

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
Кафедра «Технология функциональных и конструкционных материалов»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Направление подготовки  
Квалификация(степень) выпуска  
Форма обучения

22.04.02 – «Металлургия»  
магистр  
очная

Составитель:

В.Н.Шаршин

Владимир 2019

**Шаршин В.Н.**

Методические указания к практическим работам по дисциплине «Вопросы теории литейных процессов» / Владим. гос. ун-т им. А.Г. и Н.Г. Столетовых; сост. В.Н.Шаршин. – Владимир, 2012. –55 с.

Методические указания составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Вопросы теории литейных процессов» и рассчитаны на магистрантов, обучающихся по направлению 22.04.02 – «Металлургия». Служат руководством к проведению практических работ и направлены на формирование основных профессиональных компетенций, отвечающих требованиям ФГОС-3 по направлению подготовки 22.04.02 – «Металлургия» к результатам освоения ОПОП ВПО.

Табл. 13. Ил. 1.

Рассмотрены и одобрены на  
заседании УМК направления  
22.04.02 «Металлургия»  
Протокол № 9 от 7.06. 2019 г.  
Рукописный фонд кафедры  
ТФ и КМ ВлГУ

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие.....	4
Общие положения.....	5
Раздел 1. Состав, теплофизические свойства и технологические параметры литейных сплавов.....	7
1.1. Расчёт состава сплавов.....	9
1.2. Теплофизические свойства литейных сплавов .....	11
1.3. Расчёт количества газов в твёрдых и жидких литейных сплавах.....	16
Раздел 2. Гидравлические процессы литья.....	19
2.1. Расчёт процессов силового взаимодействия расплава с формой (гидростатика).....	19
2.2. Расчёт гидродинамических параметров литья.....	25
2.3. Расчёт литниковых систем.....	28
Раздел 3. Расчёт прибылей для отливок .....	35
3.1. Определение тепловых узлов.....	37
3.2. Определение количества прибылей.....	38
3.3. Расчет массы (объема) и размеров прибылей для отливок, изготавливаемых в песчано-глинистых форма.....	39
3.4. Метод расчета по массе питаемого узла и приведенному размеру.....	43
Приложение 1.....	46
Приложение 2.....	47
Приложение 3.....	48
Приложение 4.....	49
Приложение 5.....	53
Библиографический список.....	54

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Проблема получения отливок высокого качества всегда имела важное значение. Для её решения технолог – литейщик должен знать механизмы литейных процессов и уметь управлять ими.

Один из основоположников науки и дисциплины «Теория литейных процессов» профессор Гуляев Б.Б. отмечал, что литейное производство состоит, с одной стороны, из процессов, имеющих дело с металлом (плавка, заливка, кристаллизация расплава, затвердевание литой заготовки), с другой стороны, в литейное производство входят процессы, касающиеся литейной формы (применяемые материалы, способы их подготовки и обработки, способы изготовления и подготовки литейных форм к заливке). Процессы, связанные с литейной формой, подробно изучаются в дисциплине «Технология литейного производства». В данном методическом пособии рассмотрены только процессы, происходящие с самим металлом или при его участии.

Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Вопросы теории литейных процессов» содержат практические рекомендации для решения задач по следующим разделам: состав и свойства литейных сплавов, взаимодействие расплавов с газами, обработка расплавов, расчёт шихты, заполнение расплавами неподвижных и вращающихся литейных форм. Методические указания снабжены необходимой справочной литературой.

Настоящие методические указания составлены с использованием учебного пособия для практических занятий по дисциплине «Теория литейных процессов», разработанных проф. Пикуновым М.В и Кондратенко Т.Т. для студентов литейных специальностей Московского института сталей и сплавов.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Учебная дисциплина «Вопросы теории литейных процессов» является базовой частью профессионального цикла образовательной программы подготовки магистров по направлению 150400.68 - «Металлургия. Прогрессивные технологии при производстве отливок».

Целью практических работ является обеспечение базовой теоретической подготовки студентов–магистрантов по профилю специальности.

Задачи практикума:

- изучение основных физических и физико-химических свойств металлов и сплавов, определяющих закономерности получения литого изделия на всех этапах технологического процесса;
- изучение теоретических основ приготовления и обработки расплавов, заполнения литейной формы, кристаллизации расплавов, затвердевания и охлаждения отливки.
- приобретение навыков практических расчётов основных физических и технологических параметров процесса получения отливок

Для успешного изучения дисциплины «Вопросы теории литейных процессов» студенты-магистранты, кроме успешного освоения дисциплин общепрофессиональной и профессиональной подготовки бакалавриата по данному профилю, должны свободно владеть материалом следующих курсов: «Физическая химия», «Гидравлика», «Материаловедение», «Физика», «Сопротивление материалов».

Изучение дисциплины обеспечит формирование у магистров профессиональный подход к решению задач технического и научно-исследовательского характера. Знание, умения и навыки, полученные в ходе освоения дисциплины, используются при выполнении выпускных квалификационных работ.

В результате освоения дисциплины «Вопросы теории литейных процессов» студент-магистрант должен обладать следующими **компетенциями:**

Обладать готовностью к саморазвитию, самореализации, использованию творческого потенциала (ОК-3).

Обладать готовностью использовать фундаментальные общеинженерные знания в профессиональной деятельности (ОК-11).

Обладать способностью управлять реальными технологическими процессами обогащения и переработки сырья, получения и обработки металлов (ПК-1) .

## РАЗДЕЛ 1

### СОСТАВ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

В литейном производстве чистые металлы, как правило, редко используются для получения отливок. В основном мы имеем дело со сплавами. Что такое сплав?

**Сплавом** называют вещество, образованное сплавлением двух или более металлов или металлов с неметаллами (железо с углеродом, алюминий с кремнием и т.п.). Сплав - это раствор различных металлов и неметаллов в металлической основе, а также - механическая смесь таких растворов и промежуточных фаз, образующихся при взаимодействии между компонентами.

**Промежуточные фазы** - продукты химического взаимодействия между компонентами сплавов или между сплавами и окружающей средой ( $Al_2O_3$ ,  $Al_3Fe$ ,  $FeO$ ,  $Fe_3C$  и др.).

Сплавы бывают: **черные** (сталь, чугун) и **цветные** (все другие). Сплавы различают по температуре плавления на **легкоплавкие** ( $t_{пл} < 420^\circ C$ ), **тугоплавкие** ( $t_{пл} > 1000^\circ C$ ) и сплавы со средней температурой плавления ( $420^\circ C < t_{пл} < 1000^\circ C$ ). В зависимости от метода получения заготовок сплавы подразделяют на **литейные** и **деформированные**. **Деформируемые** – подвергают прокату, ковке или штамповке. **Литейные** – для производства изделий методом литья. Кроме того, бывают ещё и промежуточные сплавы, предназначенные для приготовления рабочих сплавов. Это – **лигатуры**. Они имеют повышенную концентрацию легирующих компонентов.

Примеры лигатур:  $Al+Ti$ ,  $Al+Ni$ ,  $Al+Fe$ ,  $Fe+Si$ ,  $Fe+Mn$  и др.

**В состав сплава входят: основа, легирующие добавки и примеси.**

**Основой** сплава является металл, обычно один, определяющий его служебные свойства и стоимость.

**Легирующими** называют элементы, которые вводятся в сплав специально для

управления его служебными и технологическими свойствами.

Кроме этого в сплавах всегда присутствуют примеси.

**Примесями** называют элементы, содержание которых незначительно и которые попали в сплав из руды, топлива, атмосферы, шлаков. По воздействию на служебные характеристики сплава примеси подразделяются на **вредные**, т.е. снижающие свойства сплавов (например, S и P во многих сплавах), и **нейтральные**, не оказывающие влияния на его свойства.

Отдельную группу составляют вещества, вводимые в малых количествах с целью управления главным образом размерами и формой зерна -**модификаторы**

**Модифицирование** – процесс изменения структуры сплава.

**Модифицирующие компоненты** представляют собой металлы или неметаллы, которые вводят в расплав с целью улучшения структуры отливок.

К основным **критериям качества** литого металла относятся механические свойства, показатели структуры, испытания износостойкости, коррозионной стойкости и т.п., заданные в технических требованиях.

Жидкие металлы и сплавы называют **расплавами**. Процесс перехода металла из твёрдого в жидкое состояние называют **плавлением**.

При нормальных условиях и начальной температуре металл находится в твердом состоянии, т.е. чтобы перевести его в жидкое состояние, металл необходимо нагреть до **температуры плавления**. Процессы нагрева, плавления и перегрева до **температуры заливки** чистых металлов и эвтектических сплавов характеризуются изменением температуры металла и его объема.

Температура фазового перехода из твердого состояния в жидкое в течение некоторого времени сохраняется постоянной, при этом наблюдается скачкообразное увеличение объема и соответствующее уменьшение плотности.

Постоянство температуры свидетельствует о равенстве количества теплоты, подводимой к металлу, и количества теплоты, расходуемой на его плавление, т. е. сообщаемой металлу так называемой скрытой теплоты плавления. Поэтому, несмотря на нагрев металла, температура его в этот период остается постоянной. Явление

скачкообразного увеличения объема при плавлении (оно составляет чаще всего 2...7%), а следовательно, и соответствующего ему уменьшения объема при затвердевании создает серьезные проблемы для технологов при производстве отливок, так как является причиной усадочных раковин и усадочной пористости.

## 1.1. Расчёт состава сплавов

В литейном производстве составы сплавов принято выражать в процентах по массе (% масс.). Это наиболее удобный для практики способ, поскольку масса легко определяется простым взвешиванием. В научных исследованиях важным является содержание компонентов сплава в молярных процентах (% мол.). Можно принять, что в сплавах, находящихся как в твердом, так и в жидком состояниях, структурными единицами являются отдельные атомы. В этом случае число молей каждого компонента ( $n_i$ ) в 100 г сплава оказывается равным частному от деления (% масс.), данного компонента на его молярную массу (атомный вес). Общее число молей равно сумме этих величин  $\sum n_i$ . Содержание любого компонента в молярных процентах равно:

$$\% \text{ мол.} = (n_i / \sum n) \cdot 100.$$

В последнее время составы сплавов, получаемых в аморфном состоянии, принято выражать в виде формул  $A_x B_y C_z$ , где  $x, y, z$  показывают содержание в молярных процентах, поэтому  $x + y + z = 100$ .

Давление пара сплавов выражается законом Рауля, при этом коэффициент активности принят равным 1.

Теплофизические свойства металлов определяют затраты энергии на плавку. Теплоемкость металлов при расчетах считается не зависящей от температуры. Общая масса сплава  $m$ . В состав сплава входят компоненты  $A, B, C$  с массой соответственно  $m_A, m_B, m_C$  и примеси  $X, Y, Z$  массой  $m_X, m_Y, m_Z$ . Таким образом  $m = \sum m_{A,B,C} + \sum m_{X, Y, Z}$ . Состав сплава в массовых процентах компонентов и примесей:

$$\% \text{ масс. } (A, B, C) = (m_{A,B,C}/m) \cdot 100;$$

$$\% \text{ масс. } (X, Y, Z) = (m_{X,Y,Z}/m) \cdot 100;$$

$$\Sigma[\% \text{ масс. } (A, B, C)] + \Sigma[\% \text{ масс. } (X, Y, Z)] = 100 \%.$$

Ввиду малости величины  $\Sigma[\% \text{ масс. } (X, Y, Z)]$  ею обычно пренебрегают.

Состав сплава в молярных процентах (без учета примесей):  $\% \text{ мол. } (A, B, C) = [(m_{A,B,C}/M_{A,B,C})/\Sigma(m_{A,B,C}/M_{A,B,C})] \cdot 100$ , где  $M_{A,B,C}$  - молярные массы компонентов  $A, B, C$ . Если в вышеприведенных выражениях отбросить множитель 100, получаем выражение состава сплава в молярных долях компонентов  $A, B, C$ .

Состав сплава, состоящего из компонентов  $A, B, C$  (без учета содержания примесей, можно выразить формулой, где индексами у букв  $A, B, C$  являются цифры, отражающие содержание данного компонента в молярных процентах. Например, марке сплава Бр010Ц2 соответствует формула  $\text{Cu}_{88}\text{Sn}_{10}\text{Zn}_2$ .

Масса 1 моль сплава:  $M_{\text{спл}} = [\Sigma M_{A,B,C} \cdot (\% \text{ мол. } A, B, C)]/100$ . При таком расчете принимается, что структурными единицами в сплаве являются атомы компонентов. Единицы ppm (parts per million) используют для выражения содержания малых количеств примесей в сплавах.

1 ppm = 1 часть на 1 миллион частей.

Поскольку 1 % = 1 часть на 100 частей, получаем, что 1 % =  $10^4$  или 1 ppm =  $1 \cdot 10^4$  %.

Единицы  $\text{см}^3/100 \text{ г}$  используют для выражения содержания газа в металлах и сплавах. В этом случае считают, что весь газ, обнаруженный в металле анализами, независимо от формы его присутствия (раствор, соединения) выделен в свободном виде ( $\text{H}_2, \text{N}_2, \text{O}_2$  и т.п.) и находится в нормальных условиях ( $T = 293 \text{ К}, p = 101000 \text{ Па}$ ). Например, установлено, что в металле содержится  $3 \cdot 10^{-4}$  масс. водорода и 0,01 % масс. азота. Следовательно, в 100 г сплава имеется  $3 \cdot 10^{-4}$  г водорода и 0,01 г азота. С учетом молярных масс этих газов (из прил. 4  $M_{\text{H}_2} = 2 \text{ г/моль}, M_{\text{N}_2} = 28 \text{ г/моль}$ ) получаем, что число молей каждого газа равно соответственно:

$$n = 3 \cdot 10^{-4} / 2 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ моль};$$

$$n = 0,01 / 28 = 36 \cdot 10^{-5} \text{ моль}.$$

Поскольку при нормальных условиях 1 моль газа занимает объем 22400 см<sup>3</sup>, получаем следующие количества водорода и азота:

$$\text{Водород} - 22400 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 3,36 \text{ см}^3 / 100\text{г};$$

$$\text{Азот} - 22400 \cdot 36 \cdot 10^{-5} = 8 \text{ см}^3 / 100\text{г}.$$

В технических расчетах можно принять, что при сплавлении металлов не происходит изменение объема. На этом основании удельный объем сплава ( $V_{\text{спл}}$ ) является аддитивной величиной, определяемой удельными объемами компонентов ( $V_A, V_B, V_C$ ) и их содержанием в сплаве, выраженным в % масс. ( $X_A, X_B, X_C$ ). Удельный объем сплава вычисляется по формуле:

$$V_{\text{спл}} = (X_A \cdot V_A + X_B \cdot V_B + X_C \cdot V_C) / 100.$$

Плотность - величина, обратная удельному объему:  $\rho = 1/V$ . Плотность сплава  $\rho_{\text{спл}}$  может быть выражена через плотности компонентов  $\rho_A, \rho_B, \rho_C$  и их содержание в массовых процентах  $X_A, X_B, X_C$  по формуле:

$$\rho_{\text{спл}} = 100 / (X_A / \rho_A + X_B / \rho_B + X_C / \rho_C).$$

## 1.2. Расчёт теплофизических свойств сплавов

**Температура плавления** - температура при которой металл переходит в жидкое состояние (в металле не рвутся все связи атомов). Только металлы имеют строго определенную температуру плавления, сплавы строгой температуры плавления не имеют. Они плавятся в интервале температур (ликвидус, солидус). Для чистых металлов строго определенная величина.

**При температуре солидус** - начинается процесс плавления, при ликвидус - заканчивается.

**Температура кипения** – температура, при которой сплав начинает активно испаряться (происходит разрушение кристаллической решетки).

**Способность испаряться в жидком состоянии (сублимироваться).**

Процесс сублимации - процесс кипения, минуя стадию плавления.

Температура кипения не связана с температурой плавления.

Когда давление пара превышает давление атмосферы, начинается активное кипение.

**Плотность** - свойство, которое определяет количество металла, характер поведения сплава и количество компонентов, скалярная физическая величина, определяемая как отношение массы тела к занимаемому этим телом объёму, г/см<sup>3</sup>, кг/м<sup>3</sup>.

При плавлении металлов их плотность изменяется в меньшую сторону (на 3-5%). Их аномальность в том, что происходит перестройка кристаллической решетки. Висмут, галлий, сурьма, германий - у них плотность при плавлении увеличивается.

Расчет **средней плотности сплава:**

$$100/\rho_{\text{сплава}} = X_a/\rho_a + X_b/\rho_b + X_c/\rho_c$$

Изменение плотности рассчитывается по формуле:

$$d\rho = (\rho_{\text{тв}} - \rho_{\text{жс}})/\rho_{\text{тв}} \cdot 100\%$$

**Удельный вес** определяется как отношение веса вещества P к занимаемому им объёму V, Н/м<sup>3</sup>, кгс/м<sup>3</sup>.

При нагревании металлов их плотность уменьшается, а при охлаждении – возрастает. При плавлении большинства металлов их плотность изменяется в меньшую сторону (на 3-5%), а при затвердевании – в большую. Между тем, существуют, так называемые, аномальные металлы. Их аномальность заключается в том, что при плавлении их плотность увеличивается, а при затвердевании – уменьшается. Висмут, галлий, сурьма, германий - у них плотность при плавлении увеличивается. На самом деле, аномальность заключается только в перестройке кристаллической решетки при плавлении или затвердевании.

Изменение плотности при плавлении влияет на усадку.

**Теплота плавления** - количество тепла, которое необходимо поднести к металлу и сплаву для его расплавления (Дж/кг). Количественно равна **скрытой теплоте кристаллизации**.

**Вязкость** - это сила внутреннего трения. Характеризует способность металла сопротивляться деформации сдвига. Вязкость делится на динамическую и кинематическую. С увеличением температуры вязкость уменьшается и наоборот.

**Диффузия** - процесс переноса вещества, направленный на выравнивание концентрации атомов вещества в пределах одной фазы. Движущей силой процесса диффузии является градиент концентрации ( $dC/dx$ ).

**Поверхностная энергия** - избыток энергии поверхностного слоя на границе раздела фаз (по сравнению с энергией вещества внутри тела), обусловленной различием межмолекулярных взаимодействий в обеих фазах. При увеличении поверхности раздела, т. е. при переводе молекул (атомов) в поверхностный слой, совершается работа против некомпенсированных сил межмолекулярного взаимодействия у границы раздела, равная удельной свободной поверхностной энергии, мДж/м<sup>2</sup>.

**Теплоёмкость** - это количество тепла, которое нужно передать объёму (массе) вещества для того, чтобы его температура увеличилась на один градус, Дж/кг·град, Дж/м<sup>3</sup>·град.

**Теплопроводность** – это процесс распространения тепловой энергии путем непосредственного соприкосновения между частицами вещества – молекулами и атомами или путем диффузии молекул, атомов и свободных электронов, Вт/(м·К).

Свойства материала, в котором протекает тепловой процесс, представлены тремя величинами:

- *удельной теплоемкостью  $c$* , Дж/(кг·К);
- *теплопроводностью  $\lambda$* , Вт/(м·К);
- *плотностью  $\rho$* , кг/м<sup>3</sup>.

Обычно эти величины встречаются в виде комплекса, называемого температуропроводностью  $a = \lambda / c \cdot \rho$ , м<sup>2</sup>/с или см<sup>2</sup>/с.

При теплопередаче от одного твердого тела к другому (отливки и формы) применяется величина, называемая **теплоаккумулирующей способностью**  $b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$ , Дж/(м<sup>2</sup>·с<sup>1/2</sup>·К).

В литейных тепловых процессах участвует также **удельная скрытая теплота кристаллизации** материала отливки  $L$ , кДж/кг.

Для распространенных основ сплавов величины теплоемкости при нормальной температуре и вблизи температуры плавления в твердом состоянии имеют следующие значения:

**Основа сплава**..... **Zn Mg Al Cu Fe Ti**

**Теплоемкость, Дж/(кг·К):**

**при 20° С**..... **380 980 905 384 447 545**

**вблизи температуры**

**плавления** ..... **460 1460 1420 545 875 —**

Наиболее высокой **теплопроводностью** обладают серебро, медь, алюминий и золото. Теплопроводность сильно зависит от состава сплава; даже небольшие примеси могут резко ее изменять.

При повышении температуры теплопроводность металлических тел, как правило, снижается. Чем выше температура, тем меньшее влияние на теплопроводность оказывают примеси. Для важнейших основ литейных сплавов при нормальной температуре и вблизи температуры плавления теплопроводность имеет следующие значения:

**Теплопроводность, Вт/(м · К):** **Zn Mg Al Cu Fe Ti**

**при 20° С** ..... **108 160 210 385 73 16**

**вблизи температуры плавления**..... **92 145 419 328 29 -**

Наиболее высокую **теплоту кристаллизации** имеют бор, кремний, титан, цирконий. Для основ важнейших литейных сплавов они составляют:

**Основы сплавов**..... **Zn Mg Al Cu Fe Ti**

### **Теплота кристаллизации,**

**кДж/кг ..... 105 380 400 205 272 327**

Теплопередача в стенках песчаных форм, представляющих собой капиллярно-пористые и часто влажные тела на микроструктурном уровне, очень сложна. Теплота в них переносится: теплопроводностью самих зерен, состоящих из кварца; через контакты и прослойки связующих между зёрнами; лучеиспусканием с зерна на зерно через поры; фильтрующимися через поры газами путем конвекции. Кроме того, на процесс влияют испарение влаги, сгорание органических добавок, реакции в газовой фазе. При больших перепадах температур в стенках малотеплопроводных форм их тепловые характеристики на различных расстояниях от отливки могут оказаться существенно различными. На теплопередачу может также оказать влияние степень уплотнения смеси. Однако при технологических расчетах всеми этими явлениями приходится пренебрегать, а свойства смесей в стенках форм оценивать как свойства обычных твердых тел.

**Плотность** песчано-глинистых смесей в формах равна 1600—1700 кг/м<sup>3</sup>, а их теплоемкость для *сухой смеси* равна 750—850 Дж/(кг·К), для *сырой* — 1050—1200 Дж/(кг·К). **Теплопроводность** формовочных смесей лежит в широком интервале —0,014—0,4 Вт/(кг·К). Ее величина в десятки раз меньше **теплопроводности** компактного кварца, из которого она в основном состоит. Повышение массовой доли глины в смеси от 4 до 12% увеличивает площадь контактов и повышает теплопроводность на 5—10%. При возрастании содержания влаги в смеси от 0 до 4% ее **теплопроводность** возрастает в 2—2,5 раза, а при увеличении влаги до 8%—в три раза. Это связано с возрастанием переноса теплоты испаряющейся водой. Уменьшение размеров частиц песка вызывает эффект экранирования и тормозит теплопередачу излучением. При переходе от крупного песка с размером частиц 0,5—1 мм на более мелкий (0,25 мм) его **теплопроводность** уменьшается до 1,5 раз. Введение добавок опилок

резко уменьшает теплопроводность смеси. При низких температурах теплопередача в смеси определяется главным образом контактами между зёрнами; при высоких излучением и степенью его экранирования.

Усредненные значения тепловых характеристик обычных песчаных формовочных смесей для их обычных условий работы приведены в табл.2.

### **1.3. Расчёт количества газов в твёрдых и жидких литейных сплавах**

В этом разделе содержатся задачи, в которых рассматриваются различные стороны взаимодействия металлических расплавов с газами, а также задачи по раскислению расплавов и образованию неметаллических включений и газовых пор. В задачах по раскислению равновесные содержания кислорода и раскислителя в расплаве, а также состав продуктов раскисления считаются известными и указаны в условиях.

Большинство литейных сплавов в жидком состоянии активно взаимодействуют с газами. В результате образуются разнообразные растворы газов в компонентах сплавов и химические соединения. При охлаждении расплавов растворимость газов в них снижается и они выделяются (табл.1).

При выделении из раствора в процессе кристаллизации газы могут образовывать пустоты, которые разделяются на скопление мелких пузырьков, называемых газовой пористостью, и отдельные крупные пузыри, называемые газовыми раковинами. Их выделение из раствора в твердом металле может вызывать значительные местные давления, внутренние напряжения и надрывы, которые проявляются в виде флокенов в стали или вспучивания на листах из цветных сплавов.

Таблица 1

## Растворимость газов в металлах – основах литейных сплавов

Металлы	Растворимость в см <sup>3</sup> /100 г		К о э ф ф и ц и е н г р а с п р е д е л е н и я
	В твердой фазе	В жидкой фазе	
Магний	18	26	0,70
Алюминий	0,036	0,69	0,052

Медь	4	12	0,33
Никель	18	38,8	0,46
Железо	13,36	26,7	0,50

Некоторые газы, в частности водород, оставаясь в растворенном состоянии в твердых сплавах, понижают их механические свойства.

Источниками газов в отливках являются:

- 1) шихтовые материалы, содержащие их в растворенном состоянии или в виде окисленных поверхностей;
- 2) атмосфера печи при плавке, которая содержит основные компоненты воздуха — азот и кислород; водяные пары и водород, образующийся при их разложении; окислы углерода и серы, образующиеся при сгорании топлива;
- 3) атмосфера формы при разливке.

Содержание газов в сплавах определяют следующим образом.

**Химический анализ.** В этом случае образец из сплава нагревается (желательно до расплавления) в высоком вакууме. При этом газы из него выделяются, а затем определяется их количество и состав обычными методами газового анализа.

**Технологические пробы.** В этом случае о содержании газов судят по их выделению в пробе сплава, затвердевающей в определенных условиях. Например, в алюминиевых сплавах тигель с расплавом охлаждают при давлении 0,1 мм рт. ст. В этих условиях выделение газов происходит весьма интенсивно и довольно полно с образованием пористости. После охлаждения пробу разрезают и подсчитывают количество газовых пузырьков на 1 см<sup>2</sup> поверхности продольного разреза. Развитие пористости, пропорциональное содержанию газа, можно определять по эталонам и выражать в баллах.

Кроме того, существуют различные физико-химические методы определения газов, например, метод спектрального анализа.

Количество газов выражается либо в процентах, либо в кубических сантиметрах (при нормальных условиях) на 100 г сплава. Зависимость растворимости газа в жидком металле от давления определяется по формуле, впервые предложенной А. Сивертсом в 1912 г.,

$$S = A\sqrt{p},$$

где  $p$  — парциальное давление газа в кгс/см<sup>2</sup>;  $A$  — постоянная для данного металла и газа величина.

Одним из эффективных средств удаления газов из металла является вакуумирование, т. е. выдерживание или переливание его в расплавленном состоянии в вакууме.

Кроме изменения растворимости, образование газовых пузырей возможно за счет протекания реакций с получением газообразных продуктов. Например, при недостаточно раскисленной стали в результате увеличения концентрации углерода и кислорода вблизи границы твердой фазы при кристаллизации, протекает реакция  $FeO + C = Fe + CO$ .

Для образования самостоятельной фазы в жидком металле газовый пузырек должен преодолеть давление атмосферы  $p_{атм}$ , гидростатический напор  $\rho H$  и поверхностное натяжение металла  $\sigma$ . Для того чтобы пузырек мог расти, давление  $p$  в нем должно отвечать следующему неравенству:

$$p > p_{атм} + \rho H + 2\sigma/r$$

Если радиус пузырька  $r$  равен нулю, то давление, необходимое для его возникновения, становится бесконечным. Следовательно, его возникновение в непрозрачной жидкости весьма затруднено.

## РАЗДЕЛ 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ЛИТЬЯ

Заполнение литейной формы расплавом представляет собой очень сложную и важную для получения качественной отливки технологическую операцию, определяемую разнообразными физико-химическими явлениями, описываемыми гидростатикой и гидродинамикой.

В задачах этого раздела рассматривается поведение неподвижного расплава в печи, в ковше, в литейной форме. В задачах требуется определить давление на стенки печи, ковша или формы, найти условия подъема верхней полуформы, оценить возможность проникновения расплава в поры стенки формы. Часть задач посвящена явлениям, происходящим в заполненной расплавом вращающейся литейной форме (при центробежном литье), при этом принимается, что все слои расплава и сама литейная форма движутся с совершенно одинаковой угловой скоростью, без проскальзывания. В задачах, отражающих поведение движущегося расплава, рассматривается опорожнение разливочного ковша, фильтрация расплава, заполнение литейной формы расплавом.

### 2.1. Расчёт процессов силового взаимодействия расплава с формой (гидростатика)

**Закон Паскаля.** Пусть жидкость находится в неподвижном сосуде, и на ее свободную поверхность действует внешнее давление  $P_{вн}$ . Необходимо определить, каково будет давление  $P$  в этой жидкости на произвольной глубине  $h$  (рис.1).

Мысленно выделим вертикальный цилиндр с малой площадью основания  $f$  и высотой  $h$ . Составим уравнение сил, действующих по вертикальной оси. На основание цилиндра сверху действует сила внешнего давления  $F = P_m \cdot f$  и сила тяжести столба жидкости  $G = \rho \cdot g \cdot h \cdot f$ , где  $\rho$  - плотность жидкости;  $g$  - земное ускорение.

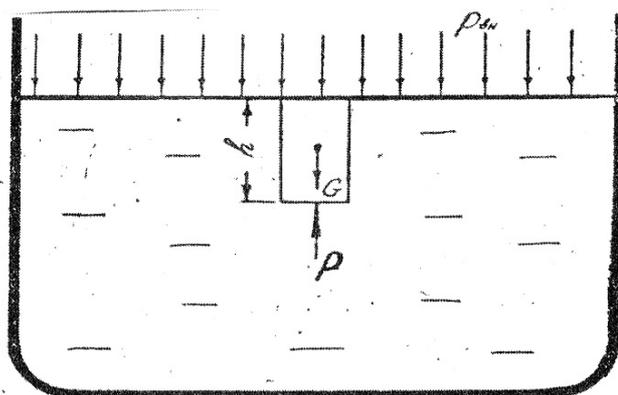


Рис. 1. Схема к выводу основного закона гидростатики

Снизу на основание цилиндра действует сила  $R$ , равная произведению  $R = P \cdot f$ . Все остальные силы, определяемые давлением, действуют в горизонтальном направлении на боковую поверхность цилиндра и в уравнение не входят.

Поскольку рассматриваемый цилиндр неподвижен, следует записать

$$G + F = R \quad (1)$$

или

$$p \cdot g \cdot h \cdot f + P_{\text{вн}} \cdot f = P \cdot f, \quad P = P_{\text{вн}} + p \cdot g \cdot h. \quad (2)$$

Следовательно, давление внутри жидкости равно сумме внешнего давления, оказываемого на жидкость, и давления самой жидкости, определяемого произведением плотности на земное ускорение и на глубину рассматриваемой точки от свободной поверхности. Давление в жидкости действует одинаково по всем направлениям.

Из уравнения (2) вытекает **закон Паскаля**: внешнее давление, приложенное к жидкости, передается равномерно и одинаково по всем направлениям и во все точки жидкости.

Проявление основного закона гидростатики можно видеть при заливке литейных форм с горизонтальным разъемом (рис.2).

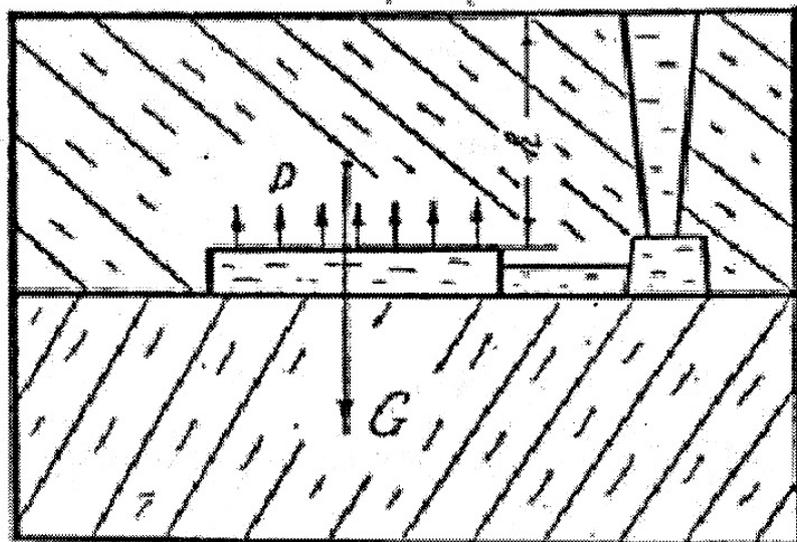


Рис. 2. Схема сил, действующих на верхнюю половину заполненной расплавом литейной формы

В заполненной литейной форме, предназначенной для получения отливки и виде плиты, площадью  $S$  сила, создаваемая давлением расплава, будет равна  $Q = PS$ . Вкладом литниковой системы в данном случае пренебрегаем ввиду его малости.

Если сила  $Q$  превысит массу верхней полуформы  $G$ , то неизбежно эта полуформа будет поднята расплавом, и он вытечет по разьему наружу. Чтобы этого не происходило, формы перед заливкой либо специально нагружают, либо полуформы скрепляют между собой скобами. Масса груза и усилия скрепления задают с определенным запасом, так как при заполнении подъемная сила достигает значительно большей величины из-за так называемого гидравлического удара, возникающего в момент окончания заполнения полости формы. Поскольку подъемная сила прямо зависит от плотности расплава, то при работе с алюминиевыми или магниевыми сплавами эта сила оказывается малой и необходимость в нагружении или скреплении полуформ обычно отпадает.

**Закон Архимеда.** Гидростатическое давление жидкости, которое действует на всякое погруженное в жидкость тело в направлении, обратном действию силы тяжести, стремится вытолкнуть его на поверхность.

Найдем силу, действующую на тело произвольной формы  $ABCDEF$ , погруженное в жидкость (рис.3). Спроектируем это тело на объемную поверхность жидкости, получим поверхность, которая проходит по контуру тела  $ALDK$ . Выделим объем жидкости  $V_{AFEDMN}$ , который действует на тело сверху с силой, равной  $Q_1 = \rho_{ж} \cdot g \cdot V_{AFEDMN}$ . Здесь  $\rho_{ж}$  - плотность жидкости;  $g$  – земное ускорение. Снизу на тело действует сила  $Q_2$ , равная  $Q_2 = \rho_{ж} \cdot g \cdot V_{ABCDMN}$ .

Равнодействующая этих двух сил

$Q = Q_2 - Q_1 = \rho_{ж} \cdot g \cdot (V_{ABCDMN} - V_{AFEDMN})$ . Разность объемов  $V_{ABCDMN} - V_{AFEDMN}$  есть не что иное, как объем рассматриваемого тела  $V_{ABCDEF}$ .

Следовательно,

$$Q = \rho_{ж} \cdot g \cdot V_{ABCDEF} \quad (3)$$

Таким образом, на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная по величине массе вытесненной жидкости. Это есть закон Архимеда.

Если архимедова сила  $Q$  больше массы самого тела, то оно всплывает на поверхность жидкости. Это определяется соотношением плотности жидкости  $\rho_{ж}$  и тела  $\rho_{т}$ .

Если  $\rho_{ж} > \rho_{т}$ , то тело всплывает, а если  $\rho_{ж} < \rho_{т}$ , - тонет в жидкости.

В литейном производстве с действием закона Архимеда приходится считаться при использовании стержней - специальных частей формы, выполняющих внутренние полости в отливке. Материал стержней имеет плотность 1,6-1,8 г/см<sup>3</sup>, и поэтому только в магниевых сплавах, обладающих плотностью не более 1,6 г/см<sup>3</sup>, стержни не будут всплывать во время заливки. При получении отливок из чугунов, сталей, медных и алюминиевых сплавов всегда принимают специальные меры против возможного всплывания стержней.

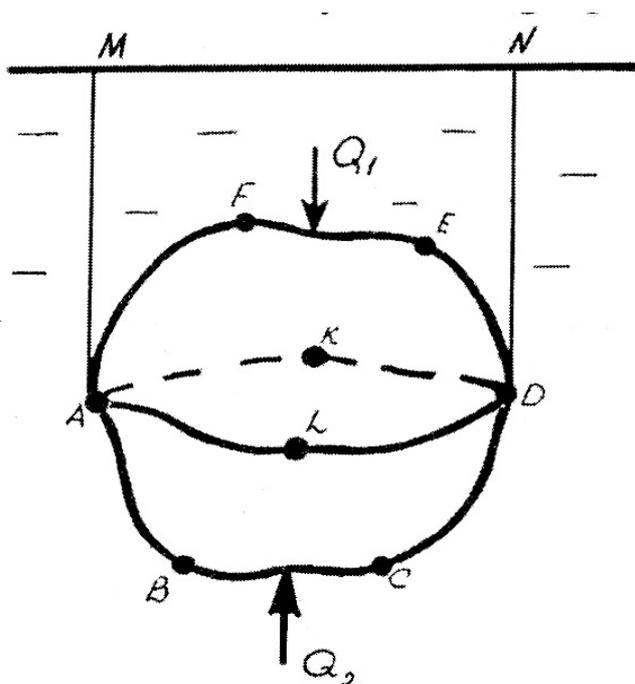


Рис.3. Схема к расчёту сил, действующих на тело произвольной формы, погруженное в жидкость

При конструкции литейной формы, изображенной на рис.4, а, теоретически на стержень не действует выталкивающая сила, поскольку он не охвачен жидкостью с нижней стороны. Однако практически всегда есть вероятность подтекания расплава под опорную часть стержня, так называемый знак, и тогда всплывание возможно. Поэтому на практике подобные стержни всегда укрепляют с помощью большого знака (опорной части) либо с помощью специальных жеребеек. При конструкции, изображенной на рис. 4, б, произойдет всплывание стержня, если архимедова сила, определяемая объемом выступов 1 на стержне, окажется больше массы всего стержня.

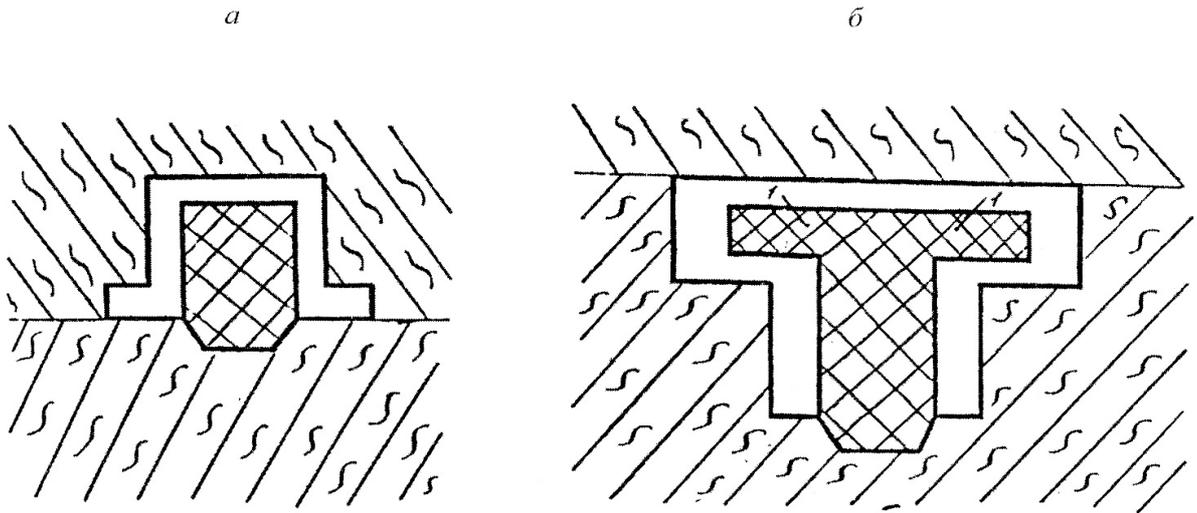


Рис. 4. Конструкция литейной формы, при которой всплытие стержня в расплаве теоретически невозможно (а) и вероятно (б)

Давление ( $p$ ) в неподвижной жидкости, находящейся в сосуде со свободной поверхностью:

$P = \rho gh + P_{\text{внеш}}$ ; где:  $\rho$  - плотность жидкости,  $g$  - земное ускорение,  $h$  - расстояние по вертикали от свободной поверхности до данной точки в объеме жидкости,  $P_{\text{внеш}}$  - внешнее давление на свободную поверхность жидкости.

Давление  $P$  в газовом пузыре, находящемся в жидкости или давление ( $p$ ) в капле жидкости 2 несмешивающейся с жидкостью 1:

$P = 2\sigma/r + \rho gh + p_{\text{внеш}}$ ; где:  $\sigma$  - поверхностная энергия на границе газ-жидкость 1 или жидкость 1 - жидкость 2,  $r$  - радиус газового пузыря или капли жидкости 2,  $\rho$  - плотность жидкости 1,  $g$  - земное ускорение,  $h$  - расстояние по вертикали от свободной поверхности жидкости 1 до газового пузыря или капли жидкости 2,  $p_{\text{внеш}}$  - внешнее давление на свободную поверхность жидкости.

Капиллярное давление, возникающее в цилиндрическом канале ( $P_{\text{цил}}$ ) или плоском зазоре ( $p_{\text{пл}}$ ) при заполнении их жидкостью:

$$P_{\text{цил}} = 2\sigma \cos\varphi/r;$$

$P_{\text{пл}} = \sigma \cos\varphi/0,5\delta$ , где  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости,  $r$  - радиус цилиндрического канала,  $\delta$  - толщина плоского зазора,  $\varphi$  - краевой угол смачивания жидкостью материала канала.

При расчетах необходимо учитывать знак косинуса угла  $\varphi$ . Если  $\varphi < 90^\circ$ , то  $\cos\varphi > 0$  и давление  $p > 0$ . Это означает, что жидкость самопроизвольно затекает в канал (зазор). Если  $\varphi > 90^\circ$ , то  $\cos\varphi < 0$  и  $p < 0$ . Это говорит о том, что жидкость может затечь в канал (зазор) только под внешним давлением, превосходящим вычисленное.

**Закон Архимеда:** тело, погруженное в жидкость, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им жидкость.

Скорость ( $V$ ) установившегося движения шарообразной частицы в жидкости под действием силы тяжести (формула Стокса):

$V = (2/9) \cdot [(p_{\text{ч}} - p_{\text{ж}})r^2g/\eta]$ , где  $p_{\text{ж}}$  - плотность жидкости,  $p_{\text{ч}}$  - плотность материала частицы,  $r$  - радиус частицы,  $\eta$  - динамическая вязкость жидкости,  $g$  - земное ускорение.

При  $p_{\text{ч}} > p_{\text{ж}}$  частица движется по направлению действия силы тяжести (вниз), при  $p_{\text{ч}} < p_{\text{ж}}$  частица движется в обратном направлении.

## 2.2. Расчёт гидродинамических параметров литья

**Закон постоянства масс движущегося потока.** Металлические расплавы обладают плотностью, не зависящей от давления. Поэтому при течении расплава по полностью заполненному каналу, площадь поперечного сечения которого переменна и составляет  $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ , наблюдается постоянство объемного расхода  $V = u_1 \cdot f_1 = u_2 \cdot f_2 = u_3 \cdot f_3 \dots u_n \cdot f_n$  (см<sup>3</sup>/с). Здесь  $V$  - средняя линейная скорость потока на участке канала с соответствующим сечением (см/с). Поскольку плотность расплава при всех условиях остается неизменной, то и массовый расход  $Q = V \cdot \rho$  (кг/с) тоже постоянен.

**Закон Бернулли.** При движении жидкости в закрытом канале (рис.5) в направлении от сечения 1 к сечению 2 происходят взаимные переходы

кинетической и потенциальной энергий частиц жидкости. При этом в силу закона сохранения сумма обоих видов энергии остается постоянной.

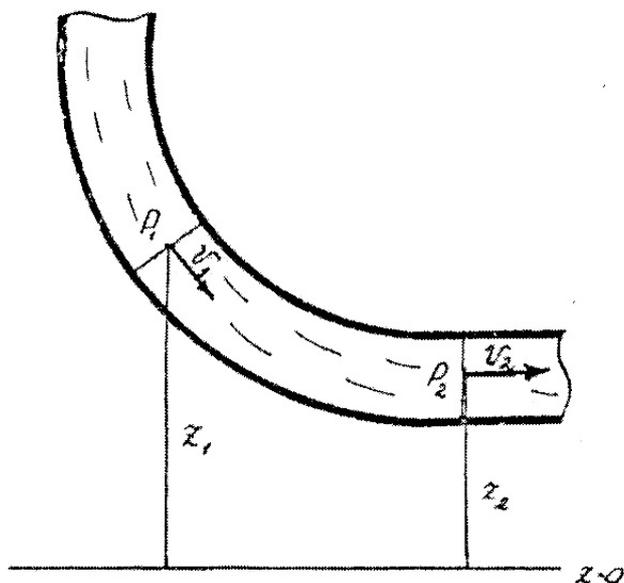


Рис. 6.5. Схема, поясняющая закон Д. Бернулли

Потенциальная энергия определяется высотой  $Z$  над произвольно выбранным уровнем, где  $Z = 0$ , и давлением  $P$ . Кинетическая энергия определяется линейной скоростью движения жидкости  $u$ . Количественно закон постоянства энергии в рассматриваемом потоке выражается равенством

$$Z_1 + P_1/\rho g + u_1^2/2g = Z_2 + P_2/\rho g + u_2^2/2g. \quad (4)$$

Это и есть уравнение Д. Бернулли, согласно которому сумма геометрического  $Z$ , пьезометрического  $P/\rho g$  и скоростного  $u^2/2g$  напоров (м, см, мм) в различных сечениях потока жидкости есть величина постоянная.

Уравнение Д. Бернулли можно написать в единицах давления (Па, атм, кг/см<sup>2</sup>)

$$Z_1 \rho g + P_1 + u_1^2 \rho / 2 = Z_2 \rho g + P_2 + u_2^2 \rho / 2. \quad (5)$$

В приведенной форме уравнение Д. Бернулли характеризует поведение идеальной жидкости, имеющей нулевую вязкость и не испытывающей трения о стенки каналов. Для реальной ньютоновской жидкости, какой являются расплавы, при течении от сечения 1 к сечению 2 некоторая часть энергии будет потеряна и

перейдет в тепло. Поэтому в правой части уравнения вводится дополнительный член  $\Delta H$ , выражающий эти потери:

$$Z_1 + P_1/\rho g + u_1^2/2g = Z_2 + P_2/\rho g + u_2^2/2g + \Delta H_{1-2}. \quad (6)$$

Течение жидкости может быть ламинарным и турбулентным. При ламинарном характере отдельные струи текут, не перемешиваясь в виде параллельных слоев. При турбулентном течении струи произвольным образом перемешиваются, частицы жидкости движутся не только вдоль, но и поперек общего потока. Характер течения жидкости определяется взаимодействием сил инерции и сил вязкости.

Преобладание сил вязкости приводит к ламинарному движению. При усилении влияния инерционных сил течение становится турбулентным. Очевидно, что характер течения должен зависеть от вязкости жидкости, линейной скорости движения и размера сечения канала как элемента, воспринимающего силы трения. Эта связь выражается безразмерной величиной числом Рейнольдса  $Re = u \cdot d / \nu$ , где  $u$  - линейная скорость потока (см/с);  $d$  - диаметр канала круглого сечения (см);  $\nu$  - кинематическая вязкость (см<sup>2</sup>/с). Для канала некруглого сечения используется эквивалентный диаметр  $d_{эке} = 4R_{гидр}$ , равный четырем гидравлическим радиусам.

Гидравлический радиус есть отношение площади поперечного сечения потока жидкости к смоченному периметру. Например, если канал имеет прямоугольную форму в поперечном сечении с размерами  $a$  и  $b$  и целиком заполнен потоком, то:

- площадь сечения потока  $F = a \cdot b$  ;
- смоченный периметр  $P = 2(a + b)$ ;
- гидравлический радиус  $R_{гидр} = F/P = a \cdot b / 2(a + b)$ ;
- эквивалентный диаметр  $d_{эке} = 2a \cdot b / (a + b)$  .

Для канала квадратного сечения  $a = b$ ;  $R_{гидр} = a/4$ ;  $d_{эке} = a$ .

Для цилиндрического канала гидравлический радиус

$$R_{гидр} = (\pi d^2/4) / \pi d = d/4.$$

Для воды установлено, что течение сохраняется ламинарным при  $Re < 2300$ . При  $Re > 2300$  течение становится турбулентным.

Скорость ( $v$ ) и объемный расход ( $q$ ) жидкости, свободно вытекающей из отверстия в стенке или дне сосуда:

$$v = \sqrt{2gH}; q = \varepsilon f v = \varepsilon \varphi f \sqrt{2gH} = \mu f \sqrt{gH},$$

где  $\varepsilon$  - коэффициент сжатия струи,  $\varepsilon = 0,65 - 0,67$ ;  $\varphi$  - коэффициент скорости,  $\varphi = 0,95 - 0,98$ ;  $\mu$  - коэффициент расхода,  $\mu = 0,62 - 0,65$ ;  $f$  - площадь отверстия;  $g$  - земное ускорение,  $H$  - расстояние по вертикали от центра отверстия до свободной поверхности жидкости.

Если жидкость вытекает через систему заполненных каналов, то коэффициент расхода  $\mu = (1/(1 + \sum \xi))^{1/2}$ , где  $\xi$  - коэффициент потерь напора на трение, при поворотах, сужениях и расширениях каналов. Эти коэффициенты указаны в справочниках.

**Критерий Рейнольдса:**

$Re = 4R_{гидр} u / \nu$ , где  $R_{гидр}$  - гидравлический радиус канала,  $R_{гидр} = F/P$ ,  $F$  - площадь поперечного сечения канала,  $P$  - смоченный периметр сечения,  $u$  - скорость потока жидкости,  $\nu$  - кинематическая вязкость жидкости,

$\nu = \eta/\rho$ ,  $\eta$  - динамическая вязкость жидкости,  $\rho$  - плотность жидкости.

## 2.3.Расчёт литниковых систем

**Классификация литниковых систем.** Литниковые системы подразделяют по гидродинамическому признаку на сужающиеся и расширяющиеся и по направлению течения расплава в полость формы на верхние, боковые и нижние (сифонные).

Для сужающихся литниковых систем характерно последовательное уменьшение площадей поперечных сечений стояка, шлакоуловителя и питателей:

$$f_{cm} > f_{ул} > f_{num}.$$

При наличии самого узкого места в питателях, лимитирующих расход металла, обеспечивается быстрое заполнение металлом всей системы и шлакоуловителя в целях лучшего улавливания шлака. Однако истечение металла в полость формы происходит с большой линейной скоростью, что может привести к разбрызгиванию и окислению расплава, захвату воздуха и размыву формы. Наиболее широко эти системы применяют в производстве чугунных отливок.

В расширяющихся литниковых системах узкое место чаще всего находится в нижнем сечении стояка:

$$f_{cm} < f_{ул} < f_{num}.$$

Скорость потока от стояка к питателям последовательно снижается, в результате чего металл поступает в полость формы более спокойно, с меньшим разбрызгиванием, меньше окисляясь и размывая стенки формы. Расширяющиеся системы применяют при изготовлении отливок из стали, алюминиевых, магниевых и других легкоокисляющихся сплавов. В настоящее время наблюдается тенденция их использования и для чугунных отливок.

На рис.1 показаны литниковые системы с верхним (а), боковым (б—д) и нижним (ё) подводом металла.

Для систем на рис.1, а, б характерным является то, что в течение всей заливки обеспечивается горячее зеркало расплава, что способствует направленному снизу вверх затвердеванию и устранению дефектов отливок, связанных с охлаждением и преждевременным затвердеванием головной части потока металла. Применять их для легкоокисляющихся сплавов нецелесообразно, так как падающая струя способствует образованию оксидных плен и пены.

В системах на рис.1, б—г шлакоуловители и питатели расположены сбоку отливки в горизонтальной плоскости разъема формы, что удобно в отношении формовки. При машинной формовке наиболее часто используют систему, показанную на рис.1, г.

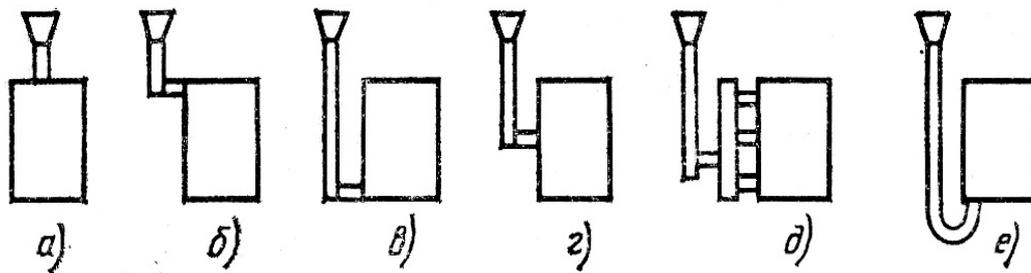


Рис.1. Литниковые системы с различным подводом металла

В литниковых системах на рис.1, в, е металл поступает снизу под затопленный уровень без разбрызгивания, окисления и вспенивания, что наиболее важно для легкоокисляющихся пленообразующих сплавов. Эти системы обычно применяют для отливок с отношением их высоты к толщине стенки не более 50, так как в противном случае форма может не заполниться металлом из-за преждевременного охлаждения и затвердевания головной части потока. Нижний подвод металла не способствует направленному снизу вверх затвердеванию отливки.

Ярусные литниковые системы (рис.1, д) характеризуются последовательным действием питателей, начиная с нижних, по мере подъема уровня металла в полости формы. Эти системы, обеспечивающие спокойное заполнение и достаточно горячий металл в головной части потока, широко применяют при изготовлении крупных и тонкостенных отливок из черных и цветных сплавов.

**Расчёт литниковых систем.** В расчетах используют законы гидравлики, эмпирические зависимости и номограммы. Расчет обычно сводится к определению площади поперечного сечения узкого места  $f_{уз}$  литниковой системы с последующим определением площадей поперечных сечений остальных элементов системы.

Основным является уравнение

$$f_{yz} = M/(\rho \tau \mu \sqrt{2gH_p}), \quad (1)$$

где  $M$  — масса всех отливок в форме, включая боковые прибыли;  $\rho$  — плотность жидкого металла;  $\tau$  — продолжительность заполнения формы;  $\mu$  — коэффициент расхода металла;  $0 < \mu < 1$ ;  $g$  — ускорение свободного падения;  $H_p$  — расчетный статический напор.

Время заполнения формы рассчитывают по формулам, которые можно представить в следующей обобщенной форме:

$$\tau = A\delta^m M^n,$$

где  $\delta$  — толщина стенки (преобладающая) отливки, мм;  $M$  — масса отливки, кг;  $A, m, n$  — коэффициенты, значения которых приведены в табл. 9.

Наиболее часто используют зависимость вида  $\tau = A \cdot (\delta M)^{1/3}$  в которой  $m = n = 0,334$ .

Коэффициент расхода  $\mu$ , характеризующий суммарные гидравлические потери, определять расчетным методом затруднительно, так как литниковые каналы являются относительно короткими и, кроме того, заранее необходимо знать площади сечений и размеры всех элементов литниковой системы. Поэтому его обычно определяют экспериментально. В большинстве случаев  $\mu = 0,4 - 0,7$  (табл. 2).

Наибольшее влияние на коэффициент расхода оказывает сама литниковая система: ее сложность, характер местных сопротивлений, число поворотов и др. Влияние полости формы незначительно, и только для самых сложных и тонкостенных отливок можно вносить поправку 5—7 % в сторону снижения коэффициента  $\mu$ .

Таблица 1

**Значения коэффициентов  $A, m, n$ ,  
для различных сплавов**

Сплав	<i>A</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
Чугун *	1,63—2,2	0	0,5
Чугун **	2	0,331	0,334
Сталь **	1,5	0,334	0,334
Алюминиевый **	1,7—3	0,334	0,334
Магниевого **	2,3—4,5	0,334	0,334

\* По данным Г. Дитерта.

\*\* По данным Г. М. Дубицкого.

Таблица 2

Коэффициент расхода  $\mu$  для различных **форм и сплавов**

Форма	Чугун	Сталь
Мелкая	0,6/0,5	0,5/0,42
Средняя	0,48/0,42	0,38/0,32
Крупная	0,41/0,35	0,3/0,25

Примечание. В числителе приведены

данные для сухой формы,

в знаменателе — для сырой.

В первом приближении можно пользоваться некоторыми практическими рекомендациями. По мере перехода от нижних к верхним литниковым системам коэффициент расхода увеличивается. Так, например, боковая (см. рис.1, *г*) и нижняя (см. рис.1, *в*) литниковые системы по сравнению с верхней (см. рис.1, *б*) имеют меньшие значения  $\mu$  соответственно на 0,1 и 0,2. При повышении температуры заливки на 50 °С к значению  $\mu$  прибавляют 0,05. Если полость формы имеет слабую вентиляцию, то  $\mu$  уменьшают на 0,05.

При заливке через литниковую чашу происходит полное гашение энергии струи металла, падающей из ковша. Расчетный статический напор в этом случае (рис. 2, *а*)

$$H_p = H_0 - p^2(2c),$$

где  $H_0$  — начальный напор или расстояние от горизонтальной оси питателей до верхнего уровня металла в чаше;  $p$  — расстояние от горизонтальной оси питателей до верха отливки;  $c$  — высота отливки.

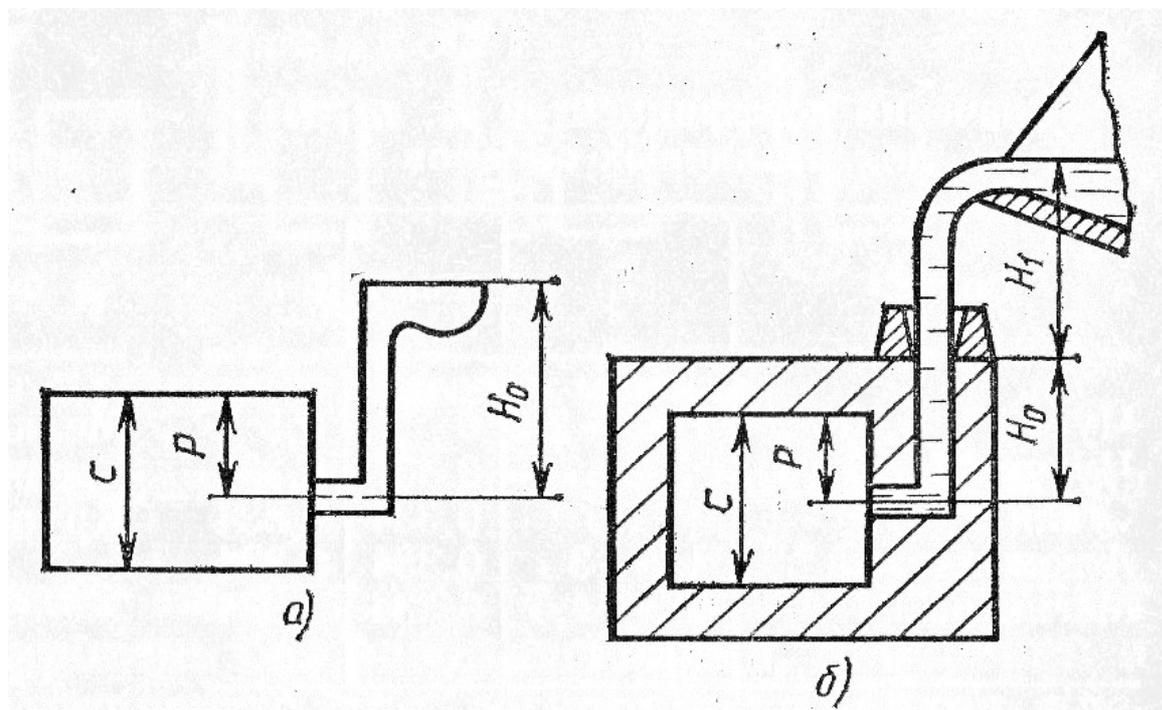


Рис.2. К определению расчётного статического напора при заливке металла через литниковую чашу (а) и воронку (б)

Для литниковых систем на рис. 1, а, б  $p = 0$  и  $H_p = H_0$  и для систем на рис. 1, в, е  $p = c$  и  $H_p = H_0 - c/2$ . Если заливка ведется через литниковую воронку (рис. 2, б), то расчетный статический напор

$$H_p = H_0 - p^2(2c) + H_1,$$

где  $H_0$  — расстояние от оси питателей до верхней кромки верхней опоки;  $H_1$  — расстояние от верхней кромки верхней опоки до уровня металла в поворотном ковше.

После определения площади сечения узкого места по формуле (1) рассчитывают площади поперечных сечений остальных элементов системы. На практике наиболее часто используют следующие соотношения площадей поперечных сечений стояка, шлакоуловителя и питателей:

для чугунов

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} \text{ составляет } 1 : 1,2 : 1,5;$$
$$1 : 1,5 : 1,2; \quad 1 : (1-2) : 1; \quad 1,2 : 1,1 : 1,$$

для сталей

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} = 1,1 : 1,3 : 1,5,$$

а если применяют шамотный сифонный припас

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} = 1 : 1 : (1 - 2),$$

для медных сплавов

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} = 1 : 2 : (2 - 4),$$

для алюминиевых и магниевых сплавов

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} = 1 : (2 - ) : (2 - 6).$$

После расчета площадей сечений определяют размеры всех элементов литниковой системы. Для прямого круглого стояка определяют его диаметр. Наиболее часто используемые трапециевидные шлакоуловители имеют следующие соотношения размеров:

$$b_{шл.в} = 0,8b_{шл.н}; \quad h_{шл} = 1,4b_{шл.н},$$

где  $b_{шл.в}$ ,  $b_{шл.н}$  — соответственно верхнее и нижнее основания;

$h_{шл}$  — высота шлакоуловителя.

Поперечные сечения питателей обычно имеют прямоугольную форму. Толщина питателя  $\delta_{пит}$  не должна превышать толщину отливки в месте подвода металла. Ширину питателя  $b_{пит}$  определяют делением площади его поперечного сечения на высоту. Размеры литниковых чаш и воронок выбирают по справочным материалам.

### РАЗДЕЛ 3. Расчет прибылей для отливок

Прибыли подразделяют по следующим признакам:

- по расположению различают верхние и боковые;
- по технологии изготовления - открытые, закрытые;
- по заполнению - проточные, сливные (отводные);
- по протяженности - сплошные, локальные;
- по силам, действующим на металл в прибыли—гравитационные (действуют только при заливке в вакууме), гравитационно-атмосферные, газового давления и высокого давления;
- по условиям охлаждения - обычные (полость для прибыли выполнена из того же материала, что и литейная форма), теплоизолированные (полость выполнена из менее теплопроводного материала, чем форма), экзотермические (материал полости выделяет тепло при его нагреве металлом);
- по способу отделения - отбиваемые, отрезаемые и легкоотделяемые;
- по числу питаемых узлов - индивидуальные и групповые;
- по конфигурации - цилиндрические, шаровые, полушаровые, кольцевые, кольцевые в форме перевернутого стакана с плоским и сферическим дном, прямоугольные, квадратные и сложной формы в соответствии с конфигурацией теплового узла.

Верхние прибыли располагаются, как правило, над массивным узлом в верхней части отливки.

Боковые прибыли соединяются с массивными узлами на вертикальных или наклонных поверхностях отливки.

Открытые прибыли доходят до контрлада формы и их верхняя поверхность непосредственно сообщается с атмосферой.

Закрытая прибыль со всех сторон окружена формовочной или стержневой смесью.

Проточные (проливные) прибыли расположены на пути металла из стояка и литниковых каналов в полость формы, соединяются с отливкой шейкой и через них (если их несколько) протекает вся масса заливаемого в форму металла, за

исключением металла, находящегося в каналах литниковой системы до проточных (проливных) прибылей.

В сливные прибыли заливаемый металл «сливается» из отливки.

Сплошные прибыли применяются для цилиндрических отливок (например, цилиндров компрессоров) и цилиндрических частей отливок (например, ступиц зубчатых колес). Как правило же, прибыли бывают локальными.

Как уже выше было отмечено, сила гравитации действует только в условиях вакуума, т.е. когда атмосферное давление равно нулю. При заливке в условиях обычной атмосферы с давлением, равном 1 кгс/см<sup>2</sup>, или в автоклаве с повышенным давлением от 5 кгс/см<sup>2</sup> (давление в сети сжатого воздуха) и выше силы гравитации и силы давления «атмосферы» действуют совместно, т.е. прибыли являются гравитационно-атмосферными, тем не менее такие прибыли называются прибылями атмосферного давления.

Атмосферное давление начинает действовать только тогда, когда в междендритных каналах возникает пониженное давление - вакуум. Этот момент наступает, когда силы тяжести не могут компенсировать уменьшение объема жидкой фазы в междендритных пространствах. Поэтому при уменьшении объема происходит разрыв жидкости, образуется пустота с давлением, равным нулю. Тут же автоматически включается «атмосфера»: металл уже под совместным воздействием сил тяжести и сил давления атмосферы продавливается по междендритным каналам в образовавшуюся пустоту, устраняя пористость в отливке. Очевидно, что чем больше «атмосферное» давление, тем плотнее будет отливка.

### 3.1. Определение тепловых узлов

Расчет прибылей начинается с определения тепловых (горячих, термических, массивных) узлов (скоплений) металла в отливке. Для этого в тепловые узлы сечений стенок отливки вписывают окружность так, чтобы она одновременно касалась очертаний этого узла. Далее определяют отношения диаметра  $D_{во}$  вписанной окружности к максимальной толщине  $h_{max}$  стенки, подходящей к этому узлу, т.е.  $D_{во}/h_{max}$ . Важным является выбор допустимого граничного значения этого отношения (критерия)  $K_y$  (для данного сплава), с которым надо сравнить отношение  $D_{во}/h_{max}$ .

Если  $D_{во}/h_{max} > K_y$ , то рассматриваемый узел является тепловым, в противном случае этот узел не является таковым.

Трудности выбора критерия  $K_y$  связаны с различным временем затвердевания разных узлов, несмотря на одинаковые значения  $K_y$ , кроме того,  $K_y$  зависит от типа сплава и от требований к отливке. В первом приближении для отливок общего назначения ориентировочные значения  $K_1$  можно принять по следующим данным:

Углеродистая сталь	СЧ 15	Al-сплавы	Mg-сплавы	Cu-сплавы
1,1...1,2	1,2...1,3	1,2....1,3	1,15...1,25	1,2....1,4

При значениях  $K_y$ , превышающих приведенные, в отливках возможны усадочные дефекты.

### 3.2. Определение количества прибылей

При расчете прибылей необходимы данные по радиусу действия прибылей  $l_{оп}$ , холодильников  $l_x$  и торцов  $l_m$  (рис.5). Некоторые из известных данных приведены в табл. 5.

В соответствии с тепловыми узлами и этими данными технолог должен назначить места установки прибылей и холодильников.

После определения мест установки прибылей следует рассчитать объемы и размеры прибылей и толщину и массу холодильников (если они

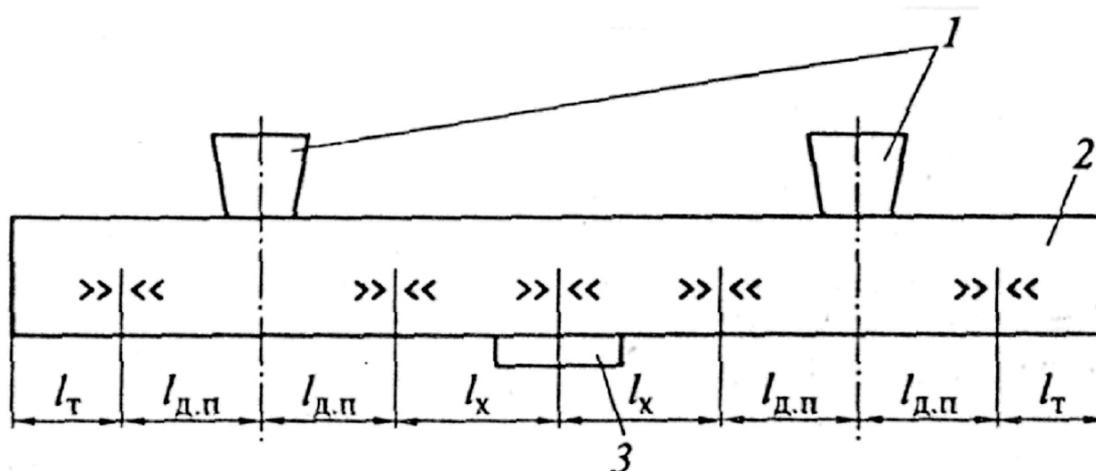


Рис. 5. Радиусы действия прибылей (1), торцов (2) и холодильников (3):  $l_{пр}$ ,  $l_m$ ,  $l_x$  - длина тепловых зон действия торцов, прибылей и холодильников соответственно; « области появления пористости »

применяются). Затем следует проверить, обеспечивается ли принятым количеством прибылей и (или) холодильников заданное качество отливки.

Для этого измеряются расстояния  $l_{отл}$  от края прибыли для трех случаев: до торцов отливки, до края соседней прибыли и до края соседнего холодильника

Затем сравнивают эти расстояния с радиусами действия прибылей, холодильников и торцов. Если стенки отливки изогнуты (плавно или по ломанной линии), то за расстояние  $l_{отл}$  следует принимать протяженность средней линии

стенки отливки. При правильной установке прибылей и холодильников должны быть выполнены следующие неравенства для названных выше трех случаев:

Первый случай:  $l_{отл} \leq (l_{он} + l)$

Второй:  $l_{отл} \leq 2l_{он}$

Третий:  $l_{отл} \leq (l_{он} + l_x)$ .

Если какое-либо из неравенств не выполняется, то необходимо установить дополнительные прибыль или холодильник, использовать технологический напуск или изменить протяженность прибыли.

Таблица 5

**Относительные протяженности зон действия торцевого эффекта  $l_t$ , холодильника  $l_x$  и радиуса питания прибыли  $l_{дп}$  для отливок типа бруска, плиты и кольца.**

Сплавы	Относительная длина (протяженность) зоны плотного металла.	Прибыльная зона $K_{пр} = l_{дп}/h_o$	Зона торцевого эффекта $K_m = l_m/h_o$	Зона действия холодильника $K_x = l_x/h_o$
	1			
Сталь углеродистая, белый чугун	2,5	2,0	2,0	3,0
Сталь легированная	1,5	1,875	2,5	2,5
Латунь 70,30	2,0	2,0	2,5	2,5
Латунь с 4% Zn	1,77	2,23	2,5	2,5
Алюминиевая бронза	2,0	2,0	2,5	3,0
Марганцовистая бронза	2,0	2,0	2,5	2,5
Силумин	3,5	3,5	4,5	3,5
Al-Cu	3,0	3,0	5,5	4,0

### 3.3. Расчет массы (объема) и размеров прибылей для отливок, изготавливаемых в песчано-глинистых формах

При расчете прибылей необходимо учитывать, что прибыль должна иметь минимальный запас по объему (массе), который обеспечивает питание отливки и вывод в нее усадочных дефектов из отливки; затвердевать позже питаемого узла, для чего иметь минимальную поверхность охлаждения.

Кроме того, конструкция и расположение прибылей должны обеспечить, по возможности, удобство формовки, минимальные затруднения усадки отливки и минимальные затраты на их отделение от отливки.

По расчету прибылей имеется обширная литература .

В данном учебном пособии ниже описаны 2 эмпирических метода расчета: метод Й. Пржибыла и метод расчета по массе питаемого узла и его приведенному размеру.

Метод И.Пржибыла [23].

В этом методе используется коэффициент прибыли  $K_{п}$ , равный отношению объема прибыли  $V_{пр}$  к объему усадочной раковины  $V_{ур}$  :

$$K_{п} = V_{пр} / V_{ур}. \quad (4)$$

Коэффициент  $K_{п}$  определяется экспериментально.

С другой стороны, исходя из физических представлений, объём усадочной раковины можно определить из следующего соотношения

$$V_{ур} = \varepsilon_{v\Sigma} \cdot (V_o + V_{пр}) \quad (5)$$

где:  $\varepsilon_{v\Sigma}$  - суммарная относительная объемная усадка затвердевания и усадка в жидком состоянии;

$V_o$  - объем отливки или питаемого узла, очерченного радиусом действия прибыли

Решая совместно уравнения (4) и (5), получаем:

$$V_{пр} = V_o \cdot \varepsilon_{v\Sigma} K_{п} / (1 - \varepsilon_{v\Sigma} K_{п}) \quad (6)$$

Данные для вычислений с помощью уравнения (6) приведены в

табл. 6.

После нахождения  $V_{np}$  размеры поперечного сечения  $a_n$ ,  $b_n$  и высоту  $H_n$  прибыли можно определить по следующим уравнениям:

$$a_n = k_k k_p \cdot (V_{np} \cdot k_{\pi} k_{\phi} / k_{\pi})^{1/3} \quad (7)$$

где:  $a_n = b_n$  (квадратное сечение);

$a_n = d_n$  (круглое сечение - цилиндр  $d_y$ , шар  $d_m$ );

$a_n = b_n / k_n$  (прямоугольное сечение);

$k_{\pi}$  - коэффициент соотношения сторон прямоугольного сечения, для квадратного и круглого сечений  $k_{\pi} = 1$ ;

$k_k$  - коэффициент, определяемый количеством питаемых отливок от одной прибыли,  $k_k = 1$  - для одной отливки,  $k_k = 0,7$  - для двух,  $k_k = 0,58$  - для трех и  $k_k = 0,5$  - для четырех отливок;

$k_p = 1,1-1,2$  коэффициент превышения размера прибыли над размером отливки, для отливки типа плиты  $k_p = 1$ ;