

Министерство образования и науки Республики Казахстан

Павлодарский государственный университет

им. С. Торайгырова

Факультет металлургии, машиностроения и транспорта

Кафедра металлургии

**«КОНВЕРТЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ»**

Методические указания к изучению курса по дисциплине  
«Технология металлургического производства»

Павлодар

УДК 669.162.21(07)

ББК 34.323-5я7

К65

**Рекомендовано ученым советом ПГУ им. С. Торайгырова**

**Рецензенты:**

кандидат технических наук, профессор М.М. Суюндиков

**Составитель А.А. Абрамов, П.О. Быков**

К65 Конвертерные процессы. Методические указания к изучению курса по дисциплине «Технология металлургического производства» / сост. А.А. Абрамов, П.О. Быков. – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2007. – 19 с.

В методическом указании приводятся общие сведения по конструкции профиля доменной печи и основные способы расчета профиля доменной печи.

Методическое указание разработано в соответствии с государственным стандартом специальности 050709 «Металлургия» ГОСО РК 3.08.335 – 2006.

УДК 669.162.21(я7)

ББК 34.323-5я7

© Абрамов А.А., Быков П.О., 2007

©Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова, 2007

## Введение

Во многих областях техники, в том числе и в металлургическом производстве приходится встречаться со сложными процессами, недоступными прямому визуальному наблюдению и аналитическому расчету. В таких случаях большую помощь может принести физическое моделирование, основанное на теории подобия. Оно позволяет из наблюдений над процессами, протекающими в физической модели, сделать выводы о процессах, имеющих место в реальных, интересующих нас условиях и агрегатах.

В соответствии с теорией подобия необходимо и достаточно, чтобы процессы в модели и реальном агрегате, описывались одинаковыми по форме безразмерными уравнениями и краевыми условиями и имели численно равные значения сходственных безразмерных параметров (критериев подобия). В случае подобия при одинаковых значениях сходственных безразмерных аргументов сходственные безразмерные функции модели и образца будут равны.

Метод подобия применим только в сочетании с глубоким теоретическим анализом протекающих физических процессов. Роль анализа возрастает еще и потому, что, как правило: точное подобие в сложных явлениях является невозможно. В этих условиях ставится задача не столько учесть все возмущающие воздействия, сколько пренебречь всем несущественным. В этом заключается задача приближенного моделирования.

В случае если сложное явление невозможно перенести в другой масштаб и одновременно сохранить равенство всех критериев подобия, используют приближенное моделирование. При этом главным является то обстоятельство, что в определенных условиях исследуемое явление практически не зависит от некоторых критериев или зависит незначительно. Поэтому эти критерии в определенных пределах могут иметь различные значения в моделях и образцах.

Приближенное моделирование картины движения вязкой жидкости возможно благодаря двум свойствам потока: стабильности, т.е. свойства вязкой жидкости принимать определенное распределение скоростей в поперечном сечении потока и автомодельности, т.е. в независимости характера движения вязкой жидкости от числа Рейнольдса, имели место при двух крайних режимах движения: ламинарном и турбулентном. Эти свойства позволяют при турбулентном режиме течения приближенно выполнить условия подобия, работая на модель с числом Рейнольдса, отличное от образца. Зная масштаб моделирования к заданным параметрам продувки кокса можно рассчитать идентичный режим продувки для модели.

В данном методическом пособии ... описания лабораторных работ по курсу «Конвертерные процессы», выполняемые на холодных моделях с использованием методов приближенного физического моделирования

реальных процессов, протекающих в полостях конвертора. Результаты наблюдения над моделью в данном случае позволяют получить качественную картину явлений, имеющих место в реальном промышленном агрегате.

### Работа №1

#### Изучение влияния положения сопла над ванной на величину реакционной зоны и глубину проникновения газовой струи в жидкость.

Цель работы - наблюдение за формой реакционной зоны и глубиной проникновения газовой струи в жидкую ванну при изменении положения фурмы над поверхностью жидкости.

Описание установки.

Опыты проводятся на прозрачной модели 250-тонного кислородного конвертора, выполненной в масштабе 1:25. В качестве жидкости, моделирующей металл, используется вода. Продувка осуществляется технически чистым кислородом, поступающим из газового баллона. В опытах используется только односопловая фурма, перемещение и фиксация которой осуществляется с помощью штатива и прижимного болта. Схема установки показана на рисунке 1.

Расход кислорода при продувке контролируется ротаметром, а давление газовым манометром.

Выполнение работы.

Моделируется продувка в 250-тонном кислородном конвертере с расходом дутья, эквивалентным рабочему режиму продувки. Односопловую фурму устанавливают на уровне поверхности спокойной жидкости.

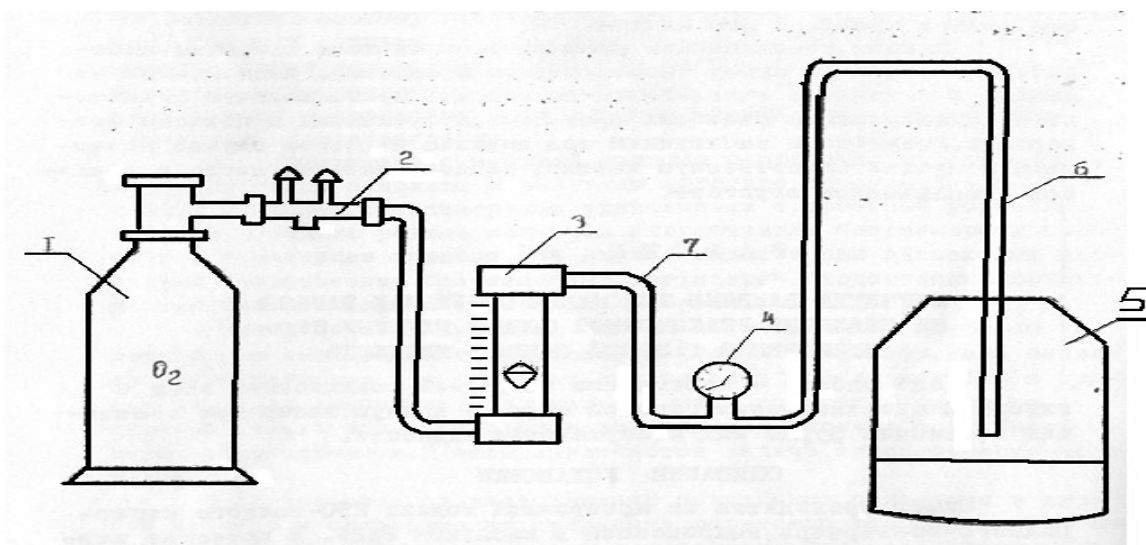


Рисунок 1. Схема установки.



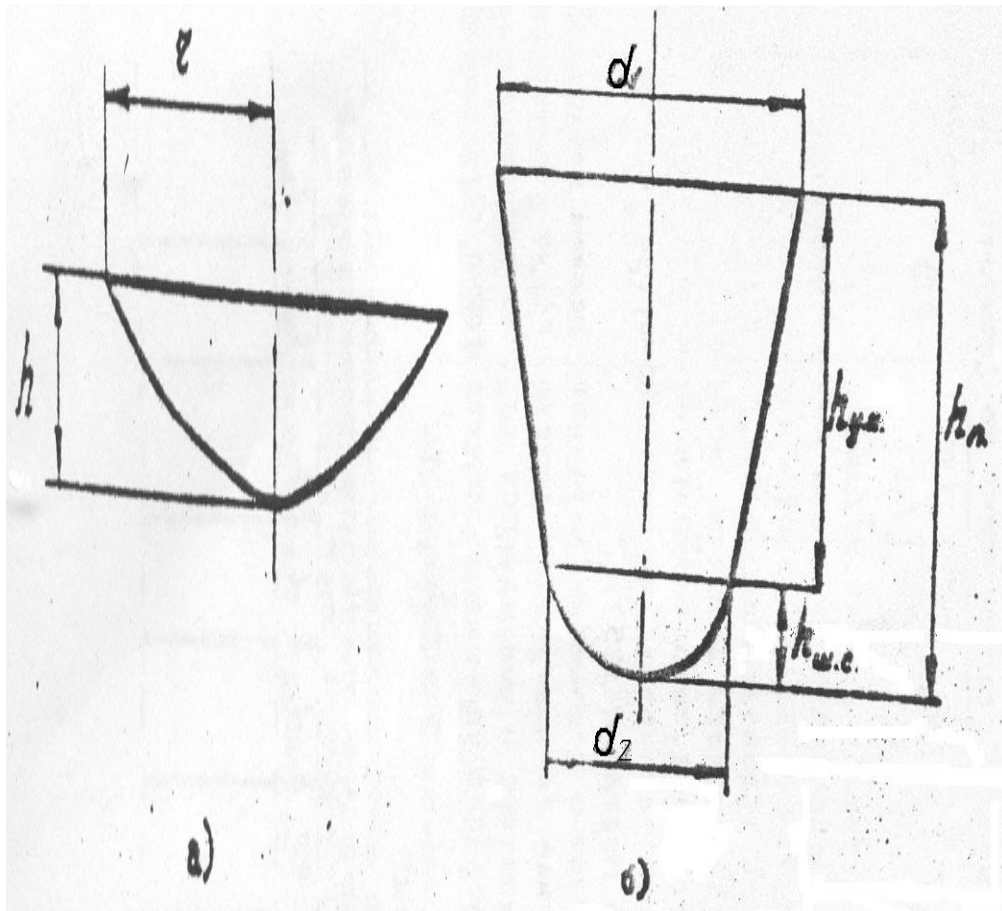


Рисунок 2. Форма кратера:  
 а) - шаровой сегмент, б) - сочетание шарового сегмента с усеченным конусом.

### Оформление отчета.

Отчет содержит описание и эскиз установки, расчет режима продувки и таблицы с результатами наблюдений. Опытные данные используют для расчетов объема реакционной зоны:

$$V_{у.к.} = \frac{1}{12} \pi h_{у.к.} (d_1^2 + d_1 d_2 + d_2^2) \quad (2)$$

$$V_{ш.с.} = \frac{1}{16} \pi h_{ш.с.} (h_{ш.с.}^2 + 3 z^2)$$

(3)

Вычислив объем реакционной зоны, строят график зависимости объема лунки от положения сопла над ванной:

$$V_{р.з.} = V_{у.к.} + V_{ш.с.} = f(H_c) \quad (4)$$

В отчете содержатся выводы о влиянии положения сопла над ванной на изучаемые факторы (помимо зависимости объема реакционной зоны от высоты сопла над уровнем металла строятся аналогичные зависимости для глубины и ширины кратера).

## Работа №2

Изучение влияния интенсивности продукта на величину реакционной зоны и глубину проникновения газовой струи в каждую ванну.

Цель работы: изучение изменения формы реакционной зоны и глубины проникновения газовой струи в жидкость при изменении интенсивности продувки.

Работа проводится на установке холодного моделирования, описанной в работе 1.

### Проведение работы.

Моделируется продувка в 250-тонном кислородном конвертере в интервале расходов дутья 800-1200 м<sup>3</sup>/мин (3,2-4,8 м<sup>3</sup>/мин.тн.).

По формуле (1) (см. работу 1) рассчитываются соответствующие значения расхода дутья для модели для параметров продувки в реальной конвертере с интенсивностью 800-1200 м<sup>3</sup> /мин с интервалом через каждые 100 м<sup>3</sup>/мин. Данные расчета заносят в таблицу 1.

Таблица 1.

Объект исследования	Интенсивность продувки м <sup>3</sup> /мин.				
	1	2	3	4	5
250-тонный кислородный конвертер	800	900	1000	1100 1200	
Модель в масштабе 1:25					

В модель на глубину 100-110 мм. Заливают воду. Продувку проводят через односопловую фурму, устанавливаемую на высоте 40-70 мм. Над уровнем спокойной жидкости. После стабилизации дугового режима осуществляется наблюдение за поведением газовой струи в жидкости, эскизируется форма и размеры кратера, фиксируется глубина погружения газовой струи в жидкость так же, как в работе 1. Результаты наблюдений заносят в таблицу 2.

Таблица 2.

## Результаты наблюдения

№ пп	Расходы дутья, м <sup>3</sup> /мин		Форма реакционной зоны	Основные размеры (рис.2)					
	250-тонном конвертере	в прозрачной модели		H	$\tau$	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	h <sub>у.к.</sub>	h <sub>ш.с.</sub>
1	800								
2	900								
3	1000								
4	1100								
5	1200								

## Оформление отчета.

В отчете описывается установка, на которой проводились опыты, содержатся таблицы с результатами расчетов режимов продувки зоны по формулам (2)-(4) и строится зависимость  $V_{р.з.} = f(V_r)$  величины реакционной зоны от расхода дутья при фиксированном положении сопла над ванной.

В отчете содержатся ЭСКИЗЫ реакционной зоны и выводы о влиянии расхода дутья на изучаемые факторы. Как и работе 1 строятся зависимости глубины и ширину реакционной зоны от интенсивности продувки при стабилизированном положении сопла над ванной.

## Результаты наблюдений.

№ ПП	Рабочая жидкость	Интенсивность продувки л/мин	Положение фурмы, мм	Изменение уровня ванны, мм	ΔH/H <sub>0</sub>	Примечание
1	Вода	30	50			
2		40	50			

**6.2. Изучение изменения уровня ванны****при донной продувке**



Описанные в пункте 6.1. опыты проводятся в той же последовательности на установке холодного моделирования данной продувке (рисунок 4)

Уровень воды и толщина слоя масла, а также количество добавляемых древесных и парафиновых опилок остаются прежними. Интенсивность продувки также выдерживается на тех же уровнях, что и при верхнем дутье. По полученным данным заполняется таблица, аналогичная в пункте 6.1 и на графике строятся зависимости измерения уровня ванны от интенсивности продувки для всех условий эксперимента.

По результатам моделирования вспенивания ванны при различных технологических условиях продувки делаются соответствующие выводы.

### 6.3. Изучение осаждающего действия верхнего дутья.

Для изучения осаждающего действия газовой струи на вспененную ванну используют одновременную продувку жидкости снизу и сверху. Вначале в установке донной продувки добиваются стабильного положения вспененной ванны (интенсивность продувки и уровень вспенивания фиксируются). Затем на расстоянии 50-70 мм над уровнем вспененной ванны устанавливаются четырехсопловая фурма. При постоянном положении верхней фурмы и изменяющемся режиме подачи дутья через неё фиксируется снижение уровня пены. По результатам наблюдений заполняется таблица.

№ ПП	Интенсивность нижней продувки  л/мин	Высота жидкости, мм		Интенсивность верхней продувки  л/мин	Снижение уровня пены, мм	Примечание
		Спокойн.	Вспенен.			

По данным опытов строится также график зависимости относительного снижения уровня вспененной ванны от интенсивности подачи верхнего дутья. В заключении делаются выводы по данному разделу.

## РАБОТА №3

### **Изучение процесса выпуска металла из кислородного конвертера.**

Вся сталь, выплавленная в сталеплавильных агрегатах проходит стадию выпуска из агрегата. При этом жидкая сталь подвергается следующим воздействиям:

а) за счёт окисления струи металла атмосферным воздухом (вторичное окисление) содержания кислорода в металле увеличивается в среднем на 0,005-0,008%.

б) при контакте струи с окружающим воздухом металл насыщается азотом (концентрация азота увеличивается на 0,0002-0,0005%).

Уменьшить поступление кислорода и азота в металл из атмосферы можно за счёт правильной организации струи (струя должна быть плотной, не размытой, что достигается соответствующей подготовкой сталевыпускного отверстия) либо созданием над зеркалом и струей металла восстановительной или нейтральной атмосферы.

в) при выпуске металла происходит уменьшение его температуры на 15-40 °С.

г) эрозия огнеупоров сталевыпускного отверстия приводит к увеличению экзогенных неметаллических включений в стали (по некоторым данным на 5-12%)

д) при выпуске металла из сталеплавильного агрегата вместе с металлом в сталеразливочный ковш увлекается часть конечного технологического шлака. При контакте металла и шлака в ковше развиваются реакции взаимодействия между компонентами металла и шлака, что приводит к изменению состава металла (окисление марганца, кремния, ресульфурация и рефосфорация).

Перечисленные выше процессы обуславливают важность этапа выпуска металла как самостоятельной технологической операции, которая подобно предыдущим и последующим операциям должна быть проведена так же тщательно.

Одной из важнейших операций, проводимых над металлом во время его выпуска, является раскисление стали. Обычно раскисление проводится путем дачи кусковых ферросплавов под струю металла в ковше при его наполнении на  $1/3 - 2/3$  высоты. С точки зрения увеличения производительности

сталеплавильного агрегата выпуск металла следует производить как можно быстрее (например, увеличив диаметр выпускного отверстия), при этом уменьшается поступление кислорода и азота в металл из атмосферы. Но слишком быстрый выпуск увеличивает опасность «закозления» ферросплавов, их неполного растворения в металле и в итоге не гарантируется получение заданного химического состава стали. Избежать этого можно путем достаточной энергичности перемешивания в период присадки ферросплавов, что на практике обеспечивается кинетической энергией падающей струи металла. В производственных условиях длительность выпуска должна быть не менее 5-6 минут, т.к. именно за это время происходит растворение ферросплавов фракцией 40-100 мм. Увеличивать сверх этого предела длительность выпуска нерационально, т.к. снижается производительность действующих сталеплавильных агрегатов.

### **Описание установки**

Работа выполняется на холодной прозрачной модели 250-тонного конвертера КарМК, изготовленной в масштабе 1:25. Модель снабжена первичным механизмом вращения, приспособлением для замера угла поворота и скорости вращения. Модель установлена на катках в муфте, сужающих насадок выпускного отверстия, которые имеют различные проходные сечения и имитируют износ леточных блоков по ходу службы конвертера от 150 до 30 мм (через каждые 25 мм)

### **Выполнение работы**

**Часть 1.** Изучение зависимости длительности выпуска металла из конвертера от диаметра выпускного отверстия.

**Цель работы:** Определение диаметра сталевыпускного отверстия на промышленном конвертере, при котором длительность выпуска составляет 5-7 минут.

В работе в качестве жидкости, моделирующей жидкий металл, используется 40% водный раствор бромистого калия, а в качестве жидкости, моделирующей шлак – гептан  $C_7H_{16}$ . Методом анализа размерностей для данных условий физического моделирования с учетом масштабного коэффициента установлено, что при массе жидкого металла в промышленном конвертере равной 300 тонн, объём моделирующей жидкости составит

примерно 2700  $\text{см}^3$ . При весе шлака в конвертере равном 40 тонн, объём жидкости, моделирующей шлак, равен 835  $\text{см}^3$ .

В модель залить жидкости, моделирующие металл и шлак в указанном выше количестве, затем установить насадку №1 (с минимальным проходным сечением) и наклонять конвертер с максимальной скоростью до момента, когда уровень шлака окажется на срезе горловины конвертера. Одновременно пускается секундомер. Как только в ковш начнут поступать первые порции шлака (гептана) остановить секундомер и конвертер вернуть в начальное положение. Затем насадка №1 снимается, жидкость из сталеприемного ковша вновь сливается в конвертер и опыты повторяются (с каждой насадкой по 2 раза и берется среднее значение)

Соответствие модельных насадок и отверстий промышленного конвертера приведено в таблице 1.

Таблица 1.

№ ПП	Диаметр насадки на холодной модели, мм	Диаметр сталевыпускного отверстия на промышленном конвертере, мм
1	6	150
2	7	175
3	8	200
4	9	225
5	10	250
6	11	275
7	12	300

Результаты опытов с различными насадками заносятся в таблицу 2.

Таблица 2.

№ опыта	Количество металла (40% р-р $H_{B_2}$ )	Количество шлака (гептана)	Диаметр насадки	Время выпуска, сек		
				Опыт 1	Опыт 2	Среднее
1	2700 $см^3$	835 $см^3$	6			
2	-	-	7			
3	-	-	8			
4	-	-	9			
5	-	-	10			
6	-	-	11			
7	-	-	12			

Для перехода от времени выпуска на модели к времени выпуска на образце (промышленном конвертере) используем равенство критериев гомохронности:

$$H_{0\text{мод}} = H_{0\text{обр}} \quad (8)$$

$$\left(\frac{\partial \tau}{\alpha}\right)_{\text{мод}} = \left(\frac{\partial \tau}{\alpha}\right)_{\text{обр}} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial_{\text{мод}} \tau_{\text{мод}}}{\alpha_{\text{мод}}}\right) = \left(\frac{\partial_{\text{обр}} \tau_{\text{обр}}}{\alpha_{\text{обр}}}\right) \quad (10)$$

Из соотношения (10) определяем время выпуска металла на промышленном конвертере:

$$\tau_{\text{обр}} = \frac{\alpha_{\text{обр}}}{\alpha_{\text{мод}}} \times \frac{\vartheta_{\text{мод}}}{\vartheta_{\text{обр}}} \times \tau_{\text{мод}} \quad (11)$$

Где  $\frac{\alpha_{\text{обр}}}{\alpha_{\text{мод}}}$  - соотношение линейных размеров образца и модели (масштаб моделирования), равное 25:1

$\frac{\vartheta_{\text{мод}}}{\vartheta_{\text{обр}}}$  - соотношение линейных скоростей вращения модели и конвертера, равное

при угловой скорости вращения от 0,01 до 1 об/мин  
2,24

$\tau_{\text{мод}}$  - время выпуска жидкости из модели, сек

Подставляя известные значения в формулу (11) определяют время выпуска металла из конвертера и строят графики зависимости времени выпуска от диаметра отверстия для модели и образца.

По графику, относящемуся к промышленному конвертеру, определяют диаметр сталевыпускного отверстия при котором длительность выпуска металла составляет 5-7 минут.

Затем делаются выводы по работе, которые заносятся в отчет.

**Часть 2.** Определение количества шлака, попавшего в сталеразливочный ковш при выпуске металла.

В модель залить жидкости, моделирующие металл и шлак в указанном в части 1 количестве. Медленно поворачивая конвертер с произвольной скоростью, сливают жидкость, фиксируя угол и время поворота. После прохождения отверстия шлаковым поясом выпуск прекращают и закрывают выпускное отверстие. С помощью бюретки определяется количество жидкости, моделирующей шлак, попавшей в ковш. Затем насадки заменяются и опыт повторяется. Данные опыта заносятся в таблицу 3 (необходимо поддерживать примерно одинаковую скорость вращения во всех 3-х опытах)

Таблица 3

№ опыта	Диаметр отверстия, мм	Угол поворота, град.	Время поворота, сек	Угловая скорость вращения, град/сек	Количество шлака, см <sup>3</sup>
1	6				
2	7				
3	8				
4	9				
5	10				
6	11				
7	12				

По результатам опытов (Таблица 3) строится график зависимости количества шлака, попавшего в ковш, от диаметра выпускного отверстия (при постоянной скорости вращения) Затем устанавливается насадка №4 или №5 и на этой насадке изучается влияние скорости вращения конвертера на количество попадающего в ковш шлака. Для этого жидкость вначале сливают при малой скорости вращения, затем скорость вращения увеличивают (3-4 разных скорости). Данные опытов заносят в таблицу 4.

Таблица 4

№ опыта	Диаметр насадки, мм	Угол поворота, град	Угловая скорость, град/сек	Время поворота, сек	Количество шлака, см <sup>3</sup>
---------	---------------------	---------------------	----------------------------	---------------------	-----------------------------------

1	10-11				
2	-				
3	-				
4	-				

По результатам опытов (таблица 4) графически строят зависимость количества шлака, попавшего в ковш, в начальный период времени в зависимости от скорости вращения конвертера (при постоянном диаметре выпускного отверстия) и делают соответствующие выводы.

#### Работа №4

#### Изучение скорости растворение твёрдого тела в барботируемой ванне.

**Цель работы:** моделирование процесса растворения извести в шлаковом расплаве и выявление факторов, влияющих на скорость процесса.

В сталеплавильных агрегатах имеет место значительное перемешивание металла и шлака вследствие воздействия кислородной струи на металл, конвективных потоков, а также всплывания большого количества пузырей окиси углерода. Перемешивание ванны оказывает большое влияние на массо- и теплообменные процессы и, в частном случае, на процесс растворения твердых материалов (известь, железная руда, стальной скрап) в жидких металлургических расплавах.

Скорость растворения вещества может быть описана уравнением А. Н. Щукарева:

$$V = \rho_{\Sigma} (C_{\text{нас}} - C_0)F \quad (12)$$

Где  $V$  - скорость растворения твердого тела в жидкости, г/сек

$\rho_{\Sigma}$  - суммарный коэффициент массопереноса, см/сек



$C_{\text{нас}}, C_0$  - концентрация насыщения и текущая концентрация растворяемого вещества соответственно, г/см<sup>3</sup>

$F$  – площадь поверхности растворяемого тела, см<sup>2</sup>

Из уравнения (12) видно, что при постоянных значениях концентраций и площади поверхности, скорость растворения твердого тела зависит от коэффициента массопереноса, являющегося функцией гидродинамической обстановки в ванне.

В данной работе предполагается определить посредством холодного физического моделирования характер зависимости скорости растворения твердых образцов от интенсивности перемешивания жидкости.

### **Приготовление образцов**

Образцы готовятся из сплава соды с щавелевой кислотой в соотношении 3:1. Тщательно перемешанная смесь порошков расплавляется в тигле при температуре 900°C и разливается в специальные отдельные формы. После затвердевания отпиливается донная часть отливки, шлифуется с обеих торцевых сторон и получается таблетка диаметром 35 мм и толщиной порядка 5 мм. Со стороны отпиленной головной части образцы нумеруются. Затем измеряется диаметр и толщина образца и вычисляется площадь его плоской грани со стороны донной части отливки. Далее образцы покрываются парафином со стороны пронумерованной плоской грани и по цилиндрической поверхности. Затем подготовленная таблетка взвешивается.

### **Проведение работы**

Работа выполняется на установке донной продувки жидкости (см. работу №6, рис. 4). Растворяемый образец укрепляется на подвижной жесткой штанге, позволяющей регулировать его положение в реакционном сосуде. Для отсчета времени растворения образца служит секундомер, а для измерения веса образца – аналитические весы. Температура в зоне растворения определяется ртутным термометром. Давление дутья (кислород или азот) и его расход замеряются соответственно манометром и ротаметром.

В реакционный сосуд заливается дистиллированная вода в количестве 1 литр. Образец закрепляется на штанге и фиксируется в определенном

положении в воде. Включается подача газа и устанавливается его расход порядка 32-35 л/мин. Одновременно с подачей дутья включают секундомер и ведётся растворение образца в течении 2 минут, после чего образец извлекается из сосуда и взвешивается. Затем опыт повторяется с другим образцом при увеличении расхода газа. После каждых 2 опытов вода сливается и заменяется новой. Всего подвергаются растворению 5-6 образцов. Результаты наблюдений заносят в таблицу

№ ПП	№ образцов	Расход газа, л/мин	Давление дутья, кг/ см <sup>2</sup>	Температура		Вес образца		Потеря		Скорость растворения, г/мин
				В начале опыта	В конце опыта	До опыта	После опыта	Гр.	%	
1	1	35								
2	2	45								
3	3	55								

По результатам опытов строят график зависимости скорости растворения образца от интенсивности продувки и делаются соответствующие выводы.

Отчет содержит:

1. Теоретические сведения
2. Описание установки
3. План проведения опытов
4. Результаты опытов (таблицы, графики)
5. Выводы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Явонский. Теория процессов производства стали. М. «Металлургия», 1968.
2. В.И. Лапицкий, С.М. Левин, С.И. Легкостум, Н.И. Ступарь, С.Г. Афанасьев. Конвертерные процессы производства стали. «Металлургия» 1970.
3. В.И. Явонский, С. Л. Левин и др. Metallurgy стали. М, «Металлургия» 1973.
4. М.П. Квитко, С. Г. Афанасьев. Кислородно-конвертерный процесс.М. «Металлургия» 1974.
5. Дон Дзе. Конвертерное производство стали (перевод с японского) «Металлургия», 1971
6. И.И. Борнацкий, В.И. Исаев и др. Современный кислородно-конвертерный процесс. Из-во «Техника», Киев, 1974.
7. В.И. Баптизианский. Теория кислородно-конвертерного процесса. «Металлургия» ,1975.
8. В.И. Баптизианский. Механизм и кинетика процесса в конвертерной ванне. Metallurgizdat. 1960.