

**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования**

Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра машиностроения

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И
ОБОРУДОВАНИЯ**

РАСЧЕТ СОСУДОВ С ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

*Методические указания к самостоятельным работам
для студентов магистратуры направления 15.04.02*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021**

УДК 622.012 (073)

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ. Расчет сосудов с жидким металлом: Методические указания к самостоятельным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *С.Л. Иванов, И.Е. Звонарев, А.В. Михайлов*. СПб, 2021. 27 с.

Изложен теоретический материал необходимый при оценке величин сопротивлений при повороте сосуда с жидким металлом. Представлены варианты индивидуальных заданий и методика автоматизированного расчета сосуда технологических сопротивлений, возникающих при повороте сосуда с жидким металлом в среде Компас 3D.

Предназначены для студентов магистратуры всех форм обучения направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование».

Научный редактор проф. *В.В.Максаров*

Рецензент канд. техн. наук *Д.А. Шибано* (ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова»)

ВВЕДЕНИЕ

В технологии получения цветных металлов, на одном из первых мест находятся агрегаты, как для новых, так и для традиционных металлургических процессов. С этой точки зрения, выпускаемые машины можно разбить на две группы: горизонтальные конвертеры и наклоняющие анодные печи (для традиционной технологической схемы: плавка, конвертирование, рафинирование); вертикальные конвертеры и агрегаты автогенной плавки.

Данное оборудование занимает важное место в металлургии тяжелых цветных металлов, и его технический уровень, по существу, определяет эффективность работы металлургических цехов.

Важным этапом при создании изделия машиностроения является процесс проектирования. Будущие выпускники должны научиться принимать конструкторско-технологические решения, соответствующие эксплуатационным требованиям к изделиям и современному уровню развития технологии. Самостоятельная работа студентов должна обеспечить выработку навыков творческого подхода к решению этих задач.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При повороте сосуда с жидким металлом (конвертера, ковша, электропечи, шлаковой чаши, миксера и т.д.) общий статический момент, который должен преодолеть привод при опрокидывании сосуда с металлом, равен сумме моментов:

$$M_{\text{оп}} = M_{\text{п}} + M_{\text{м}} + M_{\text{тр}}$$

где $M_{\text{п}}$ – момент, необходимый для поворота порожнего сосуда;

$M_{\text{м}}$ – момент от веса жидкого металла;

$M_{\text{тр}}$ – момент от сил трения в опорах сосуда.

Опрокидывающий момент в зависимости от веса порожнего сосуда.

Определение опрокидывающего момента в зависимости от веса порожнего сосуда сводится к нахождению центров тяжести корпуса (ковша, контейнера, миксера, электропечи) и его футеровки. Определение производят одним из способов, изложенных в курсе теоретической механики.

Координаты центра тяжести корпуса (футеровки) сосуда как однородного твердого тела относительно координатной системы XOY .

$$x = \frac{\sum \Delta V_i x_i}{\sum \Delta V_i}$$
$$y = \frac{\sum \Delta V_i y_i}{\sum \Delta V_i}$$

где ΔV – элементы объема тела;

x_i, y_i – координаты центров тяжести элементов объема тела.

$$x = \frac{\sum \Delta G_i x_i}{\sum \Delta G_i}$$
$$y = \frac{\sum \Delta G_i y_i}{\sum \Delta G_i}$$

где G_i, x_i, y_i – соответственно вес элементов корпуса (футеровки), сосуда и координаты их центров тяжести.

Общие координаты центра тяжести порожнего сосуда

$$x_0 = \frac{\sum \Delta G_k x_k + \sum G_\phi x_\phi}{\sum \Delta G_k + \sum \Delta G_\phi}$$

$$y_0 = \frac{\sum \Delta G_k y_k + \sum G_\phi y_\phi}{\sum \Delta G_k + \sum \Delta G_\phi}$$

где G_k ; G_ϕ – вес корпуса и футеровки;

x_k ; x_ϕ ; y_k ; y_ϕ – координаты их центров тяжести.

Расстояние от центров тяжести порожнего сосуда до оси его вращения равно r для сосудов симметричной формы (конические ковши, конверторы с симметричной горловиной и т.д.).

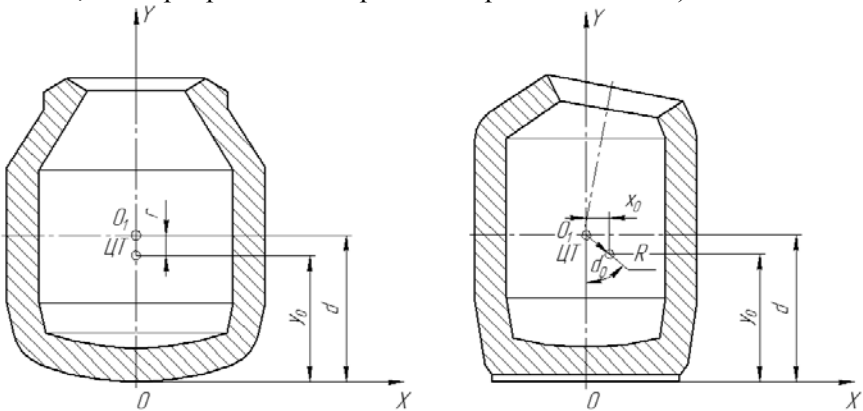


Рисунок 1 – Схемы к определению опрокидывающего момента от веса порожнего сосуда.

Опрокидывающий момент от веса порожнего сосуда симметричной формы определяют из выражения:

$$M_n = G_o r_o \sin \varphi$$

график изменения этого момента представлен на рисунке 2.

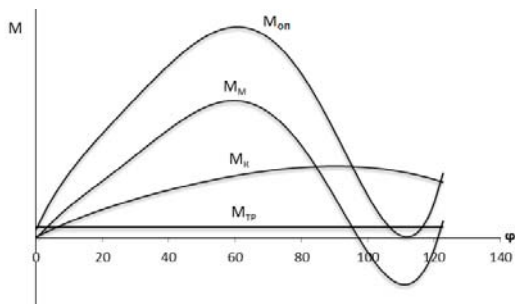


Рисунок 2 – Графики опрокидывающих моментов конвертера функции угла поворота.

Опрокидывающий момент в зависимости от веса жидкого металла.

Определение опрокидывающих моментов сосудов произвольной формы с жидким металлом вследствие изменения формы жидкого металла и смещение его центра тяжести при различных углах поворота сосуда является сложной задачей, поэтому универсальных аналитических методов ее решения нет. При расчетах вручную пользуются приближенными графоаналитическими методами. Сущность этих методов заключается в том, что весь объем металла условно делят на элементарные объемы, находят величины объемов и их центры тяжести для различных углов наклона сосуда. Затем, пользуясь известными из теоретической механики выражениями, находят центр тяжести всего объема металла при данном угле поворота сосуда. Опрокидывающие моменты определяют как произведение веса металла на расстояние от центра тяжести объема до оси вращения. Для решения задачи – нахождения центра тяжести металла характерным является необходимость нахождения уровня металла в сосуде для заданных положений его угла наклона до начала слива. Уровень металла в этом случае определить аналитически невозможно из-за сложности формы, которую занимает металл после его заливки. Поэтому нахождение уровня жидкого металла до начала его слива производят методом последовательных приближений: задаются уровнем металла в

сосуде и вычисляют его объем, если последний оказывается больше или меньше физического, то уменьшают или увеличивают его уровень и вновь вычисляют объем до тех пор, пока совпадение объемов будет удовлетворительным.

Объем жидкой садки в сосуде до начала слива

$$V_M = \frac{Q}{\rho}$$

где Q – масса садки;

ρ – плотность жидкого металла, т/м³.

При этом возможно делать некоторые допущения: плоскость зеркала расплавленного металла всегда параллельна горизонтальной плоскости, совпадающей с осью OX ; металл выливается из сосуда при достижении им крайней точки на внутренней поверхности сосуда и плоскость зеркала металла так же параллельна оси OX . При выборе расположения осей координат ось OY следует совмещать с осью вращения сосуда, а ось OX проходит через крайнее положение внешней поверхности сосуда (крайняя нижняя точка).

Определив координаты центра тяжести и объемы металла для различных углов наклона конвертера, находят опрокидывающие моменты от силы тяжести металла

$$M_M = Q_i l_{\phi}$$

где Q_i – сила тяжести металла при данном угле наклона;

l_{ϕ} – плечо действия силы Q_i относительно оси вращения.

По вычисленным значениям опрокидывающих моментов от силы тяжести металла для каждого значения заданного угла наклона конвертера строят графики $M_M = f(\varphi)$ (рисунок 2).

Момент трения в опорах определяется из выражения:

$$M_{тр} = (G_0 + Q_i) f r_{ц}$$

где f – коэффициент трения в цапфе;

$r_{ц}$ – радиус цапфы.

По общему максимальному моменту вычисляется мощность двигателя привода:

$$N_{дв} = M_{оп\ max} \frac{\omega}{\eta}$$

где ω – угловая скорость сосуда;

η – к.п.д. привода, рассчитывается с учетом передаточного числа привода.

По найденной мощности выбирается и обосновывается типоразмер двигателя.

Одним из основных требований безопасности к надежности работы механизмов поворота сосудов с жидким металлом является обеспечение устойчивости сосуда при любых углах его наклона. Поэтому сосуд должен иметь положительный опрокидывающий момент, т. е. момент возврата в исходное положение. Для уменьшения расхода электроэнергии при повороте сосуда величина его максимального опрокидывающего момента должна быть наименьшей. Устойчивость сосуда (ковша, конвертера) обеспечивается выбором такого положения оси вращения, при котором, в случае поломки механизма поворота, наклоненный сосуд с жидким металлом не опрокидывается, а при отсутствии самотормозящих передач в механизме возвращается в исходное вертикальное положение.

Определение оптимального положения оси вращения сосуда требуется не только при проектировании новых механизмов для разлива металла, оно необходимо и для утолщения огнеупорной кладки в местах наибольшего ее износа с целью увеличения стойкости футеровки.

При расчетах опрокидывающих моментов от веса жидкого металла чаще всего применяются методы Д.А. Заводчикова и П.Н. Аксенова.

Вследствие большого объема вычислений при расчете сосудов с жидким металлом попробуем упростить расчет и найти центры тяжести металла при данном угле поворота сосуда с помощью САПР Компас 3D, а сам расчет сделать в программе Microsoft Excel. (В программном пакете Компас 3D нет дополнительных приложений и библиотек для анализа движения жидкости, поэтому пользоваться следующим приложением как инструкцией нежелательно, т.к. для каждого вида сосудов нужен индивидуальный подход).

Применение графоаналитических методов и нахождение опрокидывающего момента от веса металла рассмотрим на примере расчета конвертера.

ЗАДАНИЕ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

По заданным исходным данным (таблица 1) вычислить суммарный момент, необходимый для поворота сосуда с жидким металлом (рассмотреть от 10 или больше положений, от исходного до полного опрокидывания сосуда). Расчет возможно вести как вручную, так с использованием программы Microsoft Excel.

При расчете следует выбрать 3 предварительные оси вращения:

- ось, совпадающая с центром тяжести сосуда;
- ось, находящаяся ниже центра тяжести на 0,5 метра.
- ось, находящаяся выше центра тяжести на 0,5 метра.

Необходимо обоснованно выбрать одно из 3-х положений осей для которой требуется минимальная мощность привода, но не будет нарушено требование безопасности – невозможность самопроизвольного выливания металла из сосуда при отключении энергоснабжения.

Для выбранного расположения оси, в пояснительной записке представить эскизы сосуда с жидким металлом для всех положений.

Представить расчётные таблицы составляющих моментов сопротивления с указанием координат центров тяжести, составляющих силы веса и плеч:

- момент сопротивления при повороте порожнего сосуда;
- момент сопротивления при повороте жидкого металла;
- момент трения в опорах;
- суммарный момент.

Построить для всех 3-х вариантов расположения оси поворота графики с указанием моментов по циклу поворота. Для наилучшего варианта расположения оси выбрать мощность приводного электродвигателя, предварительно проведя расчёт кинематики и потерь в приводе механизма поворота.

В расчетах следует принять следующие общие условия: толщина футеровки составляет 200 мм, в качестве материала используется шамотный кирпич; толщина кожуха корпуса – 10 мм, материал – сталь. Количество жидкого металла в сосуде обосновано принимается студентом в пределах от 30 до 70 % от объема сосуда.

Таблица 1

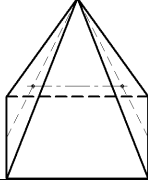
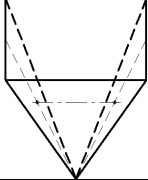
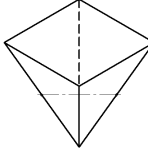
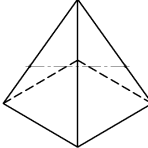
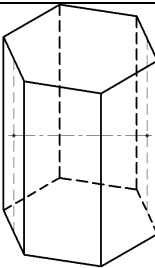
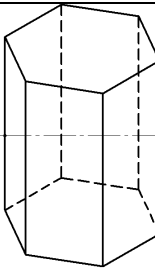
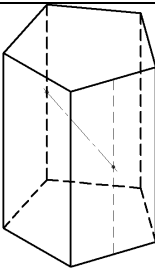
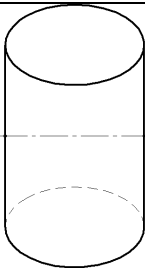
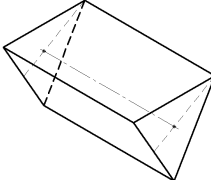
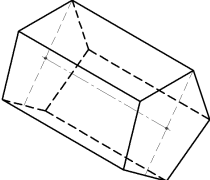
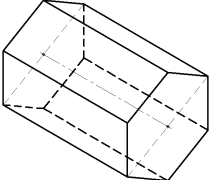
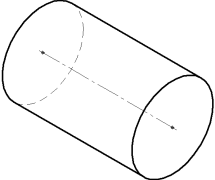
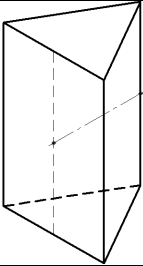
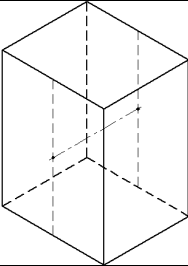
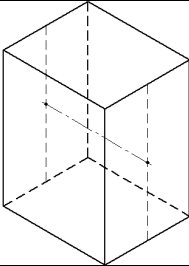
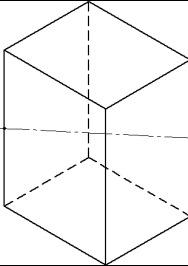
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

№	Материал	Фигура	Параметры	Скорость, об/мин	Выпускное отверстие	Ось (Приложение)
1	Золото	Шар	$R = 2 \text{ м}$	1,3	$R = 0,5 \text{ м}$	–
2	Цинк	Цилиндр	$R = 3 \text{ м}, H = 6 \text{ м}$	1,2	–	Рисунок 8
3	Алюминий	Цилиндр горизонтальный	$R = 1,5 \text{ м}, L = 5 \text{ м}$	1,8	$R = 1 \text{ м}$	Рисунок 12
4	Цинк	Конус	$\alpha = 15^\circ, R = 2 \text{ м}$	1,3	$R = 0,5 \text{ м}$	–
5	Мель	Обратный конус	$\alpha = 17^\circ, R = 2,5 \text{ м}$	1,9	–	–
6	Олово	Сфера	$D = 5,5 \text{ м}$	1,8	$R = 1 \text{ м}$	–
7	Мель	Призма прямая шестигранная	$a = 1 \text{ м}, H = 6 \text{ м}$	1,3	–	Рисунок 5
8	Свинец	Призма прямая шестигранная	$a = 1,2 \text{ м}, H = 4 \text{ м}$	1,1	–	Рисунок 6
9	Серый чугун	Призма прямая шестигранная горизонтальная	$a = 1,4 \text{ м}, L = 5 \text{ м}$	1	$R = 1 \text{ м}$	Рисунок 11
10	Алюминий	Правильная четырехугольная пирамида	$a = 1,5 \text{ м}, H = 7 \text{ м}$	1,9	$R = 0,7 \text{ м}$	Рисунок 1
11	Свинец	Правильная четырехугольная пирамида	$a = 1,7 \text{ м}, H = 6 \text{ м}$	1	$R = 0,6 \text{ м}$	Рисунок 4
12	Железо	Горизонтальная правильная четырехугольная пирамида	$a = 2 \text{ м}, H = 5 \text{ м}$	1,6	–	Рисунок 2

Продолжение таблицы 1

№	Материал	Фигура	Параметры	Скорость , об/мин	Выпускное отверстие	Ось
13	Серый чугун	Обратная правильная четырехугольная пирамида	$a = 1 \text{ м}, H = 7 \text{ м}$	2	–	Рисунок 3
14	Цинк	Призма прямая пятигранная	$a = 1 \text{ м}, H = 6 \text{ м}$	1,8	–	Рисунок 7
15	Железо	Призма прямая пятигранная горизонтальная	$a = 2 \text{ м}, L = 5 \text{ м}$	1,5	$R = 1 \text{ м}$	Рисунок 10
16	Железо	Призма прямая трехгранная	$a = 1,1 \text{ м}, H = 6 \text{ м}$	1,7	–	Рисунок 13
17	Свинец	Призма прямая трехгранная горизонтальная	$a = 1,6 \text{ м}, H = 5 \text{ м}$	1	$R = 1 \text{ м}$	Рисунок 9
18	Серебро	Параллелепипед	$2 \times 3 \times 3 \text{ м}$	1,1	–	Рисунок 14
19	Свинец	Параллелепипед	$3 \times 3 \times 3 \text{ м}$	1,8	–	Рисунок 15
20	Золото	Параллелепипед	$2 \times 5 \times 3 \text{ м}$	1,7	–	Рисунок 16
21	Серебро	Параллелепипед	$6 \times 4 \times 2 \text{ м}$	1,1	–	Рисунок 14
22	Медь	Параллелепипед	$1 \times 2 \times 4 \text{ м}$	1	–	Рисунок 15
23	Железо	Параллелепипед	$1 \times 3 \times 5 \text{ м}$	1,6	–	Рисунок 16
24	Олово	Параллелепипед	$2 \times 2 \times 2 \text{ м}$	1,6	–	Рисунок 14
25	Свинец	Параллелепипед	$2 \times 3 \times 4 \text{ м}$	1,5	–	Рисунок 15
26	Алюминий	Параллелепипед	$2 \times 2 \times 3 \text{ м}$	1,2	–	Рисунок 16

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

			
Рис. 1	Рис. 2	Рис. 3	Рис. 4
			
Рис. 5	Рис. 6	Рис. 7	Рис. 8
			
Рис. 9	Рис. 10	Рис. 11	Рис. 12
			
Рис. 13	Рис. 14	Рис. 15	Рис. 16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА МЕТАЛЛА И КООРДИНАТ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ

Для определения центра масс с помощью системы Компас 3D должны быть построены трехмерные модели корпуса, футеровки и металла.

Все модели выполняются в масштабе 1:1.

Пример построения корпуса

Для создания модели корпуса вызовите команду **Файл**→**Создать** (рис. 21).

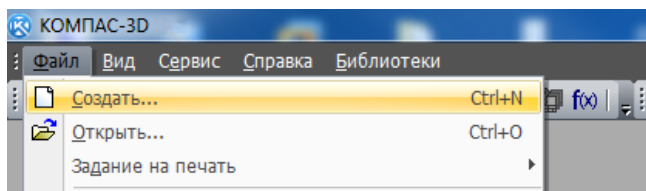


Рис. 21 – Команда **Создать**

В появившемся окне выбрать **Деталь** (рис. 22).

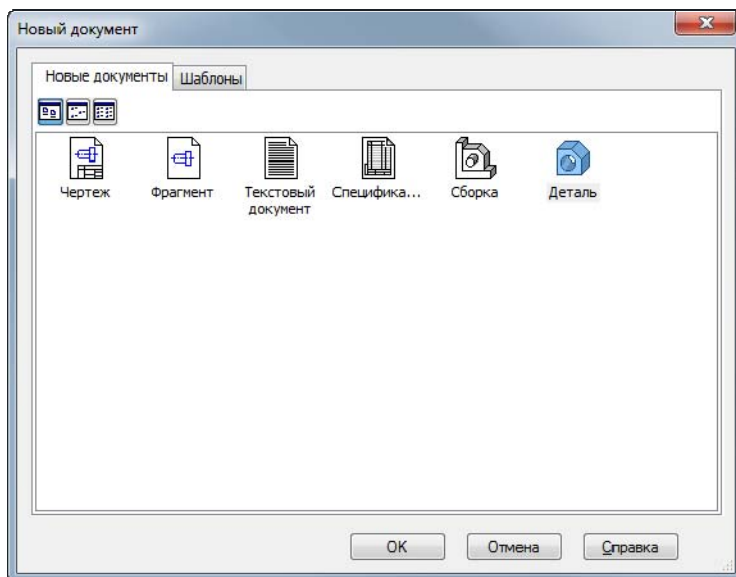



Рис. 22 – Диалоговое окно **Новый документ**

На панели **Вид** нажать кнопку **Ориентация**  и выбрать ориентацию **Изометрия XYZ** (рис. 23).

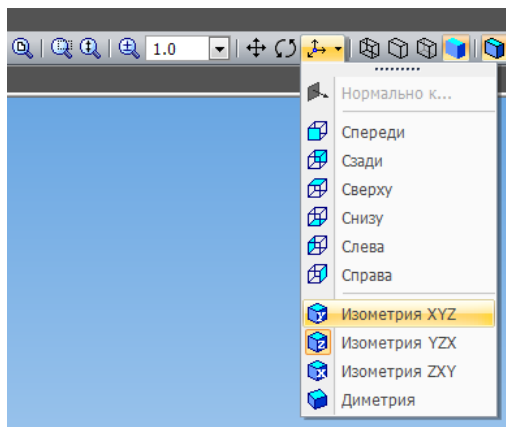


Рис. 23 – Раскрывающийся список кнопки **Ориентация**

В дереве модели раскройте **Начало координат** и укажите **Плоскость ZX** (фронтальная плоскость) (рис. 24).

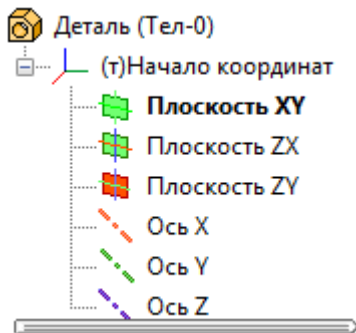



Рис. 24 – Дерево построения

На панели **Текущее состояние** нажмите кнопку **Эскиз** .

В эскизе строится внешний контур сечения корпуса (рис. 25).

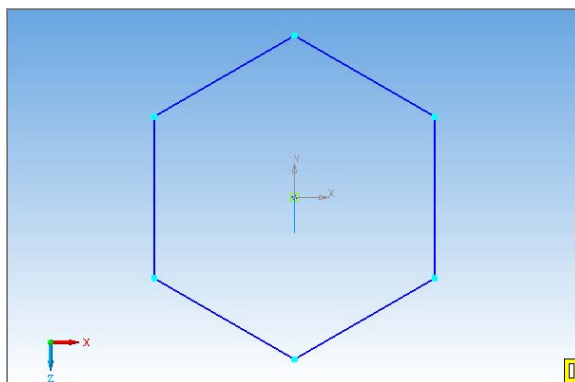



Рис. 25 – Пример эскиза внешнего контура

На панели **Редактирования** делали, нажмите кнопку **Операция выдавливания** .

Необходимо указать значение параметра **Расстояние 1**, которое будет соответствовать, в данном случае, высоте корпуса (рис. 26).

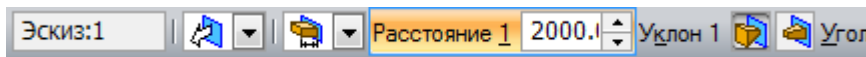


Рис. 26 – Панель свойств **операции выдавливания**.

Предварительный результат будет в виде фантома, по которому можно оценить правильность построения (рис. 27).

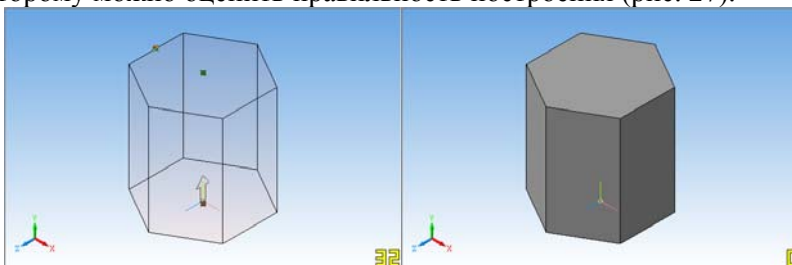




Рис. 27 – Фантом модели и готовая модель

Что бы применить построение, на панели специального управления нажмите кнопку **Создать объект** .

На панели **Редактирования** делали, нажмите кнопку **Оболочка** .

Выбрать верхнюю плоскость и на вкладке Тонкая стенка выбрать: **Тип построения тонкой стенки – Внутрь; Толщина стенки 2 – 10.0** (рис. 28).

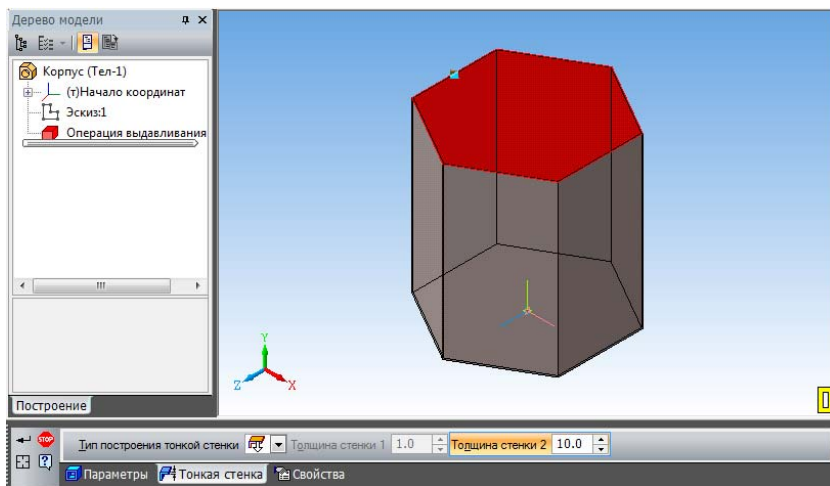



Рис. 28 – Панель свойств операции **Оболочка**

Что бы применить построение, на панели специального управления нажмите кнопку **Создать объект**  (рис. 29).

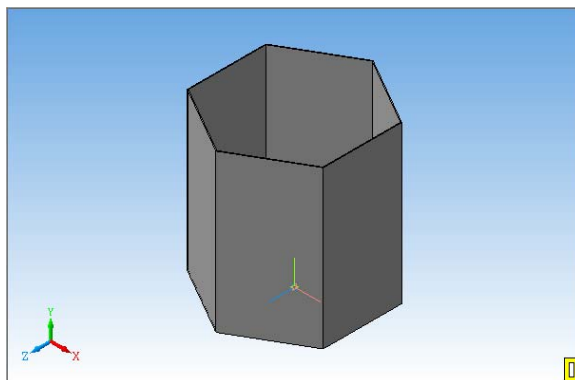


Рис. 29 – Тонкостенная шестигранная пирамида

Далее необходимо определить свойства модели. Для этого щелкните правой кнопкой мыши на верхней строчке Древа построения (рис. 30).

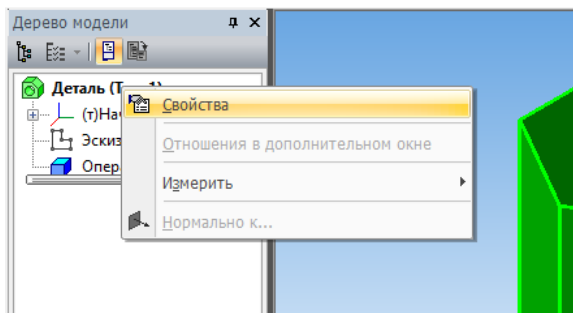


Рис. 30 – Контекстное меню

Нажмите **Список свойств** и укажите **Наименование** и **Обозначение** (если требуется) детали (рис. 31).

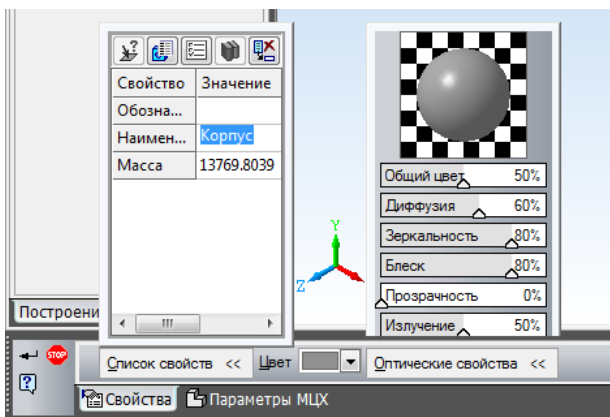


Рис. 31 – Панель свойств детали

Перейдите к вкладке **Параметры МЦХ**, нажмите кнопку и выберите материал корпуса (рис. 32).

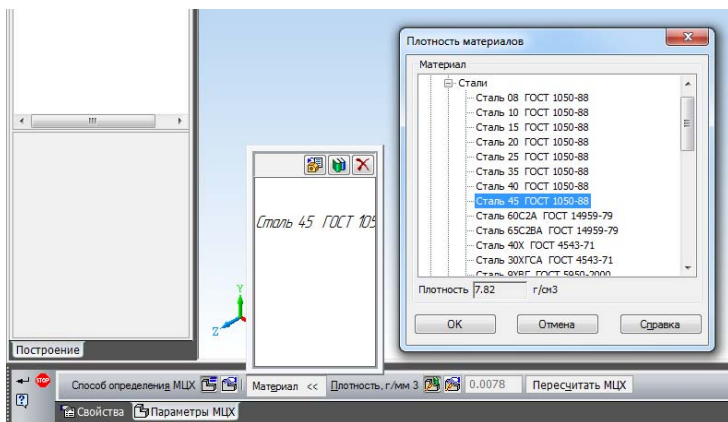


Рис. 32 – Диалоговое окно Плотность материала

Нажмите кнопку **Пересчитать МЦХ**, что бы получить данные о модели. На панели свойств можно выставить значение единиц измерения (рис. 33).

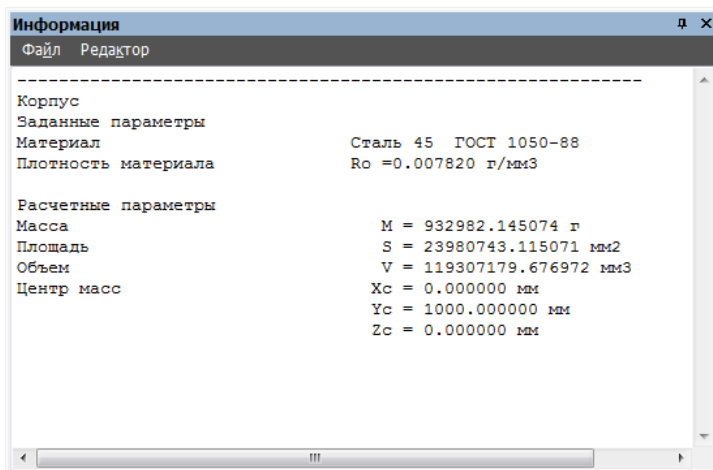



Рис. 33 – Диалоговое окно **Информация**.

Результат расчета программы вставить в отчет.

Что бы применить свойства модели, на панели специального управления нажмите кнопку **Создать объект** .

Первый пример построения расплава металла

Выбираем **Плоскость XY** (фронтальная плоскость). Строим эскиз. Размеры ставятся в соответствии с размерами порожнего сосуда (рис. 34).

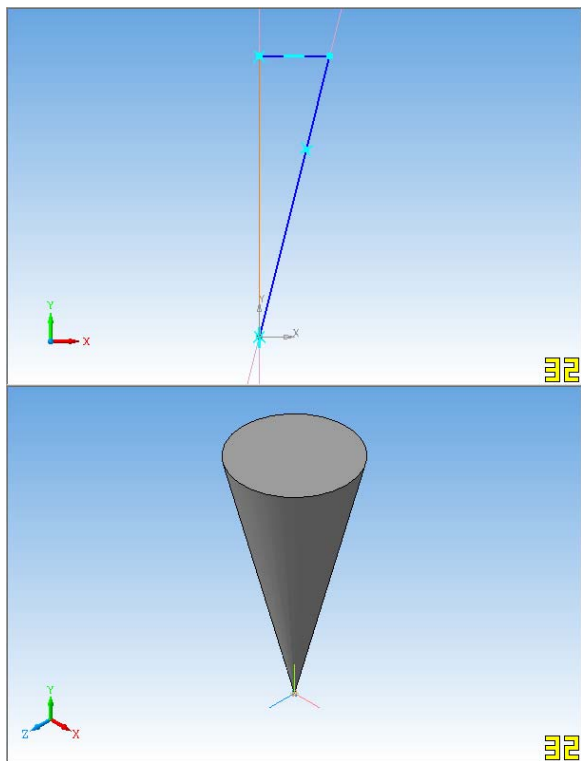


Рис. 34 – Пример эскиза и модели.

Высота расплава, не зависимо от задания, берется максимальная (или выше).

Кнопкой **Операция вращения**  получаем модель расплава металла.

В той же плоскости строим еще один эскиз (рис. 35).



Рис. 35 – Пример эскиза.

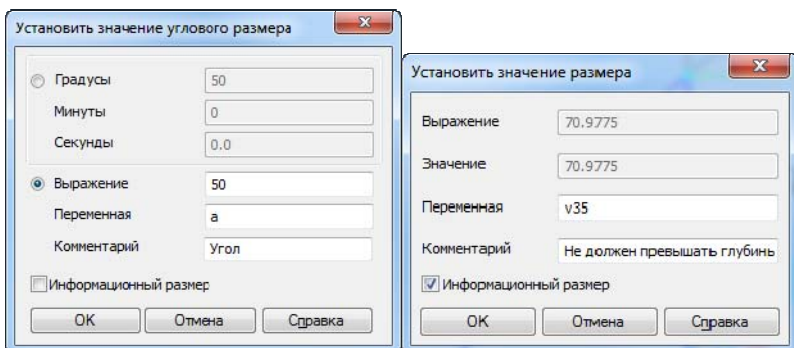


Рис. 36 – Окно комментария

Кнопкой **Сечение по эскизу**  убираем лишнюю часть модели (рис. 37).

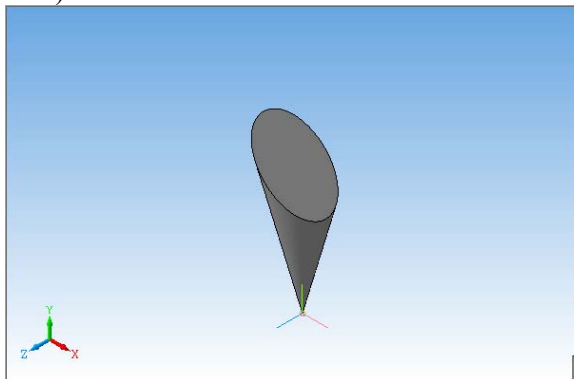




Рис. 37 – Усеченный конус

На панели **Стандартная** нажать кнопку **Переменные** . В переменные **Угол** и **Высота** вводим нулевой наклон и высоту, на которую залит металл (рис. 38).

Переменные				
Имя	Выражение	Значение	Пар...	Комме.
Деталь (Тел-1)				
.....				
+ (т)Начало координат				
+ Эскиз:1				
+ Операция вращения:1				
- Эскиз:2				
.....	v19		0.0	Искл...
.....	v26	45.0	45.0	Угол
.....	v28	1700.0	1700.0	Высота
.....	v29	1000.0	1000.0	
.....	v30	1000.0	1000.0	
.....	v35		2700.0	
+ Сечение по эскизу:1				

Рис. 38 – Окно **Переменные**

Далее нужно перестроить модель нажав кнопку **Меню**  и выполнив команду **Меню**→**Сервис**→**Перестроить** (рис. 39).

Необходимо узнать объем залитого в сосуд металла. Информацию можно посмотреть с помощью Команды **Сервис**→**МЦХ модели**.

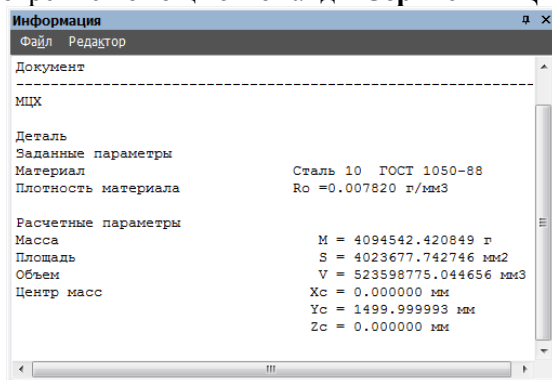


Рис. 39 – Диалоговое окно **Информация**

При изменении угла наклона, подбираем параметр Высота так, чтобы объем оставался неизменным в пределах погрешности $\pm 5\%$. Если сечение сосуда постоянное, например призма или параллелепипед, то параметр высоты подбирать не нужно.

Как только информационный размер превысит значение глубины сосуда, эскиз необходимо изменить, т.к. металл начнет выливаться (рис. 40).

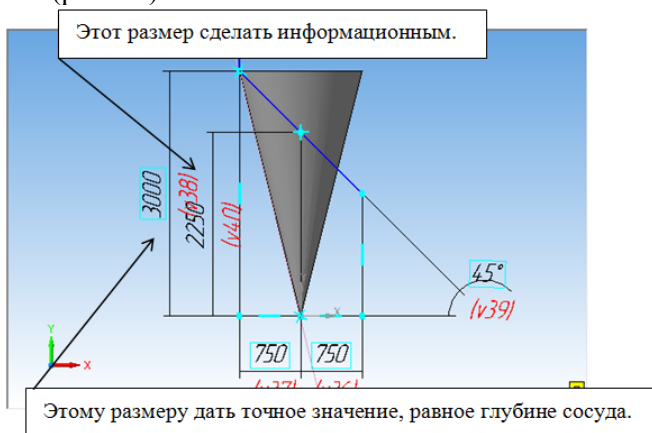


Рис. 40 – Присвоение размеров

Если при перестроении, размер Высота (теперь уже информационный) будет практически нулевым, или модель не перестраивается вообще, значит, при таком угле наклона весь расплав выльется из порожнего сосуда.

Второй пример построения расплава металла

При некоторых фигурах первый вариант построения эскиза будет нецелесообразным. Следует избегать слишком сложной параметризации эскиза – это будет приводить к ошибкам построения и необратимым изменениям в эскизе.

Приведем еще один пример параметризации эскиза (рис. 41).

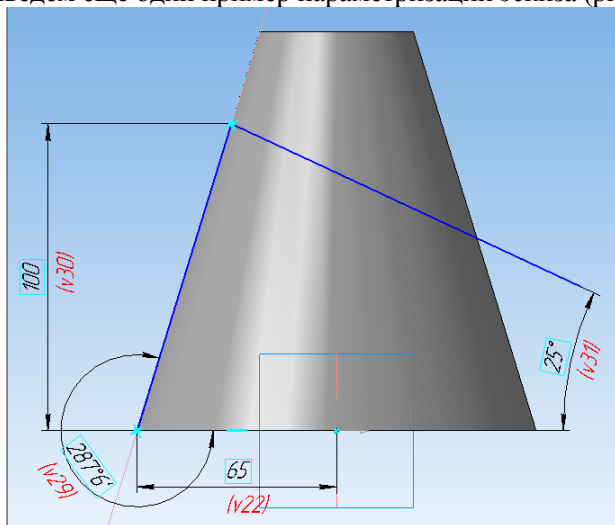


Рис. 41 – Пример построения усеченного конуса

В данном эскизе меняются параметры v30 (Высота) и v31 (угол). При изменении угла наклона v31, подбираем параметр v30 (Высота) так, чтобы объем оставался неизменным в пределах погрешности $\pm 5\%$. Как только параметр v30 (Высота) станет примерно равной глубине порожнего сосуда, то его значение нужно выставить равной глубине порожнего сосуда и не изменять при остальных изменениях параметра угла v31.

РАСЧЕТ ОПОКИДЫВАЮЩИХ МОМЕНТОВ В MICROSOFT EXCEL

Для расчета опрокидывающих моментов, все снятые данные вводятся в таблицу Excel (Таблица 1, первые 5 столбцов).

Далее вводим столбцы с координатами точки поворота (Таблица 1, следующие 3 столбца).

Далее вычисляем для каждого положения значения:

$M_{оп}$ – общий статический момент;

$$M_{оп} = M_{п} + M_{м} + M_{тр}$$

$M_{п}$ – момент, необходимый для поворота порожнего сосуда (равен нулю, при нулевом значении коэффициента смещения);

$$M_{п} = G_o r_o \sin\varphi$$

$M_{м}$ – момент от веса жидкого металла;

$$M_{м} = Q_i l_{\phi}$$

$M_{тр}$ – момент от сил трения в опорах сосуда;

$$M_{тр} = (G_o + Q_i) f r_{ц}$$

l_{ϕ} – плечо действия силы Q_i относительно оси вращения.

$N_{дв}$ – мощность двигателя привода

$$N_{дв} = M_{оп\max} \frac{\omega}{\eta}$$

Далее строятся графики моментов (рис. 42)

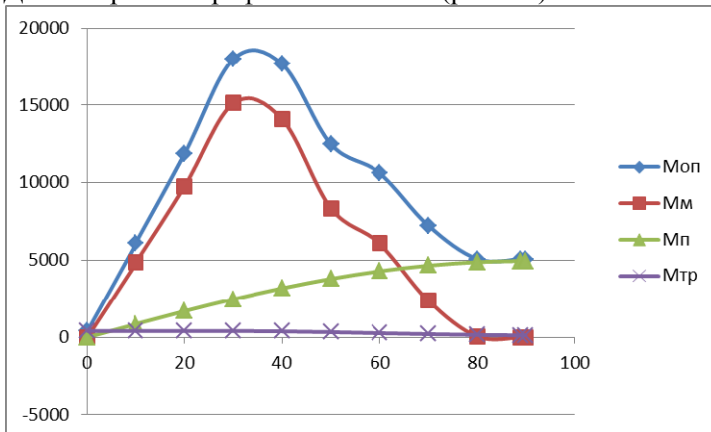


Рис. 42 – Графики моментов

Таблица 1. Пример таблицы Excel

φ	X	Y	V	M	y_0	y_1	R	I	G	M _{гр}	M _м	M _{лп}	N
0	0,0000	0,8612	3,4862	21614	0,7951	0,9951	0	0	211819	406156	0	0	406156
10	-0,0144	0,8625	3,4862	21614	0,7951	0,9951	0,03473	0,02589	211819	406156	4841,42	860,749	6108,32
20	-0,0298	0,8661	3,4862	21614	0,7951	0,9951	0,0684	0,05229	211819	406156	9779,35	1695,34	11880,8
30	-0,0473	0,8750	3,4862	21614	0,7951	0,9951	0,1	0,08091	211819	406156	15133,5	2478,43	18018,1
40	-0,0744	0,8349	3,2576	19969	0,7951	0,9951	0,12856	0,08258	195694	381961	14113,1	3186,21	17681,3
50	-0,1275	0,7671	2,7902	16603	0,7951	0,9951	0,15321	0,06031	162714	332491	8345,62	3797,17	12475,3
60	-0,2307	0,7377	2,1473	11974	0,7951	0,9951	0,17321	0,06564	117348	264447	6075,92	4292,76	10633,1
70	-0,3023	0,7351	1,5526	7691	0,7951	0,9951	0,18794	0,04701	75369	201504	2378,03	4657,92	7237,46
80	-0,2542	0,7530	1,0923	4378	0,7951	0,9951	0,19696	0,00268	42908	152785	485882	4881,55	5082,92
89	-0,0171	0,7927	0,8438	2589	0,7951	0,9951	0,19997	0,0021	25376	126484	1,24323	4956,1	5083,83
90	0,0000	0,7951	0,8354	2529	0,7951	0,9951	0,2	0	24784	125595	0	4956,86	5082,45
					k							Max	3,77179

где:

φ – угол поворота сосуда;

X – координата X центра масс;

Y – координата Y центра масс;

V – объем;

M – масса;

y_0 – координата Y центра масс порожнего сосуда без металла;

y_1 – смещенная координата (значение координаты Y, увеличенное на коэффициент смещения);

k – коэффициент смещения;

R – радиус поворота центра масс относительно оси вращения;

G – вес;

$M_{гр}$; $M_{м}$; $M_{лп}$; $M_{оп}$ – соответствующие моменты;

N – мощность двигателя привода

Изменяя коэффициент k можно оценить изменение графиков и изменение величины мощности двигателя.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	1
ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	4
<i>ПРИЛОЖЕНИЕ</i>	13
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА МЕТАЛЛА И КООРДИНАТ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ.....	14
РАСЧЕТ ОПРОКИДЫВАЮЩИХ МОМЕНТОВ В MICROSOFT EXCEL	26

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,
ЭКСПЛУАТАЦИИ И РЕМОНТА
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И
ОБОРУДОВАНИЯ**

РАСЧЕТ СОСУДОВ С ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ

*Методические указания к самостоятельным работам
для студентов магистратуры направления 15.04.02*

Сост.: *С.Л. Иванов, И.Е. Звонарев, А.В. Михайлов.*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
машиностроения

Ответственный за выпуск: *С.Л. Иванов*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 16.03.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,6. Усл.кр.-отт. 1,6. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 75 экз. Заказ 194.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2