

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования

«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

физико-технический факультет

«УТВЕРЖДАЮ»

Декан ФТФ

В.И. Бойко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.



**Разделение гетерогенных систем  
в поле центробежных сил**

Методические указания по выполнению лабораторной работы по курсу:  
**«Процессы и аппараты химической технологии»**

для студентов специальностей:

240601 – Химическая технология материалов современной энергетики

240603 – Химическая технология редких элементов

и материалов на их основе

Томск 2008

УДК - 543(075)

Методическое указание по выполнению лабораторных работ: «Разделение гетерогенных систем в поле центробежных сил»

Для студентов дневного отделения, по специальности:

240601 – Химическая технология материалов современной энергетики;

240603 – Химическая технология редких элементов  
и материалов на их основе

Томск. Изд. ТПУ 2008 г. 14 с.

Составители – Брус И.Д., доцент кафедры ХТРЭ, к. т. н.

– Тураев Н.С., доцент кафедры ХТРЭ, к.т.н.

– Оствальд Р.В., доцент кафедры ХТРЭ, к.х.н.

– Гребнев В.А., ассистент кафедры ХТРЭ

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к использованию в учебном процессе семинаром кафедры ХТРЭ

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_\_ г. Поток № \_\_\_

Зав. каф. ХТРЭ  
профессор, д. х. н.

Жерин И. И.

## 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ

Под **центрифугированием** понимают процесс разделения неоднородных систем (эмульсий и суспензий) в поле центробежных сил с использованием сплошных или проницаемых для жидкости перегородок. Процессы центрифугирования проводятся в машинах, называемых **центрифугами**.

**Центрифуга** представляет собой в простейшем виде вертикальный цилиндрический **ротор** со сплошными или перфорированными боковыми стенками. Ротор укрепляется на вертикальном валу, который приводится во вращение электродвигателем, и помещается в соосный цилиндрический неподвижный кожух, закрываемый съемной крышкой; на внутренней поверхности ротора с перфорированными стенками находится фильтровальная ткань или тонкая металлическая сетка.

Под действием центробежных сил суспензия разделяется на осадок и жидкую фазу, называемую **фугатом**. Осадок остается в роторе, а жидкая фаза удаляется из него.

В **отстойных центрифугах** со сплошными стенками производят разделение эмульсий и суспензий по принципу отстаивания, причем действие силы тяжести заменяется действием центробежной силы.

В **фильтрующих центрифугах** с проницаемыми стенками осуществляют процесс разделения суспензий по принципу фильтрации, причем вместо разности давлений используется действие центробежной силы.

В отстойной центрифуге разделяемая суспензия или эмульсия отбрасывается центробежной силой к стенкам ротора, причем жидкая или твердая фаза с большей плотностью располагается ближе к стенкам ротора, а другая фаза с меньшей плотностью размещается ближе к его оси; осадок (или фаза с большей плотностью) образует слой у стенок ротора, а фугат переливается через верхний край ротора.

В фильтрующей центрифуге разделяемая суспензия также отбрасывается к стенкам ротора и фазы разделяются; при этом жидкая фаза проходит сквозь фильтровальную перегородку в кожух и отводится из него, твердая фаза в виде осадка задерживается на внутренней стороне этой перегородки, а затем удаляется из ротора.

Таким образом, общие закономерности центрифугирования имеют сходство с закономерностями отстаивания и фильтрации. Однако процессы в отстойных и фильтрующих центрифугах сложнее соответствующих процессов в отстойниках и фильтрах. Это обусловлено тем, что в центрифугах вместо силы тяжести и разности давлений действует центробежная сила, достигающая больших значений, а вместо плоских слоев жидкости и осадка образуются слои с цилиндрическими граничными поверхностями, усложняющими зависимость хода процесса от геометрических факторов.

Разделение эмульсий в отстойных центрифугах обычно называют **сепарацией**, а устройства, в которых осуществляется этот процесс, - **сепараторами**. Примером такого процесса является отделение сливок от обрат.

При разделении суспензий в отстойных центрифугах различают процессы центробежного осветления и центробежного отстаивания. В первом случае из жидкости удаляются твердые примеси, содержащиеся в ней в незначительных количествах, например, при осветлении лаков и смазочных материалов. Во втором случае разделяется суспензия, содержащая твердую фазу в большом количестве, в частности суспензия угля в воде.

Разделение суспензий в фильтрующих центрифугах называют **центробежным фильтрованием**. Аналогично процессам разделения суспензий на фильтрах на фильтрующих центрифугах могут последовательно выполняться операции фильтрования с образованием осадка, промывки и отжима его с целью уменьшения влажности.

Процессы центрифугирования осуществляются периодически или непрерывно.

В связи со сложностью закономерностей центрифугирования и разнообразием конструкций применяемых на практике центрифуг разработка теории процесса и точных методов расчета его затруднительна. Следует считать, что наиболее надежные данные для расчета процесса центрифугирования можно получить на основании опытов по разделению данной эмульсии или суспензии на небольшой центрифуге, конструктивно по возможности воспроизводящей рассчитываемую. Однако в настоящее время установлены основные закономерности, характеризующие процессы центробежного отстаивания и центробежного фильтрования и позволяющие наметить оптимальные условия работы центрифуг.

### 1.1 Центробежная сила и фактор разделения

Создание центрифуг обусловлено стремлением повысить скорость разделения неоднородных систем в поле центробежных сил по сравнению со скоростью разделения этих систем в отстойниках или фильтрах. Поэтому целесообразно оценить в общем виде отношение центробежной силы к силе тяжести. Это можно сделать сравнением ускорений, действующих на тело в центробежном и гравитационном полях, так как применительно к телу определенной массы силы пропорциональны ускорениям.

Разделяющее действие центрифуг возрастает пропорционально величине центробежного фактора разделения, который представляет собой отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести

$$Kp = \frac{\omega^2 \cdot r}{g}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения, выраженная в радианах в секунду.

Если мы числитель и знаменатель этой дроби умножим на массу вращаемого тела, то в числителе мы получим центробежную силу, а в знаменателе силу тяжести. Следовательно, мы можем определить фактор разделения и как отношение центробежной силы к силе тяжести.

Если нам известно значение линейной скорости движения вращаемого тела ( $V$ , м/сек), то в соответствии с физическим смыслом понятие радиана (цен-

тральный угол, опирающейся на дугу, длина которой равна радиусу), угловая скорость вращения:  $\omega = \frac{V}{r}$ .

Подставляя это значение в (1), получим

$$Kp = \left(\frac{V}{r}\right)^2 \cdot \frac{r}{g} = \frac{V^2}{rg}. \quad (2)$$

Если скорость вращения задана числом оборотов в минуту, то угловая скорость вращения:  $\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}$ .

Подставив это значение в (1), получаем

$$Kp = \left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 \cdot \frac{r}{g} = \frac{\pi^2 n^2 r}{900g}. \quad (3)$$

Скорость осаждения определяется из равенства силы сопротивления и центробежной силы. В области Стокса для самых мелких частиц при  $Re < 2$  скорость осаждения

$$W_{\text{осажд}} = W_{\text{осажд}}^0 \cdot K_p, \quad (4)$$

где  $W_{\text{осажд}}^0$  – скорость осаждения данной частицы под действием силы тяжести.

В переходной области ( $Re=2 \div 500$ ):

$$W_{\text{осажд}} = W_{\text{осажд}}^0 \cdot K_p^{0,715}. \quad (5)$$

В автомодельной области ( $Re > 500$ )

$$W_{\text{осажд}} = W_{\text{осажд}}^0 \cdot K_p^{0,5}. \quad (6)$$

Так как требуемая поверхность осаждения обратно пропорциональна скорости осаждения, то поверхность осаждения в центрифуге меньше поверхности отстойника при равной производительности в области Стокса в  $K_p$  раз, в переходной области в  $K_p^{0,715}$  раз и в автомодельной области в  $K_p^{0,5}$  раз.

Как известно, в общем случае центробежная сила  $C$  выражается равенством:

$$C = \frac{mV^2}{r} = \frac{GV^2}{gr}, \quad (7)$$

где  $m$  – масса вращающегося тела, кг;  $G$  – вес вращающегося тела, Н;  $V$  – окружная или линейная скорость вращения, м/сек;  $r$  – радиус вращения, м.

Окружная скорость вращения определяется равенством:

$$V = \omega r = \frac{2\pi n}{60} r, \quad (8)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения, рад/сек;  $n$  – число оборотов в минуту.

Сопоставляя равенства (7) и (8), найдем:

$$C = \frac{G}{rg} \left(\frac{2\pi n}{60} r\right)^2 \quad (9)$$

или

$$C = \frac{Gm^2\pi^2}{900g}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что увеличение числа оборотов ротора значительно больше влияет на возрастание центробежной силы, чем увеличение диаметра ротора центрифуги.

Из равенства (7) видно, что ускорение в поле центробежных сил составляет  $V^2/r$ . отношение центробежного ускорения к ускорению силы тяжести называют **фактором разделения**:

$$Kp = \frac{V^2}{gr}, \quad (11)$$

приняв величину  $G = 1 \text{ Н}$ , из соотношений (7), (10), (11) получим:

$$Kp = \frac{m^2\pi^2}{900g}. \quad (12)$$

Например, для центрифуги с ротором диаметром 1000мм ( $r = 0,5\text{м}$ ), вращающимся со скоростью  $n = 1200$  оборотов в минуту, фактор разделения составляет:

$$Kp = \frac{0,5 \cdot 1200^2}{900} = 800. \quad (13)$$

При этом надо отметить, что в технической литературе при расчётах часто делается допущение о равенстве значений  $\pi^2$  и  $g$ , соответственно при таком допущении в формуле (12) эти константы сократятся.

Фактор разделения является важной характеристикой центрифуг, так как, при прочих равных условиях, разделяющее действие центрифуги возрастает пропорционально величине  $Kp$ . Расчет скорости осаждения в поле центробежных сил может быть произведен по уравнениям, описывающим скорости осаждения за счет сил тяжести в переходной и автотельной областях при подстановке в эти уравнения вместо критерия  $Ar$  произведение  $Ar Kp$ .

### 1.2 Процессы в отстойных центрифугах

В общем случае разделение суспензий в отстойных центрифугах складывается из стадий осаждения твердых частиц на стенках ротора и уплотнения образовавшегося осадка. Первая из этих стадий протекает по законам гидродинамики, вторая - по закономерностям механики грунтов (пористых сред).

При малой концентрации твердых частиц в исходной суспензии (приблизительно не более 4 объемн.%) наблюдается свободное осаждение их в роторе без образования четкой поверхности раздела между чистой жидкостью и еще нерасслоившейся суспензией. При повышении концентрации образуется ясная граница раздела вследствие стесненного осаждения твердых частиц.

Процессы разделения суспензий в отстойниках и отстойных центрифугах существенно различаются. В отстойниках гравитационное поле однородно, а интенсивность поля центробежных сил возрастает по мере движения частицы к периферии ротора. Это приводит к тому, что при вращении ротора с определенным числом оборотов на частицу действует возрастающая центробежная сила, обуславливающая ускорение ее движения. В отстойниках частицы

проходят через постоянные по площади поперечные сечения плоского слоя жидкости, а в отстойных центрифугах они перемещаются через возрастающие по площади поперечные сечения кольцевого слоя. Поэтому закономерности процессов в отстойниках нельзя распространить на процессы в отстойных центрифугах.

Разделяющая способность отстойных центрифуг характеризуется индексом производительности  $\Sigma$ , который является произведением площади цилиндрической поверхности осаждения  $F$  в роторе на фактор разделения  $Kp$ :

$$\Sigma = F \cdot Kp, \quad (14)$$

откуда

$$\frac{\Sigma}{F} = Kp. \quad (15)$$

Учитывая, что фактор разделения выражает отношение скоростей отстаивания частиц в отстойной центрифуге и отстойнике, в соответствии с равенством (15) величину  $\Sigma$  следует считать равной площади отстойника, эквивалентного по производительности для данной суспензии рассматриваемой центрифуге, который соответствует площади отстойника, эквивалентного по производительности для данной суспензии площади осаждения рассматриваемой центрифуги.

В соответствии с зависимостью скорости осаждения в центрифуге от  $K_p$  имеем в области Стокса

$$\Sigma = F_{\text{центр}} \cdot K_p, \quad (19)$$

где  $F_{\text{центр}}$  – поверхность центрифуги, имеющей равную производительность с отстойником.

В промежуточной области

$$\Sigma = F_{\text{центр}} \cdot K_p^{0,715}. \quad (20)$$

В автомодельной области

$$\Sigma = F_{\text{центр}} \cdot K_p^{0,5}. \quad (21)$$

Как видно из равенств (17) и (18), в этих областях площадь отстойника, эквивалентного по производительности рассматриваемой центрифуге возрастает не пропорционально фактору разделения, а менее интенсивно.

Индекс производительности  $\Sigma$  отражает влияние всех конструктивных особенностей осадительной центрифуги, определяющих ее разделительную способность.

Рассмотрим выражение для индекса производительности в ламинарной области (области Стокса) применительно к цилиндрическому ротору центрифуги, в котором находится слой жидкости. На рис.1 дана простейшая схема действия отстойной центрифуги. На практике толщина слоя жидкости  $h$  значительно меньше диаметра ротора  $D$ , поэтому величину фактора разделения можно отнести к среднему диаметру  $(D-h)$ . Тогда в соответствии с выражением (3)

$$Kp = \frac{\pi^2 n^2}{900g} \cdot \frac{D-h}{2}.$$

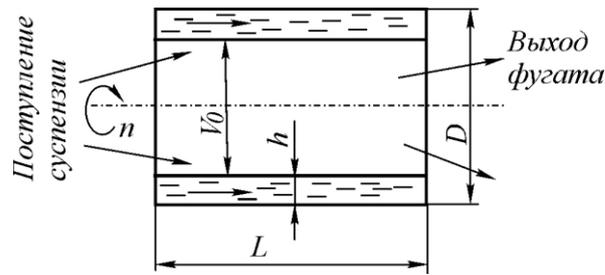


Рис. 1. Схема действия отстойной центрифуги

Площадь цилиндрической поверхности осаждения в роторе

$$F = \pi(D-h) \cdot L. \quad (19)$$

Отсюда

$$\Sigma = F \cdot Kp = \pi \cdot L \frac{(D-h)^2 n^2 \pi^2}{1800g}. \quad (20)$$

Если принять, что жидкость в роторе перемещается не по всему кольцевому пространству, занимаемому слоем, а только по тонкой внутренней зоне кольцевого пространства (поверхностный режим течения), то приближенно можно полагать

$$Kp = \frac{r_0 n^2 \pi^2}{900g} \quad \text{и} \quad F = 2\pi r_0 L, \quad (21)$$

где  $r_0$  - радиус свободной поверхности жидкости.

В этом случае

$$\Sigma = FKp = 2\pi L \frac{r_0^2 n^2 \pi^2}{900g}. \quad (22)$$

Равенство (14) применимо при условии, если осаждение твердых частиц суспензии происходит при ламинарном режиме. Вследствие большого значения центробежной силы осаждение частиц в центрифугах может происходить в условиях переходного и турбулентного режимов. Индекс производительности выражается следующим образом:

в переходном режиме

$$\Sigma = FKp^{0,715}, \quad (23)$$

в турбулентном режиме

$$\Sigma = FKp^{0,5}. \quad (24)$$

Как видно из равенств (23) и (24), в этих случаях площадь отстойника, эквивалентного по производительности рассматриваемой центрифуге, возрастает не пропорционально фактору разделения, а менее интенсивно.

Производительность осадительных центрифуг в действительности оказывается пониженной по сравнению с производительностью, вычисленной на основе рассчитанной скорости осаждения твердых частиц в центробежном поле. Уменьшение производительности объясняется, в частности, следующими причинами: отставанием скорости вращения жидкости от скорости вращения ротора, приводящим к уменьшению центробежной силы, действующей на частицу; неравномерностью течения жидкости вдоль ротора и увлечением осадившихся частиц с его стенок; образованием вихревых зон,

взмучивающих частицы. В связи с этим вводят понятие о коэффициенте эффективности отстойной центрифуги

$$\zeta_{и} = \frac{Q_{Д}}{Q_{Т}}, \quad (25)$$

где  $Q_{Д}$  и  $Q_{Т}$  - действительная и рассчитанная производительности центрифуги, м<sup>3</sup>/сек.

Значение коэффициента  $\zeta_{и}$  для отстойных центрифуг разных конструкций различно и находится опытным путем. Пользуясь соотношением (25), определяют действительную производительность центрифуги.

## 2. УСТРОЙСТВО ЦЕНТРИФУГ

По значению фактора разделения центрифуги можно условно разделить на две группы: нормальные центрифуги ( $Kp < 3500$ ) и сверхцентрифуги ( $Kp > 3500$ ).

Нормальные центрифуги применяются главным образом для разделения различных суспензий, за исключением суспензий с очень малой концентрацией твердой фазы, а также для удаления влаги из штучных материалов. Сверхцентрифуги служат для разделения эмульсий и тонкодисперсных суспензий.

Нормальные центрифуги могут быть отстойными и фильтрующими. Сверх центрифуги являются аппаратами отстойного типа и подразделяются на трубчатые сверхцентрифуги, используемые для тонкодисперсных суспензий, и жидкостные сепараторы, служащие для разделения эмульсий.

Существенным признаком типа центрифуг является способ выгрузки из них осадка. Выгрузка производится вручную, при помощи ножей или скребков, шнеков и поршней, движущихся возвратно-поступательно (пульсирующих), а также под действием силы тяжести и центробежной силы.

По расположению оси вращения различают вертикальные, наклонные и горизонтальные центрифуги. Вал ротора вертикальной центрифуги имеет опору внизу или подвешивается сверху.

В зависимости от организации процесса центрифуги делятся на периодически и непрерывно действующие.

## 3. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рис.2) состоит из ротора (1), электродвигателя(2), рабочих кювет (3), пробирок с исследованными системами (4) и пульта управления (5).

На пульте управления смонтирован часовой механизм для автоматического выключения привода центрифуги, тахометр для контроля числа оборотов ротора, пакетный переключатель числа оборотов ротора и кнопка электромагнитного тормоза.

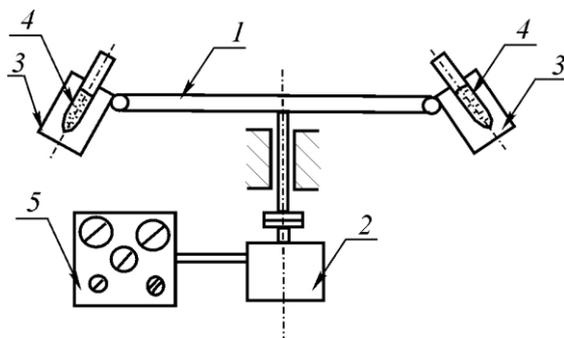


Рис. 2. Схема лабораторной установки

#### 4. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

В две пробирки наливаются по 5 мл 0,1N р-ра хлорида или сульфата железа (III), а затем к ним добавляются по 5 мл 0,1N р-ра аммиака или едкого натра. Пробирки устанавливаются в центрифугу симметрично относительно оси вращения. После включения центрифуги и набора заданной скорости вращения центрифуга вращается с постоянной скоростью в течение времени  $t_1, t_2, t_3, t_4$  и  $t_5$  а затем выключается.

После остановки центрифуги вынимаются пробирки и измеряется высота осветленного раствора и высота осадка.

Такую же систему компонентов помещают в третью пробирку («спокойную» пробирку), однако не устанавливают её в центрифугу, а оставляют в штативе и наблюдают за процессом осаждения под действием сил тяжести.

Строится график: высота осветленной части раствора, как функция времени осаждения.

На линейной части графика определяется скорость осаждения, а по ней для самых мелких частиц по формуле Стокса вычисляется диаметр осаждаемых частиц:

$$\omega_{oc} = \frac{d^2 g (\rho_{тв} - \rho_{жид})}{18\mu} \cdot Kp, \quad (26)$$

где  $Kp$  – центробежный фактор разделения.

$$Kp = \frac{\omega^2 R}{g} = \frac{v^2}{R \cdot g}, \quad (27)$$

здесь  $\omega$  - угловая скорость вращения, радиан/секунда,  $R$  - радиус вращения,  $g$  - ускорение силы тяжести,  $v$  - линейная скорость.

Если скорость вращения дается в оборотах в минуту ( $n$ ), то

$$\omega = \frac{\pi n}{60} \quad \text{и} \quad Kp = \frac{\pi^2 n^2 R}{900g}. \quad (28)$$

Подсчитывается критерий  $Re$  для подтверждения того, что процесс осаждения проходит в области Стокса, а так же отношение скорости осаждения в центрифуге и в «спокойной» пробирке.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ

При обработке экспериментальных данных необходимо правильно оценивать погрешности измерений и расчета.

Экспериментальные установки оснащены измерительными устройствами и приборами, использование которых для измерения того или иного параметра процесса сопряжено с погрешностями. Погрешности могут быть систематическими и случайными. Кроме того, при несоблюдении условий проведения опытов или недостаточном внимании исполнителя работы могут быть грубые погрешности (промахи). Для оценки точности измерений применяют статистическую теорию ошибок. В частности, удобным вычислительным методом является метод наименьших квадратов, Приведем для примера порядок вычисления погрешностей при прямых измерениях:

### 1. Найти среднее значение

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где  $n$  – число измерений в серии (выборке);  $x_i$  – численное значение измеренной величины).

### 2. Найти единичные отклонения

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x}. \quad (2)$$

### 3. Проверить выполнение тождества

$$\sum_{i=1}^n \Delta x_i = 0 \quad (3)$$

(сумма всех положительных и отрицательных отклонений от среднего должна равняться нулю).

### 4. Вычислить квадраты отклонений

$$(\Delta x_i)^2. \quad (4)$$

### 5. Найти среднее квадратичное отклонение

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 / (n-1)}. \quad (5)$$

### 6. Выявление промахов измерения

Выявить и исключить из таблицы измерений промахи (приблизительно считая промахами измерения, при которых  $\Delta x_i > 2S_n$ ).

### 7. Найти среднее квадратичное отклонение среднего

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 / [n(n-1)]}. \quad (6)$$

### 8. Определение доверительной вероятности

Задаться значением надежности (доверительной вероятности  $\alpha$  - обычно 0,95).

### 9. Определение критерия Стьюдента

Выбрать из таблицы коэффициент (критерий) Стьюдента  $t_{\alpha n}$  при данных  $\alpha$  и  $n$  (число выборок может быть как угодно большим, но при проведении лабораторных опытов обычно  $n = 5-7$ , не менее 4).

Таблица 1. Значение коэффициентов Стьюдента « $t_{\alpha n}$ »

Доверительная вероятность	Выборка (n)									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,70	2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
0,95	12,7	4,3	3,2	2,8	2,6	2,4	2,4	2,3	2,3	2,1
0,99	63,7	9,9	5,8	4,6	4,0	3,7	3,5	3,4	3,3	3,0

### 10. Вычислить погрешность результата измерения

$$\Delta x = \varepsilon_{\alpha} = t_{\alpha n} \times S_x^* \quad (7)$$

\* При умножении критерия Стьюдента  $t_{\alpha n}$  на  $S_n$  определяют, в каком интервале находится истинное значение измеряемой величины (при отсутствии систематической погрешности). Если желательно получить один и тот же интервал погрешности при измерениях, а значит и одинаковый коэффициент  $t_{\alpha n}$ , например, 3,1, то при  $\alpha = 0,95$  достаточно провести три - четыре измерения, а при  $\alpha 0,99$  - десять.

### 11. Ввод результатов в таблицу

Внести в таблицу окончательный результат:  $\bar{x} \pm \Delta x$ ;

### 12. Определение относительной погрешности

Найти относительную погрешность (в %):

$$\varepsilon_x = \left( \frac{\Delta x}{\bar{x}} \right) \times 100. \quad (8)$$

### ПРИМЕР

Определение погрешностей измерения и расчета

1. Произвели измерение величины параметра "X":

15, 18, 14, 16;

2. Находим среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где  $n$  – число измерений в серии;

$x_i$  – численное значение измеренной величины;

$$\bar{x} = \frac{15+18+14+16}{4} = 15,75;$$

3. Находим единичные отклонения от среднего значения:

$$\Delta x_i = x_i - \bar{x},$$

$$15 - 15,75 = -0,75,$$

$$18 - 15,75 = 2,25,$$

$$14 - 15,75 = -1,75,$$

$$16 - 15,75 = 0,25;$$

4. Проверяем согласие с соотношением:

$$\sum_1^n \Delta x_i = 0$$

(т.к. сумма всех положительных и отрицательных отклонений от среднего должна равняться нулю)

$$-0,75 + 2,25 - 1,75 + 0,25 = 0;$$

5. Вычисляем квадраты отклонений  $(\Delta x_i)^2$ :

$$(-0,75)^2 = 0,56,$$

$$(2,25)^2 = 5,06,$$

$$(-1,75)^2 = 3,06,$$

$$(0,25)^2 = 0,0625;$$

6. Находим среднее квадратичное отклонение:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta x_i)^2}{(n-1)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,56 + 5,06 + 3,06 + 0,0625}{3}} = \sqrt{\frac{8,75}{3}} = 1,7;$$

7. Выявляем и исключаем из таблицы промахи (приблизительно считая промахами измерения, при которых  $\Delta x_i > 2S_n$ ):

$$(2S_n = 2 \cdot 1,7 = 3,4),$$

$$\Delta x_i:$$

$$-0,75 < 3,4,$$

$$2,25 < 3,4,$$

$$-1,75 < 3,4,$$

$$0,25 < 3,4;$$

8. Находим среднее квадратичное отклонение среднего:

$$S_x = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (\Delta x_i)^2}{[n(n-1)]}} = \frac{1,7}{\sqrt{4}} = \frac{1,7}{2} = 0,85;$$

9. Задаемся значением надежности (доверительной вероятности  $\alpha$  - обычно 0,95);

10. Выбираем из таблицы коэффициент (критерий) Стьюдента " $t_{\alpha n}$ " при данных  $\alpha$  и  $n$  (число выборок может быть как угодно большим, но при проведении лабораторных опытов обычно  $n = 5-7$ , не менее 4),  $t_{\alpha n} = 3,2$ ;

11. Вычисляем погрешность результата измерения:

$$\Delta x = 3,2 \cdot 0,85 = 2,75,$$

При умножении критерия Стьюдента  $t_{\alpha n}$  на  $S_{\bar{x}}$  определяем, в каком интервале находится истинное значение измеряемой величины (при отсутствии систематической погрешности). Если желательно получить один и тот же интервал погрешности при измерениях, а значит и одинаковый коэффициент " $t_{\alpha n}$ ", например, 3,2, то при  $\alpha = 0,95$  достаточно провести три-четыре измерения, а при  $\alpha = 0,99$  – десять.

Вносим в таблицу окончательный результат:  $\bar{x} \pm \Delta x$ , т.е.  $15,75 \pm 2,72$ .

Находим относительную погрешность (в %):

$$\varepsilon_x = \left( \frac{\Delta x}{\bar{x}} \right) \cdot 100 = \frac{2,72}{15,75} \cdot 100 = 17,3\%.$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.А.Безденежных и др. Руководство к практическим занятиям по лаборатории процессов и аппаратов химической технологии: Учебное пособие для вузов (Под ред. чл.-корр. АН СССР П.Г.Романова. Л,- Химия, 1990.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.- Химия, 1973.
3. Соколов В.И. Современные промышленные центрифуги. М.- Машиностроение, 1967.
4. Шкоропад Д.Е. Центрифуги для химических производств. М.- Машиностроение, 1975.