



Л. Г. Корс, Н. В. Корс

**НЕКОТОРЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ
В ХИМИИ И ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**Калининград
2009**

Л. Г. Корс, Н. В. Корс

НЕКОТОРЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ
В ХИМИИ И ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Учебно-практическое пособие

Издательство
Российского государственного университета им. Иммануила Канта
2009

УДК 66.01:519.673
ББК 35
К69

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Российского государственного университета им. Иммануила Канта.

Корс Л. Г., Корс Н. В.

К69 Некоторые производственные задачи в химии и химической технологии: учеб.-практ. пособие. — Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2009. — 67 с.

Приведен ряд примеров, задач и технологических расчетов процессов производства некоторых минеральных кислот и удобрений: двойного суперфосфата, кормового монокальцийфосфата, аммофоса.

Предназначено для студентов естественнонаучных факультетов университетов и химико-технологических вузов.

УДК 66.01:519.673
ББК 35

© Издательство РГУ им. И. Канта, 2009
© Корс Л. Г., Корс Н. В., 2009

ВВЕДЕНИЕ

Несколько лет назад в РГУ им. И. Канта был передан на безвозмездной основе кафедрой «Технология неорганических веществ» КазХТИ г. Чимкента программный комплекс для расчетов некоторых типов задач по курсу «Химическая технология» специальности 020101 — «Химия». На основе этого комплекса была выполнена работа «Расчет каталитического реактора для реакции окисления SO_2 в SO_3 » [1], которая включала методическое обеспечение:

— вычисления равновесной степени превращения SO_2 в SO_3 при различных температурах; расчета оптимальной температуры при различных степенях превращения; расчета скорости контактного окисления на ванадиевом катализаторе в зависимости от температуры при определенной степени превращения; расчета материальных и тепловых балансов контактного реактора по схемам одинарного и двойного контактирования;

— графического построения рабочих линий послойного окисления SO_2 в SO_3 в контактном аппарате с неподвижным слоем катализатора;

— вычисления расхода ванадиевой контактной массы по слоям для определения размеров реактора (диаметра и высоты каждого слоя).

Для функционирования программного комплекса «Расчет материальных потоков сушильно-абсорбционного отделения сернокислотного цеха», приведенной в практикуме [1] в качестве контрольного примера, разработаны методические указания и вариант численного расчета в виде файла CAO.doc* (все файлы со звездочкой после расширения находятся в ПК в файле C:\химтехнология\база_данных\).

В данном пособии продолжена разработка методического обеспечения по ряду примеров, задач и технологических расчетов, связанных с производством минеральных кислот и удобрений. Технологические расчеты материальных балансов базируются на физико-химических принципах осуществления процессов и сводятся к количественной интерпретации расходов сырья, энергии и других производственных затрат. Цель пособия — ознакомить студентов с вычисли-

тельными методами исследования моделей процессов и продуктов химической технологии и привить навыки выполнения этих инженерных расчетов. Представленные в настоящем пособии задачи отражают процессы реальных современных химических производств. Для их решения требуется знание химизма процессов, основных законов химии и важнейших технологических операций. Моделирование технологических задач на ПК позволяет студентам выполнять индивидуальные технические расчеты вручную с контролем результатов или оперативно рассчитывать несколько вариантов реализации технологических процессов. В первом случае студентами приобретаются навыки технических расчетов конкретных производств, во втором — умение анализировать и выбирать лучшие решения по качественным и технико-экономическим показателям (ТЭП) процесса. В пособии приведены примеры и варианты решения типовых задач, указаны формулы, помогающие выполнить расчеты [2; 3]. Пособие разработано для раздела курса «Производство фосфорных кислот (термической и экстракционной) и минеральных удобрений» с учетом современных требований к самостоятельному изучению материала.

1. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОСТЫХ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ

1.1. Классификация и некоторые понятия в производстве минеральных удобрений

Расчеты ТЭП в производстве минеральных удобрений основаны главным образом на балансовых уравнениях химических реакций обменного разложения гетерогенных некаталитических процессов.

Минеральными удобрениями называются соли, содержащие в своем составе элементы, необходимые для питания и роста растений и улучшения плодородия почвы, используемые с целью получения высоких и устойчивых урожаев [4; 5]. Понятие «стандартные туки» вводится для соизмерения различных видов удобрений, содержащих неодинаковое количество питательного элемента. Подсчет производительности заводов, а также общего объема производства удобрений ведется в «стандартных туках».

При подсчете общего баланса удобрений их весовые количества принято выражать в условных единицах (туках — процентном содержании питательного компонента для фосфорных удобрений в пересчете на продукт, содержащий 18,7 % $P_2O_{5\text{усв}}$ из апатита, 19 % $P_2O_{5\text{усв}}$ из фосфорита; для азотных — на продукт, содержащий 20,5 % азота; для калийных — на продукт, содержащий 41,6 % K_2O ; для борных — на продукт, содержащий 9 % H_3BO_3).

Пример. Какому количеству стандартных азотных и калийных удобрений соответствует 1 т натриевой селитры и 1 т хлорида калия?

Решение. Рациональный способ решения основан на обратной пропорциональной зависимости между содержанием питательного элемента в удобрении и его количеством:

$$1) \frac{P_{\text{NaNO}_3}}{P_{\text{ст}}} = \frac{H_{\text{ст}}}{H_{\text{NaNO}_3}}; P_{\text{ст}} = \frac{1 \cdot 16,4}{20,5} = 0,8 \text{ т NaNO}_3,$$

где 1 т натриевой селитры, содержащей 16,4 % N, соответствует 0,8 т стандартного азотного удобрения — «стандартного тука»;

$$2) \frac{P_{\text{KCl}}}{P_{\text{ст}}} = \frac{H_{\text{ст}}}{H_{\text{KCl}}}; P_{\text{ст}} = \frac{1 \cdot 61}{41,6} = 1,47 \text{ т},$$

где 1 т хлорида калия, содержащего 61 % K₂O, соответствует 1,47 т стандартной калийной соли — «стандартного тука».

Существует специальный показатель — К (коэффициент пересчета количества минеральных удобрений в стандартные туки), который находится отношением процентного содержания питательного элемента в сравниваемом удобрении к содержанию питательного элемента в стандартном удобрении данной группы. Тогда при вычислении количества удобрения в стандартных туках число, соответствующее массе сравниваемого удобрения, умножается на коэффициент пересчета. Для решения задачи необходимы данные о содержании питательных элементов в удобрениях:

1) в NaNO₃ — 16,4 % N,

$$K_{\text{NaNO}_3} = \frac{16,4}{20,5} = 0,8; 1 \cdot 0,8 = 0,8 \text{ т};$$

2) в KCl — 61 % K₂O,

$$K_{\text{KCl}} = \frac{61}{41,6} = 1,47; 1 \cdot 1,47 = 1,47 \text{ т}.$$

Минеральные удобрения классифицируют по их агрохимическому значению, по количеству и виду питательных веществ, растворимости в почвенных водах, физиологическому действию на удобряемые почвы.

По происхождению удобрения делятся на минеральные, органические, органоминеральные. По агрохимическому назначению — на прямые и косвенные (известкование почв). По количеству питательных веществ — на простые (N, P, K) и комплексные (два или три питательных элемента). При этом комплексные удобрения могут быть смешанными (смеси получают механическим смешиванием туков) и

сложными (соединения нескольких питательных веществ, полученных на основе химических реакций).

Все сложные минеральные удобрения по методу их производства могут быть разделены на три группы:

1) получаемые переработкой фосфорной кислоты (аммофос, диаммофос) [5; 6];

2) получаемые переработкой смеси фосфорной и азотной кислот (нитроаммофос, нитроаммофоска) (файл NPK.doc*; файл нитроаммофоска.doc*);

3) получаемые разложением природных фосфатов азотной кислотой (нитрофос, нитрофоска) (файл NPK.doc*; нитрофосфаты.doc*).

Таблица 1.1

Характеристика комплексных удобрений [6]

Удобрение	Соотношение N : P ₂ O ₅ : : K ₂ O	Содержание, %			Гигроскопическая точка, %	Слеживаемость
		N + P ₂ O ₅ + + K ₂ O	P ₂ O ₅ вол.	H ₂ O		
Аммофос	1:4:0	62—64	90	0,5	65	Не слеживается
Диаммофос	1:2,5:0	64—66	90	0,6	72	—
Нитроаммофос	1:1:0	46—48	95	0,9	58	Слеживается
Нитроаммофоска	1:1:1	51—53	95	0,9	54	—
Нитрофос	1,4:1:0	40—42	45	0,9	—	—
Нитрофоска	1:1:1	32—34	55	1,1	59	—
Азофоска	1:1:1	48—50	85	—	—	—

По степени растворимости удобрения классифицируют на водорастворимые в почвенных водах (N, K) и растворимые в почвенных кислотах (P). Фосфорные удобрения по степени растворимости делятся на водорастворимые (простой, двойной суперфосфат), растворимые в органических кислотах, или усвояемые (преципитат, термо-

фосфат, обесфторенный фосфорит, апатит) [6], нерастворимые, или растворимые только в сильных кислотах (фосфоритная мука); по физиологическому действию на почвы — на кислые (двойной суперфосфат), щелочные (термофосфаты), нейтральные (преципитат); по форме — на обычные и гранулированные; по агрегатному состоянию — на жидкие (аммиачная вода — 25 % NH_3 , КАС — карбамид и аммиачная селитра) и твердые (N, P, K) удобрения.

В химической промышленности помимо минеральных удобрений выпускаются и кормовые добавки. Кормовые фосфаты (КФ) — это минеральные подкормки для сельскохозяйственных животных, содержащие фосфор и кальций. К ним относят монокальцийфосфат (МКФ), который получают взаимодействием термической или экстракционной H_3PO_4 с апатитовым либо фосфоритовым концентратом (не менее 28 % P_2O_5). МКФ содержит не более 18 % Ca, не менее 24 % P, не более 0,2 % F, 0,006 % As, 0,002 % Pb. МКФ применяют в рационах крупного рогатого скота при недостатке фосфора и небольшом избытке Ca.

Применение КФ способствует нормализации обмена веществ в организме животных, увеличению их плодовитости, повышению продуктивности и снижению себестоимости продукции животноводства. Мировое производство КФ около 3 млн т в год (в пересчете на P_2O_5) [6].

1.2. Постановка задачи о расчете вариантов получения кормового МКФ или камерного двойного суперфосфата, удовлетворяющих ГОСТу

В промышленности получают кормовой МКФ, как и двойной суперфосфат, путем обработки фосфатов фосфорной кислотой по камерному методу, который осуществляется в несколько стадий, отличающихся друг от друга аппаратным оформлением.

Стадия основного разложения осуществляется в смесителе и суперфосфатной камере, затем происходит дозревание (вызревание, дозревание на складе) и сушка кормового МКФ в барабанной сушилке. При получении же двойного суперфосфата следующей стадией после дозревания является нейтрализация свободной кислоты, гранулирование, а затем сушка.

Технологический режим получения кормового МКФ и двойного суперфосфата во многом схож: используется фосфорная кислота кон-

центрации (69—75 % H_3PO_4), температура на стадии разложения составляет 353—373 К (80—100 °С), дозревание происходит в одинаковых условиях. Однако при получении кормового МКФ расходуют несколько больше фосфорной кислоты (норма фосфорной кислоты для МКФ — 1,1—1,25 от стехиометрического количества, для двойного суперфосфата — 1,05—1,1). Сушка кормового МКФ осуществляется при более высоких температурах — 403—423 К (130—150 °С) для обеспечения высокой степени обесфторивания продукта, для двойного суперфосфата — 373—383 К (100—110 °С). На рисунке 1.1 приведены принципиальные потоки производства двойного суперфосфата из апатита камерным способом.



Рис. 1.1. Получение двойного суперфосфата камерным способом

Недостаток камерного способа производства двойного суперфосфата — это необходимость использования концентрированной

термической фосфорной кислоты или упаренной экстракционной фосфорной кислоты (дополнительные расходы энергии на выпарку) для разложения фосфатов, а также перемешивание, перемещение (затраты энергии) и длительное складское вылеживание продукта (капитальные затраты на сооружение склада). Кроме того, при складском дозревании продукта выделяются сильно разбавленные фтористые газы, улавливание которых затруднительно. От этих недостатков свободен метод получения двойного суперфосфата по поточной схеме. В случае использования неупаренной экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) фосфаты разлагают в смесителях — реакторах, а избыточную влагу удаляют сушкой продукта в распылительных и вращающихся барабанных сушилках (рис. 1.2).

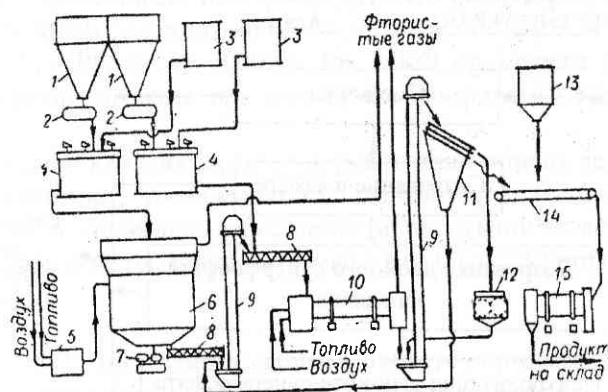


Рис. 1.2. Поточная схема производства гранулированного двойного суперфосфата из фосфоритной муки и неупаренной экстракционной фосфорной кислоты:

1 — бункер для фосфоритной муки; 2 — весовой дозатор; 3 — напорный бак для фосфорной кислоты; 4 — реактор; 5 — топка; 6 — распылительная сушилка; 7 — привод гребка; 8 — шнек; 9 — элеватор; 10 — барабанная сушилка; 11 — грохот; 12 — дробилка; 13 — бункер молотого мела; 14 — ленточный транспортер; 15 — барабанный нейтрализатор

При использовании полученной из фосфорита, в частности кенгисеппского концентрата, кислоты с концентрацией 28—32 % P_2O_5 фосфат разлагается на 50—55 % при перемешивании пульпы в течение одного часа при 343—363 К (70—90°C) в непрерывно действующих реакторах. Вытекающая из реакторов пульпа разделяется на два пото-

ка. Часть ее (около половины) высушивается в распылительной сушилке топочными газами. Температура выходящих из сушилки газов — 398—403 К (125—130°C). Температура высушенного материала не превышает 368 К (95°C). Продукт смешивают в шнековом смесителе-грануляторе со второй частью пульпы; сюда же поступает небольшое количество ретур (фракция размером меньше 1 мм). Затем гранулы, содержащие 20—22 % влаги, высушивают в прямоточной барабанной сушилке до влажности 3—4 %. В процессе сушки разложение фосфорита продолжается, и общая степень разложения сырья увеличивается до 80—85 % и более при применении H_3PO_4 повышенной концентрации — 37—40 % P_2O_5 . Продукт, выходящий из барабанной сушилки с температурой 368 К (95°C), направляется на грохочение. Гранулы размером 1—4 мм нейтрализуют мелом в горизонтальном вращающемся барабане-нейтрализаторе для уменьшения свободной кислотности до 5 % и ниже, в результате получается готовый продукт, содержащий 42—44 % $P_2O_{5\text{св}}$. Частицы крупнее 4 мм измельчают в дробилке, смешивают с ретуrom и возвращают в смеситель — гранулятор.

МКФ кормовой и двойной суперфосфат должны удовлетворять следующим основным показателям, указанным в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Характеристика продуктов

Продукт	Содержание компонента, %				
	P_2O_5 с.к.р.*	$P_2O_{5\text{св}}$	$P_2O_{5\text{св}}$	F	H_2O
Двойной суперфосфат ГОСТ 16306-75	—	49 ± 1	$< 2,5$	—	< 4
	—	43 ± 1	$< 5,0$	—	< 5
Монокальцийфосфат ГОСТ 23999-80	55	—	—	$< 0,2$	< 4
	50	—	—	$< 0,2$	< 4

Примечание: * — растворимое в 0,4 % HCl.

Цель работы — освоение методики расчета по уравнениям реакций материальных балансов процесса производства кормового фосфата или двойного суперфосфата, полученных камерным способом на основе фосфорной кислоты (экстракционной или термической) из различного сырья (фосфорита, апатита).

Задание:

1. Используя полученные исходные данные (табл. 1.3), по программе RP2.BAS рассчитать варианты материального баланса производства кормового МКФ или двойного суперфосфата по камерному способу.

Таблица 1.3

Исходные данные к программе RP2.BAS в системе QBASIC

Показатель	Единица измерения	Идентификатор величины	Вариант исходных данных			Контрольный пример [1]
			1	2	3	
1. Расход фосфатного сырья	кг	Q	1000			1000
2. Состав фосфатного сырья:	Доли единицы	CAO	0,3	0,39	0,52	0,42
CaO		P2O5	0,25	0,27	0,39	0,28
P ₂ O ₅		GMO	0,02	0,03	0,009	0,02
MgO		FE2O3	0,01	0,05	0,01	0,01
Fe ₂ O ₃		AL2O3	0,009	0,05	0,01	0,009
Al ₂ O ₃		F	0,02	0,02	0,03	0,02
F		CO2	0,06	0,07	0,06	0,06
CO ₂						
3. Концентрация фосфорной кислоты	>>	C	0,7	0,72	0,75	0,7
4. Норма фосфорной кислоты	>>	H	1,1	1,0	1,2	1,05
5. Степень разложения по стадиям:	>>					
разложение сырья в камере		X1	0,8	0,7	0,8	0,8
дозревание продукта на складе		X2	0,9	0,9	0,9	0,9
сушка продукта		X3	0,93	0,93	0,93	0,93

Окончание табл. 1.3

Показатель	Единица измерения	Идентификатор величины	Вариант исходных данных			Контрольный пример [1]
			1	2	3	
6. Степень выделения фтора в газовую фазу по стадиям:	Доли единицы					
разложение		F1	0,1	0,1	0,1	0,1
дозревание		F2	0,6	0,6	0,6	0,6
сушка		F3	0,8	0,8	0,8	0,8
7. Испарение воды по стадиям:	>>					
разложение		W1	0,1	0,1	0,1	0,1
дозревание		W2	0,15	0,15	0,15	0,15
8. Содержание воды в готовом продукте	>>	W3	0,03	0,03	0,03	0,03
9. Степень дегидратации Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·H ₂ O	>>	Y	0,4	0,4	0,4	0,4

2. Используя расчетные и литературные данные, сопоставить качественные показатели продукта и обосновать возможность получения продукта с более высокими ТЭП при изменении исходных данных: качественных показателей сырья (апатит, фосфорит), нормы и выбора вида кислоты (термическая или экстракционная).

3. По номеру студента в списке группы выбрать из таблицы приложения свой вариант задач, их решения представить в отчете вместе с условиями задач.

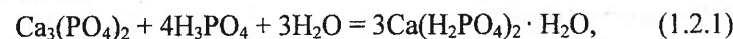
Порядок выполнения работы:

1. Введите исходные данные (табл. 1.3) после получения задания для самостоятельного решения и уточнения у преподавателя варианта и объема необходимых расчетов. Изучите технологический режим получения МКФ камерным и поточным методом, затем подберите один или несколько вариантов показателей технологического режима и сведите их в таблицу исходных данных, проанализируйте результаты расчетов, выполненных по рабочей программе.

2. В отчете приведите характеристику сырья (фосфорита, апатита) и продуктов — кормового МКФ и двойного суперфосфата, полученных по камерному способу; параметры технологического режима, принципиальную схему производства продуктов; исходные данные для расчетов; таблицы результатов расчетов материального баланса и качественных показателей продуктов; список рекомендуемой литературы.

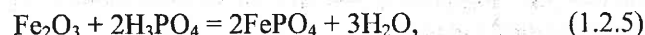
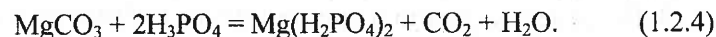
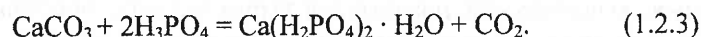
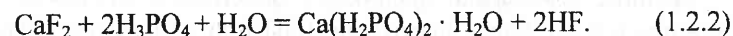
3. Если по качественным показателям полученный продукт (кормовой МКФ или двойной суперфосфат) не соответствует требованиям ГОСТа, то необходимо пересмотреть параметры технологического режима, выбрать по литературным и практическим данным улучшенный вариант, позволяющий получить продукт, удовлетворяющий стандарту.

Предполагаем, что на всех стадиях производства МКФ происходит постепенное, с одинаковой скоростью разложение минералов, входящих в состав фосфатного сырья, по следующим основным уравнениям (1.2.1—1.2.10):



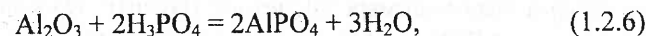
$$a_1 = \frac{4 \cdot 98}{310} = 1,26; b_1 = \frac{3 \cdot 18}{310} = 0,174; c_1 = \frac{3 \cdot 252}{310} = 2,44,$$

где 98; 18; 310; 252 — M_r H_3PO_4 ; H_2O ; $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ соответственно.



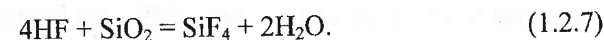
$$a_5 = \frac{2 \cdot 98}{160} = 1,23; b_5 = \frac{3 \cdot 18}{160} = 0,34; c_5 = \frac{2 \cdot 151}{160} = 1,89,$$

где 98; 18; 160; 151 — M_r H_3PO_4 ; H_2O ; Fe_2O_3 ; FePO_4 соответственно.



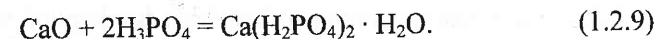
$$a_6 = \frac{2 \cdot 98}{102} = 1,92; b_6 = \frac{3 \cdot 18}{102} = 0,53; c_6 = \frac{2 \cdot 122}{102} = 2,39,$$

где 98; 18; 102; 122 — M_r H_3PO_4 ; H_2O ; Al_2O_3 ; AlPO_4 соответственно.



$$b_7 = \frac{2 \cdot 18}{6 \cdot 19} = 0,316; c_8 = \frac{144}{6 \cdot 19} = 1,26; c_7 = \frac{60}{6 \cdot 19} = 0,53,$$

где 18; 19; 144; 60 — M_r H_2O ; F ; H_2SiF_6 ; SiO_2 соответственно.



$$a_9 = \frac{2 \cdot 98}{56} = 3,5; c_9 = \frac{252}{56} = 4,5,$$

где 98; 56; 252 — M_r H_3PO_4 ; CaO ; $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ соответственно.



$$a_{10} = \frac{2 \cdot 98}{40,3} = 4,86; b_{10} = \frac{18}{40,3} = 0,45; c_{10} = \frac{218,3}{40,3} = 5,42,$$

где 98; 18; 40,3; 218,3 — M_r H_3PO_4 ; H_2O ; MgO ; $\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ соответственно.

Расчет количества расходуемой фосфорной кислоты (a), которое необходимо для разложения исходных компонентов сырья в реакциях (1.2.1; 1.2.9; 1.2.10; 1.2.5; 1.2.6), воды (b), которая выделяется в результате разложения исходных компонентов сырья в реакциях (1.2.1; 1.2.10; 1.2.5; 1.2.6), а также основных и побочных продуктов (c), которые образуются в каждой из реакций (1.2.1; 1.2.9; 1.2.10; 1.2.5; 1.2.6; 1.2.7; 1.2.8) с соответствующими стехиометрическими коэффициентами.

Фтористый водород, образующийся при разложении сырья по реакции (1.2.2), соединяясь с кремнеземом, образует четырехфтористый кремний (1.2.7), который может выделяться в газовую фазу или образовывать кремнефтористоводородную кислоту, входящую в состав продукта (1.2.8). Допускаем, что фтор после разложения находится во всех фазах в виде H_2SiF_6 .

Фосфор присутствует в сырье в виде трикальцийфосфата $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, с которым связана часть CaO , оставшаяся в виде CaF_2 , CaCO_3 и др. Вместо уравнений реакций (1.2.3—1.2.4) расчет ведется по упрощенным выражениям (1.2.9—1.2.10).

Степень разложения сырья после камеры составляет 75—80 %, после дозревания на складе — 80—90 %, на стадии сушки монокальцийфосфата происходит дополнительное разложение минералов, входящих в состав сырья.

Исходные данные для расчета приводятся в таблице 1.3.

Программа расчетов материального баланса состоит из следующих разделов:

- 1.2.1. Расчет состава фосфатного сырья.
- 1.2.2. Расчет количества расходуемой фосфорной кислоты.
- 1.2.3. Расчет состава продукта после разложения сырья в камере.
- 1.2.4. Расчет состава продукта после стадии дозревания на складе.
- 1.2.5. Расчет состава продукта после стадии сушки.
- 1.2.6. Расчет качественных показателей продукта.

Описание алгоритма решения задачи.

Отметим, что в каждом разделе все употребляемые вещества обозначаются с помощью идентификаторов языка QBASIC.

1.2.1. Расчет состава фосфатного сырья производится на 1000 кг (табл. 1.3, вариант 1)

Масса компонентов исходного сырья (кг):

Масса СаО, связанного в виде $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ в пересчете на P_2O_5 :

$\text{CAOT} : \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 3 \cdot 56 / 142 = 1,183 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot Q.$

$\text{CAOT} = 1,183 \cdot 0,25 \cdot 1000 = 295,75.$

Масса $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ в пересчете на P_2O_5 :

$\text{TK} : \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 310 / 142 = 2,183 \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot Q.$

$\text{TK} = 2,18 \cdot 0,25 \cdot 1000 = 545,75.$

Масса СаО, связанного в виде других соединений:

$\text{GCAO} : \text{CAO} \cdot Q - \text{CAOT}.$

$\text{GCAO} = 0,3 \cdot 1000 - 295,75 = 4,25.$

Масса MgO : $\text{GMGO} = \text{GMO} \cdot Q.$

Масса MgO = $0,02 \cdot 1000 = 20.$

Масса Fe_2O_3 : $\text{GFEO} = \text{FE2O3} \cdot Q.$

Масса $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0,01 \cdot 1000 = 10.$

Масса Al_2O_3 : $\text{GALO} = \text{AL2O3} \cdot Q.$

Масса $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,009 \cdot 1000 = 9.$

Масса F : $\text{GF} = F \cdot Q.$

Масса F = $0,02 \cdot 1000 = 20.$

Масса CO_2 : $\text{GCO} = \text{CO2} \cdot Q.$

Масса $\text{CO}_2 = 0,06 \cdot 1000 = 60.$

Массу «прочих» определяют по разности между общей массой фосфатного сырья (например, 1000 кг) и суммарной массой известных компонентов:

$\text{PR} = Q - (\text{TK} + \text{GCAO} + \text{GFEO} + \text{GALO} + \text{GMGO} + \text{GF} + \text{GCO}).$

Масса прочих PR = $1000 - 545,75 - 4,25 - 20 - 10 - 9 - 20 - 60 = 331.$

1.2.2. Расчет количества расходуемой фосфорной кислоты.

Исходные данные:

1. Концентрация фосфорной кислоты (H_3PO_4) — C = 0,7 (доли единицы).

2. Норма расходуемой фосфорной кислоты — H = 1,1 (доли от стехиометрического количества).

Количество фосфорной кислоты (кг) рассчитывают по уравнению 1.2.1, 1.2.5, 1.2.6, 1.2.9, 1.2.10.

Стехиометрическое количество H_3PO_4 :

$\text{GK} = \text{TK} \cdot 4 \cdot 98 / 310 + \text{GCAO} \cdot 2 \cdot 98 / 56 + \text{GFEO} \cdot 2 \cdot 98 / 160 +$
 $+ \text{GMGO} \cdot 2 \cdot 98 / 40,3 + \text{GALO} \cdot 2 \cdot 98 / 102.$

$\text{GK} = 545,75 \cdot 1,26 + 4,25 \cdot 3,5 + 10 \cdot 1,23 + 20 \cdot 4,86 + 9 \cdot 1,92 = 831,7.$

Практическая норма H_3PO_4 :

$\text{GKH} = \text{GK} \cdot \text{H}.$

$\text{GKH} = 831,7 \cdot 1,1 = 914,9.$

Практическая норма фосфорной кислоты заданной концентрации:

$$GKP = GKH / C.$$

$$GKP = 914,9 / 0,7 = 1307.$$

1.2.3. Расчет состава продукта после разложения сырья в камере

Исходные данные:

1. Степень разложения сырья — $X1 = 0,8$ (в долях единицы).
2. Степень выделения фтора в газовую фазу — $F1 = 0,1$ (в долях единицы).
3. Доля испарившейся H_2O , вносимой с кислотой — $W1 = 0,1$ (в долях единицы).

Масса компонентов пульпы (кг):

1. Состав пульпы, образующейся по уравнениям 1.2.1, 1.2.5—1.2.10:

$$Ca(H_2PO_4) \cdot H_2O : CAP = (TK \cdot X1 \cdot 3 \cdot 252) / 310 + (GCAO \cdot X1 \cdot 252) / 56,$$

где $CAP = (545,75 \cdot 0,8 \cdot 3 \cdot 252) / 310 + (4,25 \cdot 0,8 \cdot 252) / 56 = 1080,14$.

$$FePO_4 : FEP = GFEO \cdot X1 \cdot 2 \cdot 151 / 160 = 1,89 \cdot GFEO \cdot X1,$$

где $FEP = 1,89 \cdot 10 \cdot 0,8 = 15,12$.

$$AlPO_4 : ALP = GALO \cdot X1 \cdot 2 \cdot 122 / 102,$$

где $ALP = 2,39 \cdot 9 \cdot 0,8 = 17,21$.

$$Mg(H_2PO_4) : GMP = GMGO \cdot X1 \cdot 218,3 / 40,3 = 5,42 \cdot GMGO \cdot X1,$$

где $GMP = 5,42 \cdot 20 \cdot 0,8 = 86,72$.

$$H_2SiF_6 : GFK = (GF \cdot X1 \cdot 144 / 6 \cdot 19) \cdot (1 - F1) = 1,26 \cdot GF \cdot X1 \cdot (1 - F1),$$

где $GFK = 1,26 \cdot 20 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 18,14$.

$$H_3PO_4 \text{ своб} : GKS = GKH - GK \cdot X1 = GK \cdot (H - X1),$$

где $GKS = 831,7 \cdot 0,3 = 249,51$.

$$H_2O : H2O(1) = (GKP - GKH) + (GFEO \cdot 3 \cdot 18 / 160 + GALO \cdot 3 \cdot 18 / 102 + GMGO \cdot 18 / 40,3 + GF \cdot 2 \cdot 18 / 6 \cdot 19 - TK \cdot 3 \cdot 18 / 310) \cdot X1 -$$

$$- W1 \cdot (GKP - GKH) = (GKP - GKH) \cdot (1 - W1) + (0,34 \cdot GFEO +$$

$$+ 0,53 \cdot GALO + 0,45 \cdot GMGO + 0,316 \cdot GF - 0,174 \cdot TK) \cdot X1,$$

где $H2O(1) = (1307 - 914,9) \cdot 0,9 + (0,34 \cdot 10 + 0,53 \cdot 9 + 0,45 \cdot 20 + 0,316 \cdot 20 - 0,174 \cdot 545,75) \cdot 0,8 = 295,72$.

Неразложенное сырье:

$$HS = TKO + CAO + FEO + ALO + GMO + FO + CO,$$

в том числе:

$$Ca_3(PO_4)_2 : TKO = TK \cdot (1 - X1),$$

где $TKO = 545,75 \cdot 0,2 = 109,15$.

$$CaO : CAO = GCAO \cdot (1 - X1),$$

где $CAO = 4,25 \cdot 0,2 = 0,85$.

$$Fe_2O_3 : FEO = GFEO \cdot (1 - X1),$$

где $FEO = 10 \cdot 0,2 = 2$.

$$Al_2O_3 : ALO = GALO \cdot (1 - X1),$$

где $ALO = 9 \cdot 0,2 = 1,8$.

$$MgO : GMO = GMGO \cdot (1 - X1),$$

где $GMO = 20 \cdot 0,2 = 4$.

$$F : FO = GF \cdot (1 - X1),$$

где $FO = 20 \cdot 0,2 = 4$.

$$CO_2 : CO = GCO \cdot (1 - X1),$$

где $CO = 60 \cdot 0,2 = 12$.

$$HS = 109,15 + 0,85 + 2 + 1,8 + 4 + 4 + 12 = 133,8.$$

Прочие смеси:

$$PRO(1) = PR - GF \cdot X1 \cdot 60 / 6 \cdot 19 = PR - 0,53 \cdot GF \cdot X1,$$

где $PRO(1) = 331 - 0,53 \cdot 20 \cdot 0,8 = 322,52$.

2. Состав газовой фазы:

$$CO_2 : CO2G = GCO \cdot X1,$$

где $CO2G = 60 \cdot 0,8 = 48$.

$H_2SiF_6 : FKG = GF \cdot X1 \cdot F1 \cdot 144 / 6 \cdot 19 = 1,26 \cdot GF \cdot X1 \cdot F1$,
где $FKG = 1,26 \cdot 20 \cdot 0,8 \cdot 0,1 = 2,02$.

$H_2O : H2OG = (GKP - GKH) \cdot W1$,
где $H2OG = (1307 - 914,9) \cdot 0,1 = 39,21$.

Полученные данные заносят в таблицу 1.4.

Таблица 1.4

Разложение фосфатов в камере

Компонент исходного сырья	Приход, кг	Компонент продукта	Расход, кг
1. Фосфатное сырье (Q): Ca ₃ (PO ₄) ₂ в пересчете на P ₂ O ₅ (TK) CaO в пересчете на P ₂ O ₅ (GCAO) Fe ₂ O ₃ (GFEO) Al ₂ O ₃ (GALO) MgO (GMGO) F (GF) CO ₂ (GCO) Прочие (PR)	1000 545,75 4,25 10 9 20 20 60 331	1. Пульпа подкамерный продукт: Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O (CAP) FePO ₄ (FEP) AlPO ₄ (ALP) Mg(H ₂ PO ₄) ₂ (GMP) H ₂ SiF ₆ (GFK) H ₃ PO ₄ (GKS) H ₂ O (H2O)(1) Неразложенное сырье (HS) Прочие (PRO)(1)	1080,14 15,12 17,21 86,72 18,14 249,51 295,72 133,8 322,52
2. Фосфорная кислота (GKP)	1307	2. Газовая фаза: H ₂ SiF ₆ (FKG) CO ₂ (CO2G) H ₂ O (H2OG)	2,02 48 39,21
Итого	2307	Итого	2308,11
Неувязка баланса X (%)		0,05 %	

1.2.4. Расчет состава продукта после стадии дозревания на складе

Исходные данные:

1. Состав пульпы подкамерного продукта из таблицы 1.4.
2. Степень разложения сырья — $X2 = 0,9$ (в долях единицы).
3. Степень выделения фтора в газовую фазу — $F2 = 0,6$ (в долях единицы).

4. Доля испаряемой воды, вносимой с пульпой — $W2 = 0,15$ (в долях единицы).

На стадии дозревания происходит дальнейшее разложение компонентов сырья фосфорной кислотой.

Масса компонентов продукта на стадии дозревания (k_2):

1. Состав вызревшего продукта:

$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O : CAP = (2,44 \cdot TK + 4,50 \cdot GCAO) \cdot X2$,
где $CAP = (2,44 \cdot 545,75 + 4,5 \cdot 4,25) \cdot 0,9 = 1215,68$.

$FePO_4 : FEP = 1,89 \cdot GFEO \cdot X2$, где $FEP = 1,89 \cdot 10 \cdot 0,9 = 17,01$.

$AlPO_4 : ALP = 2,39 \cdot GALO \cdot X2$, где $ALP = 2,39 \cdot 9 \cdot 0,9 = 19,36$.

$Mg(H_2PO_4)_2 : GMP = 5,42 \cdot GMGO \cdot X2$, где $GMP = 5,42 \cdot 20 \cdot 0,9 = 97,59$.

$H_2SiF_6 : GFK = 1,26 \cdot GF \cdot X2 \cdot (1 - F2)$, где $GFK = 1,26 \cdot 20 \cdot 0,9 \cdot 0,4 = 9,07$.

$H_3PO_4 : GKS = GKH - GK \cdot X2 = GK \cdot (H - X2)$,
где $GKS = 831,7 \cdot 0,2 = 166,34$.

$H_2O : H2O(2) = H2O(1) \cdot (1 - W2) + (X2 - X1) \cdot (0,34 \cdot GFEO +$
 $+ 0,53 \cdot GALO + 0,45 \cdot GMGO + 0,316 \cdot GF - 0,174 \cdot TK),$
где $H2O(2) = 295,72 \cdot 0,85 + 0,1 \cdot (0,34 \cdot 10 + 0,53 \cdot 9 + 0,45 \cdot 20 +$
 $+ 0,316 \cdot 20 - 0,174 \cdot 545,75) = 243,89$.

Неразложенное сырье:

$HS = (TK + GCAO + GMGO + GFEO + GALO + GCO + GF) \cdot (1 - X2)$,
где $HS = (545,75 + 4,25 + 20 + 10 + 9 + 60 + 20) \cdot 0,1 = 66,9$.

Прочие примеси:

$PRO(2) = PRO(1) - 0,53 \cdot GF \cdot X2$,
где $PRO(2) = 322,52 - 0,53 \cdot 20 \cdot 0,9 = 312,98$.

2. Состав газовой фазы:

$CO_2 : CO2G = GCO \cdot (X2 - X1)$,
где $CO2G = 60 \cdot 0,1 = 6$.

$H_2SiF : FKG = 1,26 \cdot GF \cdot (X2 \cdot F2 - X1 \cdot F1)$,

где $FKG = 1,26 \cdot 20 \cdot (0,9 \cdot 0,6 - 0,8 \cdot 0,1) = 11,59$.

$H_2O : H_2OG = H_2O(1) \cdot W_2$, где $H_2OG = 295,72 \cdot 0,15 = 44,5$.

Полученные данные заносят в таблицу 1.5.

Таблица 1.5.

МКФ на стадии дозревания на складе

Компонент входящего продукта	Приход, кг	Компонент выходящего продукта	Расход, кг
1. Пульпа (подкамерный продукт):		1. Дозревающий продукт:	
$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ (CAP)	1080,14	CAP	1215,68
$FePO_4$ (FEP)	15,12	FEP	17,01
$AlPO_4$ (ALP)	17,21	ALP	19,36
$Mg(H_2PO_4)_2$ (GMP)	86,72	GMP	97,59
H_2SiF_6 (GFK)	18,14	GFK	9,07
H_3PO_4 (GKS)	249,51	GKS	166,34
H_2O (H ₂ O)(1)	295,72	H ₂ O(2)	243,89
Неразложенное сырье (HS)	133,8	HS	66,9
Прочие (PRO)(1)	322,52	PRO(2)	312,98
2. Газовая фаза:		2. Газовая фаза:	
CO_2 (CO ₂ G)	48	CO ₂ G	6
H_2SiF_6 (FKG)	2,02	FKG	11,59
H_2O (H ₂ OG)	39,21	H ₂ OG	44,35
Итого	2308,11	Итого	2210,76
Неувязка баланса X (%)			4,2

1.2.5. Расчет состава продукта после стадии сушки

Исходные данные:

1. Состав вызревшего продукта из таблицы 1.5.
2. Степень разложения сырья — $X_3 = 0,93$ (в долях единицы).
3. Степень выделения фтора в газовую фазу — $F_3 = 0,8$ (в долях единицы).
4. Содержание влаги в готовом продукте — $W_3 = 0,08$ (в долях единицы).
5. Степень дегидратации продукта — $Y = 0,4$ (в долях единицы).

Масса компонентов высушенного продукта (кг):

1. Состав высушенного продукта.

$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O : CAP = (2,44 \cdot TK + 4,50 \cdot GCAO) \cdot X_3$,

где $CAP = (2,44 \cdot 545,75 + 4,5 \cdot 4,25) \cdot 0,93 = 1256,2$.

$CAP = CAP \cdot Y$ (с учетом дегидратации),

где $CAP = 1256,2 \cdot 0,4 = 502,48$.

$FePO_4 : FEP = 1,89 \cdot GFEO \cdot X_3$, где $FEP = 1,89 \cdot 10 \cdot 0,93 = 17,58$.

$AlPO_4 : ALP = 2,39 \cdot GALO \cdot X_3$, где $ALP = 2,39 \cdot 9 \cdot 0,93 = 20$.

$Mg(H_2PO_4)_2 : GMP = 5,42 \cdot GMGO \cdot X_3$, где $GMP = 5,42 \cdot 20 \cdot 0,93 = 100,8$.

$H_2SiF_6 : GFK = 1,26 \cdot GF \cdot X_3 \cdot (1 - F_3)$, где $GFK = 1,26 \cdot 20 \cdot 0,93 \cdot 0,2 = 4,69$.

$H_3PO_4 : GKS = GKH - GK \cdot X_3 = GK \cdot (H - X_3)$,

где $GKS = 831,7 \cdot 0,17 = 141,39$.

Неразложенное сырье:

$HS = (TK + GCAO + GMGO + GFEO + GALO + GCO + GF) \cdot (1 - X_3)$,

$HS = (295,75 + 4,25 + 20 + 10 + 9 + 60 + 20) \cdot 0,07 = 29,3$.

Прочие:

$PRO(3) = PRO(2) - 0,53 \cdot GF \cdot X_3$, $PRO(3) = 312,98 -$

$- 0,53 \cdot 20 \cdot 0,93 = 303,12$.

$GMKF = CAP + FEP + ALP + GMP + GFK + GKS + HS + PRO(3)$,

где $GMKF$ — масса продукта.

$GMKF = 1256,20 + 17,58 + 20 + 100,8 + 4,69 + 303,12 + 141,39 +$

$+ 29,3 = 1873,08$.

$H_2OMKF = GMKF \cdot W_3 / (1 - W_3)$,

где $H_2OMKF = 1873,08 \cdot 0,03 / 0,97 = 57,92$.

2. Состав газовой фазы:

$CO_2 : CO_2G = GCO \cdot (X_3 - X_2)$, где $CO_2G = 60 \cdot 0,03 = 1,8$.

$H_2SiF_6 : FKG = 1,26 \cdot GF \cdot (X_3 \cdot F_3 - X_2 \cdot F_2)$,

где $FKG = 1,26 \cdot 20 \cdot (0,93 \cdot 0,8 - 0,9 \cdot 0,6) = 5,04$.

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{OG} &= \text{H}_2\text{O}(2) + (\text{X}_3 - \text{X}_2) \cdot (0,34 \cdot \text{GFEO} + 0,53 \cdot \text{GALO} + \\ &+ 0,45 \cdot \text{GMGO} + 0,316 \cdot \text{GF} - 0,17 \cdot \text{TK}) - \text{H}_2\text{OMKF}, \\ \text{где } \text{H}_2\text{OG} &= 243,89 + 0,03 \cdot (0,34 \cdot 10 + 0,53 \cdot 9 + 0,45 \cdot 20 + 0,316 \cdot 20 - \\ &- 0,174 \cdot 545,75) - 57,92 = 241,75. \end{aligned}$$

Полученные данные заносят в таблицу 1.6.

Таблица 1.6

МКФ на стадии сушки

Компонент входящего продукта	Приход, кг	Компонент выходящего продукта	Расход, кг
1. Подкамерный дозрелый продукт:		1. Высушенный продукт:	
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (CAP)	1215,68	CAP	1256,2
FePO_4 (FEP)	17,01	FEP	17,58
AlPO_4 (ALP)	19,36	ALP	20
$\text{Mg}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (GMP)	97,59	GMP	100,8
H_2SiF_6 (GFK)	9,07	GFK	4,69
H_3PO_4 (GKS)	166,34	GKS	141,39
H_2O (H2O)(2)	243,89	H2OMKF	57,92
Неразложенное сырье (HS)	66,9	HS	29,3
Прочие (PRO)(2)	312,98	PRO(3)	303,12
2. Газовая фаза:		2. Газовая фаза:	
CO_2 (CO2G)	6	CO2G	1,8
H_2SiF_6 (FKG)	11,59	FKG	5,04
H_2O (H2OG)	44,35	H2OG	241,75
Итого	2210,76	Итого	2179,59
Неувязка баланса X (%)		1,4	

1.2.6. Расчет качественных показателей продукта

Содержание P_2O_5 (в долях единицы):

$$\begin{aligned} \text{P}_2\text{O}_5\text{MKF} &= (\text{Q} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 + 0,724 \cdot \text{GKH}) / (\text{GMKF} + \text{H}_2\text{OMKF}). \\ \text{P}_2\text{O}_5\text{MKF} &= (1000 \cdot 0,25 + 0,724 \cdot 914,9) / (1873,08 + 57,92) = 0,472. \end{aligned}$$

Содержание $\text{P}_2\text{O}_{5\text{усв}}$ (в долях единицы):

$$\begin{aligned} \text{P}_2\text{O}_5\text{USV} &= (0,563 \cdot \text{CAP} + 0,47 \cdot \text{FEP} + 0,58 \cdot \text{ALP} + 0,564 \cdot \text{GMP} + \\ &+ 0,724 \cdot \text{GKS}) / (\text{GMKF} + \text{H}_2\text{OMKF}). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{P}_2\text{O}_5\text{USV} &= (0,563 \cdot 1256,2 + 0,47 \cdot 17,577 + 0,582 \cdot 20 + \\ &+ 0,564 \cdot 100,8 + 0,724 \cdot 141,39) / (1873,08 + 57,92) = 0,459. \end{aligned}$$

Содержание $\text{P}_2\text{O}_{5\text{св}}$ (в долях единицы):

$$\begin{aligned} \text{P}_2\text{O}_5\text{SV} &= 0,724 \cdot \text{GKS} / (\text{GMKF} + \text{H}_2\text{OMKF}). \\ \text{P}_2\text{O}_5\text{SV} &= 0,724 \cdot 141,39 / (1873,08 + 57,92) = 0,053. \end{aligned}$$

Содержание фтора (в долях единицы):

$$\begin{aligned} \text{F} &= (\text{GF} \cdot (1 - \text{X}_3) + 0,792 \cdot \text{FK}) / (\text{GMKF} + \text{H}_2\text{OMKF}), \\ \text{F} &= (20 \cdot 0,07 + 0,792 \cdot 4,68) / (1873,08 + 57,92) = 0,0026. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{H}_2\text{O} &= \text{H}_2\text{OMKF} / (\text{GMKF} + \text{H}_2\text{OMKF}) \text{ (в долях единицы)}. \\ \text{H}_2\text{O} &= 57,92 / 1931 = 0,03. \end{aligned}$$

Данные заносят в таблицу 1.7.

Таблица 1.7

Качественные показатели монокальцийфосфата в долях единицы

P_2O_5	$\text{P}_2\text{O}_5\text{USV}$	$\text{P}_2\text{O}_5\text{SV}$	F	H_2O
0,472	0,459	0,051	0,0026	0,03

1.3. Краткие сведения теории для самостоятельного решения задач [2; 3]

В производстве экстракционной фосфорной кислоты степень разложения фосфата серной кислотой характеризуется коэффициентом разложения (%):

$$K_{\text{разл}} = (0,7 \cdot 100 \%) / (C_{\text{CaO}} / C_{\text{SO}_3}), \quad (1.3.1)$$

где 0,7 — отношение молекулярных масс CaO / SO_3 в сульфате кальция; C_{CaO} и C_{SO_3} — концентрации CaO и SO_3 в фосфогипсе.

Фосфогипсом, или фосфорополугидратом называют осадок сульфата кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, содержащий неразложившиеся фосфаты.

Для облегчения расчетов по уравнениям используют следующие понятия. Нормой серной кислоты называют число массовых частей моногидрата H_2SO_4 , приходящихся на 100 массовых частей фосфата. Стехиометрическую норму H_2SO_4 определяют исходя из общего содержания CaO в фосфате:

$$\frac{98}{56} \cdot C_{\text{CaO}} = 1,75 \cdot C_{\text{CaO}} \text{ массовых частей на 100 массовых частей фосфата,} \quad (1.3.2)$$

где 98 и 56 — молекулярные массы H_2SO_4 и CaO; C_{CaO} — содержание CaO на 100 массовых частей фосфата.

Если концентрация серной кислоты $C_{\text{H}_2\text{SO}_4}$, а коэффициент избытка ее (то есть отношение фактического количества к стехиометрическому) составляет α , то масса расходуемой кислоты равна

$$m_K = 1,75 \cdot C_{\text{CaO}} \cdot \alpha / C_{\text{H}_2\text{SO}_4} \quad (1.3.3)$$

Масса образовавшегося в результате реакции сухого фосфогипса ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) или фосфорополугидрата ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) в расчете на единицу массы фосфата оценивается гипсовым числом $g_r = m_r / m_\phi$, где m_r и m_ϕ — массы фосфогипса (фосфорополугидрата) и фосфорита (апатита). В производстве суперфосфата стехиометрической нормой серной кислоты называют число массовых частей серной кислоты (моногидрата), приходящихся на 1 массовую часть P_2O_5 , рассчитанное по уравнению реакции



исходя из предположения, что реакция идет до конца:

$$3,5M(\text{H}_2\text{SO}_4) / 1,5M(\text{P}_2\text{O}_5) = 343 / 213 = 1,61. \quad (1.3.5)$$

Выход суперфосфата на 1 т сырья определяют по формуле:

$$m_c = C_\phi \cdot 1000 / C_c \quad (1.3.6)$$

где C_ϕ и C_c — содержание P_2O_5 соответственно в исходном фосфате и в полученном суперфосфате (%).

Процентное отношение содержания усвояемого P_2O_5 к общему содержанию в продукте называют коэффициентом разложения сырья:

$$K = C_{\text{усв}} \text{P}_2\text{O}_5 \cdot 100\% / C_{\text{общ}} \text{P}_2\text{O}_5. \quad (1.3.7)$$

Пример 1. Определите коэффициент избытка α серной кислоты при получении простого суперфосфата, если норма серной кислоты (моногидрата) 68 массовых частей на 100 массовых частей апатитового концентрата с содержанием P_2O_5 39,4 %.

Решение. Стехиометрическую норму серной кислоты определяем, используя коэффициент 1,61 (формула 1.3.5). На одну массовую часть P_2O_5 необходимо 1,61 массовой части серной кислоты, следовательно, на 39,4 массовой части P_2O_5 в 100 кг апатитового концентрата нужно

$$1,61 \cdot 39,4 = 63,4 \text{ кг.}$$

Отсюда коэффициент избытка равен

$$\alpha = 68 / 63,4 = 1,07.$$

Стехиометрическую норму фосфорной кислоты x (в кг на 100 кг фосфата) рассчитывают по реакциям разложения компонентов сырья в соответствии с его минералогическим составом или по формуле

$$x = \frac{a/28 + 2b/145 + c/20 + d/71}{e} \cdot 100, \quad (1.3.8)$$

где a, b, c, d и e — процентное содержание CaO, Me_2O_3 , MgO, P_2O_5 в разлагаемом фосфате и концентрация первого иона H^+ в фосфорной кислоте; 28, 20, 71 — молекулярные массы CaO, MgO, P_2O_5 ; 145 — условная средневзвешенная молекулярная масса полуторных окислов.

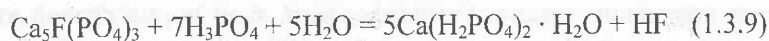
Пример 2. Определить массу расходуемой фосфорной кислоты, необходимую для разложения 100 кг фосфата, содержащего 26 % P_2O_5 , 41,8 % CaO, 5,08 % Me_2O_3 . Концентрация в кислоте первого иона водорода, определенная титрованием с диметилгельбом, равна 0,712 %.

Решение. По формуле (1.3.8) находим

$$x = \frac{100 \left[\frac{41,8}{28} + \frac{2 \cdot 5,08}{145} + \frac{26}{71} \right]}{0,712} = \frac{100(1,4929 + 0,0707 + 0,3662)}{0,712} = 168,07 \approx 168,1 \text{ кг.}$$

Пример 3. На 1000 кг двойного суперфосфата расходуется 366,7 кг фосфорной кислоты (в расчете на P_2O_5) и 349,1 кг апатитового концентрата. Определить избыток кислоты на 100 кг апатитового концентрата по сравнению со стехиометрическим ее количеством.

Решение. Согласно уравнению реакции



теоретическая масса расходуемой фосфорной кислоты на 100 кг апатита составляет

$$\frac{7 \cdot 142 \cdot 100}{2 \cdot 504} = 98,6 \text{ кг } \text{P}_2\text{O}_5,$$

где 142 и 504 — молекулярные массы P_2O_5 и $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$.

Фактическая масса расходуемой кислоты на 100 кг апатитового концентрата равна $(100 \cdot 366,7) / 349,1 = 105,04 \text{ кг } \text{P}_2\text{O}_5$.

Следовательно, применяемый избыток кислоты составляет

$$\frac{105,04 - 98,6}{98,6} \cdot 100 = 6,5\%.$$

Пример 4. На разложение 1000 кг апатитового концентрата, содержащего 39,8 % P_2O_5 , расходуется 1950 кг 54%-ной фосфорной кислоты (в пересчете на P_2O_5). Определите, сколько извести добавляют для полной нейтрализации избытка фосфорной кислоты и какова концентрация $\text{P}_2\text{O}_{5\text{общ}}$ и $\text{P}_2\text{O}_{5\text{усв}}$ в готовом продукте. Степень разложения апатитового концентрата — 80 %. Содержание CaCO_3 в известняке — 95 %. Степень использования его — 90 %. Фосфор в апатите находится в виде соли $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$.

Решение. Процентное содержание $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$ в апатите составляет

$$2 \cdot 504 \cdot 39,8 / 3 \cdot 142 = 94,2\%.$$

Масса $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$, вступившего во взаимодействие с фосфорной кислотой, с учетом степени разложения равна

$$1000 \cdot 0,942 \cdot 0,8 = 753,6 \text{ кг.}$$

Масса P_2O_5 в фосфорной кислоте равна

$$1950 \cdot 0,54 = 1053 \text{ кг.}$$

Рассчитаем, сколько фосфорной кислоты пошло на разложение 753,6 кг фторапатита в соответствии с уравнением реакции (1.3.9):

$$753,6 \cdot 7 \cdot 142 / 2 \cdot 504 = 743,13 \text{ кг.}$$

При этом получается следующее количество двойного суперфосфата:

$$753,6 \cdot 5 \cdot 252 / 504 = 1134 \text{ кг,}$$

где 252 — молекулярная масса $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Избыток фосфорной кислоты (в пересчете на P_2O_5) равен

$$1053 - 743,13 = 309,9 \text{ кг.}$$

Масса известняка, необходимая для его нейтрализации, согласно уравнению реакции равна

$$309,9 \cdot 100 / 142 = 218,2 \text{ кг,}$$

где 100 — молекулярная масса CaCO_3 .

По этой реакции образуется $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$:

$$309,9 \cdot 252 / 142 = 549,96 \text{ кг.}$$

Всего двойного суперфосфата вместе с неразложившейся частью апатита:

$$1134 + 549,96 + (1000 - 753,6) = 1930,36 \text{ кг.}$$

Определяем массу $\text{P}_2\text{O}_{5\text{усв}}$ в 1683,96 кг двойного суперфосфата:

$$1683,96 \cdot 142 / 252 = 948,9 \text{ кг,}$$

а также процентное содержание его в готовом продукте:

$$948,9 \cdot 100 / 1683,96 = 49,2\%.$$

Определяем массу P_2O_5 в неразложившемся апатите:

$$(1000 - 753,6) \cdot 0,398 = 98,07 \text{ кг,}$$

а также массу $\text{P}_2\text{O}_{5\text{общ}}$:

$$948,9 + 98,07 = 1046,97 \text{ кг.}$$

Процентное содержание $\text{P}_2\text{O}_{5\text{общ}}$ в готовом продукте составит

$$1046,97 \cdot 100 / 1930,36 = 54,2\%.$$

1.4. Задачи и ответы для самостоятельного решения [3]

1. Определите процентное содержание P_5O_5 во флотационном фосфорите, перерабатываемом в простой суперфосфат. Процесс протекает в стандартной суперфосфатной камере диаметром 7,1 м, высотой 2,5 м и интенсивностью 600 кг/м^3 в 1 ч суперфосфата, содержащего 15 % P_2O_5 . В сутки перерабатывается 7130 т фосфорита. Ответ: 30 % P_2O_5 .

2. Определите теоретический расход серной кислоты в расчете на моногидрат для разложения 5000 кг апатитового концентрата, содержащего 50,5 % CaO. Ответ: 4419 кг.

3. Определите массу расходуемой башенной (75%-ной) серной кислоты для обработки 1 т апатитового концентрата, содержащего 52,3 % CaO, если норма серной кислоты составляет 98,9 % от стехиометрической массы. Ответ: 1206,9 кг.

4. При разложении фосфорита, содержащего 25 % P_2O_5 , образовалось 3850 кг фосфогипса. Считая, что разложение фосфорита произошло полностью, определите, сколько 35%-ной H_3PO_4 в пересчете на P_2O_5 получено при этом. Гипсовое число $g_r = 1,6$. Ответ: 372 кг.

5. Серной кислотой обработали 12 тыс. кг фосфорита. Анализ показал, что в полученном фосфогипсе содержание CaO 43,5 %, SO_3 — 56,5 %. Определите массу неразложившегося фосфата $Ca_3(PO_4)_2$. Ответ: 1092 кг.

6. Рассчитайте, сколько теоретически необходимо серной кислоты (73%-ной) и воды для обработки 100 кг апатитового концентрата, содержащего 72 % $Ca_3(PO_4)_2$, с целью получения: а) экстракционной фосфорной кислоты полугидратным методом, т.е. с образованием $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$; б) простого суперфосфата. Ответ: а) 91 и 6,27 кг; б) 60,7 и 4,18 кг соответственно.

7. Из апатитового концентрата, содержащего 37 % P_2O_5 , получают экстракционную фосфорную кислоту дигидратным способом. Полученная 30%-ная H_3PO_4 в пересчете на P_2O_5 после выпаривания содержит 43,5 % P_2O_5 . Сколько упаренной кислоты можно получить из 1000 кг апатитового концентрата? Сколько воды удаляется при выпаривании? Ответ: 849,4 и 382,2 кг соответственно.

8. Обрабатывают 1500 кг апатитового концентрата (CaO — 52 %, P_2O_5 — 39,4 %) башенной 75%-ной серной кислотой. Сколько воды нужно добавить для получения 35%-ной по содержанию P_2O_5 фосфорной кислоты (процесс полугидратный)? Норма серной кислоты — 105 % от стехиометрической. Ответ: 746,25 кг.

9. Серной кислотой обработали 1000 кг апатитового концентрата (39,4 % P_2O_5). Коэффициент извлечения P_2O_5 при экстракции — 98 %, потери P_2O_5 при фильтрации — 20 %. Гипсовое число — 1,6. В результате разбавления при экстракции и отмывке отношение жидкой фазы к твердой составляет 3 : 1. Концентрация образующейся при этом фосфорной кислоты 32 %. Каков массовый выход пульпы и продукционной кислоты? Ответ: 6400 и 1196 кг соответственно.

10. Составьте материальный баланс производства 500 кг экстракционной фосфорной кислоты 35%-ной концентрации в пересчете на P_2O_5 по следующим данным: апатитовый концентрат содержит 51,3 % CaO, 39,1 % P_2O_5 . Концентрация серной кислоты — 78 %. Норма серной кислоты — 98,8 % от стехиометрической по содержанию CaO. Отношение жидкой фазы к твердой в пульпе составляет 2,5 : 1. Потери P_2O_5 при экстракции и отмывке 4 %. Выделение газообразной фазы за счет фтора в виде SiF_4 — 8,21 кг. Ответ: приход — 466,22 кг апатитового концентрата, 511,10 кг серной кислоты и 1551,2 кг воды; расход — 500 кг фосфорной кислоты и 746,6 кг фосфогипса; потери — 8,21 кг.

11. Сколько фосфорита 92%-ной концентрации $Ca_3(PO_4)_2$ нужно разложить в электротермической печи для получения 1000 кг 73%-ной H_3PO_4 ? Сколько энергии для этого необходимо?

$Ca_3(PO_4)_2 + 5C + 2SiO_2 = P_2 + 5CO + Ca_3Si_2O_7$; $\Delta H = 1460$ кДж/моль.

Ответ: 1154,59 кг; $5438 \cdot 10^3$ кДж.

12. Определите теоретический расход воздуха, необходимый для сжигания 500 кг жидкого фосфора (P), содержащего 0,98 % примесей. Коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,2$. Содержание влаги — 10 %. Ответ: 2580,6 м³.

13. Сколько воды расходуется в час для образования и разбавления фосфорной кислоты в башне сжигания, если масса сжигаемого фосфора равна 2350 кг/ч, в башне улавливается 53,2 % от общей массы образующегося P_2O_5 , а концентрация полученной кислоты — 73 % H_3PO_4 . Ответ: 2406,33 кг/ч.

14. Рассчитайте расходные коэффициенты сырья — апатитового концентрата, содержащего 86 % $Ca_3(PO_4)_2$, серной кислоты (моногидрата) и воды для получения 1 т простого суперфосфата. Ответ: 0,78; 0,43 и 0,039 т соответственно.

15. Рассчитайте норму серной кислоты (моногидрата и 68%-ной кислоты) на разложение 100 массовых частей апатитового концентрата, содержащего 39,6 % P_2O_5 . Коэффициент избытка $\alpha = 1,3$. Ответ: 82,88 и 121,88 кг соответственно.

16. Рассчитайте массу расходуемой серной кислоты и воды на разложение 350 кг апатитового концентрата. Норма серной кислоты (моногидрата) — 68 массовых частей на 100 массовых частей апатита. Концентрация кислоты — 75%-ная. Разложение ведут 69%-ной кислотой. Ответ: 317,3 и 32,7 кг соответственно.

17. При обработке 100 кг апатитового концентрата, содержащего 39,6 % P_2O_5 , серной кислотой получен камерный суперфосфат с 20,5 %

$P_2O_{5\text{общ}}$. После вызревания суперфосфата на складе содержание $P_2O_{5\text{общ}}$ составило 20,63 %. Определите, сколько суперфосфата получено. Сколько воды выделилось при его вызревании? Ответ: 191,09 и 2,8 кг соответственно.

18. Составьте материальный баланс производства простого суперфосфата из 1000 кг апатитового концентрата по следующим данным: содержание P_2O_5 в апатитовом концентрате равно 41,2 %, концентрация серной кислоты — 78%-ная. Норма моногидрата — 79 массовых частей на 100 массовых частей апатита. Разложение ведут 68%-ной кислотой. Камерный суперфосфат содержит 20,4 % $P_2O_{5\text{общ}}$, суперфосфат, вызревший на складе, — 20,65 % $P_2O_{5\text{общ}}$. Ответ: приход — 1000 кг апатитового концентрата и 1012,8 кг воды; расход — 1995,16 кг суперфосфата и 14,6 кг воды.

19. Определите коэффициент разложения сырья в процентах и выход на 1 т сырья камерного суперфосфата по следующим данным: в сырье содержится 39,4 % P_2O_5 ; в суперфосфате — 20,15 % $P_2O_{5\text{общ}}$ и 17,6 % $P_2O_{5\text{своб}}$. Ответ: 87,3 %; 1955,33 кг.

20. Определите теоретические расходные коэффициенты обогащенного фосфорита, содержащего 30 и 70 % H_3PO_4 , на производство 1 т двойного суперфосфата. Ответ: 563,5 и 563,5 кг соответственно.

21. Определите массу расходуемой фосфорной кислоты для разложения фосфата, содержащего 26 % P_2O_5 . Фосфор в сырье содержится в виде $Ca_5F(PO_4)_3$. Ответ: 837 кг.

22. Для получения 1000 кг двойного суперфосфата расходуется 370,7 кг фосфорной кислоты (в расчете на P_2O_5) и 350 кг апатитового концентрата. Определите избыток кислоты на 1000 кг апатитового концентрата по сравнению со стехиометрической массой. Ответ: 7,4 %.

23. Определите, сколько известняка необходимо для нейтрализации $P_2O_{5\text{своб}}$ в 100 кг суперфосфата, если концентрация оксида P_2O_5 составляет 26,15 %. В результате нейтрализации содержание $P_2O_{5\text{своб}}$ понижается до 2,92 %. Содержание $CaCO_3$ в известняке — 95 %, степень использования его — 75 %. Сколько углекислого газа выделится при этом? Ответ: 24,65 и 7,2 кг соответственно.

24. Стехиометрической нормой фосфорной кислоты обрабатывают 192 кг апатитового концентрата, содержащего 61 % гидроксилapatита $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH)_2$. Определите концентрацию в процентах $P_2O_{5\text{общ}}$ и $P_2O_{5\text{своб}}$ в полученном суперфосфате. Степень разложения сырья — 85 %. Ответ: 54 и 51,2 % соответственно.

25. Стехиометрической нормой фосфорной кислоты обрабатывают 250 кг апатитового концентрата, содержащего фосфор в виде

$Ca_5F(PO_4)_3$ (концентрация P_2O_5 39,2 %). При этом получается суперфосфат следующего состава: $P_2O_{5\text{общ}}$ — 50 %, $P_2O_{5\text{своб}}$ — 46,2 %, а $P_2O_{5\text{своб}}$ — практически нет. Определите степень разложения апатитового концентрата. Ответ: 85,71 %.

26. Фосфорной кислотой, норма которой составляет 120 % от стехиометрической разлагают 350 кг апатитового концентрата, содержащего 85 % $Ca_5F(PO_4)_3$. Степень разложения 100 %. Определите процентное содержание свободного P_2O_5 . Ответ: 3,6 %.

1.5. Список рекомендуемой литературы

1. Корс Л. Г., Болтнев Ю. Ф., Корс Н. В. Применение методов математического моделирования в химии и химической технологии: учеб.-практ. пособ. Калининград: Изд-во РГУ им. И. Канта, 2006 (в учебной библиотеке).
2. Сборник задач по химич. технологии: учеб. пособ. для студентов хим. и хим.-биол. специальностей пед. ин-тов / И. И. Беляева [и др.] М.: Просвещение, 1982 (в личной библиотеке).
3. Расчеты по технологии неорганических веществ / под ред. М. Е. Позина. Л.: Химия, 1977 (в личной библиотеке).
4. Основы химической технологии / под ред. И. П. Мухленова. М.: Высш. шк., 1991 (в учебной библиотеке).
5. Соколов Р. С. Химическая технология. М.: ВЛАДОС, 2003. Т. 1 (в учебной библиотеке).
6. Химическая энциклопедия: в 5 т. / под ред. И. Л. Кнунянца. М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т. 2. С. 937—938, 869—870 (в читальном зале).
7. Позин М. Е. Технология минеральных удобрений. Л.: Химия, 1989 (в личной библиотеке).

2. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ

2.1. Методические рекомендации по составлению материальных и тепловых балансов

Материальный и тепловой (энергетический) балансы составляют для анализа работы существующего аппарата с целью установления необходимых размеров аппаратуры, ее производительности и мощности, рациональных технологических схем химического производства, для улучшения работы существующих и проектирования новых предприятий.

Под технологическими балансами понимают результаты расчетов, выраженные в виде уравнений, таблиц, отражающих количество введенных и полученных в производственном процессе материалов и энергии (их приход и расход) [1]. Расчеты балансов основываются на технико-экономических показателях (ТЭП) — файл ТЭП. doc* (все файлы со звездочкой после расширения находятся в ПК в файле C:\химтехнология\база_данных\).

К технологическим показателям относятся расходные коэффициенты, выход продукта, производительность и интенсивность аппарата. К экономическим — удельные капитальные затраты, себестоимость и производительность труда. Балансы отражают условия эксплуатации и степень совершенства соответствующих химических процессов. Материальный баланс рассчитывается или только по уравнению основной суммарной реакции (упрощенный), или с учетом всех параллельных, побочных реакций и продуктов (полный).

В основе составления материальных и энергетических балансов лежат законы сохранения массы и энергии. Уравнение материального баланса означает, что масса веществ, поступивших на технологическую операцию (приход), равна массе полученных веществ (расходу): $\sum m_{\text{прих}} = \sum m_{\text{расх}}$.

Тепловой (энергетический) баланс технологического процесса или части его составляют на основе закона сохранения энергии, в соответ-

ствии с которым в замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна, т. е. приход теплоты должен быть равен расходу его в данном процессе, аппарате, операции. Уравнение теплового баланса: $\sum Q_{\text{прих}} = \sum Q_{\text{расх}}$.

При составлении технологических балансов пользуются стехиометрическими и термохимическими расчетами. Материальные и энергетические балансы имеют большое значение для анализа и оценки правильности и целесообразности осуществления производственных процессов в химической промышленности. На основе материальных балансов определяют оптимальные значения параметров технологического режима — совокупность факторов (температура, давление, концентрация реагентов), обеспечивающих устойчивое и максимально эффективное проведение процессов. С их помощью устанавливают удельные значения выходов продукции, расходов и потерь сырья, топлива и других материалов, определяют коэффициент полезного действия энергии. Сначала составляют материальный, а затем на его основе энергетический баланс. Данные теплового баланса используют для определения расходов теплоносителей и хладагентов, расчета поверхностей греющих и охлаждающих элементов и подбора оптимального теплового режима процессов. Аналитические данные применяют для стехиометрических расчетов, которые ложатся в основу материальных балансов, а термохимические и теплофизические константы (теплоты образования и разложения, плавления, растворения, возгонки, теплоемкости) — для составления энергетических балансов. Уравнения материального баланса могут быть отнесены к единице сырья, продукции или к аппарату, к отдельной операции и даже к ее стадии в единице времени.

Для составления материальных балансов необходимо знать химический состав, некоторые физические и физико-химические свойства исходного сырья и конечных продуктов производства. После проведения стехиометрических расчетов составляют таблицу материального баланса. Чаще всего расчеты относят к 1000 или 100 кг продукта или сырья. Тепловые балансы чаще всего рассчитывают в кДж. Статьи таблиц материального и энергетического баланса следует выражать не только в весовых, объемных или тепловых единицах, но и в процентах к общему приходу и расходу, что позволяет наглядней отображать степень использования массы и энергии по отношению к максимально достижимому или к теоретически возможному и облегчает восприятие цифрового материала. Если между величинами введенных и полученных веществ есть разница, то это указывает либо на ошибочность учета, анализа или вычислений, либо на неучтенные потери. В энергетическом балансе соответствующая разница в большинстве случаев отражает потери тепла.

2.2. Постановка задачи получения аммофоса в БГС и РКСГ

Ведущее место среди комплексных минеральных удобрений занимает аммофос, который является универсальным удобрением, используемым как для внесения в почву, так и для приготовления минеральных удобрений смешанного типа (рис. 2.1).

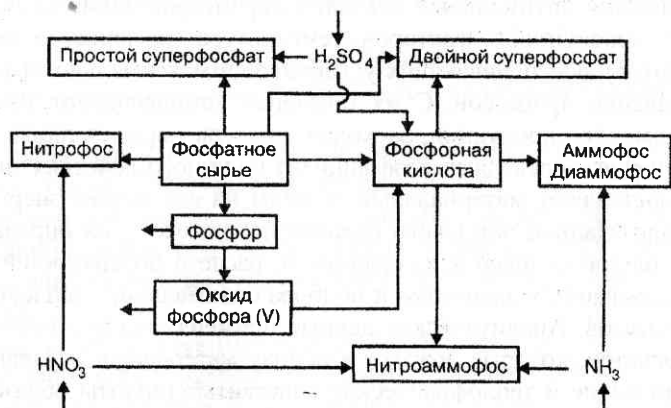


Рис. 2.1. Взаимосвязь фосфорных и важнейших комплексных удобрений на основе фосфора

В производстве аммофоса, используемого в качестве комплексного удобрения, применяют следующие варианты технологических схем (рис. 2.2, 2.3):

1. Схемы, основанные на нейтрализации слабой (20—30 % P_2O_5) экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) с последующей упаркой аммофосной суспензии, с грануляцией и сушкой продуктов в БГС (барабанный гранулятор-сушилка).

2. Схемы, основанные на нейтрализации слабой (20—30 % P_2O_5) ЭФК с последующим обезвоживанием суспензии в распылительных сушилках и РКСГ (распылительная кипящая сушилка-гранулятор).

3. Схемы, основанные на нейтрализации концентрированной (48—54 % P_2O_5) упаренной ЭФК. В этом случае нейтрализацию ведут в две ступени: сначала при атмосферном давлении в реакторах, затем в барабанных аммонизаторах-грануляторах (АГ); либо первую ступень

нейтрализации ведут при повышенном давлении с последующей сушкой аммофосной суспензии в башнях или в БГС.

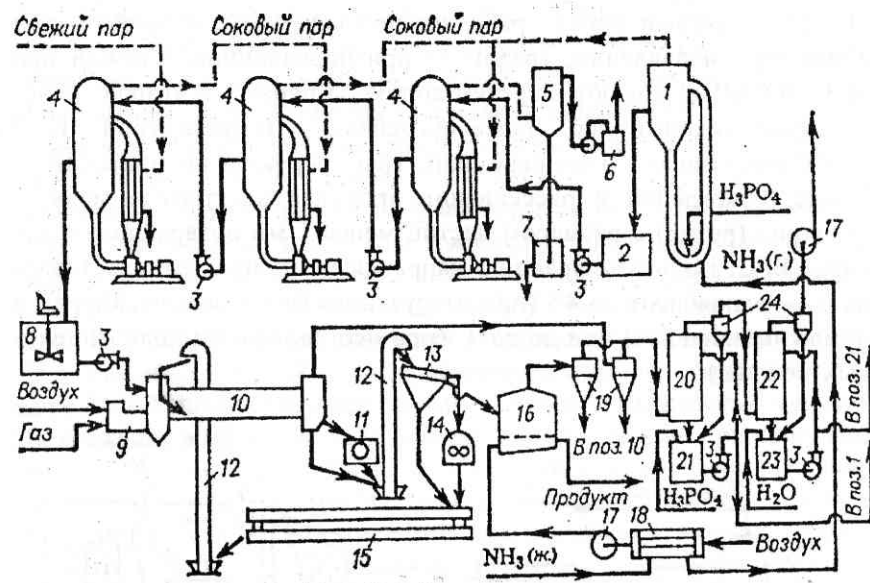


Рис. 2.2. Схема производства аммофоса с упаркой аммофосной суспензии и грануляцией в аппарате БГС:
1 — аппарат САИ; 2 — сборник; 3 — центробежные насосы;
4 — выпарные аппараты; 5 — барометрический конденсатор;
6 — вакуум-насос; 7 — барометрический бак; 8 — сборник упаренной суспензии; 9 — топка; 10 — аппарат БГС; 11 — молотковая дробилка;
12 — элеватор; 13 — грохот; 14 — валковая дробилка; 15 — вибротранспортер;
16 — холодильник КС; 17 — вентилятор; 18 — испаритель жидкого аммиака (охладитель воздуха); 19 — циклоны; 20 — кислотный промыватель газа;
21 и 23 — циркуляционные сборники; 22 — промыватель газа;
24 — брызгоуловители

Большое распространение в РФ получили схемы с промежуточной упаркой аммофосной суспензии (рис. 2.2). Фосфорную кислоту (20—29 % P_2O_5) нейтрализуют газообразным аммиаком до pH 5—5,5 в аппаратах САИ (скоростной аммонизатор-испаритель) в течение 2—3 минут. Выделяющиеся при этом пары воды отводят в

теплообменник, где они конденсируются, нагревая исходную кислоту. Аммофосную суспензию ($\text{NH}_3 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 1,1$) концентрируют в трехкорпусной выпарной установке до остаточной влажности 18—25 %; первый корпус работает под вакуумом, второй — при атмосферном давлении, третий — при повышенном. Свежий пар (0,3—0,6 МПа) подают в третий корпус, а первый и второй — используют соковый пар. Далее суспензию с температурой 112—115 °С высушивают и одновременно гранулируют в аппаратах БГС. После охлаждения и рассеивания продукта на грохоте мелкую фракцию (ретур) с размером частиц менее 1 мм возвращают в аппарат БГС. Крупную фракцию направляют на дробление, а товарную — охлаждают до 45 (при отгрузке насыпью, в контейнерах и бумажных мешках) или до 55 °С (при использовании полиэтиленовых мешков).

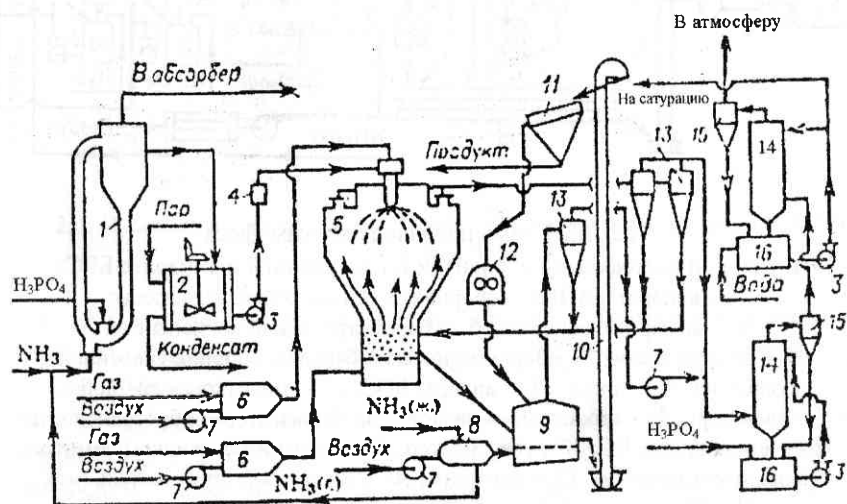


Рис. 2.3. Схема производства аммофоса с получением гранул в аппарате РКСГ:

- 1 — аппарат САИ; 2 — сборник аммофосной суспензии;
3 — центробежные насосы; 4 — дозатор; 5 — аппарат РКСГ;
6 — камеры сжигания газа; 7 — вентиляторы; 8 — аммиачный холодильник для воздуха; 9 — охладитель КС; 10 — элеватор; 11 — грохот; 12 — дробилка;
13 — циклоны; 14 — абсорберы; 15 — разбрызгиватели; 16 — сборники

Технологическая схема производства аммофоса (рис. 2.3) с использованием аппарата РКСГ позволяет соединить в одном аппарате операции упаривания пульпы, грануляции и сушки продукта, что обеспечивает высокую интенсивность всех стадий процесса при малых затратах тепла и электроэнергии. Чтобы суспензия, получаемая при нейтрализации, не была густой (это затрудняет ее транспортировку и поглощение аммиака), используют слабую 20—30%-ную P_2O_5 ЭФК или нейтрализуют концентрированную кислоту (48—54%-ную P_2O_5) в несколько стадий.

Аммофосную суспензию, полученную в аппарате САИ, распыляют в потоке топочного газа при температуре 600—700 °С в верхней части аппарата РКСГ, работающей как распылительная сушилка. Влажные частицы (15 % воды) опускаются в нижнюю часть аппарата на кипящий слой гранул, где сушка завершается в отдельном потоке греющего газа (170—200 °С), обеспечивающем температуру гранул не выше 100 °С. Затем гранулированный материал с влажностью меньше 1 % проходит воздушный холодильник, работающий по принципу кипящего слоя (КС), и направляется на рассев. Уходящие из сушилок газы поступают в циклоны для улавливания уносимой ими пыли и промываются фосфорной кислотой для извлечения аммиака, перешедшего в газовую фазу вследствие некоторой диссоциации фосфатов аммония при повышенной температуре. Затем эту фосфорную кислоту направляют на аммонизацию.

Цель работы: приобретение навыков моделирования технологических режимов различных схем получения аммофоса (по аппаратурному оформлению, по источникам сырья) с последующим использованием результатов моделирования (таблицы материального баланса) для анализа и выбора оптимального технологического процесса по качественным или технико-экономическим (по литературным данным) показателям продукта.

Задание.

1. Используя программы RP4.BAS или RP5.BAS, рассчитать и представить в виде таблиц материальный баланс производства аммофоса на основе экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) с предварительным упариванием пульпы и сушкой продукта в аппарате БГС или без предварительного упаривания пульпы и сушкой продукта в аппарате РКСГ.

2. Используя расчетные и литературные данные, сопоставить принципы действия вариантов технологических схем получения ам-

мофоса, отличающихся составом исходного сырья, показателями технологического режима и качественными показателями продукта, а также обосновать выбор схемы с более высокими ТЭП.

3. По номеру студента в списке группы выбрать из таблицы приложения свой вариант задач, их решение представить в отчете вместе с заданиями.

4. Устно или письменно (по указанию преподавателя) ответить на контрольные вопросы.

Порядок выполнения работы.

1. После получения задания для самостоятельного решения уточните у преподавателя рабочую программу и объем необходимых расчетов материальных балансов получения аммофоса. Изучите принцип действия различных технологических схем получения аммофоса (БГС и РКСГ), исходя из состава исходного сырья, показателей технологического режима, и обоснуйте выбор более рациональной схемы. Проанализированные расчеты балансов сведите в таблицу и выберите лучшие результаты.

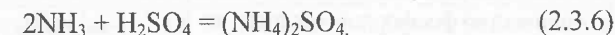
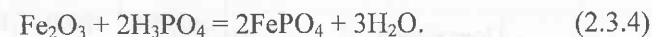
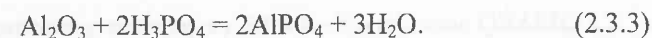
2. Набор исходных данных произведите с дисплея в компьютерном классе по программам RP4.BAS или RP5.BAS в системе QBASIC.

3. В отчете приведите характеристику аммофоса и сырья, параметры технологического режима, технологические схемы производства, исходные данные для расчетов, таблицы результатов расчетов материального баланса аммофоса и качественных показателей продукта, список использованной литературы.

4. Если по качественным показателям полученный продукт не соответствует требованиям ГОСТа, то необходимо пересмотреть показатели технологического режима, выбрать по литературным и практическим данным улучшенный вариант, позволяющий получить продукт, удовлетворяющий стандарту.

2.3. Расчет материальных балансов получения аммофоса в БГС и РКСГ по уравнениям реакций

Аммофос получают путем нейтрализации экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) аммиаком по следующим реакциям:



Программа технологических расчетов получения аммофоса для схемы в аппарате БГС RP4.BAS состоит из следующих разделов:

- Расчет состава исходных компонентов в ЭФК.
- Расчет состава продуктов на стадии нейтрализации.
- Расчет состава продуктов на стадии выпарки.
- Расчет состава продуктов на стадии сушки.
- Расчет качественных показателей и расходных коэффициентов процесса получения аммофоса.

Таблица 2.1

Исходные данные к программе RP4.BAS в системе QBASIC

Показатель	Иден- tifica- тор ве- личин	Кон- троль- ный пример	Вариант исходных данных		
			1	2	3
1. Концентрация исходных веществ в фосфорной кислоте, %:					
P ₂ O ₅	P2O5	24,5	25	28	26
SO ₃	SO3	2,2	3,75	2,3	2,8
MgO	GM	1,85	3,6	0,6	1,5
CaO	CAO	0,12	0,2	0,3	0,1
Al ₂ O ₃	AL2O3	1,1	1,3	0,8	1,25
Fe ₂ O ₃	FE2O3	1,25	1,3	1,2	1,35
F	F	1,85	1,86	1,6	1,7

Показатель	Идентификатор величин	Контрольный пример	Вариант исходных данных		
			1	2	3
2. Количество фосфорной кислоты, кг	G	1000	1000	1000	1000
3. Потери NH_3 на стадии нейтрализации, %	X	1,1	1,2	1,1	1
4. Выход продукта, доли единицы	B	0,98	0,97	0,98	0,98
5. Степень использования фосфорной кислоты, доли единицы	C	0,98	0,97	0,98	0,98
6. Концентрация свободной воды в пульпе, %:					
после третьего корпуса выпарки	CWSV3	42	40	42	40
после второго корпуса выпарки	CWSV2	35	32	35	34
после первого корпуса выпарки	CWSV1	30	30	30	28
после доупаривания	CWSV0	25	20	25	22
7. Потери фтора на стадии выпарки, %	Y	0,6	0,7	0,6	0,7
8. Потери NH_3 на стадии выпарки, %	Z	0,9	0,9	0,9	0,9
9. Потери фтора на стадии сушки, %	YS	2,1	2,2	2,1	2,6
10. Потери NH_3 на стадии сушки, %	ZS	3,9	3,9	3,9	3,8

Программа технологических расчетов получения аммофоса для схемы в аппарате РКСТ RP5.BAS состоит из следующих разделов:

- Расчет состава исходных компонентов в ЭФК.
- Расчет состава продуктов на стадии нейтрализации.
- Расчет состава продуктов на стадии сушки.
- Расчет качественных показателей и расходных коэффициентов процесса получения аммофоса.

Исходные данные к программе RP5.BAS в системе QBASIC

Показатель	Идентификатор величин	Вариант исходных данных			Контрольный пример
		1	2	3	
1. Концентрация исходных веществ в ЭФК, %:					
P_2O_5	P2O5	25	28	26	24,5
SO_3	SO3	3,75	2,3	2,8	2,2
MgO	GM	3,6	0,6	1,5	1,85
CaO	CAO	0,2	0,3	0,1	0,12
Al_2O_3	AL2O3	1,3	0,8	1,25	1,10
Fe_2O_3	FE2O3	1,3	1,2	1,35	1,25
F	F	1,86	1,6	1,7	1,85
2. Количество ЭФК, кг	G	1000	1000	1000	1000
3. Потери NH_3 на стадии нейтрализации, %	X	1,2	1	1	1,1
4. Выход продукта, доли единицы	B	0,97	0,98	0,98	0,98
5. Степень использования ЭФК, доли единицы	C	0,97	0,98	0,98	0,98
6. Потери фтора на стадии сушки, %	Y	2,2	2,5	2,6	2,2
7. Потери NH_3 на стадии сушки, %	Z	3,9	4,5	3,8	5,1

Таблица 2.3

Количественный состав ЭФК для схем получения аммофоса в аппаратах БГС и РКСТ (RP4.BAS и RP5.BAS)

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, кг
P_2O_5	24,5	H_3PO_4	338,17
SO_3	2,2	H_2SO_4	26,95
MgO	1,85	MgO	18,5

Окончание табл. 2.3

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, кг
CaO	0,12	CaO	1,2
Al ₂ O ₃	1,1	Al ₂ O ₃	11
Fe ₂ O ₃	1,25	Fe ₂ O ₃	12,5
F	1,85	H ₂ SiF ₆	23,37
		H ₂ O	568,31
<i>Итого</i>	32,87	<i>Итого</i>	1000

Таблица 2.4

**Количество сухих солей
для схем получения аммофоса в аппаратах БГС и РКСТ
(RP4.BAS и RP5.BAS)**

Соль	Количество в аммофосной пульпе, кг
MgHPO ₄ · 2H ₂ O	80,48
CaHPO ₄ · 2H ₂ O	3,69
AlPO ₄	34,08
FePO ₄	29,22
(NH ₄) ₂ SO ₄	36,3
(NH ₄) ₂ SiF ₆	28,89
NH ₄ H ₂ PO ₄	268,57
(NH ₄) ₂ HPO ₄	34,25
<i>Итого</i>	515,46

Таблица 2.5

**Материальный баланс процесса нейтрализации ЭФК
для схем получения аммофоса в аппарате БГС (RP4.BAS), кг**

Компонент исходного сырья	Количество	Компонент нейтрализованного продукта	Количество
ЭФК	1000	Аммофосная пульпа	1006,79
В том числе:		В том числе:	
H ₃ PO ₄	338,17	MgHPO ₄ · 2H ₂ O	80,48

Окончание табл. 2.5

Компонент исходного сырья	Количество	Компонент нейтрализованного продукта	Количество
H ₂ SO ₄	26,95	CaHPO ₄ · 2H ₂ O	3,69
MgO	18,5	AlPO ₄	34,08
CaO	1,2	FePO ₄	29,22
Al ₂ O ₃	11	(NH ₄) ₂ SO ₄	36,3
Fe ₂ O ₃	12,5	(NH ₄) ₂ SiF ₆	28,89
H ₂ SiF ₆	23,37	NH ₄ H ₂ PO ₄	268,57
H ₂ O	568,31	(NH ₄) ₂ HPO ₄	34,25
		H ₂ O	491,33
NH ₃	64,35	Газовая фаза	57,55
В том числе:		В том числе:	
NH ₃	64,09	NH ₃	0,7
H ₂ O	0,26	H ₂ O	56,8
<i>Итого</i>	1064,35	<i>Итого</i>	1064,35

Таблица 2.6

**Материальный баланс процесса нейтрализации ЭФК
для схем получения аммофоса в аппарате РКСТ (RP5.BAS), кг**

Компонент исходного сырья	Количество	Компонент полученного продукта	Количество
ЭФК	1000	Аммофосная пульпа	1006,79
В том числе:		В том числе сухие соли:	515,46
H ₃ PO ₄	338,17	MgHPO ₄ · 2H ₂ O	80,48
H ₂ SO ₄	26,95	CaHPO ₄ · 2H ₂ O	3,69
MgO	18,5	AlPO ₄	34,08
CaO	1,2	FePO ₄	29,22
Al ₂ O ₃	11	(NH ₄) ₂ SO ₄	36,3
Fe ₂ O ₃	12,5	(NH ₄) ₂ SiF ₆	28,89
H ₂ SiF ₆	23,37	NH ₄ H ₂ PO ₄	268,57
H ₂ O	568,31	(NH ₄) ₂ HPO ₄	34,25
		H ₂ O	491,33

Окончание табл. 2.6

Компонент исходного сырья	Количество	Компонент полученного продукта	Количество
NH ₃	64,35	Газовая фаза	57,55
В том числе:		В том числе:	
NH ₃	64,09	NH ₃	0,7
H ₂ O	0,26	H ₂ O	56,86
<i>Итого</i>	1064,35	<i>Итого</i>	1064,35

Таблица 2.7

**Материальный баланс выпарки аммофосной пульпы
для схем получения аммофоса в аппарате БГС (RP4.BAS), кг**

Приход		Расход	
Компонент нейтрализованного продукта	Количество	Компонент выпаренного продукта	Количество
Аммофосная пульпа	1006,79	Упаренная пульпа	686,57
В том числе сухие соли:	515,46	В том числе сухие соли:	514,75
MgHPO ₄ · 2H ₂ O	80,48	MgHPO ₄ · 2H ₂ O	80,48
CaHPO ₄ · 2H ₂ O	3,69	CaHPO ₄ · 2H ₂ O	3,69
AlPO ₄	34,08	AlPO ₄	34,08
FePO ₄	29,22	FePO ₄	29,22
(NH ₄) ₂ SO ₄	36,3	(NH ₄) ₂ SO ₄	36,3
(NH ₄) ₂ SiF ₆	28,89	(NH ₄) ₂ SiF ₆	28,71
NH ₄ H ₂ PO ₄	268,57	NH ₄ H ₂ PO ₄	272,2
(NH ₄) ₂ HPO ₄	34,25	(NH ₄) ₂ HPO ₄	30,08
H ₂ O	491,33	H ₂ O	171,82
		Газовая фаза	320,22
		В том числе:	
		H ₂ O	319,51

Окончание табл. 2.7

Приход		Расход	
Компонент исходного сырья	Количество	Компонент полученного продукта	Количество
		NH ₃	0,57
		HF	0,04
		SiF ₄	0,1
<i>Итого</i>	1006,79	<i>Итого</i>	1006,79

Таблица 2.8

**Материальный баланс сушки аммофосной пульпы
для схем получения аммофоса в аппарате БГС (RP4.BAS), кг**

Приход		Расход	
Компонент выпаренного продукта	Количество	Компонент полученного продукта	Количество
Упаренная пульпа	686,57	Готовый продукт	516,99
В том числе сухие соли:	514,75	В том числе сухие соли:	511,79
MgHPO ₄ · 2H ₂ O	80,48	MgHPO ₄ · 2H ₂ O	80,48
CaHPO ₄ · 2H ₂ O	3,69	CaHPO ₄ · 2H ₂ O	3,69
AlPO ₄	34,08	AlPO ₄	34,08
FePO ₄	29,22	FePO ₄	29,22
(NH ₄) ₂ SO ₄	36,3	(NH ₄) ₂ SO ₄	36,3
(NH ₄) ₂ SiF ₆	28,71	(NH ₄) ₂ SiF ₆	28,71
NH ₄ H ₂ PO ₄	272,2	NH ₄ H ₂ PO ₄	288,14
(NH ₄) ₂ HPO ₄	30,08	(NH ₄) ₂ HPO ₄	11,78
H ₂ O	171,82	H ₂ O	5,02
		Газовая фаза	169,58
		В том числе:	
		H ₂ O	166,62
		NH ₃	2,47
		HF	0,14
		SiF ₄	0,35
<i>Итого</i>	686,57	<i>Итого</i>	686,57

Таблица 2.9

Материальный баланс сушки аммофосной пульпы
для схем получения аммофоса в аппарате РКСТ (RP5.BAS), кг

Приход		Расход	
Компонент нейтрализованного продукта	Количество	Компонент полученного продукта	Количество
Аммофосная пульпа	1006,79	Готовый продукт	516,92
В том числе сухие соли:	515,46	В том числе сухие соли:	511,71
$MgHPO_4 \cdot 2H_2O$	80,48	$MgHPO_4 \cdot 2H_2O$	80,48
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	3,69	$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	3,69
$AlPO_4$	34,08	$AlPO_4$	34,08
$FePO_4$	29,22	$FePO_4$	29,22
$(NH_4)_2SO_4$	36,30	$(NH_4)_2SO_4$	36,30
$(NH_4)_2SiF_6$	28,89	$(NH_4)_2SiF_6$	28,25
$NH_4H_2PO_4$	268,57	$NH_4H_2PO_4$	289,61
$(NH_4)_2HPO_4$	34,25	$(NH_4)_2HPO_4$	10,09
H_2O	491,33	H_2O	5,21
		Газовая фаза	489,87
		В том числе:	
		NH_3	3,23
		HF	0,14
		SiF_4	0,37
Итого	1006,79	Итого	1006,79

Таблица 2.10

Выход, качество аммофоса и расходные коэффициенты
с учетом исходных данных по сырью
для схемы получения аммофоса в аппарате БГС (RP4.BAS)

Показатель	Идентификатор величины	Контрольный пример
Количество ЭФК, кг	G	1000
Содержание P_2O_5 в ЭФК, %	P2O5	24,5
Выход продукта, доли единицы	B	0,98
Степень использования P_2O_5 , доли единицы	C	0,98
Общее количество продукта, кг	PR	506,65
В том числе:		
$MgHPO_4 \cdot 2H_2O$		78,87
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$		3,61
$AlPO_4$		33,4
$FePO_4$		28,63
$(NH_4)_2SO_4$		35,57
$(NH_4)_2SiF_6$		27,54
$NH_4H_2PO_4$		282,38
$(NH_4)_2HPO_4$		11,55
H_2O		5,1
Содержание P_2O_5 в водорастворимой форме, %	P2O5W	36,36
Содержание P_2O_5 в усвояемой форме, %	P2O5USV	47,39
Содержание азота в продукте, %	N2	9,81
Расход ЭФК на 1 т аммофоса в натуре, кг	EFKN	1973,76
Расход ЭФК на 1 т P_2O_5 в аммофосе, кг	EFKF	4164,93
Расход NH_3 на 1 т аммофоса в натуре, кг	AMN	127
Расход NH_3 на 1 т P_2O_5 аммофоса, кг	AMF	268
Расход P_2O_5 ЭФК на 1 т P_2O_5 аммофоса, кг	AEFK	1

Таблица 2.11

**Выход аммофоса с учетом исходных данных по сырью
для схемы получения аммофоса в аппарате РКСТ (RP5.BAS)**

Показатель	Идентификатор величины	Контрольный пример
Количество ЭФК, кг	G	1000
Содержание P_2O_5 в ЭФК, %	P2O5	24,5
Выход продукта, доли единицы	B	0,98
Степень использования P_2O_5 , доли единицы	C	0,98
Общее количество продукта, кг	PR	506,58
В том числе:		
$MgHPO_4 \cdot 2H_2O$		78,87
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$		3,61
$AlPO_4$		33,40
$FePO_4$		28,63
$(NH_4)_2SO_4$		35,57
$(NH_4)_2SiF_6$		27,69
$NH_4H_2PO_4$		283,82
$(NH_4)_2HPO_4$		9,89
H_2O		5,1
Содержание P_2O_5 в водорастворимой форме, %	P2O5W	36,37
Содержание P_2O_5 в усвояемой форме, %	P2O5USV	47,40
Содержание азота в продукте, %	N2	9,78
Расход ЭФК на 1 т аммофоса в натуре, кг	EFKN	1974,01
Расход ЭФК на 1 т P_2O_5 в аммофосе, кг	EFKF	4164,93
Расход NH_3 на 1 т аммофоса в натуре, кг	AMN	127,02
Расход NH_3 на 1 т P_2O_5 аммофоса, кг	AMF	268
Расход P_2O_5 ЭФК на 1 т P_2O_5 аммофоса, кг	AEFK	1

Таблица 2.12

Качественные показатели гранулированного аммофоса

Аммофос	Содержание качественных показателей аммофоса, %						
	F	P_2O_5 общ	MgO	P_2O_5 усв	H_2O	P_2O_5 вод	N
Из апатита	3,5	52	0	51	1	50	12
Из фосфорита	3	47	4	46	—	41	11

Таблица 2.13

**Примерные расходные коэффициенты
на 1 т продукционного аммофоса из апатита (51 % $P_2O_{5\text{усв}}$, 12 % N)
и фосфорита Каратау (47 % $P_2O_{5\text{усв}}$, 11 % N)
при степени использования P_2O_5 – 0,96, NH_3 – 0,97**

Расходный коэффициент	Аммофос по схеме БГС	
	Апатит	Фосфорит
ЭФК, т (в пересчете на 100 % P_2O_5)	0,54	0,50
Аммиак, т N	0,15	0,14
Вода, м ³	22	22
Сжатый воздух, м ³	60	60
Электроэнергия, кВт · ч	111	111
Пар, т	0,26	0,59
Природный газ, МДж/м ³	34,8	28

Таблица 2.14

Состав обогащенных фосфатов

Фосфат	Содержание основных компонентов фосфатов, %						
	P_2O_5	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	MgO	F
Апатит	39,4	51,8	0,84	0,84	1,51	—	3,03
Фосфорит	27,6	41,8	5,08	5,08	—	3,6	2,5

2.4. Некоторые примеры составления материальных и тепловых балансов в производстве сложных удобрений [5; 6]

Пример 1. Составьте материальный баланс сатуратора для нейтрализации кислоты в производстве аммофоса (на 1000 кг фосфорной кислоты). Процентный состав экстракционной фосфорной кислоты: P_2O_5 — 25, SO_3 — 3,75, MgO — 3,6, CaO — 0,2, Al_2O_3 — 1,3, Fe_2O_3 — 1,3, F — 1,86. Состав жидкого аммиака: 99 % аммиака, 1 % воды. В процессе насыщения кислоты аммиаком испаряется 78 кг воды на 1000 кг кислоты. Содержание аммиака в нейтрализованной пульпе составляет 27 % от общего количества P_2O_5 .

Решение.

Приход.

В приходные статьи баланса включаются фосфорная кислота и аммиак.

В 1000 кг фосфорной кислоты (25 % P_2O_5) содержится в кг:

$$\bullet H_3PO_4 = \frac{1000 \cdot 0,25 \cdot 2 \cdot 98}{142} = 345;$$

$$\bullet H_2O = 1000 - 345 = 655.$$

Количество расходуемого аммиака равно 27 % от общего количества P_2O_5 : $1000 \cdot 0,25 \cdot 0,27 = 67,5$ кг.

С аммиаком поступает следующее количество воды:

$$(67,5 \cdot 1) / 99 = 0,68 \text{ кг.}$$

Расход.

При нейтрализации раствора фосфорной кислоты аммиаком в отделе сатурации по реакциям 2.3.1—2.3.6 получают следующие соли (кг):

$$\bullet \text{Дикальцийфосфат (реакция 2.3.1): } \frac{1000 \cdot 0,036 \cdot 174}{40} = 156,6,$$

$$\text{в том числе кристаллизационной воды} \text{ — } \frac{1000 \cdot 0,036 \cdot 3 \cdot 18}{40} = 48,6$$

$$\text{и } P_2O_5 \text{ — } \frac{1000 \cdot 0,036 \cdot 142}{40 \cdot 2} = 63,9,$$

где 40, 174, 18, 142 — M_r MgO , $MgHPO_4 \cdot 2H_2O$, H_2O и P_2O_5 соответственно.

$$\bullet \text{Дикальцийфосфат (реакция 2.3.2): } \frac{1000 \cdot 0,002 \cdot 172}{56} = 6,1,$$

$$\text{в том числе кристаллизационной воды} \text{ — } \frac{1000 \cdot 0,002 \cdot 2 \cdot 18}{56} = 1,3$$

$$\text{и } P_2O_5 \text{ — } \frac{1000 \cdot 0,002 \cdot 142}{56 \cdot 2} = 2,5,$$

где 56, 172 — M_r CaO , $CaHPO_4 \cdot 2H_2O$ соответственно.

$$\bullet \text{Фосфат алюминия (реакция 2.3.3): } \frac{1000 \cdot 0,013 \cdot 2 \cdot 122}{102} = 31,1,$$

$$\text{в том числе } P_2O_5 \text{ — } \frac{1000 \cdot 0,013 \cdot 142}{102} = 18,1,$$

где 102, 122 — M_r Al_2O_3 и $AlPO_4$ соответственно.

$$\bullet \text{Фосфат железа (реакция 2.3.4): } \frac{1000 \cdot 0,013 \cdot 207 \cdot 2}{160} = 33,6,$$

$$\text{в том числе } P_2O_5 \text{ — } \frac{1000 \cdot 0,013 \cdot 142 \cdot 2}{160} = 11,5,$$

где 160, 207 — M_r Fe_2O_3 и $FePO_4$ соответственно.

$$\bullet \text{Кремнефторид аммония (реакция 2.3.5): } \frac{1000 \cdot 0,0186 \cdot 178}{6 \cdot 19} = 29,$$

$$\text{в том числе аммиака} \text{ — } \frac{1000 \cdot 0,0186 \cdot 2 \cdot 17}{6 \cdot 19} = 5,5,$$

где 178, 17, 19 — M_r $(NH_4)_2SiF_6$, NH_3 , F соответственно.

$$\bullet \text{Сульфат аммония (реакция 2.3.6): } \frac{1000 \cdot 0,0375 \cdot 132}{80} = 61,9,$$

$$\text{в том числе аммиака} \text{ — } \frac{1000 \cdot 0,0375 \cdot 2 \cdot 17}{80} = 15,9,$$

где 132 и 80 — M_r $(NH_4)_2SO_4$, SO_3 соответственно.

$$\text{Количество } P_2O_5, \text{ связанной по реакциям (2.3.1—2.3.4), равно} \\ 63,9 + 2,5 + 18,1 + 11,5 = 96 \text{ кг.}$$

Остальное количество P_2O_5 связывается с аммиаком, образуя фосфаты аммония. Количество P_2O_5 , нейтрализуемое аммиаком, составляет

$$1000 \cdot 0,25 - 96 = 154 \text{ кг.}$$

В нейтрализованной пульпе содержится 27 % аммиака от общего количества P_2O_5 . На образование кремнефторида и сульфата аммония израсходовано $5,5 + 15,9 = 21,4$ кг аммиака, следовательно, на образование фосфатов аммония пошло $250 \cdot 0,27 - 21,4 = 46,1$ кг аммиака.

Для связывания всей оставшейся P_2O_5 (154 кг) по реакции (2.3.7) в моноаммонийфосфате необходимо $\frac{2 \cdot 17 \cdot 154}{142} = 36,9$ кг аммиака. При этом остается $46,1 - 36,9 = 9,2$ кг избыточного аммиака, который идет на образование диаммонийфосфата по реакции (2.3.8); его количество составляет

$$\frac{9,2 \cdot 132}{2 \cdot 17} = 35,7 \text{ кг},$$

что в перерасчете на моноаммонийфосфат составляет $\frac{35,7 \cdot 115}{132} = 31,1$ кг, где 115 и 132 — M_r $NH_4H_2PO_4$ и $(NH_4)_2HPO_4$ соответственно.

Если из 154 кг P_2O_5 могло образоваться $\frac{36,9 \cdot 115}{17} = 249,6$ кг моноаммонийфосфата, то после образования диаммонийфосфата его останется $249,6 - 31,1 = 218,5$ кг.

Выход сухих солей (с учетом кристаллизационной воды) составляет

$$572,5 - 49,9 = 522,6 \text{ кг}.$$

Таблица 2.15

Состав сухих солей с учетом кристаллизационной воды

Сухая соль	Количество	
	кг	%
$MgHPO_4 \cdot 2H_2O$	156,6	27,35
$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	6,1	1,07
$AlPO_4$	31,1	5,43
$FePO_4$	33,6	5,87
$(NH_4)_2SiF_6$	29	5,07
$(NH_4)_2SO_4$	61,9	10,81
$(NH_4)_2HPO_4$	35,7	6,24
$NH_4H_2PO_4$	218,5	38,16
Итого	572,5	100

В систему поступает $1000 + 67,5 + 0,7 = 1068,2$ кг материалов (фосфорной кислоты, аммиака и воды с ним).

В процессе сатурации из системы испаряется 78 кг воды на 1000 кг кислоты. Количество пульпы после испарения воды составляет $1068,2 - 78 = 990,2$ кг. В конечной пульпе содержится свободной воды $990,2 - 572,5 = 417,7$ кг. Всего в пульпе содержится $417,7 + 49,9 = 467,6$ кг воды.

Процентное содержание общей влаги в пульпе:

$$\frac{467,6 \cdot 100}{990,2} = 47,2 \text{ \%}.$$

Таблица 2.16

Материальный баланс сатурации в производстве аммофоса (на 1000 кг фосфорной кислоты)

Приход	кг	%	Расход	кг	%
25%-ная по P_2O_5 ЭФК			Солевая масса пульпы	572,5	53,6
в пересчете на моногидрат (100 % H_3PO_4)	345	32,3	В том числе:		
Вода с фосфорной кислотой	655	61,32	$MgHPO_4 \cdot 2H_2O$	156,6	14,6
Аммиак	67,5	6,32	$CaHPO_4 \cdot 2H_2O$	6,1	0,57
Вода с аммиаком	0,7	0,06	$AlPO_4$	31,1	2,9
			$FePO_4$	33,6	3,1
			$(NH_4)_2SiF_6$	29,0	2,7
			$(NH_4)_2SO_4$	61,9	5,8
			$(NH_4)_2HPO_4$	35,7	3,3
			$NH_4H_2PO_4$	218,5	20,5
			Вода в пульпе (свободная)	417,7	39,1
			Водяной пар	78,0	7,3
Итого	1068,2	100	Итого	1068,2	100

Пример 2. Используя данные примера 1, рассчитать тепловой баланс сатурации в производстве аммофоса на 1000 кг фосфорной кислоты указанного состава.

Температура поступающей кислоты (60 °C), аммиака (27 °C), отходящей пульпы (102 °C) при давлении 152 кПа (1,5 атм).

Решение.

Приход теплоты.

Выделение теплоты за счет реакций:

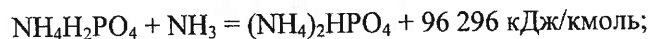
- образование моноаммонийфосфата (2.3.7):



$$Q = 36,9 \cdot 75\,362 / 17 = 163\,580 \text{ кДж},$$

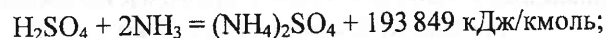
где 36,9 — количество (кг) вступившего в реакцию аммиака;

- образование диаммонийфосфата из моноаммонийфосфата (2.3.8):



$$Q = 9,2 \cdot 96\,296 / 17 = 52\,113 \text{ кДж},$$

где 9,2 — количество (кг) аммиака, реагирующего с моноаммонийфосфатом;



$$Q = 15,9 \cdot 193\,849 / 2 \cdot 17 = 90\,653 \text{ кДж},$$

где 15,9 — количество (кг) аммиака, связываемого в сульфат;



$$Q = 5,5 \cdot 159\,089 / 2 \cdot 17 = 25\,736 \text{ кДж},$$

где 5,5 — количество (кг) аммиака, вступившего в реакцию.

Всего тепла за счет химических реакций — 332 082 кДж*.

Теплота, вносимая кислотой и аммиаком:

$$1000 \cdot 2,868 \cdot 60 + (-117,2 \cdot 67,5) = 164\,169 \text{ кДж},$$

где 1000 — количество фосфорной кислоты, кг;

2,868 — средняя удельная теплоемкость кислоты, кДж/(кг · К);

60 — температура кислоты, °С;

-117,2 — энтальпия аммиака при -27 °С и 152 кПа (1,5 атм), кДж/кг;

67,5 — количество аммиака, кг.

Всего поступает теплоты 332 082 + 164 169 = 496 251 кДж.

Расход теплоты.

Нагревание пульпы до 102 °С: 1068,2 · 2,721 · 102 = 277 542 кДж,

где 1068,2 — количество пульпы, кг;

2,721 — средняя удельная теплоемкость пульпы, кДж/(кг · К);

* В расчет не включены тепловые эффекты из-за малой величины других реакций.

102 — температура пульпы, °С.

Тепловые потери в окружающую среду составляют 3 % от $Q_{\text{общ}}$:

$$496\,251 \cdot 0,03 = 14\,888 \text{ кДж}.$$

Всего расходуется теплоты: 277 542 + 14 888 = 292 430 кДж.

Избыток теплоты расходуется на испарение воды: 496 251 – 292 430 = 203 821 кДж.

Количество испаряющейся воды составит 203 821 / 2 253 = 90,5 кг, где 2 253 — скрытая теплота испарения воды при 102 °С, кДж/кг.

Общий расход теплоты: 277 542 + 14 888 + 203 821 = 496 251 кДж.

Таблица 2.17

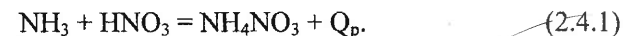
Тепловой баланс сатурации фосфорной кислоты аммиаком
(на 1000 кг фосфорной кислоты)

Приход	кДж	%	Расход	кДж	%
Теплота реакций образования:			На нагревание пульпы	277 542	35,93
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	163 580	32,96	На испарение воды	203 821	41,07
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	52 113	10,5	Тепловые потери	14 888	3
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	90 653	18,17			
$(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$	25 736	5,19			
Теплота, вносимая фосфорной кислотой и аммиаком	164 169	33,08			
Итого	496 251	100	Итого	496 251	100

Пример 3. Составьте материальный баланс процесса нейтрализации азотной кислоты аммиаком на 1 т нитрата аммония (аммиачной селитры). Концентрация азотной кислоты — 55 %, газообразного аммиака — 100 %, нитрата аммония — 85 %. Потери аммиака и азотной кислоты — 1 %.

Решение.

Нитрат аммония получают по реакции нейтрализации:



Молекулярные массы $M_r \text{ NH}_3 = 17$, $M_r \text{ HNO}_3 = 63$, $M_r \text{ NH}_4\text{NO}_3 = 80$.

Рассчитываем приход: в соответствии с уравнением на 1 кмоль NH_3 образуется 1 кмоль NH_4NO_3 . Теоретическая масса аммиака, необходимая для производства 1 т NH_4NO_3 (100 %), составляет $m_r = 17\,000 / 80 = 212,5$ кг, практическая масса аммиака с учетом потерь производства равна $m_{\text{пр}} = 212,5 \cdot 1,01 = 214,6$ (кг).

Определяем теоретическую массу азотной кислоты (100%-ной), необходимой для производства 1 т NH_4NO_3 : $m_T = 63 \cdot 1000 / 80 = 787,5$ кг.

Вычисляем $m_{\text{пр}}$ с учетом 1 % потерь HNO_3 : $m_{\text{пр}} = 787,5 \cdot 1,01 = 795,4$ кг.

Вычисляем практическую массу азотной кислоты с учетом потерь производства и концентрации HNO_3 : $m_{\text{пр}} = 787,5 \cdot 1,01 / 0,55 = 1446,2$ кг.

С азотной кислотой поступает вода: $1446,2 - 795,4 = 650,8$ кг.

Общая масса реагентов, поступивших на нейтрализацию:

$$214,6 + 1446,2 = 1660,8 \text{ кг.}$$

Получается 85%-ный раствор нитрата аммония:

$$1000 : 0,85 = 1176,47 \text{ кг.}$$

Потери NH_3 составляют $214,6 - 212,5 = 2,1$ кг, потери HNO_3 — $795,4 - 787,5 = 7,9$ кг.

Масса испарившейся воды (соковый пар) равна

$$1660,8 - (1176,47 + 2,1 + 7,9) = 474,33 \text{ кг.}$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.18.

Таблица 2.18

**Материальный баланс
процесса нейтрализации азотной кислоты аммиаком**

Приход		Расход	
Исходный компонент	т, кг	Продукт	т, кг
HNO_3 (100%-ная)	795,4	NH_4NO_3 (85%-ный)	1176,47
H_2O	650,8	H_2O (соковый пар)	474,33
NH_3 (100%-ный)	214,6	Потери NH_3 (100%-ного)	2,1
		Потери HNO_3 (100%-ной)	7,9
<i>Итого</i>	1660,8	<i>Итого</i>	1660,8

2.5. Задачи с ответами для самостоятельного решения

1. Определите выход аммиачной селитры, если на получение 18 700 кг нитрата аммония израсходовано 19 724 л 57%-ной азотной кислоты ($\rho = 1351$ кг/м³). Ответ: 96,96 %.

2. Определите расходные коэффициенты сырья NH_3 , HNO_3 на производство 1 т 100%-ной гранулированной аммиачной селитры, если потери азотной кислоты в процессе производства составляют 5 %, а аммиака — 3,8 %. Азотная кислота 58%-ной концентрации. Ответ: 0,22 и 1,43 т соответственно.

3. Сколько воды необходимо выпарить при получении 150 т 95%-ной аммиачной селитры, если используется азотная кислота 49%-ной концентрации, аммиак — 100%-ной. Ответ: 115,05 т.

4. Составьте материальный баланс производства 1 т 70%-ной NH_4NO_3 по следующим данным: азотная кислота 51%-ной концентрации, аммиак — 100%-ной; потери аммиака — 1 %, азотной кислоты — 1,5 %. Ответ: приход в кг: NH_3 — 214,6, HNO_3 — 1567,77; расход в кг: NH_4NO_3 — 1000, H_2O — 133,48; потери в кг: NH_3 — 2,1, HNO_3 — 11,81.

5. Составьте материальный баланс выпарки аммиачной селитры по следующим данным: на выпарку поступает 12 т 70%-ной аммиачной селитры; в результате выпаривания получается селитра, содержащая 89 % NH_4NO_3 . Ответ: приход — 12 000 кг NH_4NO_3 ; расход — 9720 кг NH_4NO_3 , 2280 кг сокового пара.

6. На основе материального баланса, приведенного в нижеследующей таблице, составьте тепловой баланс процесса нейтрализации в производстве аммиачной селитры.

Приход		Расход	
Исходное вещество	т, кг	Продукт	т, кг
Аммиак	214,6	NH_4NO_3 (70%-ный)	1428,6
Азотная кислота (50%-ная)	1590,8	Соковый пар	366,8
		Потеря NH_3	2,1
		Потеря HNO_3	7,9
<i>Итого</i>	1805,4	<i>Итого</i>	1805,4

Удельные теплоемкости C_{HNO_3} (50 %) = 2,763 кДж/кг·К; C_{NH_3} = 2,186 кДж/кг·К; $C_{\text{NH}_4\text{NO}_3}$ = 2,302 кДж/кг·К; энтальпии реакции нейтрализации 50%-ной кислотой $\Delta H = -105,09 \cdot 10^3$ кДж/кмоль, парообразования воды $\Delta H = -2684$ кДж/кг. Температура вводимых компонентов: аммиака — 303 К (30 °С); азотной кислоты — 323 К (50 °С), 70%-ной NH_4NO_3 — 396 К (123,6 °С).

Ответ: Расход и приход теплоты — 1468,94 МДж.

7. Определите расходные коэффициенты сырья NH_3 , CO_2 на синтез 1 т мочевины. Избыток аммиака составляет 125 % от стехиометрической

массы. Углекислый газ содержит 4 % примесей. Ответ: 1,28 и 0,76 т соответственно.

8. Сколько мочевины получится на 1000 л $\rho_{\text{NH}_3} = 0,66$ кг/л, если синтез осуществляется под давлением 20 МПа? Избыток аммиака составляет 100 % от стехиометрии, степень превращения карбамата в карбамид — 70 %, потери при упаривании — 5,8 %. Ответ: 735,7 кг.

9. Синтез мочевины осуществляется 120 %-ным избытком аммиака от стехиометрии. Достаточно ли воды, выделяющейся в результате реакции, на связывание всего избытка аммиака в NH_4OH ? Сколько непрореагировавшего аммиака остается? Степень превращения карбамата в карбамид — 88,5 %. Расчет следует произвести на 1000 кг аммиака. Ответ: 331 кг.

10. Составьте материальный баланс производства 1250 кг мочевины (в виде сухого продукта) по следующим данным: избыток аммиака — 100 % от стехиометрического. Углекислый газ содержит 6 % примесей в виде инертных газов. Степень превращения карбамата в мочевины составляет 70 %. Ответ: приход и расход — 3416,93 кг.

11. Сколько серной кислоты (моногоидрата) и коксового газа необходимо для получения 1600 кг сульфата аммония, содержащего 20,5 % азота? Содержание аммиака в коксовом газе — 1,02 %. Ответ: 579,4 кг; 2684,6 м³.

12. Сколько известняка, содержащего 95 % CaCO_3 , необходимо для нейтрализации разбавленной азотной кислоты в производстве 1 т кальциевой селитры $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$? Выход селитры составляет 85 %. Ответ: 755,1 кг.

13. Определите, какая масса нитрата натрия (NaNO_3), сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и нитрата кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ эквивалентна 1 т чистой аммиачной селитры NH_4NO_3 по содержанию связанного азота. Ответ: 2,25, 1,71 и 2,11 т соответственно.

14. Определите массу расходуемой экстракционной фосфорной кислоты, содержащей 25 % P_2O_5 и 3,75 % SO_3 , и аммиака на производство 1000 кг сухого аммофоса, состоящего наполовину из $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ и наполовину из $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$. Ответ: 2310,6 и 239,82 кг соответственно.

15. Производительность цеха — 34,1 т/ч нитроаммофоски, содержащей 16,6 % P_2O_5 . Определите часовой расход цехом термической фосфорной кислоты (52 % P_2O_5) и аммиака, содержащего 99 % NH_3 и 1 % H_2O . Аммонизацию проводят до мольного отношения $\text{NH}_3 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 0,7 : 1$. Ответ: 15 025 и 957 кг/ч соответственно.

16. В смеситель поступает 99 %-ный аммиак и 45 %-ная фосфорная кислота в мольном отношении 0,7 : 1, где происходит дальнейшая

нейтрализация аммиаком до мольного соотношения $\text{NH}_3 : \text{H}_3\text{PO}_4 = 1,05 : 1$. Определите процентный состав гидрофосфатов в начальном и конечном растворе. Расчет вести на 1000 кг раствора. Ответ: 35 % $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; 12,8 % H_3PO_4 ; 48,77 % NH_4HPO_4 ; 25,86 % $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$.

17. В производстве нитроаммофоски, полученной азотнокислотным разложением фосфатов, 1000 кг апатитового концентрата, содержащего фосфор в составе $\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$, обрабатывают 45 %-ной азотной кислотой. Определите массу расходуемой кислоты, состав и массу азотнокислотной вытяжки. Фторапатит содержит 39,4 % P_2O_5 . Ответ: 2589,67 кг H_2PO_4 ; 1516,8 кг $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$.

18. Рассчитайте соотношение питательных элементов N : P_2O_5 в нитроаммофоске, полученной в результате нейтрализации аммиаком обесфторенной азотнокислотной вытяжки. На 2000 кг вытяжки израсходовано 98,5 кг аммиака, содержащего 93 % NH_3 , 7 % H_2O . Ответ: 9 : 10.

19. В цехе грануляции производительностью 40 т/ч получается нитроаммофоска, содержащая по 17 % N, P_2O_5 и K_2O . Определите часовой расход аммиака (99,3 % NH_3); аммиачной селитры (97 % NH_4NO_3), фосфорной кислоты (52 % P_2O_5), хлорида калия (98 % KCl). Известно, что 10 % азота поступает с плавом аммиачной селитры. Ответ: 6,95 т/ч KCl ; 78 т/ч NH_4NO_3 ; 2,82 т/ч NH_3 ; 18,05 т/ч H_3PO_4 в пересчете на 52 % P_2O_5 .

2.6. Контрольные вопросы

1. Перечислите основные виды фосфорных и комплексных минеральных удобрений на основе фосфора.

2. Что такое водорастворимые, усвояемые и нерастворимые фосфорные минеральные удобрения?

3. Из какого сырья получают фосфорную кислоту и фосфорные минеральные удобрения?

4. Какие соединения получают кислотным разложением фосфатного сырья? Приведите примеры сернокислотного, азотнокислотного и фосфорнокислотного разложения фосфатов.

5. Укажите промышленные методы производства фосфорной кислоты.

6. Чем различаются ангидритный, полугидратный, дигидратный вариант экстракционного способа производства фосфорной кислоты?

7. Как влияет концентрация серной кислоты на скорость разложения фосфатов?

8. В чем преимущества электротермического способа производства фосфорной кислоты перед экстракционным?

9. Для чего в производстве восстановления фосфатов используются флюсы?

10. Укажите методы отвода теплоты в производстве термической фосфорной кислоты. Какой из способов является предпочтительным?

11. К какому виду кислотного разложения относится производство двойного суперфосфата? Почему это минеральное удобрение называется безбалластным?

12. В чем заключается преимущество поточного метода производства двойного суперфосфата по сравнению с камерным способом?

13. Какие минеральные удобрения называются комплексными? Приведите примеры.

14. Какие соли фосфорной кислоты входят в состав аммофоса?

15. В чем преимущество технологической схемы производства аммофоса с аппаратом РКСГ по сравнению с другими?

16. Сколько и какие питательные элементы входят в состав нитроаммофоски?

17. Какие принципы положены в основу различных способов классификации минеральных удобрений?

18. Руководствуясь физико-химическими основами получения аммиачной селитры, обоснуйте выбор и конструкцию аппарата ИТН?

19. Из каких стадий состоит процесс получения карбамида?

20. Каковы основные источники загрязнения окружающей среды при производстве минеральных удобрений?

21. Какие меры принимаются для уменьшения до минимума сброса вредных веществ в атмосферу и сточные воды при производстве минеральных кислот и удобрений?

2.7. Список рекомендуемой литературы

1. *Практикум по химической технологии* / под ред. С. И. Вольфовича. М.: Изд-во МГУ, 1968 (в личной библиотеке).

2. *Химическая энциклопедия*: в 5 т. / под ред. И. Л. Кнунянца. М.: Сов. энциклопедия. 1990. Т. 2. С. 869—870 (в читальном зале).

3. *Соколов Р. С.* Химическая технология. М.: ВЛАДОС, 2003. Т. 1 (в учебной библиотеке).

4. *Кутепов А. М. и др.* Общая химическая технология. М.: Высш. шк., 1985 (в учебной библиотеке).

5. *Расчеты по технологии неорганических веществ* / под ред. М. Е. Позина. Л.: Химия, 1977 (в личной библиотеке).

6. *Сборник задач по хим. технологии: учеб. пособие для студентов хим. и хим-биол. спец. пед. ин-тов* / И. И. Беляева [и др.]. М.: Просвещение, 1982 (в личной библиотеке).

7. *Позин М. Е.* Технология минеральных удобрений. Л.: Химия, 1989 (в личной библиотеке).

8. *Кочетков В. Н.* Фосфорсодержащие удобрения: справочник / под ред. А. А. Соколовского. М.: Химия, 1982 (в личной библиотеке).

9. *Технология фосфорных и комплексных минеральных удобрений* / под ред. С. Д. Эвенчика. М.: Наука, 1987 (http://ihtik.2x4.ru/chem_8janv2007/chem_8janv2007_3155.rar).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Варианты контрольных задач

№ п/п	Тема	
	Фосфорные удобрения	Комплексные удобрения
1	1, 14, 17, 21, 22	1, 5, 3, 7, 8
2	8, 2, 9, 23, 24	6, 2, 4, 19, 18
3	10, 3, 15, 25, 26	11, 3, 5, 4, 8
4	1, 9, 4, 16, 17	3, 1, 4, 10, 15
5	24, 23, 5, 18, 19	14, 8, 5, 6, 18
6	16, 3, 6, 22, 21	19, 13, 6, 11, 2
7	5, 11, 7, 1, 2	4, 11, 7, 17, 19
8	3, 4, 8, 15, 16	1, 9, 8, 7, 6
9	16, 2, 9, 20, 21	13, 15, 9, 18, 3
10	7, 18, 10, 24, 25	5, 14, 10, 16, 8
11	2, 5, 11, 3, 17	9, 3, 11, 18, 2
12	19, 17, 12, 18, 20	1, 8, 12, 14, 10
13	6, 8, 13, 19, 21	17, 2, 13, 9, 8
14	1, 11, 14, 3, 5	5, 6, 14, 16, 10
15	19, 8, 15, 1, 4	1, 7, 15, 19, 8
16	4, 9, 16, 13, 19	4, 3, 16, 10, 5
17	10, 12, 17, 24, 26	1, 6, 17, 8, 9
18	1, 7, 18, 3, 2	10, 13, 18, 7, 3
19	3, 9, 19, 1, 5	12, 4, 19, 10, 2
20	5, 10, 20, 6, 8	15, 3, 1, 17, 4
21	22, 1, 21, 7, 9	7, 10, 2, 1, 6
22	14, 8, 22, 10, 11	4, 9, 3, 14, 9
23	4, 3, 23, 15, 17	19, 7, 4, 14, 19
24	17, 18, 24, 1, 6	1, 9, 5, 18, 3
25	13, 15, 25, 17, 20	5, 15, 6, 11, 8
26	9, 7, 26, 10, 15,	3, 1, 7, 17, 12
27	8, 19, 1, 12, 14	13, 5, 8, 1, 3
28	10, 12, 2, 20, 25	17, 8, 9, 19, 4
29	4, 6, 3, 26, 1	3, 1, 10, 15, 14
30	20, 25, 4, 18, 3	13, 2, 11, 7, 9

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Программный комплекс технологических расчетов получения простых фосфорных удобрений	5
1.1. Классификация и некоторые понятия в производстве минеральных удобрений	5
1.2. Постановка задачи о расчете вариантов получения кормового МКФ или камерного двойного суперфосфата, удовлетворяющих ГОСТу	8
1.2.1. Расчет состава фосфатного сырья	16
1.2.2. Расчет количества расходуемой фосфорной кислоты	17
1.2.3. Расчет состава продукта после разложения сырья в камере ...	18
1.2.4. Расчет состава продукта после стадии дозревания на складе	20
1.2.5. Расчет состава продукта после стадии сушки	22
1.2.6. Расчет качественных показателей продукта	24
1.3. Краткие сведения теории для самостоятельного решения задач	25
1.4. Задачи и ответы для самостоятельного решения	29
1.5. Список рекомендуемой литературы	33
2. Программный комплекс технологических расчетов получения сложных фосфорных удобрений	34
2.1. Некоторые методические рекомендации по составлению материальных и тепловых балансов	34

2.2. Постановка задачи получения аммофоса в БГС и РКСГ	36
2.3. Расчет по уравнениям реакций материальных балансов получения аммофоса в БГС и РКСГ	40
2.4. Некоторые примеры составления материальных и тепловых балансов в производстве сложных удобрений	52
2.5. Задачи с ответами для самостоятельного решения	58
2.6. Контрольные вопросы	61
2.7. Список рекомендуемой литературы	62
Приложение	64

Учебное издание

**Лидия Георгиевна Корс
Наталья Владимировна Корс**

НЕКОТОРЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ЗАДАЧИ В ХИМИИ И ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Учебно-практическое пособие

Редактор М. В. Королева. Корректор М. В. Бурлетова
Оригинал-макет подготовлен Ю. Ю. Филипповым

Подписано в печать 11.03.2009 г.

Бумага для множительных аппаратов. Формат 60×90¹/₁₆.
Гарнитура «Таймс». Ризограф. Усл. печ. л. 4,2. Уч.-изд. л. 2,2.
Тираж 100 экз. Заказ 95

Издательство Российского государственного университета им. И. Канта
236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14