиться на экран. Для просмотра направлений скорости нажмите кнопку «**ВКЛ/ВЫКЛ СТРЕЛКИ**» на верхней панели инструментов.

Поле стрелок одинаковой длины, показывающих направления скорости, будет наложено на высвеченное поле. Численные значения скоростей можно определить по цветовой шкале и с помощью индикации мышью. Для изменения плотности стрелок выберите команду меню «**РЕДАКТИРОВАТЬ**» и подкоманду меню «**КОЭФФИЦИЕНТ СТРЕЛОК**».

Стрелки скорости будут нарисованы через каждые n узлов сети. Число узлов сетки (n) задается пользователем.

Следить за заполнением формы можно также путем наблюдения за графиком течения, который соответствует потоку металла. Для этого выберите команду меню «**ГРАФИКА**» и подкоманду меню «**ТЕЧЕНИЕ**» для наблюдения за графиком.

Поток расплава это есть массовая скорость, с которой металл входит в полость отливки. По значению потока можно оценить, когда металл входит в полость отливки, а когда конфигурация отливки препятствует проникновению металла в отливку.

Запись в паспорт отливки. Паспорт отливки создается в конце работы модуля «**НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ**», после задания технологических параметров моделирования и выбора начальных условий. На запрос системы по команде «**ЗАПИСАТЬ SIM ФАЙЛ**» введите номер паспорта, добавляемый к названию отливки. В паспорт записываются промежуточные результаты расчета (автоматически или при нажатии пользователем кнопки записи) в процессе моделирования, с целью последующего просмотра их и/или сохранения в архиве.

Для записи данных в паспорт нажмите кнопку «**ЗАПИСЬ В ПАСПОРТ**» верхней панели инструментов или выберите подкоманду меню «**ЗАПИСАТЬ В ПАСПОРТ**» команды меню «**ПОЛЕ**».

Что будет записано в паспорт отливки зависит от высвеченной картинке:

– *изометрическая картинка* выбранного поля. Все 3D поле будет записано в паспорт отливки;

– *сечение* выбранного поля. В паспорт отливки будет записана плоскость сечения выбранного поля.

Для автоматической записи в паспорт задайте параметры в диалоговом окне, которое появляется по команде меню «**МОДЕЛИРОВАНИЕ**» подкоманда «**АВТОЗАПИСЬ**».

Выполнение расчета. Для начала/продолжения расчета нажмите кнопку с песочными часами на панели инструментов. Для прерывания счета освободите эту кнопку.

Теплофизические данные по сплаву отливки высвечиваются в процессе счета на экране сбоку, а ниже – текущие данные по процессу моделирования.

Критерий автоматической остановки вычислений (критерий Автостопа). В программе можно задать параметр автоматической остановки вычислений. Воспользуйтесь командой меню «**МОДЕЛИРОВАНИЕ**», затем выберите подкоманду меню «**АВТОСТОП**». В появившемся диалоговом окне, отметьте параметр, который вы хотите использовать как критерий остановки. По умолчанию, если критерий остановки не задан, программа останавливается при нулевом значении жидкой фазы. Нажмите кнопку «**ОК**» для подтверждения вашего выбора.

С помощью функции автоматической остановки вы можете остановить моделирование в пакете *LVMFlow* по заданным временным интервалам или по заполненному объему формы. В модуле «**ТЕЧЕНИЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИЕ**», как критерий остановки, можно задавать также «**ЖИДКУЮ ФАЗУ**» или «**МАКСИМАЛЬНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ**».

Автоматическая запись SIM файла. С помощью этой функции можно остановить моделирование на различных этапах, заморозить его, сохранить файл под другим именем и затем продолжить моделирование и сохранение результатов. Файл можно сохранить либо по времени, либо по объему жидкой фазы, или по объему заполнения формы. Если объем установлен на 10 % это не даст вам каких-либо точных шагов, поскольку моделирование не будет таким точным. Существуют способы улучшения этого путем уменьшения временных шагов.

Автоматическое моделирование. Откройте *SIM* файл для первой отливки и задайте параметры «**АВТОСТОП**» и «**АВТОЗАПИСЬ**». Отметьте отливки, для которых собираетесь выполнить автомоделирование. Все отливки получают одни и те же, заданные параметры «автостоп» и «**АВТОЗАПИСЬ**». Это очень полезная функция, когда важно протестировать различные установки для одной и той же отливки, например различные питатели или различные температуры.

Окно, закрывается тогда, когда устанавливается новый файл для автомоделирования. Если вы откроете его снова, то сможете задать следующий файл. При этом первый файл не следует добавлять в список.

Автомоделирование начинается, если выберете «**АВТОМОДЕЛИРОВАНИЕ**» из меню «**МОДЕЛИРОВАНИЕ**».

Автомоделирование при моделировании течения слегка отличается от автоматизирования при моделировании затвердевания. Вы должны открывать каждый *SIM* файл индивидуально, для того чтобы задать характерные параметры течения для каждого файла отливки. Параметры течения должны быть заданы для каждой работы отдельно. Вы должны затем позволить программе сосчитать один шаг, остановить моделирование и затем сохранить файл. Это сохраняет параметры в *SIM* файл. После того как параметры сохранены во всех *SIM* файлах отливок, Вы можете выполнять Автомоделирование. Выберите команду меню «**МОДЕЛИРОВАТЬ**», подкоманду «**АВТОМОДЕЛИРОВАНИЕ**» и отметьте файлы, что сохранили предварительно. Используйте этот же метод, если хотите выполнить автоматизирование в модулях «**ТЕЧЕНИЕ**» и «**КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ**».

Высвечивание расчетных полей. Для наблюдения за процессом моделирования вы можете вывести на экран любое из расчетных полей. Откройте список полей на панели инструментов. Отметьте поле для вывода и нажмите левую кнопку мыши.

Возможные способы высвечивания расчетного поля вы найдете по команде меню «**ПОЛЕ**».

На верхней панели инструментов расположены следующие кнопки: «**СЕЧЕНИЕ ПОЛЯ**», «**ИЗОМЕТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ**», «**ПРОЗРАЧНАЯ МОДЕЛЬ**».

Откройте еще окна, воспользовавшись меню «**ПОЛЕ**» и «**НОВОЕ ОКНО**». Для одновременного просмотра всех открытых окон воспользуйтесь меню «**ОКНО**» и подкомандой «**TILE**». Теперь, установите необходимые расчетные поля и различные сечения в каждом окне. Все кнопки панели инструментов действуют только на активное окно. Для активизации окна щелкните на нем левой кнопкой мыши.

Установить все сечения как активное. Вы можете высвечивать различные поля и сечения полей в открытых окнах. Кнопка «**УСТАНОВИТЬ ВСЕ СЕЧЕНИЯ КАК АКТИВНОЕ**» панели инструментов позволяет вам высветить одно и то же сечение во всех открытых окнах.

Это будет сечение, высвеченное в активном окне на момент нажатия указанной кнопки.

Советы по моделированию заполнения формы.

Векторы скорости. Наблюдение поля скоростей позволяет выявить области, в которых возможны слишком большие скорости и турбулентность. Для сплавов, склонных к окислению, рекомендуется использовать в литниках скорости меньше 0,5 м/с.

Распределение температуры. При использовании модулей «**FLOW**» и «**FLOW&SOLID**» можно наблюдать охлаждение металла во время заполнения формы. Здесь можно протестировать какие скорости металла вызывают появление «холодных спаев». При переключении на поле жидкой фазы мож-

но увидеть начало затвердевания области, что может вызвать «холодный спай».

2D/3D массовое течение. Опасность струйного потока, который может расщепляться или огибать стержни может быть обнаружена при наблюдении массового течения. Также можно наблюдать опасность эрозии.

Последнее заполнение. Для дизайна вентиляционной системы формы вы должны знать места, заполняемые металлом последними. Прозрачная 3D модель будет здесь очень полезна.

Картинки моделирования затвердевания после заполнения формы. Для лучшего наблюдения за процессом затвердевания, откройте несколько окон одновременно.

Кристаллизация. Вычисления затвердевания выполняются в модуле «КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ». При моделировании учитываются фазовые переходы и гравитация. Поэтому убедитесь, что отливка правильно ориентирована в гравитационном направлении. Заполнение формы жидким металлом считается мгновенным. Файлы, рассчитанные этим модулем, можно просмотреть позднее модулем «ПРОСМОТР» или распечатать при необходимости.

Доступные действия в модуле: открыть файл с геометрией отливки; загрузка/запись параметров; автосохранение в паспорт отливки; запись в паспорт отливки; задание модели усадки; описание процента усадки; граничные условия на литнике; задание параметров каналов; выполнение расчета; расчет теплового модуля; расчет критерия Niyama; автомоделирование; высвечивание расчетных полей; циклическое моделирование; просмотр значений на датчиках; расчет размера питателя; сохранение контрольной точки.

Описание процента усадки. Усадка, представленная на поле «3DS», определяет **вероятностное распределение** усадочных дефектов. Например, 10 % усадки в данном месте означает, что в любом достаточно малом объеме в окрестности этого места 10 % объема занимает пустота и 90 % металл. При этом ничего нельзя сказать о том, в каком виде присутствует эта пустота: в виде одной сплошной поры или многих маленьких, т.е. о размерах пор ничего не говорится. Поэтому в рамках этой модели нельзя ставить вопрос о размерах пор, которые можно моделировать. В каком-то приближении усадку можно связывать с плотностью металла в данном месте.

Граничные условия на литнике. Существует возможность задавать отдельные граничные условия для каждого литника. Четыре граничных условия для литников аналогичны граничным условиям для бокса:

– **постоянная температура** – литник покрыт некоторым материалом температуру которого следует задать (например, этот материал может работать холодильником, если задавать низкую температуру);

– **теплоизоляция** означает отсутствие теплового потока. Литник покрыт очень хорошим теплоизоляционным материалом; тепловой поток с поверхности расплава отсутствует;

– **нормальные условия** – теплоотвод с поверхности в бесконечную среду с тем же материалом;

– **теплоизлучение в среду**. Если среда вакуум то теплоизлучение, если среда газ, то теплоизлучение плюс конвективный теплообмен.

Использование различных граничных условий на литниках поможет настроить литниковую систему на лучшие технологические решения.

Выполнение расчета. Для начала/продолжения моделирования нажмите кнопку с песочными часами на панели инструментов. Для остановки моделирования освободите эту кнопку.

При моделировании теплофизические данные по сплаву отливки и текущие данные процесса высвечиваются на экране сбоку.

Расчет теплового модуля. Параметр «**МОДУЛЬ**» применяется для оценки эффективности работы литниково-питающей системы и прибылей. Геометрический модуль («**GM**», см) для тела – отношение объема тела к его поверхности; для сечения – это отношение площади сечения к его периметру. «**GM**» легко вычисляется для тел, которые могут быть заданы аналитически. Рассчитать геометрический модуль для отливки произвольной формы, тем более для ее частей невозможно, однако, в некотором приближении можно считать, что геометрический модуль равен модулю термическому, а величина термического модуля пропорциональна корню квадратному от времени кристаллизации. В LVMFlow вычисляется время затвердевания каждого узла отливки, на основе которого определяется термический модуль соответствующей точки. Если Ваши технологические расчеты основаны на понятии («**GM**») модуль, то можно проектировать технологию, используя при этом полученные данные.

Поле «**МОДУЛЬ**» расположено в списке расчетных полей. Оно доступно для просмотра после завершения моделирования затвердевания. Поле показывается в 2D или 3D отображении с возможностями индикации.

Расчет критерия Niyama. Критерий **Niyama** используется для предсказания микропористости и усадочной пористости, достаточно больших для обнаружения их методом радиографического тестирования. Показано в публикациях, что этот критерий является надежным предсказателем пористости для пластинчатых отливок, но в случае отливок со сложной геометрией, этим критерием нужно пользоваться с особой осторожностью, поскольку многие факторы, влияющие на образование усадочной пористости, не учитываются критерием Niyama. Критерий Niyama определяется как G/\sqrt{T} , где G это температурный градиент в К/мм и T скорость охлаждения в К/сек. Обе величины оцениваются в конце затвердевания. Конец затвердевания можно определить как константу внутри пакета, а можно сделать параметром, доступным для редактирования

пользователем. В диалоге «**МОДЕЛЬ УСАДКИ**» введен параметр «**ПОРОГ Niyama**» (доля жидкой фазы). По умолчанию используется доля жидкой фазы – 3 %. Это значение доли жидкой фазы считается концом затвердевания и в каждой точке отливки, где доля жидкой фазы достигла заданного значения «**ПОРОГА Niyama**» будет вычисляться критерий Niyama. В результате расчета получается поле значений критерия Niyama в отливке. Каждое литейное предприятие экспериментальным путем на своих сплавах и отливках определяет интервал критических значений критерия Niyama, где возможно появление пористости.

Циклическое моделирование. Каждый цикл циклического процесса состоит из двух этапов:

1 этап – отливка в форме. Моделируется заполнение формы расплавом и затвердевание отливки в форме. Продолжительность этапа определяется по критерию выбивки;

2 этап – охлаждение формы после удаления отливки. Продолжительность этапа определяется суммой времен первой и второй фаз охлаждения.

Общие параметры циклов:

– *количество циклов* – это количество циклов, которое задается пользователем. По умолчанию задается один цикл;

– *предварительный нагрев*. Эта функция используется для начального прогрева (охлаждения) формы. В общем случае порядок следования этапов изменяется следующим образом:

1) «отливка в форме – охлаждение»;

2) «охлаждение – отливка в форме»;

– *общее время цикла* – это входной параметр только в случае, если задан критерий выбивки «**ПО ВРЕМЕНИ**». При выборе других критериев выбивки параметр «**ОБЩЕЕ ВРЕМЯ ЦИКЛА**» является не входным параметром, а информационным и будет показан только после окончания первого цикла моделирования.

Общее время цикла задается пользователем исходя из времени критерия выбивки. Разница этих времен автоматически перераспределяется на первую и вторую фазы охлаждения. При изменении времени одной из фаз охлаждения автоматически пересчитывается из этой же величины (общее время цикла – время открытия формы) время оставшейся фазы охлаждения. Общее время цикла и критерий выбивки задаются только пользователем и автоматически не пересчитываются;

– *текущее время цикла* – время от начала текущего цикла до настоящего момента;

– *текущий цикл* – текущий цикл, расчет которого в настоящее время выполняется.

В программе предложено несколько типов моделирования цикличности:

– **без циклов.** В этом случае моделируется только этап заполнения формы расплавом и охлаждения отливки в форме. Этот тип моделирования устанавливается по умолчанию;

– **все циклы FlowSolid.** Моделируется заполнение формы и затвердевание во всех циклах;

– **первый FlowSolid, следующие Solid.** Моделируется первый цикл с заполнением формы и затвердеванием, а в остальных циклах, моделируется только затвердевание;

– **все solid, последний FlowSolid.** Если заданы, например 4 цикла, то в первых 3-х циклах считается только затвердевание, а последний цикл будет моделироваться как с заполнением формы так и с затвердеванием;

– **все циклы Solid.** Эта альтернатива моделирует все циклы только с затвердеванием.

Критерий выбивки. Существуют три различных критерия выбивки отливки – открытия формы.

– **по времени** – время от начала цикла до открытия формы, заметим, что форма откроется даже в том случае, если отливка не затвердела на 100 %;

– **объем жидкой фазы** – форма откроется, как только объем жидкой фазы в отливке станет меньше заданного значения;

– **максимальная температура** – форма откроется, как только температура в отливке станет меньше максимальной.

Первая фаза охлаждения. Во время этой фазы сразу после раскрытия половинок формы есть возможность использовать три варианта охлаждения формы:

– **воздух** – половинки формы и полости выдерживаются на воздухе;

– **воздушный обдув** – половинки формы и полости подвергаются воздушному обдуву;

– **водяное орошение** – половинки формы и полости подвергаются водяному орошению.

Также необходимо задать время продолжения этой фазы охлаждения, температуру среды, поток. В случае задания нулевого времени первой фазы охлаждения программа немедленно переходит ко второй фазе охлаждения.

Вторая фаза охлаждения. Здесь имеется тот же выбор, что в первой фазе охлаждения, отличие то, что эта фаза продолжается до следующего цикла, продолжительность фазы определяется пользователем или пересчитывается по первой фазе охлаждения.

Задаются три различных способа охлаждения:

– **воздух** – половинки формы выдерживаются на воздухе;

– **воздушный обдув** – половинки формы и полость подвергаются воздушному обдуву;

– **водяное орошение** – половинки формы и полости подвергаются водяному орошению.

При этом также нужно задать время продолжения этой фазы

охлаждения, температуру среды, поток. В случае задания нулевого времени второй фазы охлаждения программа при моделировании немедленно переходит к началу следующего цикла.

Компоненты разделяемой формы. Высвечивается список материалов разделяемой формы. Материалы, не отмеченные символом «галочка», удаляются вместе с отливкой и в моделировании охлаждения формы не принимают участия. В начале нового цикла эти материалы имеют во всех ячейках начальную температуру, заданную в модуле «**НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ**». Для материалов, отмеченных символом «галочка», этап охлаждения моделируется следующим образом:

- на поверхности, которая была в контакте с металлом, моделируется теплоотвод, заданный в фазах охлаждения (обдув или орошение...);

- на поверхности, граничащей с «удаленным» компонентом формы, моделируется охлаждение на воздухе;

- на внешней поверхности разделенной формы, теплообмен со средой, моделируется согласно заданным граничным условиям.

Для того чтобы промоделировать охлаждение формы после удаления отливки необходимо сделать оснастку отливки из различных тел. В диалоге отметьте галочками тела, которые будут участвовать в охлаждении. Задайте два цикла охлаждения. Для первого цикла задайте его продолжительность. Существующая фаза охлаждения будет продолжаться до нового заполнения формы. Предусмотрены три типа охлаждения: естественная конвекция, воздушный обдув и водяное орошение. Для естественной конвекции необходимо задать температуру окружающей среды, для воздушного обдува и водяного орошения необходимо задать температуру среды и скорости обдува и орошения.

Датчики будут сохранены так, что можно будет увидеть увеличение температуры в каждом цикле в отливке или в форме. Результаты циклического моделирования будут сохранены в том же файле как первое моделирование.

П р о с м о т р з н а ч е н и й н а д а т ч и к а х . Для просмотра значений на датчиках нажмите закладку «**ДАТЧИКИ**» боковой панели инструментов или выберите подкоманду меню «**ДАТЧИКИ**» команды меню «**ГРАФИКА**».

Список координат датчиков будет высвечен в том случае, если они были заданы при работе с модулем «**НАЧАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ**». Отметьте графики и узлы сетки с датчиками, которые вы хотите просмотреть. Отмеченные графики будут высвечены в рабочем окне. Одновременно можно просмотреть не более трех графиков. Для отказа от окна с графиками на датчиках закройте его.

Р а с ч е т р а з м е р а п и т а т е л я . Функция «**РАСЧЕТ РАЗМЕРА ПИТАТЕЛЯ**» в LVMFlow производит расчет питателей цилиндрической формы. Количество питателей (прибылей) определяется по результатам

моделирования затвердевания отливки, т.е. по количеству областей, в которых произошла нежелательная усадка. Для определения размеров питателей используется понятие *модуль* (расчет теплового модуля). Элемент отливки, имеющий больший модуль, кристаллизуется позже, чем элемент с меньшим модулем. Прибыль пристраивается к области, требующей питания в месте наиболее близком к максимальному модулю и учитывающем технологичность получающейся конструкции. Модуль прибыли должен быть больше или равен модулю отливки (прибыль застынет позже или одновременно с отливкой). Это теоретически позволяет усадочным дефектам, образующимся при кристаллизации отливки, заполняться жидким металлом из прибыли. Питатели можно будет нарисовать в *3D CAD* системе и присоединить к модели отливки для выполнения полного моделирования затвердевания.

Ход работы

Получите задание у преподавателя (табл. 3.1).

Конвертируйте во внутренний формат LWMFlow.

Задайте начальные условия.

Произведите моделирование полной задачи либо затвердевание (по заданию преподавателя).

Проанализируйте полученные результаты моделирования.

Требования к отчету по практической работе

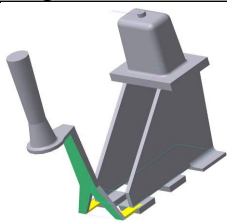
В отчете указывается цель работы, дается краткое изложение теории, приводится чертеж смоделированной отливки.

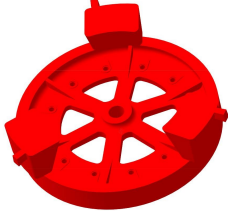
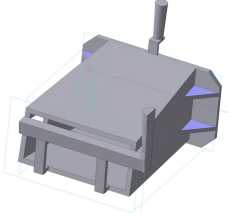
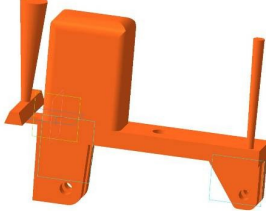
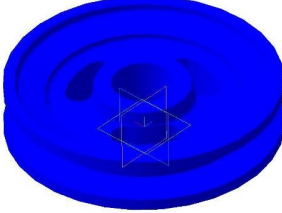
Контрольные вопросы и задания

1. Расскажите о теоретических основах теплопереноса на границе.
2. Назовите параметры модели усадки.
3. Назовите средства повышения эффективности питания.
4. Расскажите о математической модели расчета LVMFlow.
5. Как производится формирование сетки?

Таблица 3.1

Задания для выполнения практической работы №3

Номер варианта	Сплав	Чертеж отливки
1	35Л	

2	35XMЛ	
3	СЧ30	
4	35XMЛ	
5	35Л	

Практическая работа №4

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЗАПОЛНЕНИЯ УСАДКИ И ПРИБЫЛЕЙ ДЛЯ КОНКРЕТНОЙ ОТЛИВКИ

Цель работы

Изучение методики и приобретение навыков получения отливки в разовой форме без дефектов усадочного характера.

Задачи лабораторной работы

- Изучить основные понятия разделов «Усадочные дефекты при затвердевании отливок» и «Питание отливок при усадке и расчет прибылей».
- Освоение принципов выбора питающих узлов, компенсирующих усадку сплавов при кристаллизации и затвердевании отливок в зависимости от конструктивных особенностей отливок и технологических параметров их литья с расчетами конкретных параметров теплового узла, скорости кристаллизации и прибыли.

Краткие теоретические сведения

Усадочные процессы и расчеты прибылей. Наиболее эффективным методом предупреждения образования в отливках усадочных раковин и пор является использование прибылей. Прибыль представляет дополнительный строго рассчитанный объем металла для наиболее массивных частей отливки (узлов питания). Чем большую объемную усадку имеет сплав, тем более необходима установка прибылей на отливках (сталь, высокопрочные чугуны, латуни, бронзы и др.).

При проектировании технологического процесса изготовления отливки необходимо определить объемы и конфигурации узлов питания для того, чтобы определить количество прибылей и места их установки. После этого выбирают тип прибыли: открытая или закрытая, верхняя или боковая, с напуском или без напуска, обогреваемая, под давлением и т.д. При этом учитывают следующие факторы: конфигурация узла питания, его положение при заливке, конструкцию и способ изготовления формы, тип сплава, целесообразность комбинированного применения прибылей и холодильников.

Расчет объема и геометрических размеров прибылей. Расчеты объема прибылей и их геометрических параметров начинают с определения протяженности питаемой зоны от одной прибыли до другой с учетом зоны охлаждения торцевого эффекта.

Зоны могут быть расширены за счет увеличения объема прибылей и использования с торцов отливки холодильников. Однако экономически и технологически такие возможности ограничены.

Если классифицировать все формы узлов питания к двум простым конфигурациям (типа плиты или типа бруса, цилиндра), то зависимости для расчета зон действия прибыли $l_{пр}$ (мм) и торцевого эффекта l_T следующие:

– для узлов питания типа плиты:

$$l_{пр} = K_{пл} \cdot A; \quad l_T = K_{пл} \cdot A;$$

– для узлов питания типа бруска или цилиндра:

$$l_{пр}^K = \frac{D}{K_{в.р}} \sqrt{K}; \quad l_T^K = \frac{D}{K_{в.р}} \sqrt{K};$$

где A – толщина плиты; D – длина стороны бруска или диаметр цилиндра; K – коэффициент конфигурации питаемого узла.

Для разных литейных сплавов, узлов питания, типов литейных форм рекомендуются следующие зависимости для расчета $l_{пр}$ и l_T :

– для стальных отливок типа плиты (песчаная форма), рис. 4.1, а:

$$l_{пр} = (2...3)A; \quad l_T = 4,5A;$$

– для стальных отливок типа плита (песчаная форма с холодильниками), рис. 4.1, б:

$$l_{пр} = (4,5...6,5)A; \quad l_T = (4,5...5,5)A$$

– для стальных отливок типа бруска (песчаная форма), рис. 4.1, а:

$$l_{пр} = 1,5 \cdot D; \quad l_{пр} + l_T = (30...44)\sqrt{D};$$

– для стальных отливок типа бруска (песчаная форма с холодильниками), рис. 4.1, б:

$$l_{пр} = 30\sqrt{D}; \quad l_{пр} + l_T = (30\sqrt{D} + D);$$

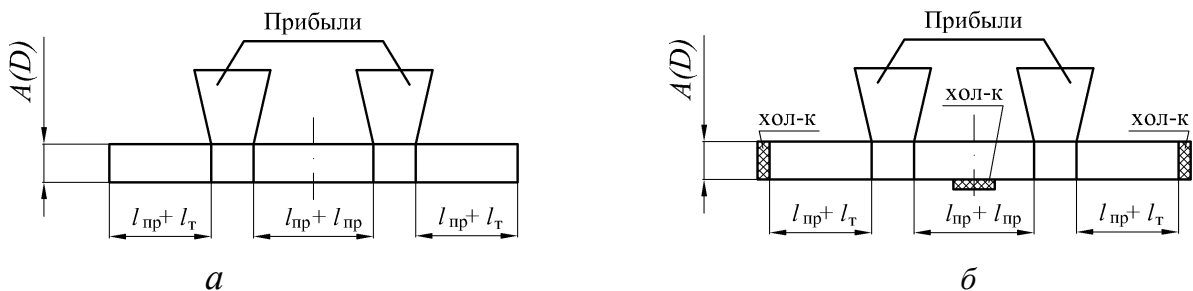


Рис. 4.1. Схемы для расчета зон действия прибылей и торцевого эффекта: а – без холодильников; б – с холодильниками

– для отливок типа плиты из алюминиевых сплавов (песчаная форма), рис. 4.1, а:

$$l_{\text{пр}} = 3A; \quad l_{\text{пр}} + l_{\text{T}} = 6,5A;$$

– для отливок типа плиты из алюминиевых сплавов (металлическая форма), рис. 4.1, а:

$$l_{\text{пр}} = 2,5A; \quad l_{\text{пр}} + l_{\text{T}} = 5,5A;$$

– для отливок типа бруса из алюминиевых сплавов (песчаная форма), рис. 4.1, а:

$$l_{\text{пр}} + l_{\text{T}} = 6,8\sqrt{D};$$

– для отливок типа бруса из алюминиевых сплавов (металлическая форма), рис. 4.1, а:

$$l_{\text{пр}} + l_{\text{T}} = 6,5\sqrt{D};$$

– для отливок типа плиты из латуни и алюминиевой бронзы, рис. 4.1, а:

$$l_{\text{пр}} + l_{\text{T}} = 4A;$$

– для отливок типа бруса из латуни и алюминиевой бронзы, рис. 4.1, а:

$$l_{\text{пр}} + l_{\text{T}} = 1,5D;$$

Зона действия прибыли может быть увеличена на 30-40 % при подводе металла из литниковой системы непосредственно под прибыль.

Ввиду того, что на процессы затвердевания и питания отливки оказывает влияние множество факторов, разработано и используется на практике множество различных методов расчета объема и геометрии прибыли для определенных типов отливок и сплавов. Существует ряд приближенных универсальных методов расчета, применимых для обширной группы литейных сплавов. Один из таких методов – метод Р. Намюра – дает довольно точные параметры прибыли для сплавов с небольшой двухфазной областью кристаллизации (углеродистые и легированные стали, высокопрочные чугуны и т.д.).

Объем прибыли (дм³) определяют из соотношения:

$$V_n = \frac{\omega \frac{C_3^{\text{ж}}}{\text{и}} - \frac{v_0}{q_0} \frac{C^3}{C_0 S_0 \text{ш}} + 2\varepsilon_V C V_0}{1 - 2\varepsilon_V}. \quad (4.1)$$

Для расчета объема прибыли по методу Намюра необходимо, прежде всего, определить объем узла (V_0) и его эффективную суммарную поверхность охлаждения (S_0) (за исключением поверхности контакта узла с прибылью и со смежными частями отливки).

Выбранный узел питания разбивают на элементарные объемы поверхности, для которых рассчитывается суммарный объем и поверхность узла (дм^3 , дм^2):

$$V_0 = \Sigma V_i, \quad (4.2)$$

$$S_0 = \Sigma S_i. \quad (4.3)$$

Тогда приведенный размер узла питания:

$$R_0 = V_0 / S_0, \quad (4.4)$$

Влияние конфигурации прибыли учитывается через безразмерный критерий (фактор формы прибыли), который вычисляется для каждого класса геометрически подобных прибылей. Ориентировочно можно принимать:

– отливки стальные и из высокопрочного чугуна (прибыли открытые):

$$\omega = H_n / D_n \approx 1,7 \dots 2,0, \quad (4.5)$$

– отливки стальные и из высокопрочного чугуна (прибыли закрытые) и отливки из цветных сплавов:

$$\omega = H_n / D_n \approx 1,25 \dots 1,5, \quad (4.6)$$

где D_n – диаметр основания прибыли; H_n – высота прибыли.

Для разных типов прибылей значения ω приведены в табл. 4.1, которые могут быть использованы в приближенных расчетах.

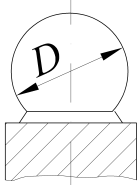
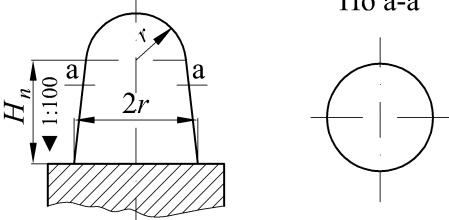
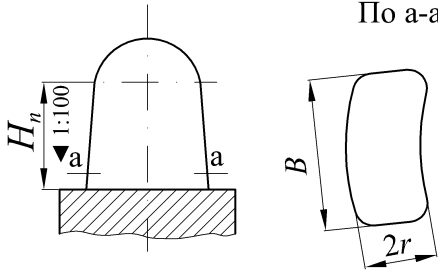
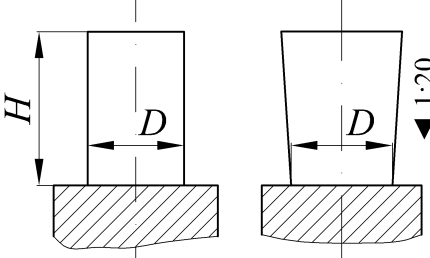
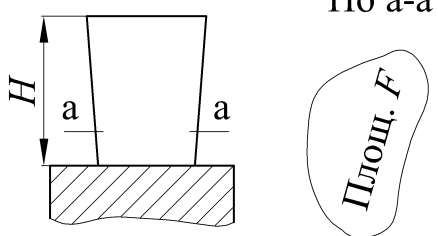
Относительная эффективность охлаждения отдельных поверхностей и сопряжений питаемого узла по сравнению с плоской стенкой учитывается при расчете V_n через поправочный коэффициент:

$$q_0 = \frac{1}{2} \sqrt[3]{1 + \sqrt{1 + 4 \frac{V_0/S_0}{S_0/H_0}}} \quad (4.7)$$

где $H_0 = \Sigma H_i$ – суммарная протяженность отдельных ребер, кривых поверхностей в узле питания (табл. 4.2).

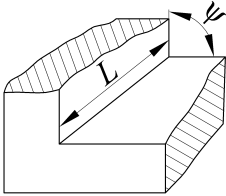
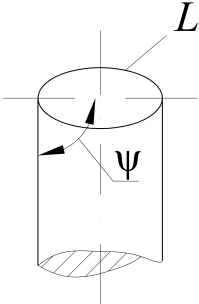
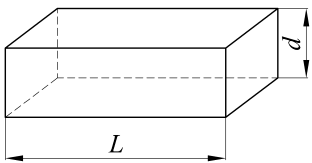
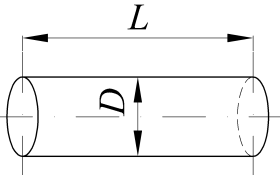
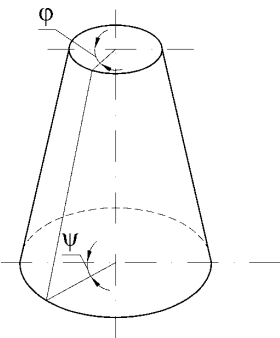
Таблица 4.1

Расчет высоты прибылей по их объему для типовых конструкций прибылей

Вид прибыли	Характеристика	Расчетная формула	Фактор формы прибыли
	шаровая прибыль	$D = 1,24\sqrt[3]{V_0}$	220
	закрытая куполообразная цилиндрическая прибыль	$H = \frac{V_n}{\pi r^2} - \frac{2}{3}r$ $H_n + r$	280
	закрытая куполообразная цилиндрическая прибыль с компактной формой горизонтального сечения	$H = \frac{V_n - 0,45\pi r^2 B}{F}$ $H_n + r$	300
	открытая цилиндрическая или коническая прибыль	$H = \frac{4V_n}{\pi D^2}$ $H = \frac{0,9V_n}{\pi D^2}$	340
	открытая прибыль с компактной формой горизонтального сечения	$H = \frac{V_0}{0,95F}$	400

¹ Не менее высоты питаемого узла

Схема для вычисления H_0

Форма частей узла питания	Характеристики	Значения H_0	
		для выступающих углов и выпуклостей	для входящих углов и вогнутостей
	$\varphi = 90^\circ$	$+\frac{\pi}{4}nL$	$-nL$
	φ любой	$+\frac{\pi}{4}nLctg\frac{\varphi}{2}$	$-\frac{\pi}{4}nLctg\frac{\varphi}{2}$
	квадратная призма	$+\pi nL+2\pi nd$	$-4nL-8nd$
	полная цилиндрическая поверхность	$+\pi nL$	$-\pi nL$
	часть конической поверхности	$+\frac{\psi}{360}\pi n\frac{L}{\cos\varphi}$	$-\frac{\psi}{360}\pi n\frac{L}{\cos\varphi}$

Величину n (фактор влияния свойств сплава и формы), которая необходима для расчета H_0 определяют из соотношения:

$$n = \frac{\rho_{Me} (W_{ЧСТ_{Me}} \Psi)}{\rho_{\phi} \Psi_{\phi} \Psi_{T_n}}, \quad (4.8)$$

где $\rho_{\text{Ме}}$, $\rho_{\text{Ф}}$ – удельные веса сплава, формы, кг/м³; $c_{\text{Ме}}$, $c_{\text{Ф}}$ – теплоемкости сплава и формы, кДж/кг·К; W – теплота плавления металла, кДж/кг; ΔT – перегрев сплава над ликвидусом ($\Delta T = T_{\text{зал}} - T_{\text{лик}}$, $T_{\text{зал}}$ – температура заливки сплава, $T_{\text{сол}}$ – температура солидуса), °К; $T_{\text{н}}$ – температура на поверхности контакта отливка-форма (при литье в песчаные формы $T_{\text{н}}$ равна $T_{\text{сол}}$), °К.

При расчете объема прибылей необходимо учитывать относительный объем усадочных раковин, возникающих в узле питания. Объем усадки (ϵ_V) зависит от свойств сплава, температуры и скорости заливки, размеров питаемого узла, типа формы и т.д. Существует множество расчетных методов определения объема усадочных раковин, их формы. Усадку можно учитывать по рекомендуемым значениям ϵ_V .

После расчета $V_{\text{н}}$ определяют, исходя из размеров и конфигурации питаемого узла, размеры выбранной прибыли (табл. 4.1).

Ход расчетов

Получите у преподавателя вариант задания (рис. 4.6, табл. 4.4).

Рассчитайте основные параметры прибыли, используя формулы 4.1-

4.8.

Изобразите узел питания и прибыль с указанием основных размеров.

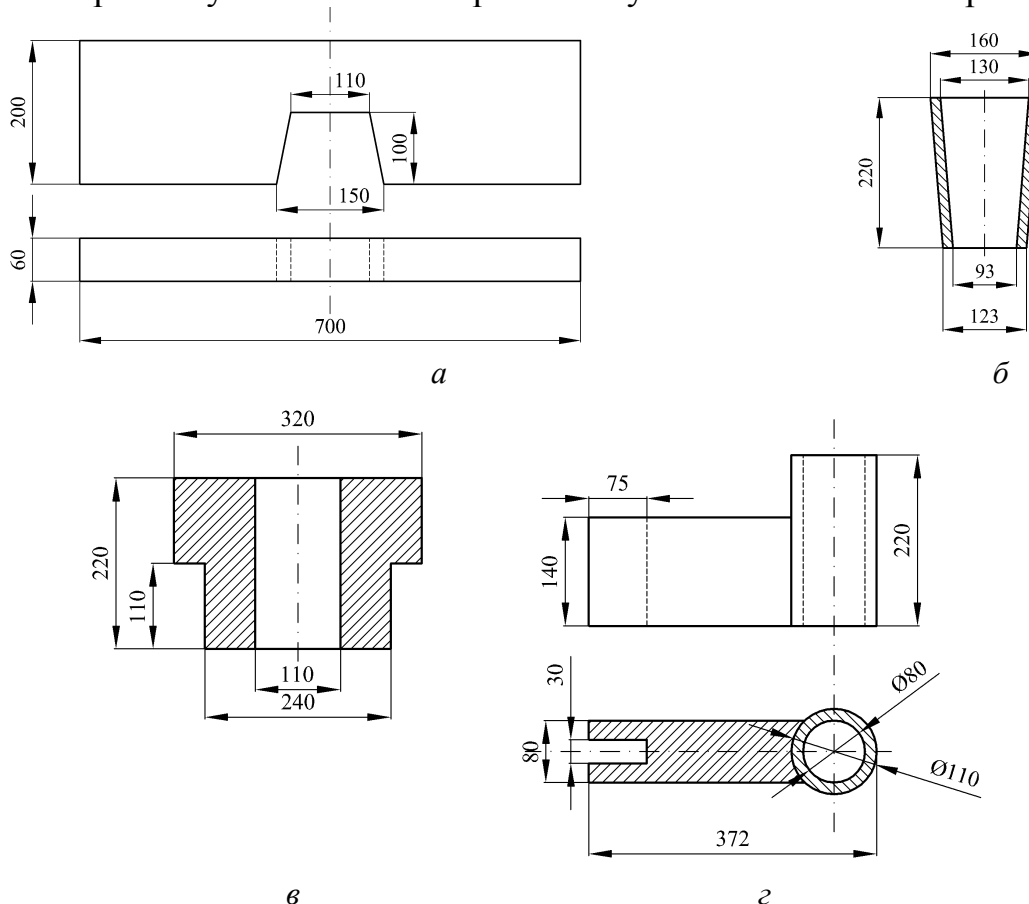


Рис. 4.6. Питаемые узлы (по табл. 4.4)

Таблица 4.4

Варианты заданий

Вариант	Сплав	Форма	Плотность, кг/м ³		Теплоемкость, кДж/(кг·К)		Перегрев над ликвидусом, К	Температура поверхности контакта металл-форма, К	Теплота плавления, кДж/кг	Тип узла питания	Относительная усадка
			сплава	формы	сплава	формы					
1	сталь	песчаная	750 0	150 0	0,84	1,10	20	168 0	268	рис. 4.6, а	0,03 5
2	высоко-прочный чугун	песчаная	740 0	150 0	0,85	1,10	80	142 3	188		0,04 0
3	силумин	чугунная	250 0	700 0	1,08	0,85	13 0	850	170		0,05 0
4	сталь	чугунная	750 0	700 0	0,84	0,85	50	150 0	268		0,04 5
5	бронза	песчаная	880 0	150 0	0,42	1,10	75	109 8	257		0,08 0
6	латунь	чугунная	860 0	700 0	0,39	0,85	42	125 0	221	рис. 4.6, б	0,09 0
7	высокопрочный чугун	чугунная	740 0	700 0	0,85	0,85	60	135 0	188		0,03 0
8	силумин	песчаная	250 0	150 0	1,08	1,10	90	750	170		0,04 5
9	сталь	песчаная	750 0	150 0	0,84	1,10	30	162 0	268		0,05 0
10	бронза	чугунная	880 0	700 0	0,42	0,85	98	960	257		0,08 0
11	латунь	песчаная	860 0	150 0	0,39	1,10	64	130 8	221	рис. 4.6, в	0,09 0
12	высокопрочный чугун	песчаная	740 0	150 0	0,85	1,10	40	142 3	188		0,03 5
13	сталь	чугунная	750 0	700 0	0,84	0,85	10	160 0	268		0,05 0
14	латунь	чугун-	860	700	0,39	0,85	48	129	221		0,09

		ная	0	0				0			0
15	силумин	песчаная	250 0	150 0	1,08	1,10	70	750	170	рис. 4.6, з	0,04 5
16	высокопрочный чугун	чугунная	740 0	700 0	0,85	0,85	30	135 0	138		0,03 0
17	бронза	песчаная	880 0	150 0	0,42	1,10	13 0	107 0	257		0,08 0
18	сталь	песчаная	750 0	150 0	0,84	1,10	25	164 0	268 7		0,04 0
19	ковкий чугун	песчаная	720 0	150 0	0,85	1,10	40	142 3	190		0,03 0

Требования к отчету по практической работе

В отчете указывается цель работы, дается краткое изложение теории, приводятся результаты расчетов прибыли, а также ее эскиз.

Контрольные вопросы

1. Что такое прибыль?
2. Перечислите основные виды прибылей.
3. Расскажите о методике расчета прибылей инженерным способом.
4. Расскажите об усадочных процессах в отливках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теоретические основы литейного производства : конспект лекций [текст].
2. Теоретические основы литейного производства: метод. указания по самостоятельной работе [текст].
3. СТО 4.2-07–2008. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной и научной деятельности [текст] / разработ. : Т. В. Сильченко, Л. В. Белошапко, В. К. Младенцева, М. И. Губанова. – Введ. впервые 09.12.2008. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – 47 с.
4. Каталог лицензионных программных продуктов, используемых в СФУ / сост. : А. В. Сарафанов, М. М. Торопов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т; 2008. – Вып. 3.
5. Теоретические основы литейного производства. [Электронный ресурс] : электрон. учеб.-метод. комплекс по дисциплине «Теоретические основы литейного производства»
Теоретические основы литейного производства. Банк тестовых заданий. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : контрольно-измерительные материалы.
6. Интерактивные технические средства обучения : практическое руководство / сост. : А. Г. Суковатый, К. Н. Захарьин, А. В. Казанцев, А. В. Сарафанов. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009 г. – 84 с.
7. Унифицированная система компьютерной проверки знаний тестированием UniTest версии 3.0.0 : руководство пользователя / А. Н. Шниперов, Б. М. Бидус. – Красноярск, 2008.
8. Теоретические основы литейного производства. Презентационные материалы. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : наглядное пособие «Теоретические основы литейного производства»
9. Интерактивные технические средства обучения: практическое руководство / сост. А. Г. Суковатый, К. Н. Захарьин, А. В. Казанцев, А. В. Сарафанов. – Красноярск : ИПК СФУ, 2009. – 84 с.
10. Гуляев, Б. Б. Теория литейных процессов / Б. Б. Гуляев. – Л. : Машиностроение, 1976. – 211 с. (С.11–45, 54–73, 97–121, 144–196).
11. Дубицкий, Г. М. Литниковые системы / Г. М. Дубицкий. – М.–Свердловск : Машгиз, 1962. – 256 с.
12. Технологические расчеты заполнения формы сплавом : метод. указание для дипломного и курсового проектирования / сост. Б. С. Чуркин. – Свердловск : Изд-во Уральск. политех. ин-та, 1984. – 34 с.
13. Василевский, П. Ф. Литниковые системы стальных отливок / П. Ф. Василевский. – М. : Машгиз, 1956. – 160 с.
14. Ветшика, А. Теоретические основы литейной технологии / А. Ветшика. – Киев : Вища шк., 1981. – 317 с.

15. Изосимов В. А. Решение на ЭВМ технологических задач по литейному производству : учеб. пособие / В. А. Изосимов. – Челябинск : Изд-во Челябинского политех. ин-та, 1989. – 71 с.
16. Немюр, Р. Зоны действия прибылей / Р. Немюр // 24-й Международный конгресс литейщиков : сб. – М., 1960. – С.101-103.
17. Кауфман, А. С. Расчет прибылей для отливок : метод. указания для курсового проектирования / А. С. Кауфман, В. А. Чечулин. – Свердловск : Изд-во Уральского политех. ин-та, 1981. – 23 с.
18. Филиппенков, А. А. Стальные отливки: учеб. / А. А. Филиппенков, В. М. Миляев. – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – 276 с.
19. Технология литейного производства / Б. С. Чуркин [и др.]. – Екатеринбург, 2000. – 662 с.
20. Голод, В. М. Теория литейных процессов : учеб. пособие / В. М. Голод. – Л. : 1983. – 88 с.
21. Мамина, Л. И. Теоретические основы литейного производства. Кристаллизация сплавов и затвердевание отливок : учеб. пособие / ГАЦМиЗ. – Красноярск, 2002. – 140 с.