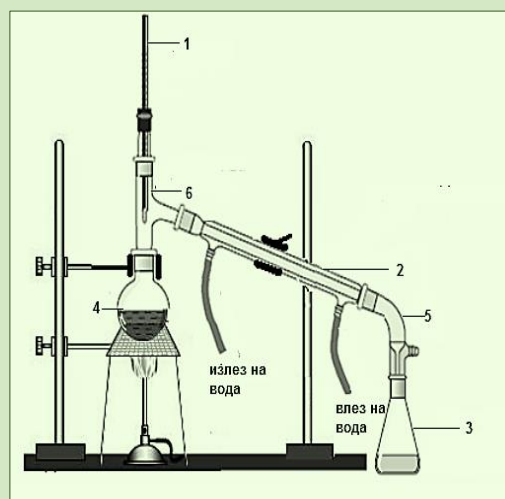
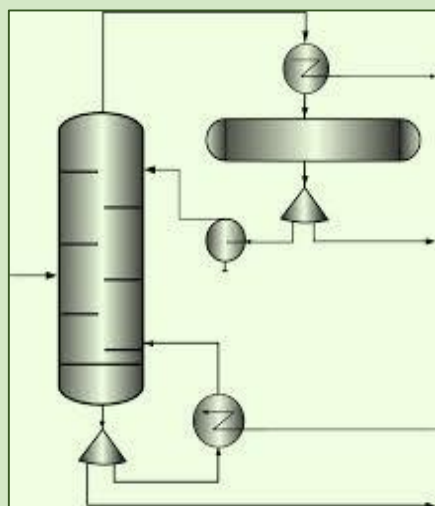




Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

Дарко Андроников  
Соња Јордева

## ОПЕРАЦИИ НА ПРЕНОС НА МАСА ПРАКТИКУМ





Дарко Андроников

Соња Јордева

ОПЕРАЦИИ НА ПРЕНОС НА МАСА  
ПРАКТИКУМ

**Автори:**

Доц. д-р Дарко Андроников  
Асс. м-р Соња Јордева

**ОПЕРАЦИИ НА ПРЕНОС НА МАСА  
ПРАКТИКУМ**

**Рецензенти:**

Доц. д-р Киро Мојсов  
Доц. д-р Ацо Јаневски

**Лектор:**

Даниела Такева

**Техничко уредување:**

м-р Соња Јордева  
д-р Дарко Андроников

**Издавач:**

Универзитет „Гоце Делчев“ – Штип

CIP - Каталогизација во публикација  
Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

66.02:531.422.04(075.8)(076)

АНДРОНИКОВ, ДАРКО

Операции на пренос на маса [Електронски извор] : практикум / Дарко  
Андроников, Соња Јордева. - Штип : Универзитет "Гоце Делчев",  
Технолошко-технички факултет, 2016

Начин на пристап (URL): <https://e-lib.ugd.edu.mk/naslovna.php>. -

Текст во PDF формат, содржи 77 стр. - Наслов преземен од екранот.  
- Опис на изворот на ден 27.01.2016. - Библиографија: стр. 77

ISBN 978-608-244-282-2

1. Јордева, Соња [автор]

а) Пренос на маса - Хемиско-технолошки операции - Високошколски  
учебници - Вежби  
COBISS.MK-ID 100377610

УНИВЕРЗИТЕТ „ГОЦЕ ДЕЛЧЕВ“ – ШТИП

ТЕХНОЛОШКО-ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ



Доц. д-р Дарко Андроников

Асс. м-р Соња Јордева

**ОПЕРАЦИИ НА ПРЕНОС НА МАСА  
ПРАКТИКУМ**

Штип, 2016

## ПРЕДГОВОР

Овој практикум е помошен материјал, односно додаток на скриптата за студентите кои го слушаат предметот *Операции на пренос на маса* како посебен предмет, како и за дел од предметите *Кинетика и феномени на пренос* и *Технолошки операции во прехранбената индустрија* во втора година на Технолошко-техничкиот факултет при Универзитетот „Гоце Делчев“ во Штип и со самото тоа првенствено е наменет за студентите на овој факултет. Практикумот можат да го користат и студенти кои изучуваат технолошки операции во текстилната или други гранки на индустријата. Потребата од овој практикум произлезе од недостатокот на литература од оваа област. Практикумот содржи: кратки изводи од теоријата неопходни за објаснување на методите за пресметка на конкретни проблеми, пресметковни задачи и упатства за лабораториски вежби. Практикумот е конципиран според предметната наставна програма и е усогласен со содржините од скриптата по истиот предмет. Материјалот е структуриран во 11 поглавја – едно воведно и поглавјата: материјални биланси, дифузија, конвективен пренос на маса, меѓуфазен пренос на маса, адсорпција, рамнотежа на фази, дестилација, екстракција, кристализација и сушење.

Практикумот му овозможува на студентот стекнување на знаења и вештини за составување и пресметка на тотален, делумен или компонентен биланс во некој хемиски процес и решавање на проблемски задачи од областа на дифузија, конвективен и меѓуфазен пренос на маса, фазна рамнотежа и сушење. Исто така, студентот ќе се запознае со основните лабораториски апаратури и начини за изведување на процесите дестилација, екстракција и кристализација.

Како автори на овој практикум ќе бидеме бескрајно благодарни за сите забелешки и сугестии во однос на овој ракопис во насока на негово подобрување.

*Штип, септември, 2015 година*

*Авторите*

## СОДРЖИНА

|  |    |
|--|----|
| <b>1. ВОВЕД</b> .....  | 1  |
| <b>2. МАТЕРИЈАЛНИ БИЛАНСИ</b> .....                                | 4  |
| <b>3. ДИФУЗИЈА</b> .....   | 17 |
| 3.1. Еквимоларна противструјна дифузија.....                       | 22 |
| 3.2. Дифузија низ инертна компонента.....                          | 24 |
| 3.3. Нестационарна дифузија.....                                   | 28 |
| <b>4. КОНВЕКТИВЕН ПРЕНОС НА МАСА</b> .....                         | 31 |
| <b>5. МЕЃУФАЗЕН ПРЕНОС НА МАСА</b> .....                           | 35 |
| <b>6. АДСОРПЦИЈА</b> .....   | 39 |
| <b>7. РАМНОТЕЖА НА ФАЗИ</b> .....                                  | 45 |
| <b>8. ДЕСТИЛАЦИЈА</b> .....  | 50 |
| 8.1. Дестилација под атмосферски притисок.....                     | 54 |
| 8.3. Фракциона дестилација.....                                    | 57 |
| 8.4. Дестилација под намален притисок (вакуумска дестилација)..... | 59 |
| <b>9. ЕКСТРАКЦИЈА</b> .....  | 61 |
| <b>10. КРИСТАЛИЗАЦИЈА</b> .....                                    | 65 |
| <b>11. СУШЕЊЕ</b> .....  | 70 |
| 11.1. Конвективно сушење на цврст материјал.....                   | 70 |
| 11.2. Брзина на сушење.....  | 73 |
| <b>12. БИБЛИОГРАФИЈА</b> .....                                     | 78 |

## 1. ВОВЕД

Разбирањето на феномените на пренос е од суштинско значење за разбирање на многу процеси во областа на инженерството, земјоделството, метеорологијата, физиологијата, биологијата, аналитичката хемија, науката за материјали, фармацијата и многу други области на применетата наука. Во феномените на преносот спаѓаат преносот на количество движење, пренос на топлина и пренос на маса. Сите три големини се пренесуваат на аналоген начин, многу често и заедно се појавуваат и тесно се поврзани на молекуларно ниво, но овој практикум е концентриран на конкретните проблеми од преносот на маса.

**Под пренос на маса се подразбира пренесување на супстанција на молекуларно ниво од област со поголема во област со помала концентрација.** Во технолошките операции во принцип секогаш доаѓа до некој пренос: маса, топлина или количество движење, меѓутоа треба веднаш да се забележи една општа законитост дека до вакво пренесување може да дојде само ако постои некоја **погонска сила**. Молекулски пренос на маса се случува во сите операции на пренос на маса, и тоа најмалку во една фаза (адсорпција, кристализација или кондиционирање на воздухот), а често во двете фази (апсорпција, екстракција течно-течно, екстракција цврсто-течно и дестилација). На пример, кај адсорпцијата адсорбатот дифундира само низ флуидната фаза до површината на адсорбенсот за кој се врзува, или кај кристализацијата растворот дифундира низ матичната лужина до површината на кристалот каде што се таложи, кај влажнењето или сушењето на воздухот се случува само дифузија на водена пара низ гасната фаза од или кон граничната површина воздух-вода. Кај апсорпцијата, растворната компонента на гасната смеса дифундира низ гасната фаза кон граничната површина гас-течност, минува низ граничната површина и дифундира низ течната фаза.

Современата хемиска технологија ја сочинуваат бројни производни процеси, различни според хемиската природа и физичките својства на почетните супстанции, интермедиерите и крајните продукти, а исто така различни според карактерот и условите на протекување на технолошките процеси. Заедно со хемиските реакции, кои се основа на хемиското производство, се одигруваат и други физички и физичко-хемиски процеси, како резултат на што супстанциите претрпуваат длабоки промени во структурата, составот и агрегатната состојба. Меѓутоа, и покрај големата разнообразност на производните процеси, сепак бројот на елементарните (еднотипни) физички и физичко-хемиски процеси е многу мал и изнесува одвај дваесет. Од овој ограничен број основни операции (процеси) или од некои нивни делови, но со различна последователност и при различни работни услови, се создаваат технологиите на производство на разновидни хемиски производи и материјали. Елементарните процеси или операции, вклучени во различни гранки на хемиската технологија, се опишуваат (карактеризираат) со општи законитости, се изведуваат во аналогни, според принципот на работа, машини и апарати, а тие ги сочинуваат т.н. технолошки операции. Анализата на принципите на одигрување на овие основни операции и нивните пресметки, како и разработката на општите методи за пресметување на процесите и производните апарати и машини и воопштувањето на принципите за составување производни шеми на хемиско-технолошки процеси за комплексно најрационално искористување на суровините и енергијата е друга важна задача на технолошките операции, бидејќи тоа овозможува да се создадат општи начела за наоѓање оптимални услови за одвивање на производствата во различни гранки на хемиската технологија. Оваа сложена задача технолошките операции ја остваруваат со примена на методи и технички средства на современата хемиска кибернетика и претставува еден од најплодотворните начини за изучување на сложените технолошки операции и нивно обликување во производни процеси.



Проектирањето на контактен уред подразбира целосно дефинирање во поглед на хидродинамиката и преносот на маса кои се меѓусебно тесно поврзани. Анализата на контактниот уред значи проверка на можноста за извршување на одредена задача на сепарација преку одредена операција на пренос на маса во постоечкиот контактен уред. При анализата и проектирањето на операцијата на пренос на маса мора да се земат предвид:

- **Правилото на фази и законите за рамнотежа на фазите;**
- **Равенките на биланс на маса во однос на тековите на фазите и компонентите што се разменуваат меѓу фазите;**
- **Равенката на кинетика на пренос на маса од една во друга фаза.**

Правилото на фази ги одредува условите на постоење на дадениот број на фази, додека законите на рамнотежа ја дефинираат распределбата на компонентата А меѓу фазите. Зависноста која ја поврзува концентрацијата на компонентата А во две фази во состојба на рамнотежа се вика **рамнотежна зависност** или **рамнотежна линија**.

Равенките на биланс на маса ги одредуваат условите за остварување на операцијата на пренос на маса. Овие таканаречени **оперативни (работни) услови** се одредени со концентрациите на компонентата А во фазите и протоците на фазите на краевите на контактниот уред. Зависноста меѓу концентрацијата на компонентата А и протокот на фазите која се утврдува врз основа на билансот на маса на компонентата А за дел од контактниот уред, поаѓајќи од излезот на полесната фаза, се вика **оперативна или работна линија**.

Равенката на кинетика на пренос на маса ги дефинира условите кои ја одредуваат брзината на меѓуфазниот пренос и одредена е со механизмот на пренос на маса. Кинетиката на пренос на маса зависи од:

- **Разликата меѓу рамнотежната и оперативната концентрација;**
- **Физичките особини на системот;**
- **Хидродинамичките услови во контактниот уред.**

Бројни проблеми во хемиската инженерска практика се решаваат со составување на материјални, енергетски и биланси на количина на движење. Масените и енергетските биланси претставуваат наједноставен вид на пресметки чија цел е задоволување на материјалните и (или) енергетските биланси на еден или на повеќе уреди при што поединечните процеси или уреди се набљудуваат како „црна кутија“.



Слика 1.1: Упростена шема на хемиско-технолошки процес

Тоа значи дека моделот не содржи опис на брзината на процесот (на пример, израз за брзина на хемиската реакција во реакторот или израз за тоplotен флуks во разменувачот на топлина), туку наместо нив се дадени податоци како степен на „напредување“, односно ефект на процесот (на пример, степен на конверзија на

реактантот во реакторот, влезна и излезна температура на флуидот во разменуваачот на топлина и слично).

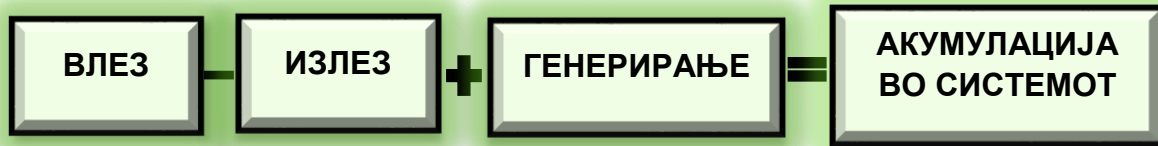
Упростена шема на хемиско-технолошки процес е прикажана на слика 1.1.

Хемиско-инженерските проблеми може да се поделат на:

- **Проблеми на проектирање (создавање) на процесот;**
- **Проблеми на водење (одржување) на процесот.**

## 2. МАТЕРИЈАЛНИ БИЛАНСИ

При изведување на равенката на материјалниот биланс се поаѓа од равенката за општиот биланс за отворен систем прикажана шематски на слика 2.1.



Слика 2.1: Шематско прикажување на општ материјален биланс

Под терминот **генерирање** се подразбира настанување како позитивно генерирање или исчезнување како негативно генерирање на некоја компонента како резултат на одвивање на една или на повеќе хемиски реакции во системот.

Материјалниот биланс може да биде:

- **вкупен (тотален)**, ако се составува за процесот во целост или за комплетната постројка;
- **делумен (парцијален)**, ако се составува за одредена фаза на процесот или за одредена единица на постројката.

Ако материјалниот биланс се составува само за **една супстанција** или компонента од процесот, тогаш се нарекува **компонентен биланс**.

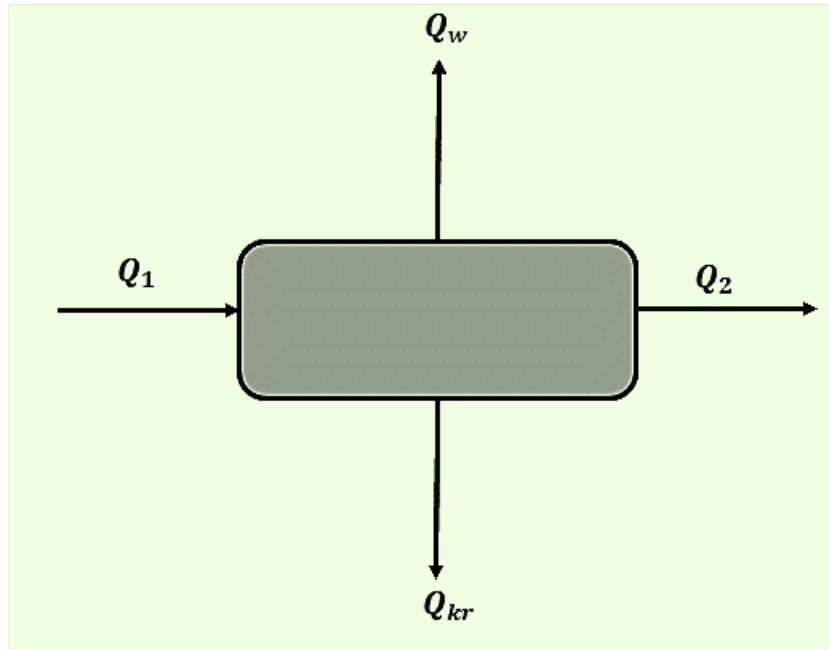
Количината на компонентата во системот (**kg** или **mol**) се добива како производ од вкупната количина на материјата во системот и концентрацијата на компонентата. Аналогно на ова, протокот на компонентата се изразува во (**kg/s**) или (**mol/s**).

### Пример 2.1:

Во континуиран уварувач се уварува 25 (t/h) раствор со состав: натриум хлорид ( $NaCl$ ) 10 %, натриум хидроксид ( $NaOH$ ) 10 % и вода ( $H_2O$ ) 80 %. За време на процесот на уварувањето од растворот се отпарува одредена количина вода, додека натриум хлоридот преципитира во облик на кристали кои се таложат и се отстрануваат од уварениот раствор. Уварениот раствор го напушта уварувачот со следниов состав: натриум хлорид ( $NaCl$ ) 2 %, натриум хидроксид ( $NaOH$ ) 50 % и ( $H_2O$ ) 48 %.

#### Да се пресметаат:

- количината на уварениот раствор (kg/h);
- количината вода што се отпарува (kg/h);
- количината  $NaCl$  што перципитира (kg/h).



Слика 2.2: Материјален биланс за примерот 2.1

**Решение:**

Шематски приказ на системот опишан во задачата е даден на слика 2.2. каде што:

$Q_1$  – масен проток на растворот што се уварува во уварувачот,

$Q_2$  – масен проток на уварениот раствор на излезот од уварувачот,

$Q_w$  – масен проток на отпарената вода,

$Q_{kr}$  – масен проток на добиените кристали.

За решавање на задачата треба да се искористат равенките на **ОПШТИОТ И КОМПОНЕНТНИОТ БИЛАНС** дадени во скриптата „Операции на пренос на маса“ во поглавјето за материјален биланс. Количината на  $NaOH$  која единствено во системот останува непроменета, ќе ја пресметаме од компонентниот биланс направен во однос на  $NaOH$  каде што со  $x_1$  е означен масениот удел на  $NaOH$  во влезниот раствор, а со  $x_2$  масениот удел на  $NaOH$  во излезниот раствор, т.е.:

$$\text{а) } Q_1 x_1 = Q_2 x_2$$

$$Q_2 = Q_1 \left( \frac{x_1}{x_2} \right) = 25 \cdot 10^3 \cdot 0,1 / 0,5 = 5000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

**б)** Количината вода што се отпарува се пресметува од компонентниот биланс направен во однос на вода, каде што со  $x_{1w}$  е означен масениот удел на водата во влезниот раствор, а со  $x_{2w}$  масениот удел на водата во излезниот раствор:

$$Q_1 x_{1w} = Q_2 x_{2w}$$

од каде:

$$Q_w = 25 \cdot 10^3 \cdot 0,8 - 5000 \cdot 0,48 = 17600 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

в) Количината што перципитира во вид на кристали се пресметува од општиот биланс на уварувачот, односно:

$$Q_1 = Q_2 + Q_{kr} + Q_w$$

$$Q_{kr} = 25 \cdot 10^3 \cdot 0,8 - 17600 = 2400 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

Или од компонентниот биланс направен во однос на  $\text{NaCl}$ :

$$Q_1 x_{1kr} = Q_{kr} + Q_2 x_{2kr}$$

$$Q_{kr} = 25 \cdot 10^3 \cdot 0,1 - 5000 \cdot 0,02 = 2400 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

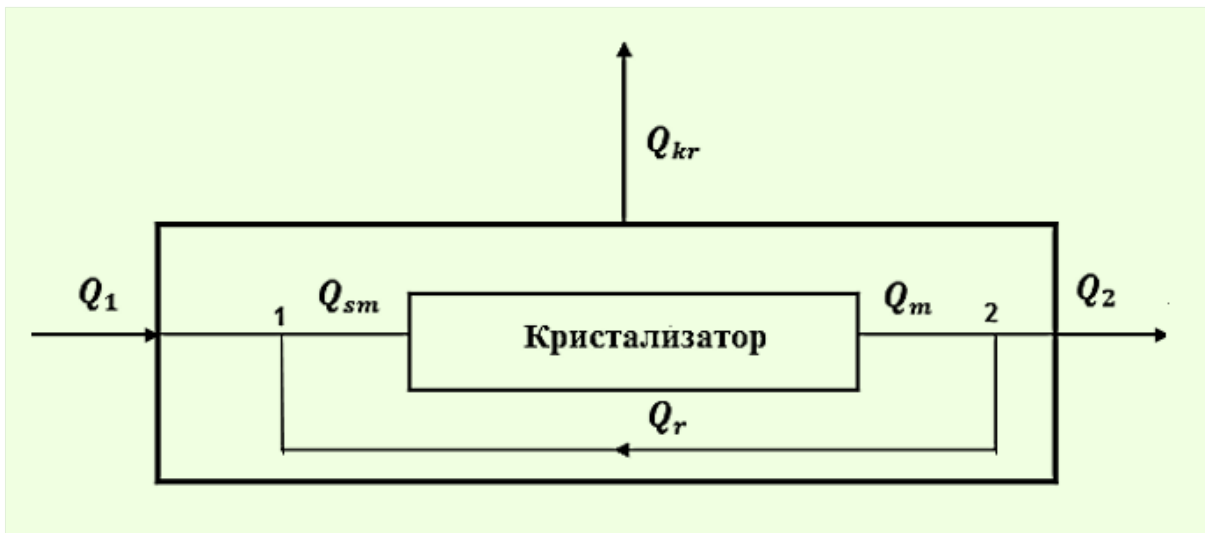
каде што:

$x_{1kr}$  – масениот удел на  $\text{NaCl}$  во влезниот раствор,

$x_{2kr}$  – масениот удел на  $\text{NaCl}$  во излезниот раствор.

### Пример 2.2:

10000  $\left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$  воден раствор кој содржи 22 %  $\text{KNO}_3$  и 17 %  $\text{NaNO}_3$  се воведува во еден кристализатор (слика 2.3.). Матичниот раствор го напушта кристализаторот со содржина на  $\text{KNO}_3$  од 12 %.



Слика: 2.3: Материјален биланс за примерот 2.2

### Да се пресметаат:

а) количината на рециркулираниот матичен раствор и количината на искристализираниот  $\text{KNO}_3$  (да се претпостави дека кристалите на  $\text{KNO}_3$  не содржат вода), ако 80 % од излезниот матичен раствор рециркулира;

б) концентрацијата на  $NaNO_3$  во матичниот раствор под претпоставка дека  $NaNO_3$  не кристализира;

в) количината и составот на почетниот раствор.

### Решение:

Ознаките на слика 2.3. се:

$Q_1, Q_2$  – масен проток на влезниот и излезниот раствор од системот,

$Q_{sm}$  – масен проток на влезната смеса во кристализаторот,

$Q_m$  – масен проток на матичен раствор,

$Q_r$  – рециркулиран матичен раствор,

$Q_{kr}$  – масен проток на искристализираниот  $KNO_3$ .

Преостанатите ознаки употребени во билансите поставени за оваа задача се:

$x'_1, x''_1$  – масени удели на  $KNO_3$  и  $NaNO_3$  во влезниот раствор,

$x'_2, x''_2$  – масени удели на  $KNO_3$  и  $NaNO_3$  во излезниот раствор,

$x'_{sm}, x''_{sm}$  – масени удели на  $KNO_3$  и  $NaNO_3$  на влезот во кристализаторот.

За системот може да се постават повеќе општи и компонентни билансни равенки:

Општиот биланс на системот е од облик:

$$Q_1 = Q_2 + Q_{kr} \quad (2.2.1)$$

Билансот на мешање на рециркулираниот со почетниот раствор е:

$$Q_{sm} = Q_1 + Q_r \quad (2.2.2)$$

Билансот на матичниот раствор е:

$$Q_m = Q_2 + Q_r \quad (2.2.3)$$

Парцијалните компонентни биланси за дел од системот (кристализаторот) во однос на  $KNO_3$ ,  $NaNO_3$  и  $H_2O$  се дадени со следниве равенства:

$$Q_{sm}x'_{sm} = Q_m x'_2 + Q_{kr} \quad (2.2.4)$$

$$Q_{sm}x''_{sm} = Q_m x''_2 \quad (2.2.5)$$

$$Q_{sm}(1 - x'_{sm} - x''_{sm}) = Q_m(1 - x'_2 - x''_2) \quad (2.2.6)$$

Изразите со кои се дадени компонентните биланси за точката на мешање 1 во однос на  $KNO_3$  и  $NaNO_3$  се:

$$Q_{sm}x'_{sm} = Q_1 x'_1 + Q_r x'_2 \quad (2.2.7)$$

$$Q_{sm}x''_{sm} = Q_1 x''_1 + Q_r x''_2 \quad (2.2.8)$$

Со замена на дадените вредности во равенките (2.2.5) и (2.2.6) се добива систем од две равенки со две непознати:

$$10000 \cdot 0,17 = Q_m x''_{sm}$$

$$10000 \cdot (1 - 0,22 - 0,17) = Q_m (1 - 0,12 - x''_2),$$

со чие решавање се добива:

$$Q_m = 8863,64 \text{ и } x''_2 = 0,192$$

Со замена, пак, на вредностите во равенката (2.2.4) се добива:

$$10000 \cdot 0,22 = 8863 \cdot 64 \cdot 0,12 + Q_{kr}$$

односно:

$$Q_{kr} = 1136,36 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$$

Количината на рециркулираниот матичен раствор се добива од условот на задачата:

$$Q_r = 0,8 \cdot Q_m = 0,8 \cdot 8863,4 = 7090,91 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right),$$

а количината на почетниот раствор се добива од равенките (2.2.7) и (2.2.8), односно:

$$1000 \cdot 0,22 = 2909,09 \cdot x'_1 + 7090,91 \cdot 0,12$$

од каде

$$x'_1 = 0,463 \quad \text{и}$$

$$1000 \cdot 0,17 = 2909,09 \cdot x''_1 + 7090,91 \cdot 0,192$$

од каде:

$$x''_1 = 0,016.$$

### Пример 2.3:

Постројка составена од уварувач и кристализатор (слика 2.4) се користи за континуирана преработка на  $8000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)$  раствор на натриум бихромат ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) со концентрација 6 %, со цел да се добие кристален бихромат. Во почетниот раствор на бихроматот се наоѓаат 0,15 % примеси. Растворот на бихроматот по уварувачот е со концентрација 38 %, а неговата концентрација во рециркулираниот раствор е 10 %. Максимално дозволената концентрација на примесите во системот е 7 %.

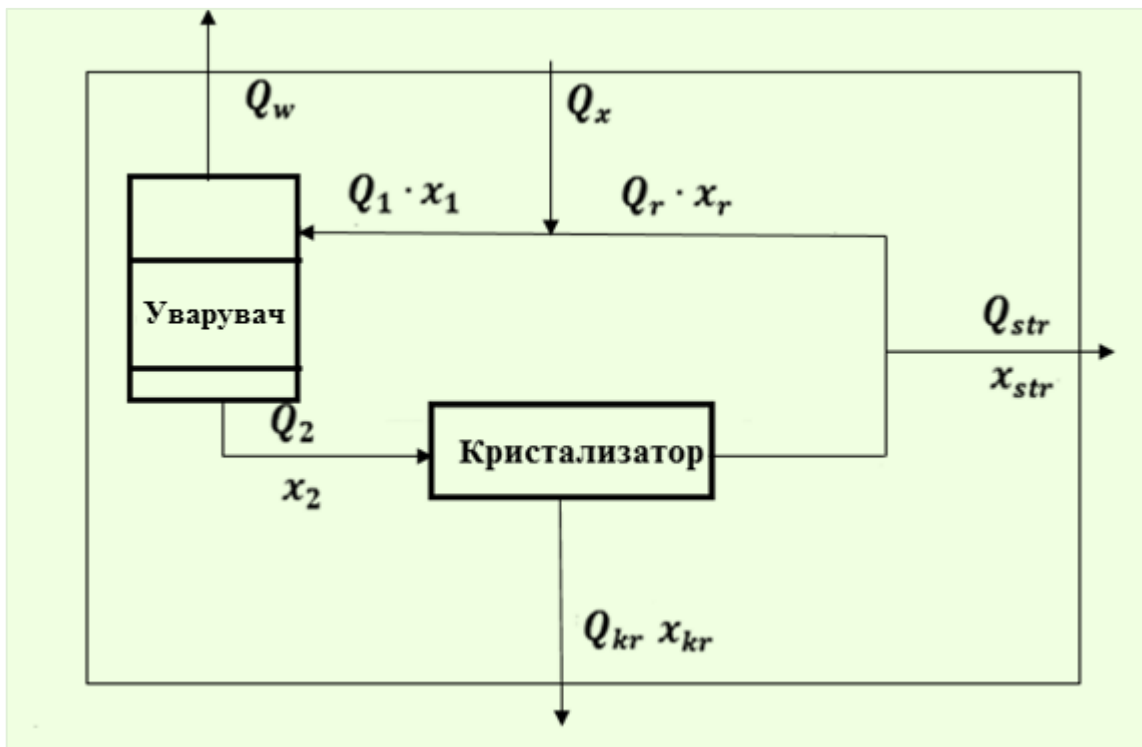
**Да се пресметаат:**

- а) количината и концентрацијата на растворот што влегува во уварувачот;
- б) количината на упарената вода во уварувачот,
- в) количината на добиените кристали на бихроматот ( $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) и количината на отстрануваниот раствор од системот.

### Решение:

Ознаките на слика 2.4 се:

- $Q$  – масен проток на влезниот раствор од системот,  
 $Q_w$  – масен проток на запарената вода во уварувачот,  
 $Q_{str}$  – масен проток на отстрануваниот раствор од системот,  
 $Q_{kr}$  – масен проток на искристализираниот бихромат,  
 $x, x_{str}$  – масен удел на  $Na_2Cr_2O_7$  во влезниот и излезниот раствор,  
 $x_r$  – масен удел на  $Na_2Cr_2O_7$  во рециркулираниот раствор,  
 $x_1$  – масен удел на  $Na_2Cr_2O_7$  на влезот во уварувачот,  
 $x_2, x_{kr}$  – масен удел на  $Na_2Cr_2O_7$  на влезот и на излезот од кристализаторот.



Слика 2.4: Материјален биланс за примерот 2.3

Според изразот за општиот материјален биланс за дадениот систем може да се напише:

$$Q = Q_w + Q_{str} + Q_{kr}$$

додека компонентниот биланс направен во однос на бихроматот за целиот систем е од облик:

$$Q \cdot x = Q_w \cdot 0 + Q_{str} \cdot x_{str} + Q_{kr} \cdot x_{kr},$$

Со замена на вредностите дадени во условот на задачата во горните равенки се добива системот равенки:

$$6000 = Q_w + Q_{str} + Q_{kr}$$



$$6000 \cdot 0,06 = Q_w \cdot 0 + Q_{str} \cdot 0,01 + Q_{kr} \cdot 1,0$$

од кои може да се изрази количината вода отстранета од уварувачот:

$$Q_w = 5640 - 0,9 \cdot Q_{str}$$

Количината на отстрануваниот раствор може да се пресмета од билансот на примесите во системот:

$$Q \cdot x^p = Q_{str} \cdot x_{str}^p$$

$x^p$  – масен удел на примесите во влезниот раствор,

$x_{str}^p$  – масен удел на примесите во излезниот раствор.

Со замена на вредностите во горната равенка се добива:

$$Q \cdot 0,0015 = Q_{str} \cdot 0,07$$

од каде количината на отстрануваниот раствор е:

$$Q_{str} = 5640 - 0,9 \cdot 128,57 = 5524,29$$

Ако се набљудува уварувачот одделно, за него може да се напишат следните равенки за општиот и компонентниот биланс (во однос на бихроматот):

$$Q_1 = Q_2 + Q_w$$

$$Q_1 \cdot x_1 = Q_2 \cdot x_2 + Q_w \cdot 0$$

Со замена на дадените вредности во горните две равенки се добива следната зависност:

$$Q_w = Q_1(1 - x_1/0,38)$$

односно:

$$Q_1 = \frac{5524,29}{(1 - x_1/0,38)} \quad (*)$$

Од билансните равенки за мешање на рециркулираниот со влезниот раствор следува:

$$Q_1 = Q + Q_r$$

односно

$$Q_1 \cdot x_1 = Q \cdot x + Q_r \cdot x_r$$

Со замена, пак, на вредностите дадени во условот на задачата следува:

$$Q_1 = 6000 + Q_r$$

$$Q_1 \cdot x_1 = 6000 \cdot 0,06 + 0,1 \cdot Q_1$$

и се добива следната зависност:

$$Q_1 \cdot x_1 = 360 - 0,1 \cdot (6000 - Q_1) \quad (**)$$

Со решавање на равенките означени со (\*) и (\*\*) за количината раствор на бихромат што оди на уварување се добива:

$$x_1 = 0,0638 \text{ (kg/kg)} \text{ односно } 6,38 \%, \text{ а за } Q_1 = 6640,108 \text{ (}\frac{\text{kg}}{\text{h}}\text{)}$$

Количината на добиените кристали од бихроматот се пресметува од равенката на општиот биланс на целиот систем:

$$Q_{kr} = Q - Q_w - Q_{str} = 6000 - 5524,29 - 128,57$$

од каде:

$$Q_{kr} = 347,14 \text{ (}\frac{\text{kg}}{\text{h}}\text{)}$$

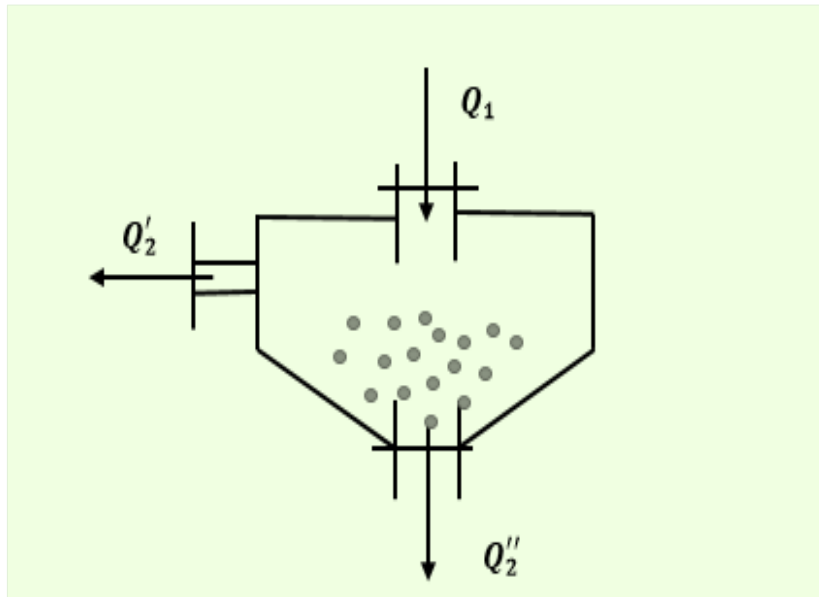
#### Пример 2.4:

Во кристализатор се лади раствор на бакар сулфат со почетна концентрација 43 % и се добиваат  $1,086 \text{ (}\frac{\text{kg}}{\text{s}}\text{)}$  влажни кристали и матичен раствор во количина од  $0,714 \text{ (}\frac{\text{kg}}{\text{s}}\text{)}$ . Добиените кристали се со 5 молекули вода ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). Молската маса на бакар сулфатот ( $\text{CuSO}_4$ ) е  $159 \text{ (}\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\text{)}$ .

#### Да се пресмета:

- концентрацијата на бакарниот сулфат ( $\text{CuSO}_4$ ) во матичниот раствор;
- количината на бакарниот сулфат ( $\text{CuSO}_4$ ) во влажните кристали.

Количината на матичниот раствор во влажните кристали изнесува  $0,086 \text{ (}\frac{\text{kg}}{\text{s}}\text{)}$ .



Слика 2.5: Материјален биланс за пример 2.4

**Решение:**

Општиот материјален биланс за процесот, според податоците од примерот 2.4 и слика 2.5, ќе биде:

$$Q_1 = Q'_2 + Q''_2$$

каде што:

$Q_1$  – количина на раствор на влезот на кристализаторот  $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$ ,

$Q'_2$  – количина на матичен раствор  $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$ ,

$Q''_2$  – количина на влажните кристали  $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$ .

Со внесување на познатите вредности на  $Q'_2$  и  $Q''_2$  се добива:

$$Q_1 = 1,086 + 0,714 = 1,8 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$$

Со ладење на почетниот раствор на бакар сулфат тој кристализира и се издвојува во форма на кристали со пет молекули на вода  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , додека другиот бакар сулфат  $\text{CuSO}_4$  што не кристализира останува во растворот и го формира таканаречениот матичен раствор. Издвоените кристали на бакар сулфат  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  не се суви туку се влажни, бидејќи содржат одредена количина на матичен раствор. Со оглед на ова, по извршената кристализација дел од почетната количина на бакар сулфат  $\text{CuSO}_4$  се наоѓа во влажните кристали  $Q''_2$ , додека еден дел е во матичниот раствор  $Q'_2$ .

За да се најде концентрацијата на бакар сулфат  $\text{CuSO}_4$  во матичниот раствор, што ќе се означи како  $x_2^{\text{CuSO}_4}$ , ќе се примени равенката на компонентен биланс за  $\text{CuSO}_4$ .

$$Q_1 \cdot x_1^{\text{CuSO}_4} = Q'_2 \cdot x_1^{\text{CuSO}_4} = Q_{\text{сув кр.}} + (Q''_2)_{\text{мат.р-р}} \cdot x_2^{\text{CuSO}_4}$$

од каде што следува:

$$x_2^{\text{CuSO}_4} = \frac{Q_1 \cdot x_1^{\text{CuSO}_4} - Q_{\text{сув кр.}}}{Q'_2 + (Q''_2)_{\text{мат.р-р}}} \quad (*)$$

каде што:

$x_1^{\text{CuSO}_4}$  – концентрација на  $\text{CuSO}_4$  во почетниот раствор,

$Q_{\text{сув кр.}}$  – количина на сувиот бакар сулфат  $\text{CuSO}_4$  во кристалите на  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$   $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$ ,

$(Q''_2)_{\text{мат.р-р}}$  – количина на матичен раствор во влажните кристали  $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$ .

Од условот на задачата дека количината на матичен раствор изнесува  $0,086 \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$  се наоѓа количината на бакарниот сулфат со пет молекули вода  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$   $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$  односно,  $(Q''_2)_{\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}}$ :

$$Q''_2 = (Q''_2)_{\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}} + (Q''_2)_{\text{мат.р-р}}$$

Го бараме  $(Q''_2)_{\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}}$ , па според тоа:

$$(Q_2'')_{CuSO_4 \cdot 5H_2O} = Q_2'' - (Q_2'')_{\text{мат.р-р}}$$

Со замена на бројните вредности за  $Q_2''$  и  $(Q_2'')_{\text{мат.р-р}}$  се добива:

$$(Q_2'')_{CuSO_4 \cdot 5H_2O} = 1,086 - 0,086 = 1 \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

За решавање на равенката (\*), односно за да се најде  $x_2'^{CuSO_4}$ , потребно е прво да се одреди количината на суви кристали до која се доаѓа преку следната равенка:

$$Q_{\text{сув кр.}} = \frac{M_{CuSO_4}}{M_{CuSO_4 \cdot 5H_2O}} \cdot Q_2''$$

каде што:

$M_{CuSO_4}$  – молската маса на  $CuSO_4$  и изнесува  $159 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)$ ,

$M_{CuSO_4 \cdot 5H_2O}$  – молската маса на  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  и изнесува  $249 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)$ .

$$Q_{\text{сув кр.}} = \frac{159}{249} \cdot 1 = 0,638 \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

Со внесување на познатите вредности во равенката (\*) се добива вредноста на  $x_2'^{CuSO_4}$

$$x_2'^{CuSO_4} = \frac{1,8 \cdot 0,43 - 0,638}{0,714 + 0,086} = 0,17$$

или

$$x_2'^{CuSO_4} = 17 \%$$

На крајот количината на  $CuSO_4$  во влажните кристали  $Q_{CuSO_4}$  ќе биде:

$$Q_{CuSO_4} = Q_{\text{сув кр.}} + (Q_2'') \cdot x_2'^{CuSO_4}$$

и се добива со замена на вредностите во горната релација:

$$Q_{CuSO_4} = 0,638 + 0,086 \cdot 0,17$$

$$Q_{CuSO_4} = 0,652 \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$$

### Пример 2.5:

Во процес на производство на сирење искористени се 100 (kg) млеко. Млекото содржело 3,8 % млечни маснотии, 8 % други суви материи (протеини, шеќери, соли), а остатокот бил вода. Произведени се 16 (kg) полномасно полутврдо сирење (слика 2.5.1) во кое има 50 % сува материја. Во сувата материја имало 45 % млечна маст.

#### Да се пресмета:

- количината на сурутката (остатокот во производството на сирење);
- каков е составот на сурутката ако во текот на процесот испариле 4 (kg) вода.

Во билансот на маса да се разгледуваат масите на: млекото, водата, сувата материја, млечната маст, сирењето и сурутката. Да се занемарат сите преостанати излезни маси.



Слика 2.5.1: Полномасно полутврдо сирење

**Решение:**

а) Во 100 (kg) млеко има 3,8 (kg) млечна маст и 8 (kg) останати суви материји. Тоа значи дека во млекото има 88,2 (kg) вода, односно:

$$100 - (3,8 + 8) = 88,2 \text{ (kg)}$$

Масениот удел на млечната маст во сирењето ( $x_{mm}$ ) може да се пресмета на следниот начин:

$$x_{mm} = 0,45 \cdot 0,50 = 0,225 \text{ (kg/kg), односно,}$$

$$x_{mm} = 22,5 \% \text{ (масени).}$$

**Вкупниот биланс на маса во преработката на млеко во сирење е:**

$$Q_m = Q_s + Q_{sur} + Q_{is.v}$$

каде што:

$Q_m$  – маса (количина) на млекото пред производството на сирење (kg),

$Q_s$  – маса (количина) на произведено сирење (kg),

$Q_{sur}$  – маса (количина) на сурутка (kg),

$Q_{is.v}$  – маса (количина) на испарената вода (kg).

Од горната равенка за општиот (вкупниот) материјален биланс може да се пресмета масата на сурутката:

$$Q_{sur} = Q_m - (Q_s + Q_{is.v}) = 100 - (16 + 4) = 80 \text{ (kg)}$$

**б) Составот на сурутката ќе се одреди од билансот на одделните компоненти.**

**Билансот на млечната маст е:**

$$x_{mm} \cdot Q_m = x_{ms} \cdot Q_s + x_{msur} \cdot Q_{sur}$$

каде што:

$$x_{mm} - \text{масен удел на млечната маст во свежото млеко, } x_{mm} = 0,038 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right),$$

$$x_{ms} - \text{масен удел на млечната маст во сирењето, } x_{ms} = 0,225 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right),$$

$$x_{msur} - \text{масен удел на млечната маст во сурутката, } x_{msur} = ?$$

$$x_{msur} = \frac{x_{mm} \cdot Q_m - x_{ms} \cdot Q_s}{Q_{sur}} = \frac{0,038 \cdot 100 - 0,225 \cdot 16}{80} = 0,0025 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

односно 0,25 % (масени).

**Билансот на вода во процесот ќе биде:**

$$x_{vm} \cdot Q_m = x_{vs} \cdot Q_s + x_{vsur} \cdot Q_{sur} + Q_{is.v}$$

каде што:

$$x_{vm} - \text{масен удел на водата во свежото млеко, } x_{vm} = 0,882 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right),$$

$$x_{vs} - \text{масен удел на водата (влажата) во сирењето, } x_{vs} = 0,50 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right), 50 \% \text{ масени,}$$

$$x_{vsur} - \text{масен удел на водата (влажата) во сурутката, } x_{vsur} = ?$$

$$x_{vsur} = \frac{(x_{vm} \cdot Q_m - x_{vs} \cdot Q_s) - Q_{is.v}}{Q_{sur}} = \frac{(0,882 \cdot 100 - 0,50 \cdot 16) - 4}{80} = 0,9525 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right),$$

односно,  $x_{vsur} = 95,25 \%$  (масени).

Бидејќи збирот од масените удели на сите компоненти секогаш е еднаков на 1 или 100 %, може да се пресмета уделот на сувата материја во сурутката,  $x_{smsur}$ :

$$x_{smsur} = 1 - x_{vsur} - x_{mm} = 1 - 0,9525 - 0,0025 = 0,045 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

односно,  $x_{smsur} = 4,5 \%$  (масени).

Освен на горниот начин, уделот на сувата материја во сурутката  $x_{smsur}$  може да се пресмета и од материјалниот биланс за сувата материја:

$$x_{smm} \cdot Q_m = x_{sms} \cdot Q_s + x_{smsur} \cdot Q_{sur}$$

каде што:

$$x_{smm} - \text{масен удел на сувите материји во свежото млеко, } x_{smm} = 0,080 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right),$$

$$x_{sms} - \text{масен удел на сувите материји во сирењето, } x_{sms} = 1 - 0,50 - 0,225 = 0,275 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right),$$

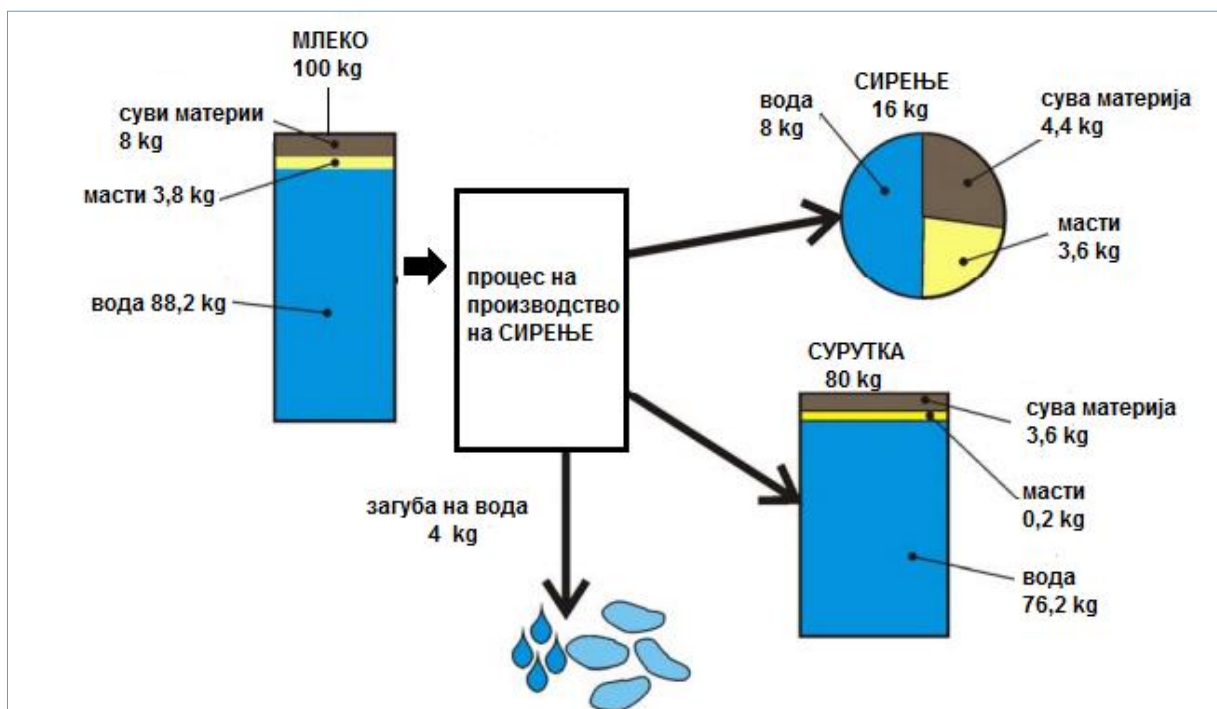
$x_{smsur}$  – масен удел на сувите материји во сурутката,  $x_{smsur} = ?$

$$x_{smsur} = \frac{x_{smm} \cdot Q_m - x_{sms} \cdot Q_s}{Q_{sur}} = \frac{0,080 \cdot 100 - 0,275 \cdot 16}{80} = 0,045 \left( \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right)$$

односно,  $x_{smsur} = 4,5\%$  (масени), што е потврда на претходно добиениот резултат.

Втората пресметка обично служи за контрола на добиениот резултат.

На слика 2.5.2 е дадена илустрација на материјалниот (масениот) биланс при производство на сирење според примерот 2.5.



Слика 2.5.2: Масен биланс при производство на сирење

### 3. ДИФУЗИЈА

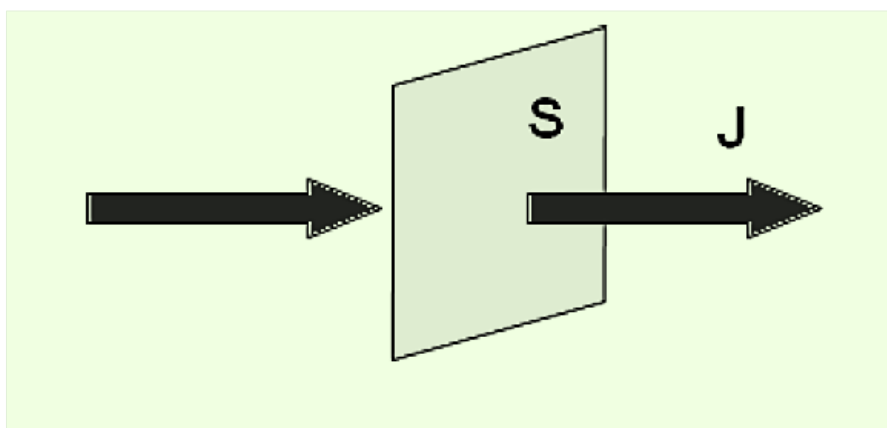
Голем број на технолошки операции се засновани врз физичката појава на движење на материјата (односно масата). Во такви случаи постојат барем две компоненти кои се измешани. Ако се остварат потребните физички услови, може да дојде до движење само на една компонента во саканиот правец.

Бинарните смеси се разновидни смеси од две компоненти. Компонентите може да бидат цврсти, течни и гасовити. Поради разновидноста на материите кои ја сочинуваат смесата и заради практична примена, постојат два основни начини за изразување на учеството (уделот) на компонентите во смесата. Тоа се **масен** и **волуменски** удел на компонентите. Наместо терминот удел на компонентите во практиката често се вели **концентрација** на компонентата.

Дифузијата се случува таму каде што постои разлика во концентрацијата, во насока од повисока кон пониска концентрација сè додека не се постигне рамнотежна состојба. Брзината на одвивање на дифузијата или преносот на маса се изразува како флуks на дифузијата. Флуksот или протокот се дефинира како маса  $m$  која при дифузијата поминува низ единица површина во единица време.

Флуksот на компонентата  $A$  е одреден со **првиот Фиков закон (Fick's law) за дифузија** и се дефинира со молските ( $J_A$ ) или масата ( $j_A$ ) кои поминуваат низ единица површина во единица време.

$$J = \frac{\text{број на честички кои поминуваат низ единица површина}}{\text{единица површина} \cdot \text{временски интервал}}$$



Слика 3.1: Флуks или проток

**Молскиот флуks,  $J_A$**  се пресметува според равенката (3.1):

$$J_A = -D_{AB} \frac{\partial C_a}{\partial z} \quad (3.1)$$

додека **масениот флуks,  $j_A$**  се пресметува според равенката (3.2):

$$j_A = -D_{AB} \frac{\partial \rho_a}{\partial z} \quad (3.2)$$



Врската меѓу молскиот и масениот флуks е дадена со релацијата (3.3):

$$j_A = J_A M_A \quad (3.3)$$

Во горните равенки ознаките означуваат:

$C_a$  – количина на компонентата  $A$  (mol),

$\rho_a$  – маса на компонентата  $A$  во единица волумен на флуидот, т.е. густина,

$D_{AB}$  – коефициент на дифузија за смеса на компонентите  $A$  и  $B$ .

Коефициентот на дифузија на компонентата  $A$  низ компонентата  $B$  е еднаков на коефициентот на дифузија на компонентата  $B$  низ компонентата  $A$ , односно  $D_{AB} = D_{BA}$ .

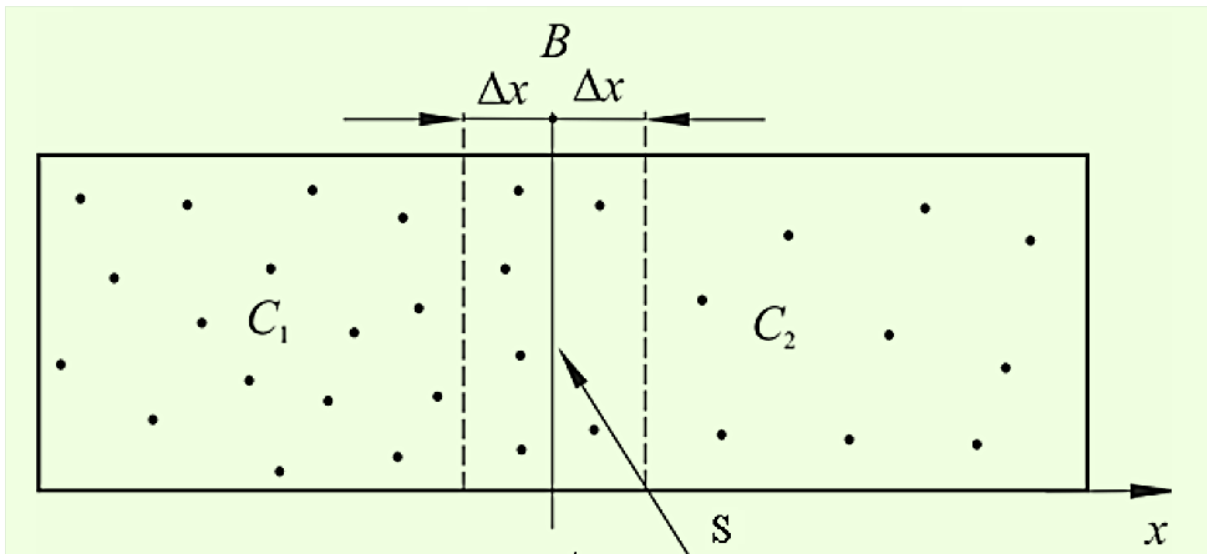
Коефициентот на дифузија зависи од состојбата на флуидот. На пример, за гас е:

$$\frac{D_{AB} P}{T^2} = \text{const.},$$

а за разблажен раствор:

$$\frac{T}{\mu D_{AB}} = \text{const.}$$

Дифузијата се дефинира и како просторно распространување како резултат на хаотично движење.



Слика 3.2: Модел на дифузија

Моделот на дифузија може да се погледне на следниот едноставен пример на слика 3.2. На сликата е разгледуван еднодимензионален систем кај кој движењето се врши само во правец на  $x$  оската. Мембраната  $B$  ги раздвојува областите со различни концентрации  $C_1$  и  $C_2$ , лево и десно од неа. Движењето на секоја честичка е по случајна патека. Во секој временски интервал  $\Delta t$  секоја честичка поминува пат  $\pm \Delta x$ , движејќи се десно  $+\Delta x$  или лево  $-\Delta x$  со еднаква веројатност.

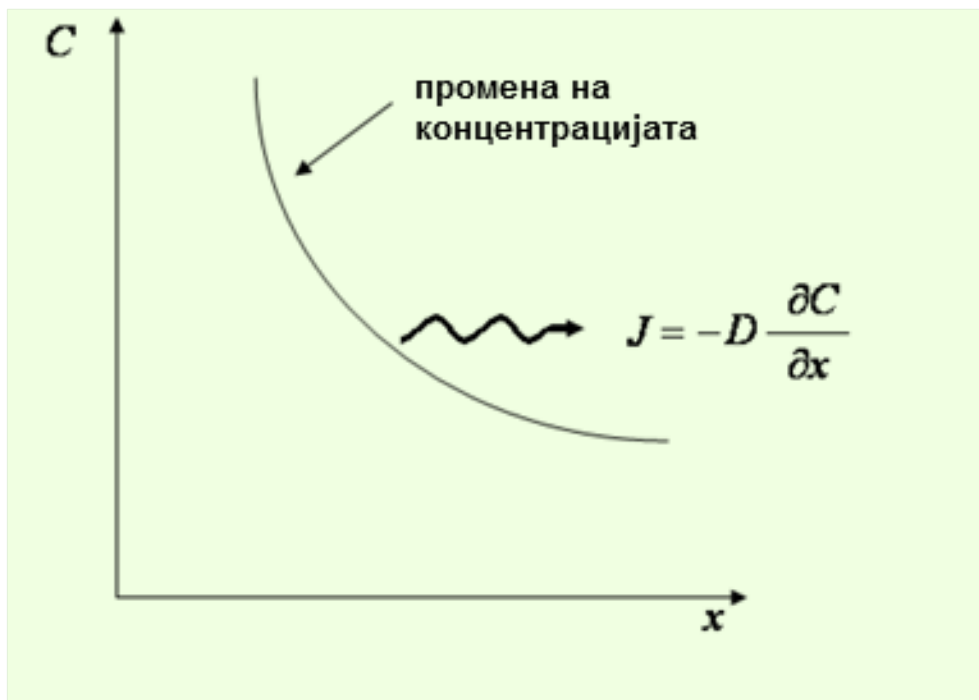
Генерално, дифузијата не е одредена само од Фиковиот закон, туку и од другите услови под кои се наоѓа флуидот. Тоа значи дека вкупниот флукс на компонентата  $N_A$  зависи од дифузиониот флукс  $J_A$ , но и од дополнителните спротивно насочени флуКСови на двете компоненти, па за гасна смеса:

$$N_A = J_A + y_A(N_A + N_B) \quad (3.4)$$

Промената на концентрацијата на компонентата со текот на времето се дефинира со **вториот Фиков закон** даден со релацијата:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.5)$$

Промената на концентрацијата со текот на времето и насоката на дифузијата графички се прикажани на слика 3.3.



Слика 3.3: Промена на концентрацијата со текот на времето и насока на дифузијата

### Пример 3.1:

Коефициентот на дифузија на **етилалкохол** –  $C_2H_5OH$  ( $A$  компонента) во **воздух** ( $B$  компонента) при притисок од 100 (kPa) и температура од 25 °C изнесува  $0,119 \left( \frac{cm^2}{s} \right)$ .

### Да се пресметаат:

Коефициентите на дифузија на оваа смеса при ист притисок и температура од 67 °C.

**Решение:**

Врз основа на врската за коефициентот на дифузија низ гас:

$$\frac{D_{AB} P}{T^{\frac{3}{2}}} = const.$$

ќе имаме:

$$\frac{D_{AB,1} P_1}{T_1^{3/2}} = \frac{D_{AB,2} P_2}{T_2^{3/2}}$$

$$D_{AB(67^\circ C, 100 kPa)} = D_{AB(25^\circ C, 100 kPa)} \frac{P_1}{P_2} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2}$$

$$D_{AB(67^\circ C, 100 kPa)} = D_{AB(25^\circ C, 100 kPa)} \left(\frac{67 + 273}{25 + 273}\right)^{3/2} = 0,145 \left(\frac{cm^2}{s}\right)$$

**Пример 3.2:**

Каков е односот на коефициентите на дифузија на притисок од 1000 (kPa) за смеса од **воздух** и **етилалкохол** ( $C_2H_5OH$ ) на температура од 0 °C и 25 °C.

**Да се споредат** теоретските и табеларните односи.

**Решение:**

Табеларните податоци за коефициентите на дифузија за смеса од воздух и етилалкохол се:

$$D_{AB(0^\circ C, 100 kPa)} = 0,102 \left(\frac{cm^2}{s}\right),$$

$$D_{AB(25^\circ C, 100 kPa)} = 0,119 \left(\frac{cm^2}{s}\right),$$

што значи дека табеларниот однос ќе биде:

$$\frac{D_{AB(25^\circ C, 100 kPa)}}{D_{AB(0^\circ C, 100 kPa)}} = \frac{0,119}{0,102} = 1,17$$

Теоретскиот однос е дефиниран со равенката со која се дефинира односот на коефициентите на дифузија, т.е.

$$\frac{D_{AB(25^\circ C, 100 kPa)}}{D_{AB(0^\circ C, 100 kPa)}} = \left(\frac{298}{273}\right)^{3/2} = 1,14$$

**Пример 3.3:****Да се пресмета:**

Колкав е односот на коефициентите на дифузија на **амонијак** ( $NH_3$ ) во смеса со **воздух** и во **разблажен воден раствор** на температура од  $5\text{ }^\circ\text{C}$  и притисок од  $200\text{ (kPa)}$ .

**Решение:**

Коефициентот на дифузија на амонијак во воздух на  $5\text{ }^\circ\text{C}$  го нема во табела и мора да се пресмета од некоја друга вредност од табелата (за некоја друга температура и притисок за кои има податоци во табелата, на пример за  $0\text{ }^\circ\text{C}$  и  $100\text{ (kPa)}$ ).

$$D_{AB(273\text{ K}, 100\text{ kPa})} = 0,198 \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right).$$

$$D_{AB(5\text{ }^\circ\text{C}, 200\text{ kPa})} = D_{AB(0\text{ }^\circ\text{C}, 100\text{ kPa})} \frac{P_1}{P_2} \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{3/2}$$

$$D_{AB(5\text{ }^\circ\text{C}, 200\text{ kPa})} = \frac{1}{2} \left( \frac{278}{273} \right)^{3/2} = 0,102 \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right)$$

Многу често се користат и други начини на дефинирање на концентрацијата на компонентите во флуидот. Најчесто се користат молските удели кои може да се доведат во врска со молската концентрација на компонентата од:

$$C_A = \frac{n_A}{V} = \frac{n_A + n_B}{V} = \frac{n_A}{n_A + n_B}$$

каде што молскиот удел на компонентата  $A$  е:

$$\frac{n_A}{n_A + n_B}$$

Вообичаени ознаки за молски удел се:

за компонента во течна фаза  $x_A$ ,

за компонента во гасовита фаза  $y_A$ , така што:

за течна фаза:  $c_A = c x_A$

за гасовита фаза:  $c_A = c y_A$

каде што:

$c$  – е вкупна концентрација на течнота или гасот.

Молската концентрација на компонентата може да се одреди и врз основа на масениот удел како:

$$c_A = \frac{\rho_{sm} x'_A}{M_A}$$

или:

$$c_A = \frac{\rho_{sm} y'_A}{M_A}$$

каде што:

$\rho_{sm}$  – густина на смесата,

$x_A$  – масен удел на компонентата  $A$  во течната смеса,

$y_A$  – масен удел на компонентата  $A$  во гасната смеса.

### 3.1. Еквимоларна противструјна дифузија

На слика 3.1.1 е прикажана смеса во која како резултат на разликата во концентрацијата настанува еквимоларна противструјна дифузија во гасна фаза. Во изворот на компонентата ( $A$ ) е поголем парцијалниот притисок на компонентата во однос на другите делови од системот и затоа доаѓа до нејзина дифузија. Вкупниот притисок и температура во системот се константни така што компонентата ( $B$ ) дифундира во спротивна насока:

$$N_A = -N_B \quad (3.1.1)$$

Со замена во равенката за Фиковиот закон се добива:

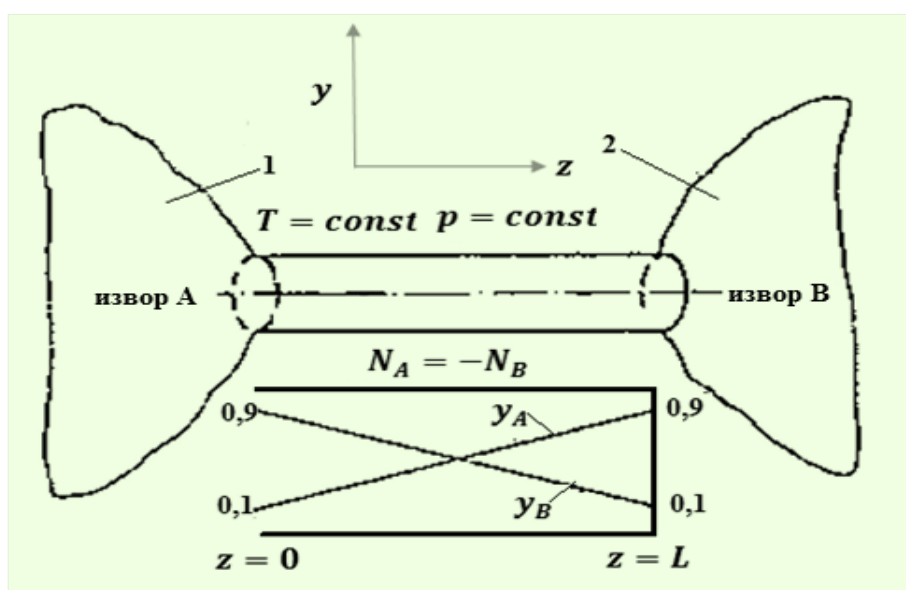
$$N_A = -D_{AB} c \frac{y_{A2} - y_{A1}}{z_2 - z_1} = \frac{-D_{AB} P}{RT} \frac{y_{A2} - y_{A1}}{z_2 - z_1} \quad (3.1.2)$$

односно

$$N_A = \frac{-D_{AB} p_{A2} - p_{A1}}{RT} \frac{L}{L} \quad (3.1.3)$$

#### Пример 3.1.1.

На слика 3.1.1 е прикажана дифузија во смеса **воздух и јаглороден моноксид (CO)**. Притисокот е 250 (kPa), а температурата 25 °C. Растојанието меѓу изворите е 10 (cm).



Слика 3.1.1: Еквимоларна противструјна дифузија

Во овој случај воздухот е компонентата (A)

**Да се пресмета:**

- а) молскиот и масениот флукс;  
 б) што ќе се случи ако притисоците во просториите 1 и 2 не се еднакви?

**Решение:**

Системот прикажан на слика 3.1.1 е во **термичка** (константна температура) и **механичка рамнотежа** (константен притисок). Поради нерамнотежата во концентрацијата доаѓа до дифузија на компонентите во спротивни насоки од областа со повисока кон областа со пониска концентрација. За да се одржи константен притисок, транспортираните молекули од едната компонента треба да се заменат со ист број на молекули од другата компонента и така доаѓа до еквиоларна противструјна дифузија.

а) Молскиот флукс ќе биде:

$$N_A = -D_{AB} c \frac{y_{A2} - y_{A1}}{z_2 - z_1} = -N_B$$

податок од табела:  $D_{AB(25^\circ\text{C}, 100\text{ kPa})} = 0,102 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\right)$

$$D_{AB(25^\circ\text{C}, 200\text{ kPa})} = D_{AB(25^\circ\text{C}, 100\text{ kPa})} \frac{P_1}{P_2} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2} = 0,164 \frac{100}{200} = 0,082 \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\right)$$

$$c = \frac{P}{RT} = \frac{2 \cdot 10^5}{8314 \cdot 298} = 0,0807 \left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}\right)$$

Флуксот на компонентата (A) во позитивната насока на z оската е:

$$N_A = -N_B = 0,082 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0807 \frac{0,9 - 0,1}{10 \cdot 10^{-2}} = 0,53 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2\text{s}}\right)$$

Масените флуковски ќе бидат:

$$j_A = J_A M_A = 0,53 \cdot 10^{-5} \cdot 29 = 15,37 \cdot 10^{-5}$$

$$j_B = J_B M_B = 0,53 \cdot 10^{-5} \cdot 44 = 23,32 \cdot 10^{-5}$$

Протоците на компонентите зависат од површината на напречниот пресек на цевката S така што молскиот проток на компонентата A ќе биде:

$$N_A = N_A \cdot S$$

б) Доколку притисоците во просториите не се еднакви, флуидот ќе дифундира и струи низ цевката. Тогаш флуксот на компонентите ќе биде збир од проточниот и дифузиониот флукс.

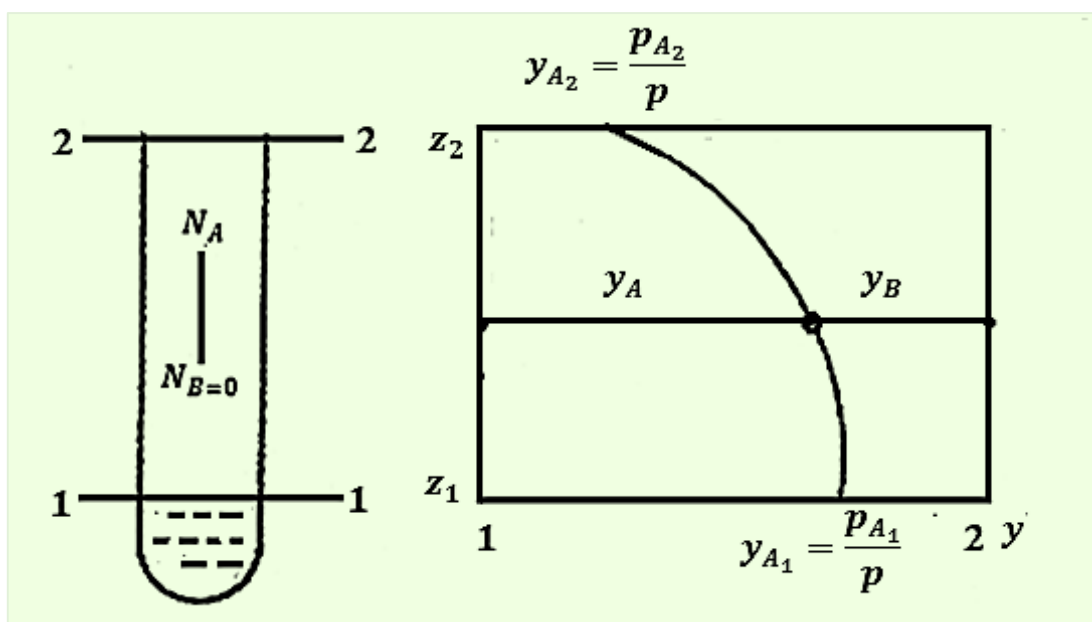
### 3.2. Дифузија низ инертна компонента

Дифузијата низ инертна компонента ( $N_B = 0$ ) е застапена во случаи во кои граничната површина (1-1), која претставува извор на  $A$  компонентата ( $z = z_1$ ), е непропустлива за компонентата  $B$ . Тогаш само компонентата  $A$  дифундира низ компонентата  $B$  и истекува низ пресекот 2-2, така што;  $N_B = 0$  (слика 3.2.1).

Погонската сила за испарување е разликата во парцијалниот притисок на компонентата  $A$  над течноста  $p_{A1}$  и парцијалниот притисок на компонентата на врвот на епруветата  $p_{A2}$ . Парцијалниот притисок на компонентата  $A$  над течноста е еднаков на напонот на водената пара  $p_{A1} = p_{A1}^0$  за дадената температура.

За дифузија во гас  $p = const$  се добива:

$$N_A = -\frac{D_{AB}c}{y_{Bm}} \frac{y_{A2} - y_{A1}}{z_2 - z_1} = -\frac{D_{AB}P}{RTp_{Bm}} \frac{p_{A2} - p_{A1}}{z_2 - z_1} \quad (3.2.1)$$



Слика 3.2.1: Дифузија низ инертна компонента

Големините  $y_{Bm}$ ,  $p_{Bm}$  претставуваат средни вредности на молскиот удел, односно на парцијалниот притисок на инертната компонента ограничена со пресеците 1 и 2. Промената на молскиот удел или на парцијалниот притисок на компонентата  $B$  во набљудуваниот волумен не е линеарна, така што средната вредност на овие големини е:

$$y_{Bm} = \frac{y_{B2} - y_{B1}}{\ln \frac{y_{B2}}{y_{B1}}} \quad (3.2.2)$$

$$p_{Bm} = \frac{p_{B2} - p_{B1}}{\ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}}} \quad (3.2.3)$$

Со споредување на двата гранични начини на дифузија на компонентите, односно на флуковите при дифузија на една компонента низ друга инертна компонента  $N_B = 0$  и при еквимоларна противструјна дифузија  $N_A = -N_B$

се добива:

$$\frac{N_{A(N_B=0)}}{N_{A(N_A=-N_B)}} = \frac{p}{p_{Bm}} = \frac{c}{c_{Bm}} = \frac{1}{y_{Bm}} > 1 \quad (3.2.4)$$

Во општ случај:

$$N_B = -kN_A \quad 0 \leq k \leq 1 \quad (3.2.5)$$

Вака дефиниран односот на флуковите се остварува при иста погонска сила ( $\Delta c / \Delta z$ ). Распределбата на концентрацијата (парцијалниот притисок) на компонентата при дифузија низ другата, инертната, како што е прикажано на слика 3.2.1, е експоненцијална.

$$\frac{1 - y_A}{1 - y_{A_1}} = \left( \frac{1 - y_{A_2}}{1 - y_{A_1}} \right)^{\frac{z - z_1}{z_2 - z_1}}$$

и се однесува на граничните пресеци 1 и 2 и некој пресек меѓу нив ( $z, y_A$ ).

### Пример 3.2.1:

Дифузионата ќелија се користи за експериментално одредување на дифузивноста на пареата во гасот (слика 3.2.1). Станува збор за системот толуол-воздух.

#### Да се пресмета:

Коефициентот на дифузија врз основа на следните податоци: температура 40 °C, притисок 101,3 (kPa). Почетното ниво на течноста е 2 (cm) од врвот на епруветата. После 275 (h) нивото на течноста е на 8 (cm) од врвот на епруветата.

Се смета дека во текот на експериментот концентрацијата на толуол на врвот на епруветата е занемарлива. Молската маса на толуолот е 92  $\left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right)$ , парниот притисок на толуолот на 40 °C е 7639 (Pa), густината на течниот толуол 850  $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$ .

#### Решение:

Ваквото мерење е нестационарно затоа што нивото на течноста во текот на мерењето се спушта и флуксот опаѓа заради зголемување на растојанието меѓу врвот на епруветата и нивото на течноста. Меѓутоа, кога се набљудува почетниот и крајниот момент, процесот може да се смета за **псевдостационарен**. Флуксот на толуолот (компонентата  $A$ ) низ инертната компонента воздух (компонентата  $B$ ) е:



$$N_A = \frac{D_{AB}P}{RTp_{Bm}} \frac{p_{A2} - p_{A1}}{z_2 - z_1} = \frac{p_{A1} - p_{A2}}{z}$$

каде што со  $z$  е означена висината на слојот по кој се врши дифузијата.

Моловите на толуолот кои дифундираат настануваат при испарување на течноста во единица време по единица површина на попречниот пресек на епруветата  $S$ .

$$N_A = \frac{1}{S} \frac{dn_A}{dt} = \frac{\rho_A dV}{M_A S dt} = \frac{\rho_A S dz}{M_A S dt} = \frac{\rho_A dz}{M_A dt}$$

Од оваа равенка за флуксот се добива:

$$z dz = \frac{D_{AB} M_A P}{RT \rho_A p_{Bm}} (p_{A1} - p_{A2}) dt$$

а со интеграција на изразот:

$$\int_{z_1=2cm}^{z_2=8cm} z dz = \frac{D_{AB} M_A P}{RT \rho_A p_{Bm}} (p_{A1} - p_{A2}) \int_0^{275h} dt$$

се добива:

$$D_{AB} = \frac{RT \rho_A p_{Bm}}{M_A P (p_{A1} - p_{A2}) t} \frac{z_2^2 - z_1^2}{2}$$

**Погонската сила** е  $(p_{A1} - p_{A2})$  каде што:

$$p_{A1} = p_A^0 = 7639 \text{ (Pa)}$$

$p_{A2} = 0$ , бидејќи концентрацијата на толуолот во пресекот 2 е занемарлива.

Средниот парцијален притисок на воздухот е:

$$p_{Bm} = \frac{(p_{B2} - p_{B1})}{\ln \frac{p_{B2}}{p_{B1}}} = \frac{(P - p_{A2}) - (P - p_{A1})}{\ln \frac{P - p_{A2}}{P - p_{A1}}} = \frac{p_{A1}}{\ln \frac{P}{P - p_{A1}}}$$

$$p_{Bm} = \frac{7639}{\ln \frac{101300}{101300 - 7639}} = 97,4 \text{ (kPa)}$$

Конечно, бараниот коефициент на дифузија за смесата толуол-воздух ќе биде:

$$D_{AB} = \frac{8314 \cdot 313 \cdot 850 \cdot 97,4}{92 \cdot 101,3(7639 - 0)275 \cdot 3600} \frac{(8 \cdot 10^{-2})^2 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2}{2} = 9,1 \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$$

**Пример: 3.2.2:**

По завршениот експеримент од претходниот пример (3.2.1) гасната смеса со непропустлива мембрана се изолира од течниот толуол и околниот воздух.

**Да се пресметаат:**

а) парцијалните притисоци на компонентите, бидејќи во системот се воспоставува рамнотежа и се формира хомогена смеса од толуол и воздух.

**Решение:**

По хомогенизацијата средниот парцијален притисок на воздухот е непроменет и само се воспоставила распределбата ( $\frac{dp_B}{dz} = 0$ )

$$p_{Bm} = p_B = 97,4 \text{ (kPa)}$$

Со оглед на тоа дека вкупниот притисок е збир од парцијалните притисоци на компонентите следува дека:

$$p_A = P - p_B = 101,3 - 97,4 = 3,9 \text{ (kPa)}$$

**Пример 3.2.3:****Да се пресмета:**

Дифузиониот флукс на оцетна киселина ( $CH_3COOH$ ) низ воден филм со дебелина од 0,1 (cm) на 20 °C ако концентрациите на оцетната киселина на спротивните страни на филмот се 9 % и 9 %. Густините на растворот се  $\rho_{3\%} = 1,0032 \text{ (g/cm}^3\text{)}$  и  $\rho_{9\%} = 1,012 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ .

**Решение:**

Во конкретниот случај активната компонента (**A**) е оцетна киселина  $CH_3COOH$  која дифундира низ инертниот слој од вода како компонента (**B**). Во овој случај молскиот флукс на активната компонента ќе биде:

$$N_A = -D_{AB} \cdot \frac{\bar{c}}{c_{Bm}} \cdot \frac{c_{A2} - c_{A1}}{z_2 - z_1}$$

каде што:

$\bar{c}$  – средна моларна концентрација на растворот што се менува од пресекот 1 до пресекот 2:

$$\bar{c} = \frac{c_1 + c_2}{2}$$

каде што  $c_1$  и  $c_2$  се молски концентрации на компонентите (**A**) и (**B**) во пресеците 1 и 2.

$$c = c_A + c_B$$

Молските концентрации на компонентите (**A**) и (**B**) може да се пресметаат од густините на растворот и масените удели на компонентите:

$$c_A = \frac{\rho_{sm} \cdot \check{x}_A}{M_A}, \quad c_B = \frac{\rho_{sm} \cdot \check{x}_B}{M_B}$$

Од горните релации следува:

$$c_{A_1} = \frac{1012 \cdot 0,09}{60} = 1,52 \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \right)$$

$$c_{B_1} = \frac{1012 \cdot 0,91}{18} = 51,16 \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \right)$$

$$c_{A_2} = \frac{1003,2 \cdot 0,03}{60} = 0,5 \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \right)$$

$$c_{B_2} = \frac{1003,2 \cdot 0,97}{18} = 54,06 \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \right)$$

Вредноста на средната вкупна молска концентрација ќе биде:

$$\bar{c} = \frac{(1,52 + 51,16) + (0,5 + 54,06)}{2} = 53,62 \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \right)$$

Сега веќе може да се пресмета и средната логаритамска концентрација на инертната компонента, т.е. водата:

$$c_{B_m} = \frac{c_{B_2} - c_{B_1}}{\ln \frac{c_{B_2}}{c_{B_1}}} = \frac{54,06 - 51,16}{\ln \frac{54,06}{51,16}} = 52,6 \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \right)$$

Бараниот дифузионен флуks сега може се пресмета:

$$N_A = -D_{AB} \cdot \frac{\bar{c}}{c_{B_m}} \cdot \frac{c_{A_2} - c_{A_1}}{z_2 - z_1} = 0,88 \cdot 10^{-9} \frac{53,62}{52,6} \frac{1,52 - 0,5}{0,1 \cdot 10^{-2}} = 9,15 \cdot 10^{-7} \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s}} \right)$$

$D_{AB}$  е податок земен од **табела** и изнесува  $0,88 \cdot 10^{-9}$  (cm<sup>2</sup>/s)

**Забелешка:** Треба да се има предвид дека набљудуваниот раствор е многу разблажен и во такви услови  $\bar{c} \approx c_{B_m}$  така што бројната вредност на пресметаниот флуks за  $N_B = 0$  е многу блиска на вредноста на истиот флуks кога  $N_A = -N_B$ .

### 3.3. Нестационарна дифузија

Дифузијата на компонента низ цврста фаза е аналогна на спроведување на топлина низ тело со ист облик. Величините кои овде се користат се:

- Релативна концентрација;
- Релативно време;
- Релативно растојание;
- Релативен отпор.

Релативната концентрација се пресметува според формулата:

$$Y = \frac{C_A - C_{AM}}{C_{A0} - C_{AM}} \quad (3.3.1)$$

**Релативното време** се пресметува според формулата:

$$X = \frac{D_{AB}t}{x_1^2} \quad (3.3.2)$$

**Релативното растојание** се пресметува според формулата:

$$n = \frac{y}{x_1} \quad (3.3.3)$$

**Релативниот отпор** се пресметува според формулата:

$$m = \frac{D_{AB}}{x_1 k_c} \quad (3.3.4)$$

каде што:

$k_c$  – коефициент на пренос на маса,

$x_1$  - полудебелина на плочата или полупречник на цилиндарот или сферата.

### Пример 3.3.1:

Две страни на дрвена плоча со димензии 1x1 (m) и дебелина 2 (cm) изложени се на сушење во воздух со константна влажност. Почетната влажност на плочата е  $0,54 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ . Рабовите на плочата се премачкани со непропустлив премаз со цел процесот на сушење да се ограничи на големата рамна површина на плочите. Влагата дифундира кон површината каде што испарува во струјата на воздухот што струи. Содржината на влагата на површината на плочата во текот на сушењето е константна, изнесува  $0,07 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ , и е еднаква на концентрацијата на влагата во воздухот. По осум часа сушење содржината на влага во центарот опаѓа од  $0,54 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$  до  $0,33 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .

### Да се пресмета:

Коефициентот на дифузија на влагата низ дрвото.

### Решение:

Почетната влажност е константна така што важат **Гарни-Луриевите дијаграми**. Концентрацијата на влагата во околниот воздух е иста како на површината на плочата што значи дека коефициентот на пренос на маса е еднаков на 0. Коефициентот на дифузија на влагата низ дрвото може да се одреди од релативното време:

$$D_{AB} = \frac{Xx_1^2}{t}$$

Релативното време на сушење се одредува врз основа на релативната концентрација  $Y$ , релативната положба  $n$  и отпорот  $m$ .

$$n = \frac{x}{x_1} = 0 \quad (\text{за центарот на плочата})$$

$$Y = \frac{c_{A0} - c_A}{c_{A0} - c_{A1}} = \frac{0,33 - 0,07}{0,54 - 0,07} = 0,55$$

$$m = \frac{D_{AB}}{x_1 k_c} = 0$$

За  $k_c \rightarrow \infty$ , па според ова следува:

$$Y = 0,55$$

$$m = 0$$

$$n = 0$$

За овие вредности на  $Y, m, n$  од дијаграм се наоѓа вредноста на  $X = 0,3$  и оттука следува:

$$0,3 = \frac{D_{AB} t}{x_1^2}$$

а коефициентот на дифузија ќе биде:

$$D_{AB} = \frac{0,3 (1 \cdot 10^{-2})^2}{8} = 0,037 \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{h}} \right)$$

**Забелешка:** Бидејќи станува збор за дифузија во цврста фаза, коефициентот на дифузија во овој случај отстапува од дефиницијата за коефициентот на дифузија во гасови и течности.

#### 4. КОНВЕКТИВЕН ПРЕНОС НА МАСА

Кога во флуидот постои градиент на брзината и градиент на концентрацијата истовремено се пренесува маса и количество на движење. Ваквиот пренос се нарекува пренос на маса или **конвективен пренос на маса**. Флуксот на компонентата А која при струење на флуидот се пренесува до или од ѕидот на цевката се пренесува во радијален правец низ тенкиот слој на флуидот покрај ѕидот на цевката кој е неподвижен и за кој важи веќе споменатиот Фиков закон (равенки број 3.1. и 3.2).

За технички пресметки овој флукс се дефинира како однос од погонската сила и отпорот:

$$\text{флукс на А} = - \frac{\text{погонска сила}}{\text{отпор}} = \frac{c_A - c_{A_i}}{(1/k_c)} \quad (4.1)$$

или

$$N_A = \frac{(c_A - c_{A_i})}{(1/k_c)} = \frac{\Delta_i c_A}{(1/k_c)} \quad (4.2)$$

односно:

$$N_A = \frac{(p_A - p_{A_i})}{(1/k_G)} = \frac{\Delta_i p_A}{(1/k_G)} \quad (4.3)$$

каде што:

$k_c$  – коефициент на пренос на маса во течна или гасовита фаза,

$1/k_c$  – отпор на преминот по единица површина на граничната фаза,

$(c_A - c_{A_i})$  – погонска сила, т.е. разлика во концентрацијата на компонентата А во флуидот и на површината покрај која флуидот струи,

$k_G$  – коефициент на пренос на маса во гасовита фаза,

$1/k_G$  – отпор на преминот по единица површина за гасна фаза,

$(p_A - p_{A_i})$  – погонска сила во гасната фаза.

Коефициентот на премин на маса се дефинира како:

$$k_c = \frac{D_{AB}}{c_{A_0} - c_{A_i}} \left( \frac{\partial c_a}{\partial z} \right) \quad (4.4)$$

Коефициентот на премин на маса зависи од начинот на дифузија така што:

$$(k_c)_{N_{B=0}} > (k_c)_{N_A=-N_B}$$

Овој коефициент е најмал за еквимоларна противструјна дифузија, а вообичаената ознака во тој случај е:

$$(k_c)_{N_A=-N_B} = k'_c$$

За пренос на една компонента низ друга инертна фаза,  $N_{B=0}$  ознаката  $(k_c)_{N_{B=0}} = k_c$  што значи дека  $k_c > k'_c$ .

Односот на коефициентите на пренос на маса кај пренос на една компонента низ друга инертна фаза и еквимоларна противструјна дифузија е:

$$\frac{k_c}{k'_c} = \frac{c}{c_{Bm}} \quad (4.5)$$

Коефициентот на премин на маса најчесто се дефинира со бездимензионалниот **Шервудов број (Sherwood number) ( $S_h$ )**:

$$S_h = \frac{k'_c \cdot l}{D_{AB}} = (Re, Sc) \quad (4.6)$$

каде што:

$S_c$  – **Шмитов број (Schmidt number)** и се пресметува според релацијата:

$$S_c = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (4.7)$$

Шервудовиот број се дефинира исклучително врз основа на коефициентот на премин на маса за  $N_B = -N_A$ , а се одредува од критериумските равенки од табелата 4.1 кои зависат од режимот на струење, особините на системот и од геометријата на струењето.

Табела 4.1: Критериумски равенки

| Начин на струење                          | $Re$ број                    | Равенка   | Интервал на важност   |
|---|------------------------------|---|---|
| Преку рамна површина                      | $Re_L = \frac{uL\rho}{\mu}$  | $S_{hL} = 0,664Re_L^{1/2}S_c^{1/3}$<br>$S_{hL} = (0,337Re_L^{4/5} - 871)S_c^{1/3}$                        | $Re_L < 3 \cdot 10^5$<br>$Re_L = 5 \cdot 10^5 - 10^8$<br><br>$S_c = 0,6 - 3000$ |
| Струење низ цевка                         | $Re = \frac{ud\rho}{\mu}$    | $S_h = 1,86 \left( \frac{Re S_c}{l/d} \right)^{1/3}$<br>$S_h = 0,023Re^{0,83}S_c^{1/3}$                   | $Re < 2300$<br><br>$Re > 10000$   |
| Струење на течност                        |                              | $S_h = 0,023Re^{0,83}S_c^{1/3}$   | $Re = 2000 - 70000$<br>$S_c = 1000 - 2260$                                      |
| Испарување на течност во струја на воздух |                              | $S_h = 0,023Re^{0,83}S_c^{0,44}$  | $Re = 2000 - 35000$<br>$S_c = 1000 - 2260$                                      |
| Обиколување на сфера                      | $Re_p = \frac{d_p\rho}{\mu}$ | $S_{hp} = 2 + 0,6Re_p^{1/2}S_c^{1/3}$   |   |
| Струење низ пакуван слој                  | $Re_p = \frac{d_p\rho}{\mu}$ | $S_{hp} = 2 + 1,8Re_p^{1/2}S_c^{1/3}$   |   |
| Струење низ флуидизиран слој              | $Re_p = \frac{d_p\rho}{\mu}$ | $S_{hp} = 2 + 0,46Re_p^{0,543}S_c^{1/3}$<br>или<br>$S_{hp} = 2 + 0,51[(1 - \epsilon)Re_p]^{1/2}S_c^{1/3}$ |   |

**Пример 4.1:**

Влажен воздух струи со брзина од 1 (m/s) преку водена површина со температура од 18 °C и должина од 1 (m). Температурата на воздухот е 25 °C, а притисокот 101,3 (kPa). Парцијалниот притисок на водената пареа е два пати помал од парниот напон над водената површина.

**Да се пресмета:**

- а) коефициентот на пренос на маса;
- б) масениот флукс на водената пареа.

**Решение:**

а) Коефициентот на премин на маса при струење на гас преку рамна површина може да се пресмета врз основа на **Шервудовиот број** ( $S_h$ ) и соодветната критериумска равенка од табелата 4.1.

**Рејнолдсовиот број (Reynolds number)** за струење преку рамна површина ( $Re_L$ ) (табела 4.1) е:

$$Re_L = \frac{uL\rho}{\mu}$$

додека вредностите за  $\rho$  и  $\mu$  се земаат од табела и изнесуваат:

$$\rho = 1,185 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \mu = 18,35 \cdot 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

$$Re_L = \frac{1 \cdot 1 \cdot 1,185}{18,35 \cdot 10^{-6}} = 6,5 \cdot 10^4$$

Критериумската равенка за оваа вредност на Рејнолдсовиот број за струење преку рамна површина од табела 4.1. е:

$$S_{hL} = 0,664 Re_L^{1/2} S_c^{1/3},$$

додека вредноста на **Шмитовиот број** ( $S_c$ ) е:

$$S_c = \frac{\mu}{D_{AB}\rho}$$

Вредноста на  $D_{AB}$  се зема од табела и изнесува  $D_{AB} = 0,256 \text{ (cm}^2\text{/s)}$ , така што вредноста на Шмитовиот број ќе биде:

$$S_c = \frac{18,35 \cdot 10^{-6}}{0,256 \cdot 10^{-4} \cdot 1,185} = 0,605$$

Сега може да се пресмета вредноста на  $S_{hL}$ :

$$S_{hL} = 0,664 (6,5 \cdot 10^4)^{1/2} 0,605^{1/3} = 143,2$$

Коефициентот на пренос на маса се изразува од равенката 4.6:

$$k'_c = \frac{S_{hL} D_{AB}}{l} = \frac{143,2 \cdot 0,256 \cdot 10^{-4}}{1} = 3,67 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \text{s} \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3} \right)} \right]$$



и на крајот:

$$k_G = \frac{k'_c}{RT} = \frac{3,67 \cdot 10^{-3}}{8315 \cdot 291} = 1,52 \cdot 10^{-9} \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}} \right)$$

### б) Пресметка на масениот флуks

Бидејќи станува збор за дифузија  $N_{B=0}$  соодветниот коефициент на премин на маса е  $k_G$  и се пресметува врз основа на претходно утврдени коефициенти (според горната постапка). Погонска сила во овој случај е разликата во парцијалните притисоци, така што масениот флуks на водената пара ќе биде:

$$N_A M_A = k_G (p_{A_i} - p_A) M_A = k_G \left( p_A^0 - \frac{p_A^0}{2} \right) M_A$$

Бидејќи  $k_G = k'_G \frac{p_B}{p_{B_m}}$  средниот логаритамски парцијален притисок на инертната компонента (воздухот) е:

$$p_{B_m} = \frac{\left( p - \frac{p_A^0}{2} \right) - (p - p_A^0)}{\ln \frac{\left( p - \frac{p_A^0}{2} \right)}{(p - p_A^0)}} = \frac{\frac{p_A^0}{2}}{\ln \frac{\left( p - \frac{p_A^0}{2} \right)}{(p - p_A^0)}}$$

$p_A^0$ , парниот напон се зема од табела и изнесува 2063,8 (Pa)

$$p_{B_m} = \frac{\frac{2063,8}{2}}{\ln \frac{\left( 101300 - \frac{2063,8}{2} \right)}{(101300 - 2063,8)}} = 99751,3 \text{ (Pa)}$$

Врз основа на Шервудовиот број  $k_G$  ќе биде:

$$k_G = 1,48 \cdot 10^{-9} \frac{101300}{99751,3} = 1,50 \cdot 10^{-9} \left( \frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}} \right)$$

Бараниот масен флуks сега може да се пресмета:

$$N_A M_A = N_{H_2O} M_{H_2O} = 1,50 \cdot 10^{-9} \frac{2063,4}{2} 18 = 2,78 \cdot 10^{-5} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$$

## 5. МЕЃУФАЗЕН ПРЕНОС НА МАСА

Овде се разгледува меѓуфазниот пренос на компонентата ( $A$ ) низ граничната површина на два флуида кои се во нерамнотежен контакт во однос на компонентата ( $A$ ). Компонентата која се пренесува тогаш поминува од едниот флуид до површината на контактот и од површината на контактот кон другиот флуид. При ваков пренос слоевите на флуидот непосредно до контактната површина се во меѓусебна рамнотежа. Затоа познавањето на рамнотежните односи на фазите е неопходен услов за проучување на преминот на масата. Ваквиот пренос најчесто се нарекува меѓуфазен пренос на маса.

Кога се разгледува преносот на маса при контакт на две фази, тогаш едната фаза најчесто претставува гас (индекс  $G$ ), а другата течност (индекс  $L$ ). Промените во содржините на компонентата ( $A$ ) тогаш обично се дефинирани со промената на парцијалниот притисок во гасната фаза  $p_A$  и промената на молската концентрација  $c_A$ .

Во општ случај може да се остварат **три карактеристични видови на контакт**.

**Првиот случај** се карактеризира со контакт на рамнотежните фази при што **нема пренос**. Тогаш хемискиот потенцијал на компонентата ( $A$ ) во полесната фаза е  $\mu_{AL}$ .

Овој контакт е дефиниран со рамнотежната крива од слика 5.1, а многу често се апроксимира со правата  $p_A^* = mc_A$ . Во општ случај рамнотежната распределба на некоја компонента е емпириски определена.

За случаите со разблажени раствори (системи со мала концентрација) важи **Хенриев закон (Henri's law)**:

$$p_A^* = H \cdot c_A \quad (5.1)$$

каде што:

$H$  – Хенриева константа.

За идеалните раствори, пак, важи **Рауловиот закон (Raoult's law)** кој гласи:

При дадена температура и притисок, парцијалниот парен притисок на една супстанција ( $p_A^*$ ) во смеса е еднаков на производот од парниот притисок на чиста супстанција ( $p_A^0$ ) и нејзиниот молски удел ( $x_A$ ) во смесата.

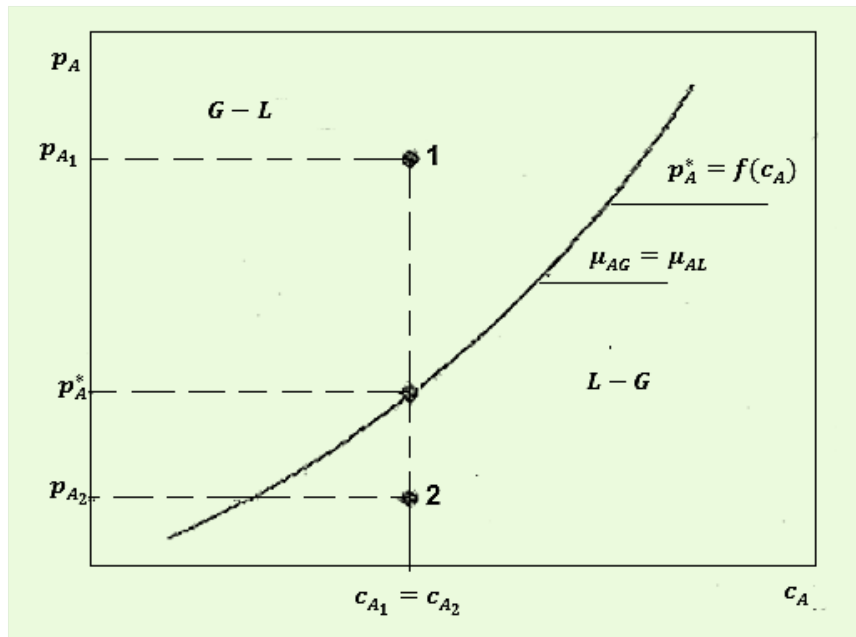
$$p_A^* = p_A^0 \cdot x_A \quad (5.2)$$

**Вториот и третиот карактеристичен контакт** одговараат на контактот на нерамнотежните фази и се манифестираат **со пренос на маса од една во друга фаза**, а се разликуваат по насоката на пренос која може да биде од лесната во потешката фаза или обратно. Во координатите  $p_A, c_A$  секоја точка може да претставува точка на контакт на фазите со соодветни концентрации (слика 5.1).

Точките на контакт кои се над рамнотежните линии, на пример точка 1, укажуваат на пренос од полесната во потешката фаза од ( $G \rightarrow L$ ), бидејќи:

$$p_{AL} > p_A^* = f(c_{A1})$$

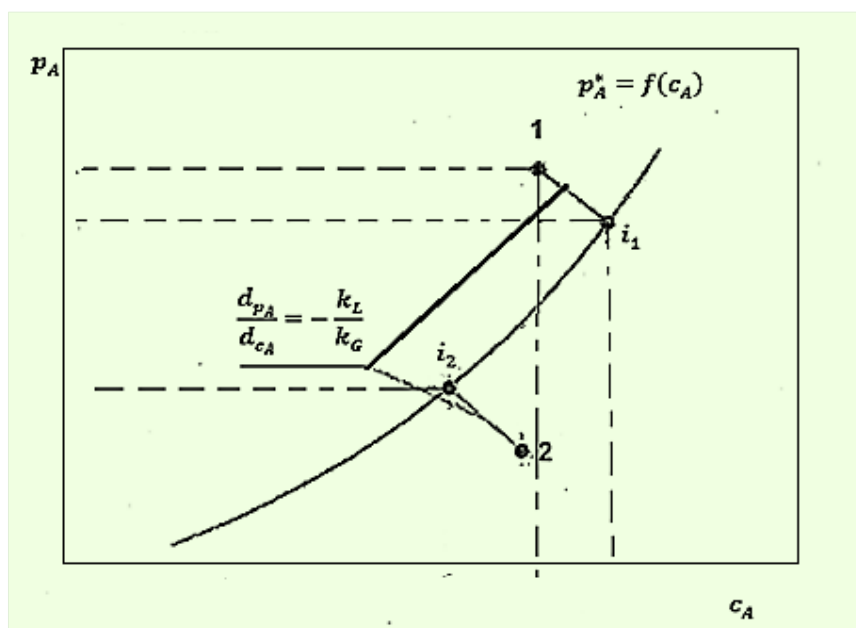
Контактот при кој доаѓа до пренос од потешка во полесна фаза од  $L$  во  $G$  е претставен со точка 2 под рамнотежната линија. Во точка 2 концентрацијата во полесната фаза  $p_{A2}$  е помала од рамнотежната и преносот е насочен кон полесната фаза.



Слика 5.1: Карактеристичен контакт на две фази

При нерамнотежен контакт се воспоставува проток на маса низ двете фази кој е определен со флуksот на премин на масата до површината на контактот и со површината на контактот. Ако големините на границата на фазите се означат со индексот ( $i$ ), а насоката на преносот е од полесната кон потешката компонента, тогаш флуksот кон границата на фазите од страна на полесната фаза ќе биде:

$$N_{AG} = k_G(p_{A1} - p_{Ai}) \quad (5.3)$$



Слика 5.2: Концентрации на границата на фазите

Аналогно на ова флуксот од страната на потешката компонента насочен од границата на фазите е:

$$N_{AL} = k_L(c_{A1} - c_{Ai}) \quad (5.4)$$

Во горните равенки  $(p_{A1} - p_{Ai})$  и  $(c_{A1} - c_{Ai})$  се погонска сила за премин од полесна во потешка фаза. За стационарни услови флуксовите во двете фази се еднакви,  $N_{AG} = N_{AL}$ , така што:

$$(p_{A1} - p_{Ai}) = \frac{k_L}{k_G}(c_{A1} - c_{Ai}) \quad (5.5)$$

Равенката (5.5) е равенка на права линија со коефициент  $-\frac{k_L}{k_G}$  (слика 5.2).

Врз основа на познатите коефициенти на пренос на маса со цртање на права во дијаграмот на пресекот со рамнотежната крива може да се одредат концентрациите на границата на фазите и врз основа на тоа да се дефинира флуксот за секоја од фазите. На слика 5.2. се прикажани состојбите на границата на фазите на пренос кои одговараат на контактите претставени со точката **1** (кога насоката на пренос е од  $G \rightarrow L$ ) и точката **2** (кога насоката на пренос е од  $L \rightarrow G$ ).

#### Пример 5.1:

Во еден уред смеса од воздух и од компонентата ( $A$ ) е во контакт со воден раствор на истата компонентата. Парцијалниот притисок на компонентата ( $A$ ) во гасната фаза изнесува 5,4 (kPa), а концентрацијата во течната фаза 0,03 (kmol/m<sup>3</sup>). Коефициентот на пренос на маса од страна на гасната фаза е  $4,3 \cdot 10^{-7}$  (kmol/m<sup>2</sup> · s · Pa), а од страна на течната фаза 0,0354 (kmol/m<sup>2</sup> · s · Pa). Равенката на рамнотежната линија е  $p_A^* = m c_A$  каде што  $m = 10,5 \cdot 10^4$  (Pa · m<sup>3</sup>/kmol).

#### Да се пресметаат:

- насоката на пренос на компонентата ( $A$ );
- концентрацијата на границата на фазите;
- погонската линија.

#### Решение:

**а)** За дадената концентрација парцијалниот притисок на компонентата  $A$  во смесата е поголем од рамнотежниот:

$$p_A^* = 10,5 \cdot 10^4 \cdot 0,03 = 3150 \text{ Pa} < p_{A1} = 5400 \text{ (Pa)},$$

што значи дека компонентата  $A$  се пренесува од гасната во течната фаза.

**б)** Составот на границата на фазите е дефиниран во пресекот на погонската права:

$$-\frac{k_L}{k_G} = \frac{(p_{A1} - p_{Ai})}{(c_{A1} - c_{Ai})} \quad (*)$$

и во рамнотежната права за разгледуваниот пресек, односно точка на контакт:

$$p_{A_1} = m \cdot c_{A_1}$$

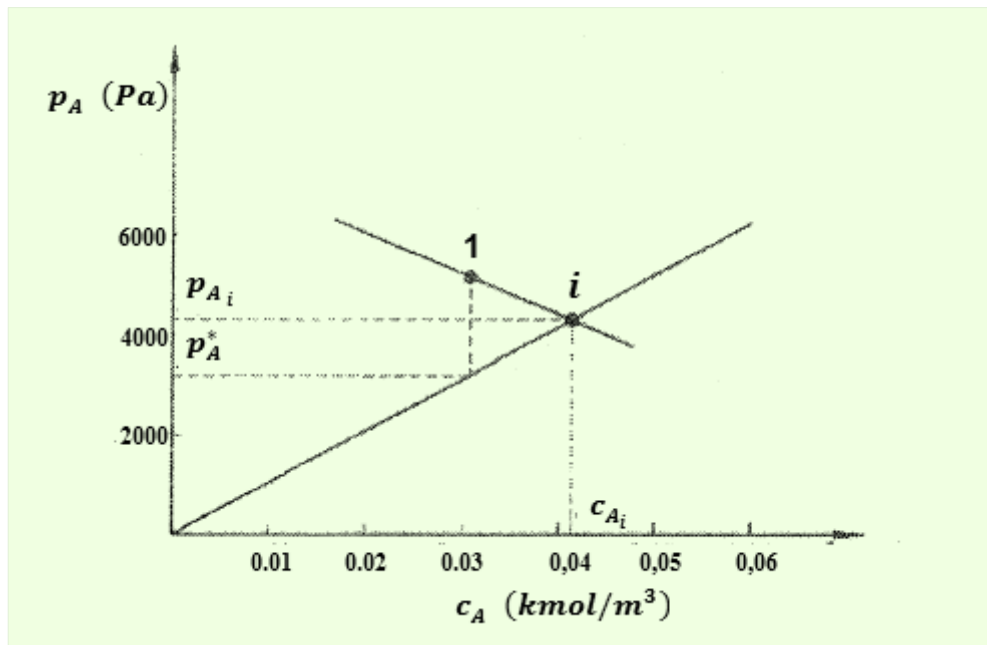
Со замена на вредностите од задачата во равенката (\*) се добива:

$$-\frac{0,0354}{4,3 \cdot 10^{-7}} = \frac{(5400 - p_{A_i})}{(0,03 - c_{A_i})} \text{ и } p_{A_i} = 10,5 \cdot 10^4 \cdot c_{A_i}$$

Ова е систем на равенки со две непознати. Со решавање на системот равенки се добиваат вредностите за  $p_{A_i}$  и  $c_{A_i}$ .

$$p_{A_i} = 4410 \text{ Pa}, \quad c_{A_i} = 0,042 \text{ (kmol/m}^3\text{)}.$$

Решението може да се добие и графички со исцртување на рамнотежната и погонската права, при што во нивниот пресек се добива составот на границата на фазите (слика 5.3):



Слика 5.3: Рамнотежна и погонска права за примерот 5.1

в) Единечната погонска права е:

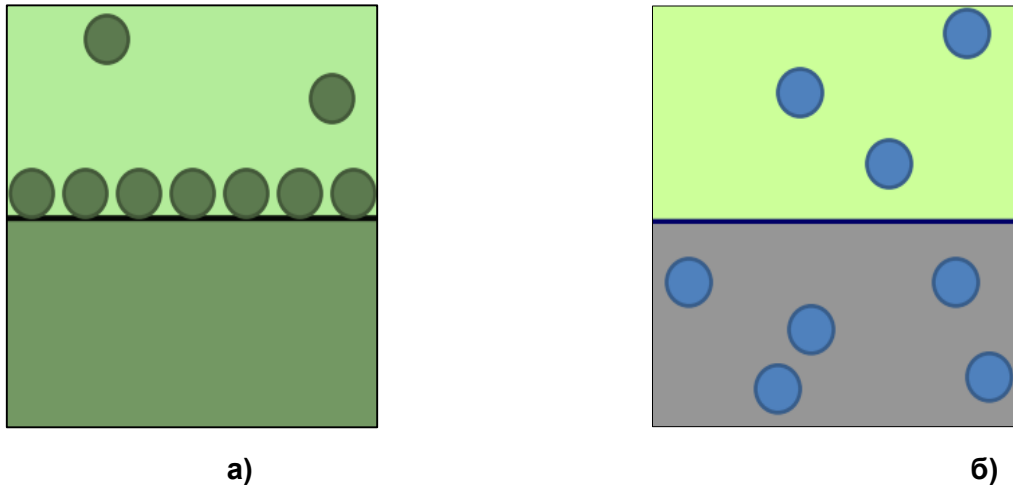
$$-\frac{0,0354}{4,3 \cdot 10^{-7}} = \frac{(p_A - 4410)}{(c_A - 0,042)}$$

односно:

$$p_A = 82,52 \cdot 10^3 \cdot c_A + 7875,7 \text{ каде што } p_A \text{ е во (Pa), а } c_A \text{ во (kmol/m}^3\text{)}.$$

## 6. АДСОРПЦИЈА

**Адсорпцијата** е појава кога на површината на фазата се зголемува или се намалува (негативна адсорпција или **десорпција**) концентрацијата на одделни компоненти, при што доаѓа до намалување на слободната енергија на граничната површина. **Адсорбат** е супстанцијата која се адсорбира, а **адсорбенс** супстанцијата на која се врши адсорпција. На слика 6.1 е илустрирана разликата меѓу адсорпцијата и апсорпцијата:



Слика 6.1: Адсорпција (а) и апсорпција (б)

**Покриеност на површината** ( $\theta$ ) е однос од бројот на покриени адсорпциони места и расположливите адсорпциони места.

**Брзината на адсорпција** ( $v_{ad}$ ) е промена на покриеноста на површината во единица време, односно:

$$v_{ad} = \frac{d\theta}{dt}, \quad (6.1)$$

од каде следува дека:

$$\theta = \int_0^t v_{ad} \cdot dt \quad (6.2)$$

За одредување на покриеноста на површината се користат следните методи:

- гравиметриски;
- волуметриски;
- флеш десорпција;
- проточен метод;
- мерење на радиоактивноста.

Адсорпција се случува на површината на цврста или течна фаза од гасна или течна фаза.

Адсорпцијата на цврста површина може да биде:

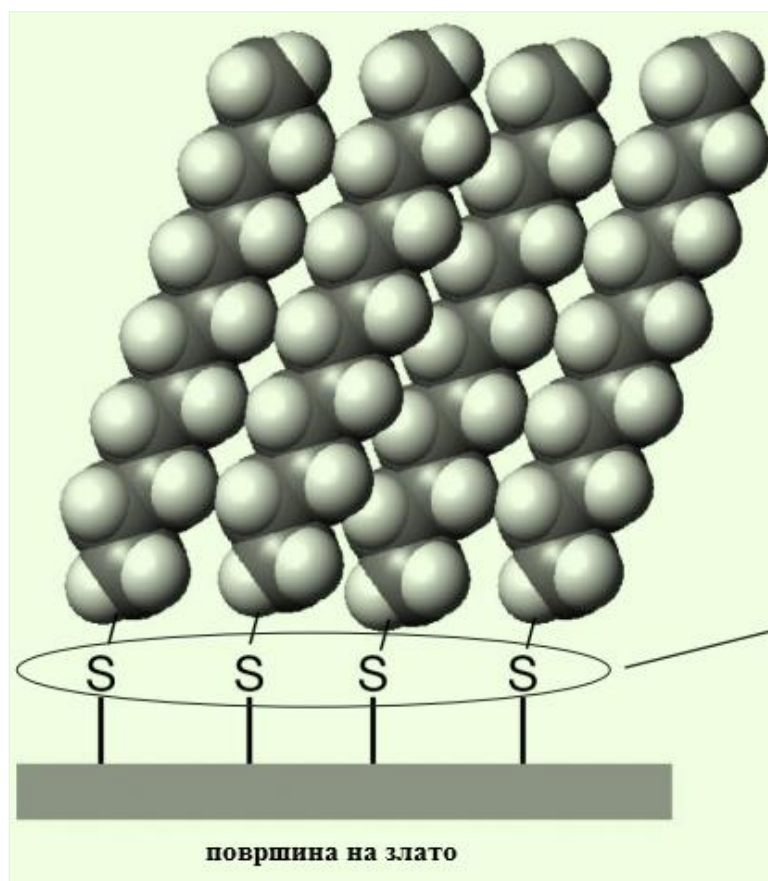
- физичка;
- хемиска.

Карактеристиките на физичката адсорпција се:

- слаби Вандервалсови сили (Van der Waals's forces);
- топлината на адсорпцијата ( $\Delta H_{ad} < 0$ ) е негативна, од редот на големина  $20 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)$ ;
- идентитетот на адсорбираните молекули останува ист, а врските во молекулите се истегнати или свиткани;
- адсорпцијата е повеќеслојна.

Карактеристиките на хемиската адсорпција се:

- молекулите се врзуваат за површината со ковалентна врска;
- енергијата на врзување е од редот на големина  $200 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}\right)$ ;
- површината треба да се загрее до висока температура и да се врши испумпување за да се десорбира хемиски адсорбираниот гас;
- десорбируваниот гас често е различен од адсорбируваниот;
- адсорпцијата е еднослојна (монослојна).



Природата на врските меѓу адсорбенсот и адсорбатот го одредува видот на адсорпција.

Слика 6.2: Адсорпција на површината на злато

На слика 6.2 е прикажан случај на адсорпција на површината на злато, односно монослој од алкилтиол формиран на површината на злато со хемисорпција на тиолните групи и агрегати на алкилните синџири.

**Пример 6.1:**

Адсорпцијата на некој гас може да се опише со **Лангмирова** (Langmuir) изотерма во која коефициентот на адсорпција на 25 °C е  $K = 0,85 \text{ (kPa}^{-1}\text{)}$ .

**Да се пресмета:**

Притисокот при кој покриеноста на површината ќе биде:

а)  $\theta = 0,15$

б)  $\theta = 95$

**Решение:**

$$\theta = \frac{Kp}{1 + Kp} \rightarrow p = \frac{\theta}{1 - \theta} \frac{1}{K}$$

Од горната равенка следува дека за степен на покриеноста на површината:

а) за степен на покриеност  $\theta = 0,15$  притисокот ќе биде,  $p = 0,21 \text{ (kPa)}$ ;

б) за степен на покриеност  $\theta = 95$ , притисокот ќе биде  $p = 22,4 \text{ (kPa)}$ .

**Пример 6.2:**

Некој цврст примерок адсорбира 0,44 (mg) јаглероден моноксид (CO) кога притисокот на гасот изнесува 26 (kPa), а температурата е 300 K. Масата на гасот која е адсорбирана на иста количина примерок при притисок од 3,0 (kPa) и температура од 300 K изнесува 0,19 (mg). Оваа адсорпција е опишана со **Лангмирова** изотерма.

**Да се пресмета:**

Покриеноста на површината на овие притисоци.

**Решение:**

$$m_1 = 0,44 \text{ (mg)} \quad p_1 = 26 \text{ (kPa)} \quad T = 300 \text{ K}$$

$$m_2 = 0,19 \text{ (mg)} \quad p_2 = 3,0 \text{ (kPa)} \quad T = 300 \text{ K}$$

$$\theta = \frac{Kp}{1 + Kp} = \frac{m}{m_0} k'$$

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{\frac{m_1}{m_0}}{\frac{m_2}{m_0}} = \frac{\frac{K \cdot p_1}{1 + K \cdot p_1}}{\frac{K \cdot p_2}{1 + K \cdot p_2}}$$



Од овде следува дека  $K$  ќе биде:

$$K = \frac{\frac{m_1 p_2 - 1}{m_2 p_1}}{1 - \frac{m_1}{m_2}} \cdot \frac{1}{p_2} = 0,19 \text{ (Pa}^{-1}\text{)}$$

Со познатата вредност на  $K$  може да се пресметаат  $\theta_1$  и  $\theta_2$

$$\theta_1 = \frac{K \cdot p_1}{1 + K \cdot p_1} = 0,83$$

$$\theta_2 = \frac{K \cdot p_2}{1 + K \cdot p_2} = 0,36$$

### Пример 6.3:

Во табелата се прикажани податоци кои се однесуваат на адсорпцијата на јаглероден моноксид ( $CO$ ) на активен јаглен на температурата од  $273 K$ . Процесот на адсорпција може да се опише со Лангмировата изотерма.

### Да се одреди:

- на што е еднаков коефициентот на адсорпцијата  $K$  ( $kPa^{-1}$ );
- волуменот што одговара на целосната покриеност на површината при формирање на монослојот,  $V_\infty$  ( $cm^3$ ).

Табела 6.1: Податоци за притисокот и волуменот за примерот 6.3

|                |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $p$ ( $kPa$ )  | 13,3 | 26,7 | 40,0 | 53,3 | 66,7 | 80,0 | 93,3 |
| $V$ ( $cm^3$ ) | 10,2 | 18,6 | 25,5 | 31,5 | 36,9 | 41,6 | 46,1 |

### Решение:

За одредување на коефициентите  $a$  и  $b$  од равенката на права  $y = a + bx$  ќе се примени методот на најмали квадрати:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

За оваа пресметка се користат вредностите за  $p$  и  $V$ , односно  $x$  и  $y$  дадени во горната табела.

Покриеноста на површината  $\theta$  може да се пресмета на два начини:

$$\theta = \frac{V}{V_{\infty}} = \frac{Kp}{1 + Kp}$$

од каде што следува:

$$\frac{V_{\infty}}{V} = 1 + \frac{1}{Kp} \rightarrow \frac{p}{V} = \frac{1}{KV_{\infty}} + \frac{1}{V_{\infty}}p$$

За големините во равенката на права,  $y = a + bx$ , ( $x, y, a$  и  $b$ ) се добиени изразите:

$$y = \frac{p}{V}, \quad x = p, \quad a = \frac{1}{KV_{\infty}}, \quad b = \frac{1}{V_{\infty}}$$

$K$  и  $V_{\infty}$ , што всушност се бараат во задачата, може да се пресметаат откако ќе се најдат вредностите на коефициентите  $a$  и  $b$ . Прво се одредува  $V_{\infty}$ , а потоа и  $K$ .

$$V_{\infty} = 113 \text{ (cm}^3\text{)}, a$$

$$K = 7,51 \cdot 10^{-3}$$

#### Пример 6.4:

Во табелата се прикажани податоци кои се однесуваат на адсорпцијата на јаглероден моноксид ( $CO$ ) на активен јаглен на различни температури при кои се постигнува вредност за волуменот  $V$  од  $10,0 \text{ (cm}^3\text{)}$ , (коригирано на  $1 \text{ atm}$  и  $273 \text{ K}$ ). Процесот на адсорпција може да се опише со Лангмировата изотерма.

#### Да се одреди:

а) вредноста на енталпијата на адсорпцијата која одговара на оваа покриеност.

Табела 6.2: Податоци за притисокот и волуменот за примерот 6.4

|                   |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|
| $T \text{ (K)}$   | 200  | 210  | 220  | 230  | 240  | 250  |
| $p \text{ (kPa)}$ | 4,00 | 4,95 | 6,03 | 7,20 | 8,47 | 9,85 |

#### Решение:

Исто како во претходниот случај, за одредување на коефициентите  $a$  и  $b$  во равенката  $y = a + bx$  ќе се примени методот на најмали квадрати:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

Покриеноста на површината  $\theta$  ќе биде:

$$\theta = \frac{V}{V_{\infty}} = \frac{Kp}{1 + Kp} \rightarrow Kp = \frac{\theta}{1 - \theta} = \text{const.}$$

$$\ln K + \ln p = \text{const.} \rightarrow \left( \frac{d \ln K}{dT} \right)_{\theta} = \frac{\Delta H_{ad}}{RT^2} = - \left( \frac{d \ln p}{dT} \right)_{\theta}$$

$$\left[ \frac{d \ln p}{(1/T)} \right]_{\theta} = \frac{\Delta H_{ad}}{R}$$

$$y = \ln p, \quad x = \frac{1}{T}, \quad b = \frac{\Delta H_{ad}}{R}$$

$$\Delta H_{ad} = -7,5 \text{ (kJ/mol)}$$

## 7. РАМНОТЕЖА НА ФАЗИ

Пред практичната изведба на дестилацијата неопходни се теоретски познавања за рамнотежата во системот течност-пара. Во случај на раздвојување на компоненти од повеќекомпонентна смеса со дестилација треба да се користат дополнителни податоци за целосно дефинирање на рамнотежата во системот пара-течност. Во согласност со **Гибсовото (Gibbs) правило на фази** следува:

$$F + S = K + 2 \quad (7.1)$$

каде што:

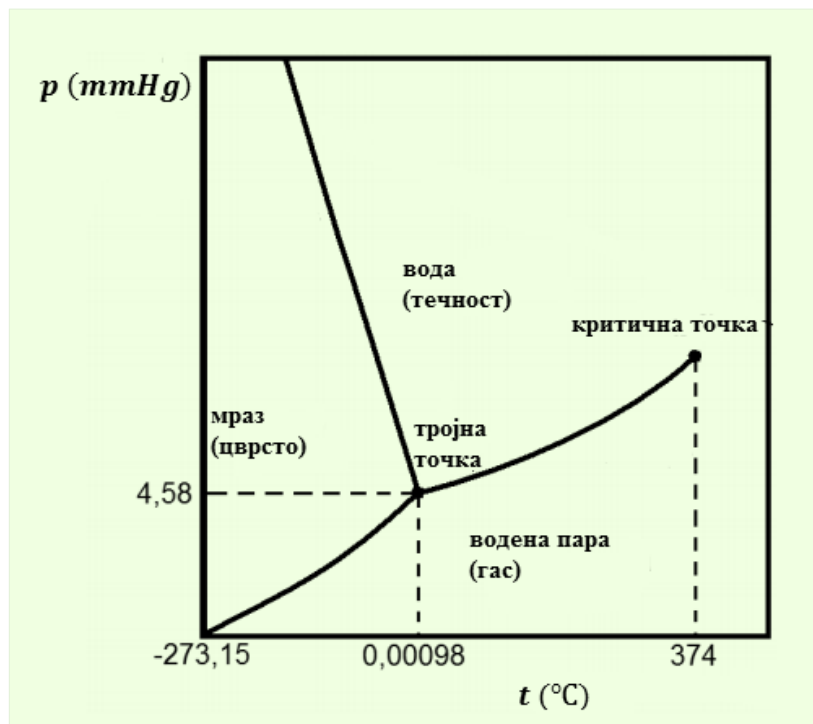
$F$  – број на фази во рамнотежа,

$S$  – број на степени на слобода,

$K$  – број на компоненти неопходни за опишување на системот.

Бројот на степени на слобода, всушност, е бројот на интензивните големини како што се **притисок, температура, концентрација (молски удел)** кои во извесни граници може да се менуваат, а хетерогениот систем, сепак, да остане во рамнотежа, односно да не се промени бројот на фази, т.е. да не смена ниту една фаза од постоечките ниту, пак, да настане нова фаза.

Промените во фазите што настануваат во еден систем при промена на надворешните услови (притисок и температура) се претставуваат преку т.н. фазни дијаграми. На слика 7.1 е прикажан фазниот дијаграм на водата.



Слика 7.1: Фазен дијаграм на водата

**Пример 7.1:****Да се одреди:**

Максималниот број на степени на слобода во системи кои содржат една, две и три компоненти:

**Решение:**

$$\text{а) за една компонента: } K = 1, F = 1 \rightarrow S = K + 2 - F = 1 + 2 - 1 = 2 \text{ т.е. } S = 2$$

$$\text{б) за две компоненти: } K = 2, F = 1 \rightarrow S = K + 2 - F = 2 + 2 - 1 = 3 \text{ т.е. } S = 3$$

$$\text{в) за три компоненти: } K = 3, F = 1 \rightarrow S = K + 2 - F = 3 + 2 - 1 = 4 \text{ т.е. } S = 4$$

**Пример 7.2:****Да се одреди:**

Максималниот број на фази кои може да се најдат во рамнотежниот систем што содржи вода и шеќер.

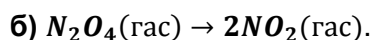
**Решение:**

Во системот има две компоненти, вода и шеќер, и тие се во рамнотежа, што значи:

$$F = ? \quad K = 2, \quad S = 0 \\ F = K + 2 - S = 2 + 2 - 0 = 4$$

**Пример 7.3:****Да се одреди:**

Колку компоненти, фази и степени на слобода има во рамнотежниот систем:

**Решение:**

$$\text{а) } K = 2, F = 3 \rightarrow S = K + 2 - F = 2 + 2 - 3 = 1$$

$$\text{б) } K = 1, F = 1 \rightarrow S = K + 2 - F = 1 + 2 - 1 = 2$$

**Пример 7.4:**

Системот се состои од воден раствор на етанол во рамнотежа со парчиња мраз.

**Да се одреди:**

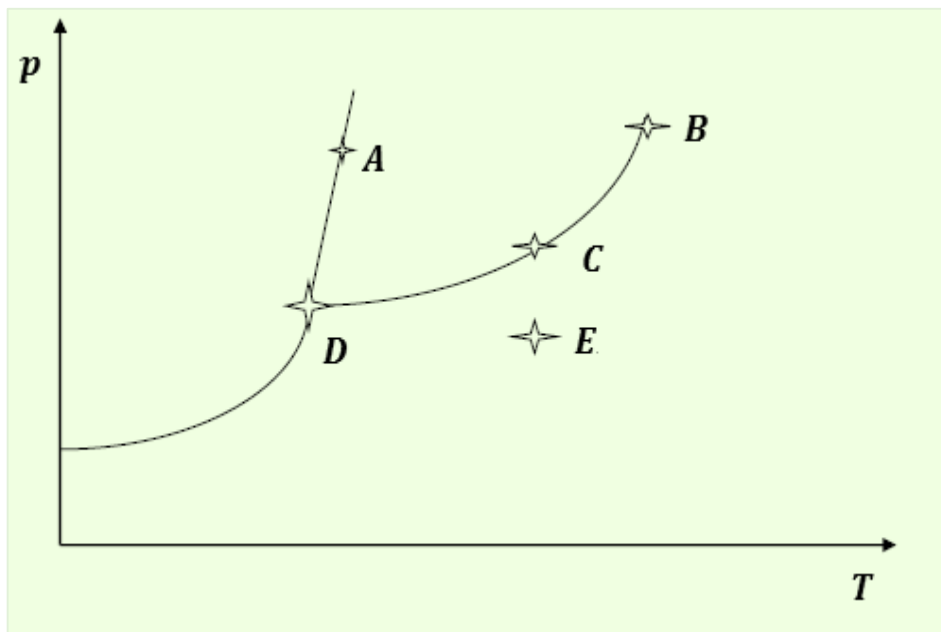
Бројот на компонентите, бројот на фазите и бројот на степени на слобода.

**Решение:**

- а) бројот на компоненти  $K = 2$  (вода и етанол);
- б) бројот на фазите  $F = 2$  (мраз и раствор);
- в) степен на слобода  $S = K + 2 - F = 2 + 2 - 2 = 2$  (температура и состав).

**Пример 7.5:**

Врз основа на следниот фазен дијаграм, **да се одреди** кој исказ е погрешен.



Слика 7.2: Фазен дијаграм за примерот 7.5

- а) Точката *A* одговара на коегзистенција на цврста и течна фаза.
- б) Точката *B* одговара на критична точка.
- в) Точката *D* одговара на коегзистенција на трите фази во рамнотежа.
- г) Движењето од *E* до *C* одговара на компресија и предизвикува кондензација.
- д) Густината на цврстата фаза е помала од густината на течната фаза.

**Решение:** Очигледно дека погрешен е исказот даден под д.

**Пример 7.6:**

**Да се одреди:**

Бројот на степени на слобода во следните системи:

- а) смеса од водород  $H_2$ , азот  $N_2$  и амонијак  $NH_3$  без катализатор;
- б) смеса од водород  $H_2$ , азот  $N_2$  и амонијак  $NH_3$  со катализатор;
- в) смеса од водород  $H_2$ , азот  $N_2$  и амонијак  $NH_3$  со катализатор со дополнителен услов дека целиот водород настанува со дисоцијација на амонијак.

**Решение:**

а)  $K = 3, F = 1 \rightarrow S = K + 2 - F = 3 + 2 - 1 = 4$

б)  $K = 2, F = 1 \rightarrow S = K + 2 - F = 2 + 2 - 1 = 3$

в)  $K = 1, F = 1 \rightarrow S = K + 2 - F = 1 + 2 - 1 = 2$

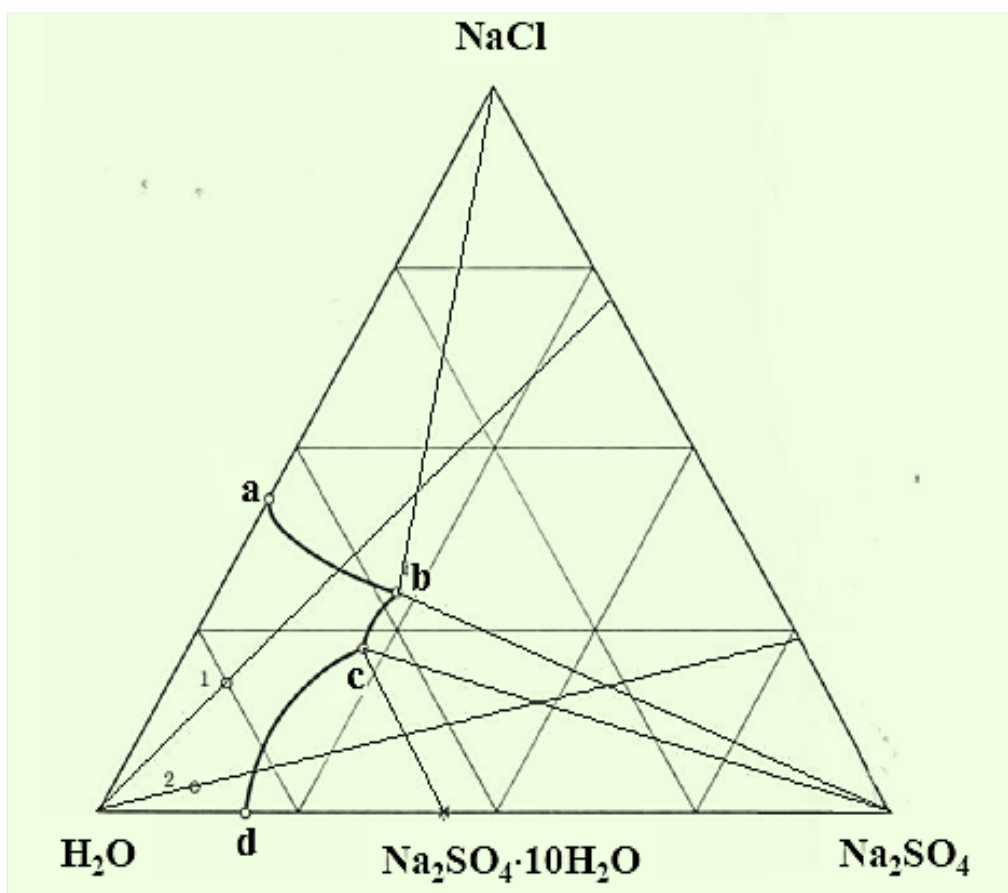
**Пример 7.7:**

Во трикомпонентен систем чиј фазен дијаграм е прикажан на сликата, кривите означуваат:

**ab** - состав на растворот презаситен со  $NaCl$

**bc** - состав на растворот презаситен со  $Na_2SO_4$

**dc** - состав на растворот презаситен со  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$

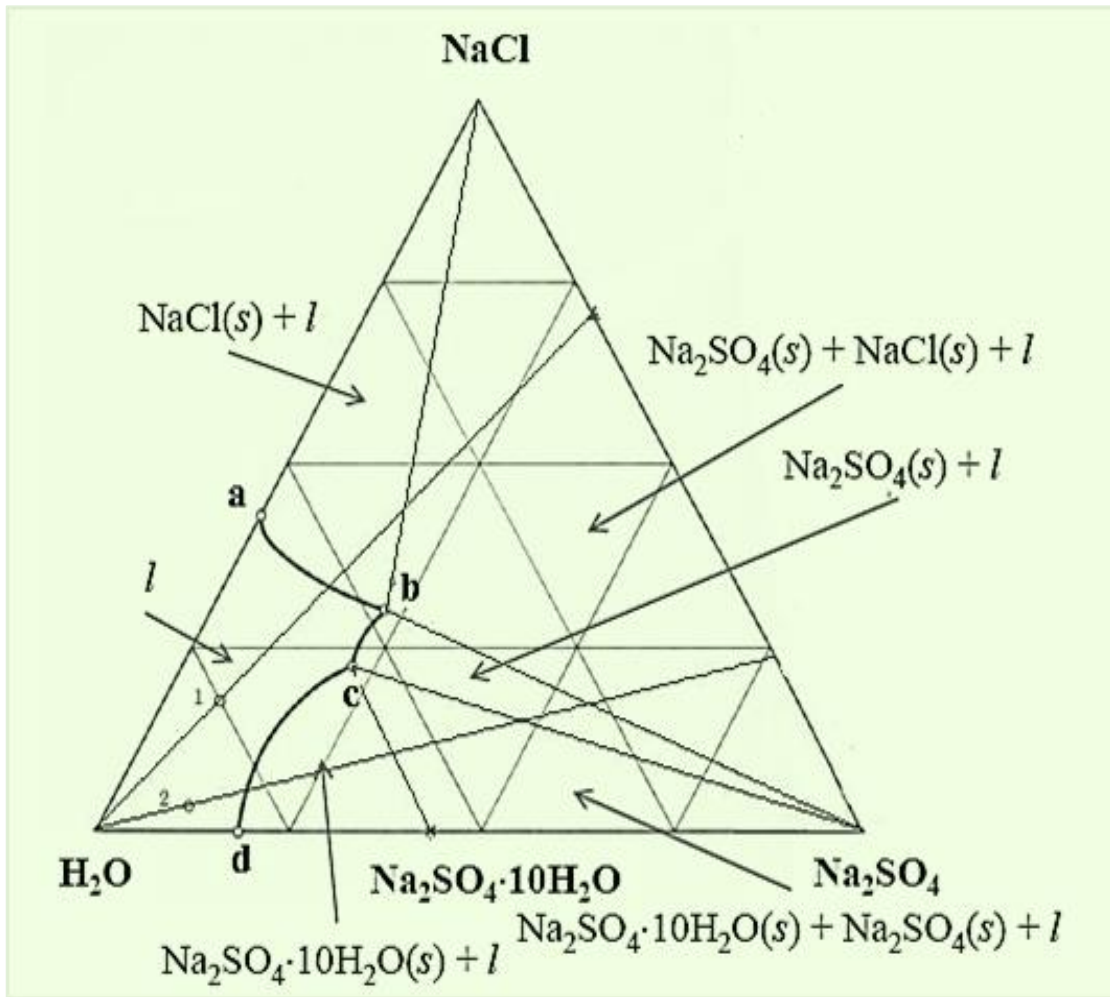


Слика 7.3: Фазен дијаграм за примерот 7.7

Да се дополни дијаграмот и да се обележат фазите во одделните области.

**Решение:**

Дополнувањето на дијаграмот и фазите во одделните области се дадени на слика 7.4, при што индексот (*s*) се однесува на цврста состојба, а индексот (*l*) на течна состојба.



Слика 7.4: Дополнет фазен дијаграм – решение на примерот 7.7

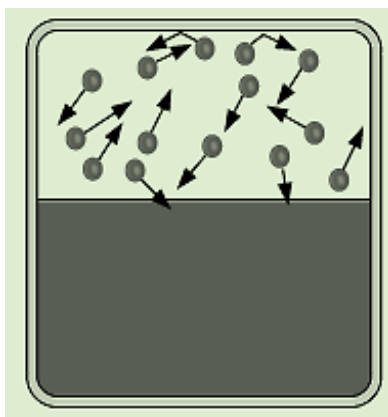


## 8. ДЕСТИЛАЦИЈА

Како производ на органските реакции вообичаено се добиваат соединенија кои многу ретко се во чиста состојба. Тие содржат различни примеси како појдовни реактанти, производи на споредни реакции, катализатори и слично, така што неопходно е да се изврши пречистување и на крајот идентификација на добиеното соединение.

Дестилацијата е еден од највообичаените методи за пречистување на испарливите течности. Процесот се состои од загревање на течноста до вриење, со што таа се претвора во пареа, и од нејзино кондензирање во течност наречена дестилат.

Доколку некоја течност се стави во затворен сад на константна температура, молекулите од површината на течноста ќе преминуваат во гасната фаза сè до постигнување на рамнотежа, односно сè додека просторот над површината на течноста не се засити со нејзината пареа. Притоа притисокот што го создава пареата над површината на течноста се нарекува **парен притисок или парен напон**. Парниот притисок на чиста течност при дадена температура е константна големина која не зависи од апсолутната количина на течноста. Со зголемување на температурата расте и парниот притисок. **Кога парниот притисок на течноста ќе се изедначи со надворешниот притисок кој дејствува врз површината на течноста, течноста почнува да врие.** Доколку надворешниот притисок кој дејствува на површината на течноста е нормален атмосферски притисок, температурата на која течноста врие се нарекува нормална точка на вриење ( $T_v$ ). Ако притисокот на површината на течноста се намали, тогаш ќе се намали и точката на вриење. Ова својство се користи при дестилација под намален притисок.



Слика 8.1: Рамнотежа помеѓу гасната и течната фаза

Во случаи кога супстанцијата која дестилира е релативно чиста, температурата на пареата ќе се зголемува сè додека ја достигне точката на вриење на течноста. Во оваа точка, течноста и пареата се во термичка рамнотежа заради што дестилацијата ќе се одвива при константна температура.

Основните принципи врз кои се темели дестилацијата на смеси на испарливи течности се содржани во два закони и тоа: **Далтоновиот закон (Dalton's law)** за парцијални притисоци и **Рауловиот закон**.

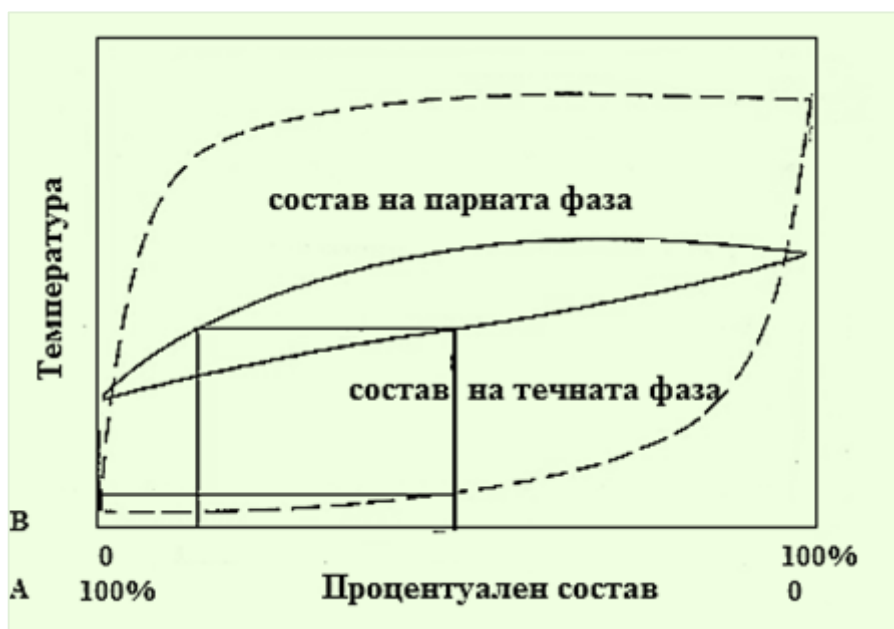
**Далтоновиот закон** за парцијални притисоци гласи:

Вкупниот притисок на гасот или парниот притисок на течноста ( $p$ ) претставува збир од парцијалните притисоци на неговите поединечни компоненти  $A$  и  $B$  со парни притисоци  $p_A$  и  $p_B$ , соодветно.

$$p = p_A + p_B$$

(Рауловиот закон веќе беше дефиниран кај поглавјето за рамнотежа на фазите со равенка број 5.1.1).

Од Рауловиот закон следува дека вкупниот парен притисок на течна смеса зависи од парцијалниот притисок на чистите компоненти и нивниот молски удел во смесата. Далтоновиот закон за парцијални притисоци и Рауловиот закон се математички изрази за тоа што точно се случува во текот на дестилацијата, бидејќи ги опишуваат промените во составот на течноста што врие и нејзината пареа во однос на температурата. Вредностите за составот на течноста и составот на пареата во однос на температурата се нанесуваат во дијаграм кој се нарекува **фазен дијаграм**. Од овој дијаграм може да се прочитаат промените во составот на течноста и на пареата во текот на дестилацијата.



Слика 8.2: Фазен дијаграм за дестилација на двокомпонентна смеса

— компоненти со блиски ( $T_v$ ); - - - компоненти со голема разлика во ( $T_v$ )

Дијаграмот го покажува текот на дестилацијата на двокомпонентна смеса и тоа за супстанции со значителна разлика во точките на вриење (испрекината линија) и блиски точки на вриење (полна линија). Да почнеме со мешавина во однос 1:1 на **две течности кои меѓусебно се мешаат** ( $A$ ) и ( $B$ ). Супстанцијата ( $A$ ) има пониска точка на вриење ( $T_v$ ) од ( $B$ ) и треба да се разделат со дестилација под атмосферски притисок. На самиот почеток на дестилацијата, кога течноста почнува да врие, составот на течноста е 50 молски % од секоја компонента, а составот на пареата се одредува со повлекување на хоризонтална линија од кривата на течноста кон кривата на пареата.

Во првиот пример кога течностите имаа значително различни ( $T_v$ ) (испрекината линија), пареата се состои од компонента ( $A$ ). Откако пареите на поиспарливата

компонента (*A*) ќе кондензираат, понатамошното загревање ќе доведе и до зголемување на температурата до точката на вриење на компонентата (*B*). На овој начин двете течности лесно ќе се раздвојат со дестилација.

Ако точките на вриење на две течности имаат блиски вредности (полна линија) и составот на пареата кога течноста започнува да врие е 85 % (*A*) и 15 % (*B*), чиста супстанција (*A*) може да се добие само ако се изведат неколку последователни дестилации (редестилација) или да се употреби **фракциона дестилација**.

Многу двокомпонентни смеси не го следат Рауловиот закон и не даваат идеални фазни дијаграми. Некои мешавини, особено оние кои содржат хидроксилни групи, дестилираат при константна температура и со константен состав. Во овој случај се вели дека течностите формираат **азеотропна смеса (азеотроп)** и не може да се разделат со дестилација.

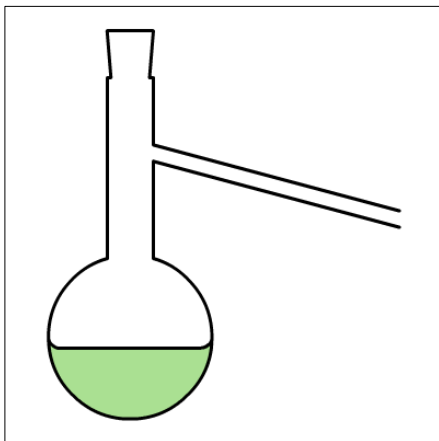
Според начините на кои се изведува дестилацијата, таа може да биде:

- дестилација под атмосферски притисок (обична или нормална дестилација);
- дестилација под намален притисок (вакуумска дестилација);
- дестилација со водена пареа;
- фракциона дестилација.

Без разлика на видот на дестилацијата, основните елементи на апаратурата за изведување на дестилација во лабораториски услови се:

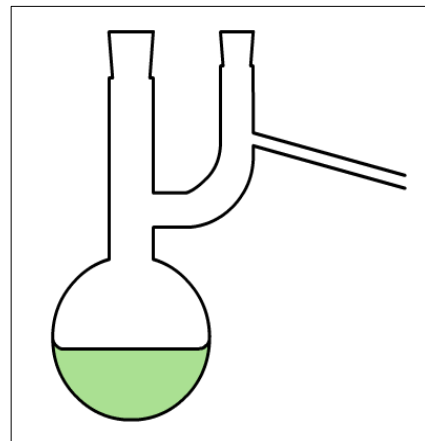
- колба;
- ладило;
- приемник (ерленмаер).

Колбата е стаклен сад со проширен долен дел, со рамно или тркалезно дно, тесен долг или краток врат и со затворач.



а)

Слика 8.3: а) Тркалезна колба со странична одводна цевка



б)

Слика 8.3: б) Клајзенова колба (Claisen's flask) со две грла

Постојат разни видови колби:

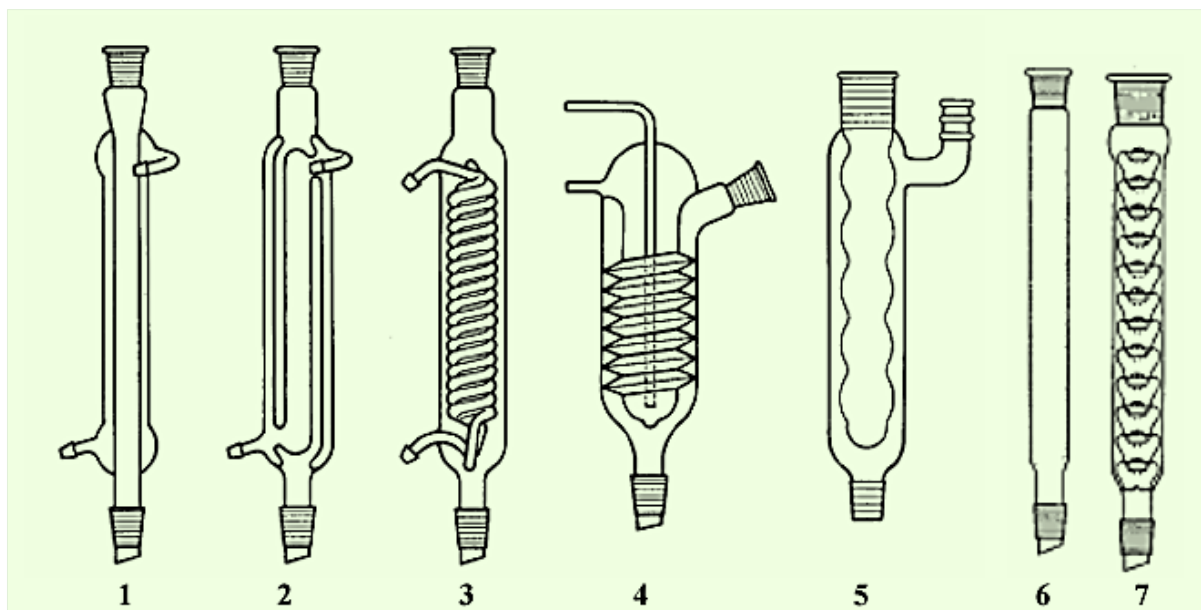
- колби со тркалезно дно, долго грло и здебелен раб на грлото;
- колба со тркалезно дно и кратко грло;
- колби со рамно дно и долго грло;
- колби со тркалезно дно, кратко грло и здебелен раб на грлото;
- колби со две или со три грла;
- ерленмаерова колба (ерленмаер).

За дестилација се користат следните видови колби:

- **тркалезна колба со странична одводна цевка** (слика 8.3а) – се употребува при дестилација под атмосферски притисок;
- **Клајзенова колба со две грла** (слика 8.3б) – се употребува при дестилација под намален притисок;
- **колба за фракциона дестилација во вакуум.**

## Ладила

Ладилото се користи за кондензација на пареата. Постојат повеќе видови ладила (слика 8.4) за дестилација. Многу често се користи Либиговото (**Liebig**) ладило кое се состои од една внатрешна цевка околу која се наоѓа стаклена обвивка преку која циркулира ладна вода. Се употребува за дестилација на супстанции кои имаат точка на вриење до 120 °C.



Слика 8.4: Ладила за дестилација

(1 - **Либигово** ладило, 2 - **Дејвисово** ладило, 3 - **Грахамово** ладило, 4 - **Фридрихово** ладило, 5 - ладило за **вакуумска дестилација**, 6 - **воздушно** ладило, 7 - **Вигрово** ладило)

Изборот на ладилото за дестилација кое ќе се користи при постапката се врши врз основа својствата и точката на вриење на супстанцијата која ја дестилираме.

Постојат и т.н. воздушни ладила кои најчесто се користат за кондензирање на пари со висока температура (за течности со точка на вриење над 150 °C) и како фракциони колони при фракциона дестилација.

## Ерленмаер

Како приемник на дестилатот најчесто се користи ерленмаер прикажан на слика 8.5. Тоа е, всушност, стаклен конусен сад со рамно дно, со тесен или широк врат. Ерленмаерите се изработуваат од обично или од огноотпорно стакло во различни големини од 50 (ml) до 600 (ml). Тие се употребуваат и за титрации, за загревање на течности и сл.



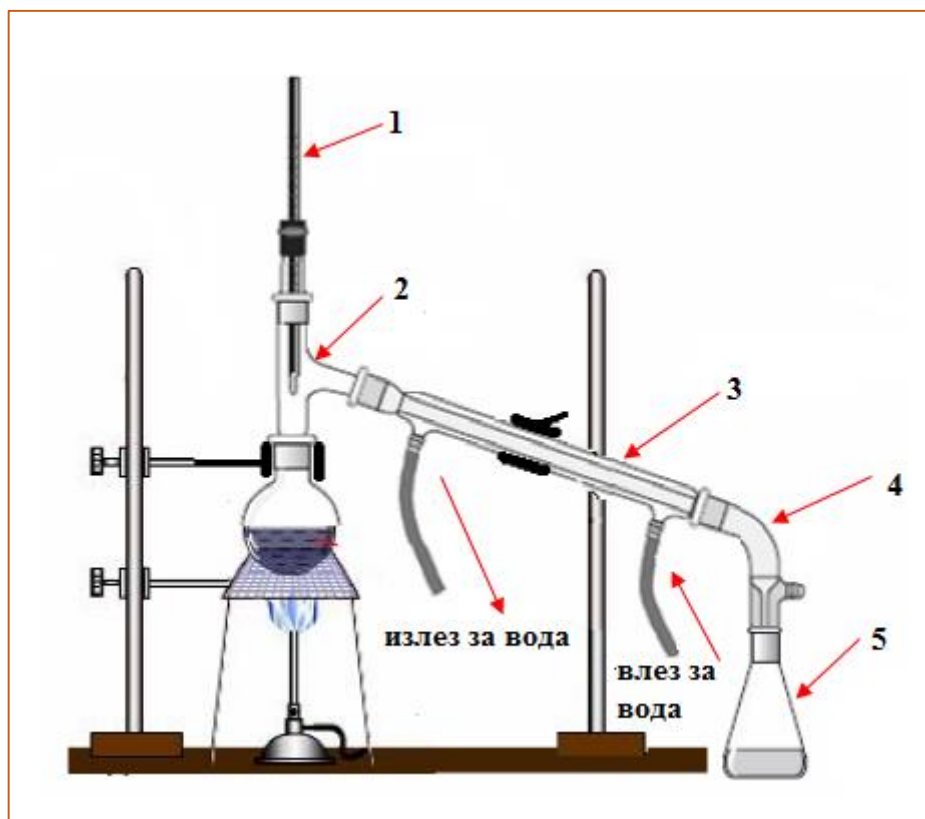
Слика 8.5: Ерленмаери

### 8.1. Дестилација под атмосферски притисок

За пречистување на течности со точка на вриење до 200 °C кои се разликуваат во точката на вриење ( $T_v$ ) за повеќе од 80 °C се користи дестилација под атмосферски притисок. Точката на вриење на некоја супстанција е нејзина важна физичка карактеристика. Таа може да се одреди со таканаречениот **Сиволобофов метод (Siwoloboff 's method)**.

Во епрувета со течност на која се одредува точката на вриење се става капилара затворена на едниот крај, а отворениот крај е потопен во течност. Епруветата се прицврстува за термометар така што висината на течност во епруветата да биде на ниво со резервоарот на живата и сите заедно се потопуваат во бањата. Со загревање на бањата од отворениот крај на капиларата почнува повремено да излегуваат меурчиња на воздух. Кога меурчињата ќе почнат да излегуваат континуирано, загревањето се прекинува, а со бавно ладење на системот меурчињата излегуваат сè побавно. Температурата на која од капиларата ќе излезе последното меурче на воздух е точка на вриење ( $T_v$ ) на испитуваната течност. Точката на вриење може да се одреди истовремено со изведувањето на дестилацијата. Температурата се мери со термометар кој со помош на тапа е прицврстен за грлото на колбата. Притоа треба да се внимава термометарот да поминува точно низ средината на грлото на колбата, а живиниот резервоар да биде околу 5 мм под нивото на страничната одводна цевка, така што е постојано и целосно облеан со парите коишто преминуваат во ладилото.

Апаратурата за практична изведба на оваа дестилација е прикажана на слика 8.1.1.



Слика 8.1.1: Апаратура за дестилација под атмосферски притисок

(1 - термометар, 2 – продолжеток, односно Y адаптер, 3 - Либигово ладило, 4 – луле, 5 – ерленмаер)

Во колбата за дестилација со помош на инка се додава течноста која треба да се дестилира (се полни најмногу до  $2/3$  од волуменот на колбата), се додаваат неколку парчиња порозен порцелан, на колбата се поставува Y адаптер (2) кој се поврзува со ладилото (3) и со термометарот (1). Сите делови од апаратурата мора добро да се поврзани меѓу себе. Се поставуваат клеми на грлото на колбата и на ладилото (лабаво затегнати). По ладилото се пушта да тече вода и се почнува со постепено загревање на колбата за дестилација. Парите од колбата преоѓаат во ладилото и таму кондензираат. Дестилатот се фаќа на долниот отвор на ладилото преку продолжетокот за фаќање на дестилатот, таканареченото луле во ерленмаер кој не смее да биде цврсто фиксиран за апаратурата. Колбата за дестилација се загрева со пламеник преку мрежичка или со водена, маслена или песочна бања.

Почетокот на дестилацијата го означува првата капка која паѓа во приемникот. Брзината на дестилација не смее да помине 1-2 капки во секунда. Дестилатот што истекува сè додека не се постигне константна температура се собира одделно и се вика **претходен тек на дестилацијата**. Потоа се става нов приемник (ерленмаер) и во него се собира **главниот тек на дестилацијата**. Задолжително се забележува температурата или температурниот интервал во кој дестилира главната фракција на дестилацијата. При крајот на дестилацијата, ако започне температурата да се зголемува над точката на вриење на течноста, приемникот повторно се менува па се собира таканаречениот **последен тек на дестилацијата**. Овој дел од дестилатот содржи распаднати продукти од супстанцијата и претставува нечистотија за главната супстанција. Колбата за дестилација се загрева сè додека во неа не останат 2 – 3 (ml) течност (не смее да се продолжи загревањето и колбата целосно да се исуши).

## 8.2. Дестилација со водена пареа

Немешливите смеси не дестилираат на ист начин како и мешливите смеси, бидејќи секоја од компонентите во ваквата смеса има свој парен притисок. Вкупниот парен притисок е збир од индивидуалните парни притисоци на чистите компоненти (за мешливите течности важен е парцијалниот парен притисок). Оттука, кога збирот на парните притисоци ќе го достигне надворешниот (атмосферскиот) притисок, смесата почнува да врие на температура пониска од онаа на секоја од чистите компоненти. Процесот на дестилација на немешлива смеса се нарекува **кодестилација**, а во случај кога една од компонентите на немешливата смеса е вода дестилацијата се нарекува **дестилација со водена пареа**. Кај оваа дестилација како дестилат се добива смеса од органско соединение и вода и таа секогаш дестилира на температура под 100 °C.

Дестилацијата со водена пареа се употребува за разделување на органски соединенија кои не се мешаат со водата. Во фармацевтијата наоѓа примена за изолација на етерични масла и смолести материји, разделување на изомери и сл.

Да разгледаме пример на две супстанции кои меѓусебно не се мешаат, на пример вода и октан. Точката на вриење на октанот е ( $T_v$ ) = 126 °C. Нивната смеса дестилира на 90 °C при атмосферски притисок (760 mm Hg). Познавајќи го парниот притисок ( $p$ ) на водата на дадена температура од 90 °C лесно можеме да го пресметаме парниот притисок на другата компонента во смесата:

$$p_{\text{вкупен}} = p_{\text{вода}} + p_{\text{октан}}$$

$$760 \text{ (mm Hg)} = 525 \text{ (mm Hg)} + p_{\text{октан}}$$

$$p_{\text{октан}} = 235 \text{ (mm Hg)}$$

За немешливите течности со водата, нивната количина во парната фаза е правопрпорционална на индивидуалниот парен притисок, па имаме:

$$\frac{p_{\text{октан}} 235 \text{ mm Hg}}{p_{\text{вода}} 525 \text{ mm Hg}} = \frac{n - \text{mol октан}}{n - \text{mol вода}} = \frac{0,448 \text{ mol октан}}{1 \text{ mol вода}}$$

односно дестилатот ќе содржи 0,448 (mol) октан на 1 (mol) вода, или доколку тоа се изрази во тежински односи:

$$M_m(\text{октан}) = 114 \text{ (g/mol)}; \quad M_m(\text{вода}) = 18 \text{ (g/mol)}:$$

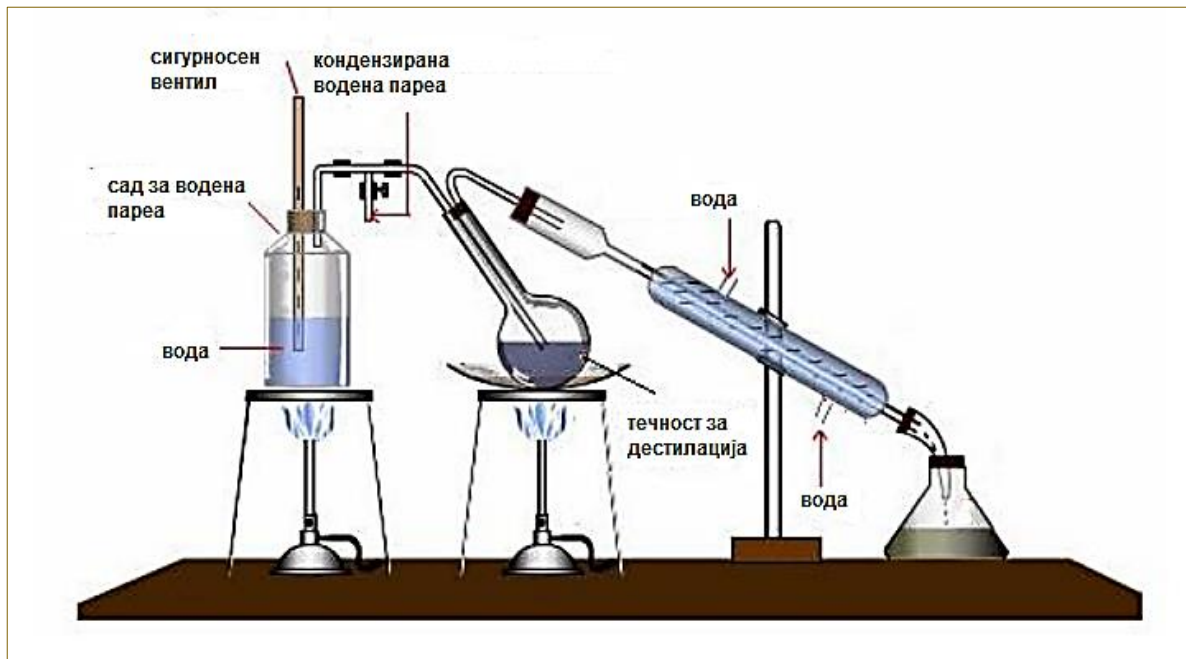
$$\frac{0,448 \text{ mol} \cdot M_m(\text{октан})}{1 \text{ mol} \cdot M_m(\text{вода})} = \frac{51 \text{ g (октан)}}{18 \text{ g (вода)}}$$

односно дестилатот ќе содржи 51 (g) октан на 18 (g) вода или 74 % (тежински) на октан.

Ова значи дека дестилацијата со водена пареа претставува ефикасна постапка за дестилирање на октан на температура која е 35 °C пониска од неговата ( $T_v$ ).

За практична изведба на дестилација со водена пареа потребна е апаратура како на слика 8.2.1. Водената пареа наједноставно се создава со загревање на вода ставена во сад/казанче, која преку цевка се внесува во колбата со органска течност. Садот се полни со вода најмногу до една половина од неговиот волумен. Колбата за дестилација има два отвора – еден за довод на водената пареа и друг за одвод на пареата од колбата за дестилација. Водата и органското соединение кодестилираат, кондензираат и се собираат како дестилат. Органското соединение се издвојува во водата во облик на маслени капки. Дестилацијата е завршена кога како дестилат се собира само вода, односно кога ќе се собере 50 (ml) чиста вода. Разделувањето на смесата од органско соединение и вода наједноставно се изведува во одделителна инка. Доколку количината на органската компонента е мала или, пак, доколку има многу блиска густина

до водата, таа најчесто се екстрахира со органски растворувач кој понатаму се суши и дестилира.



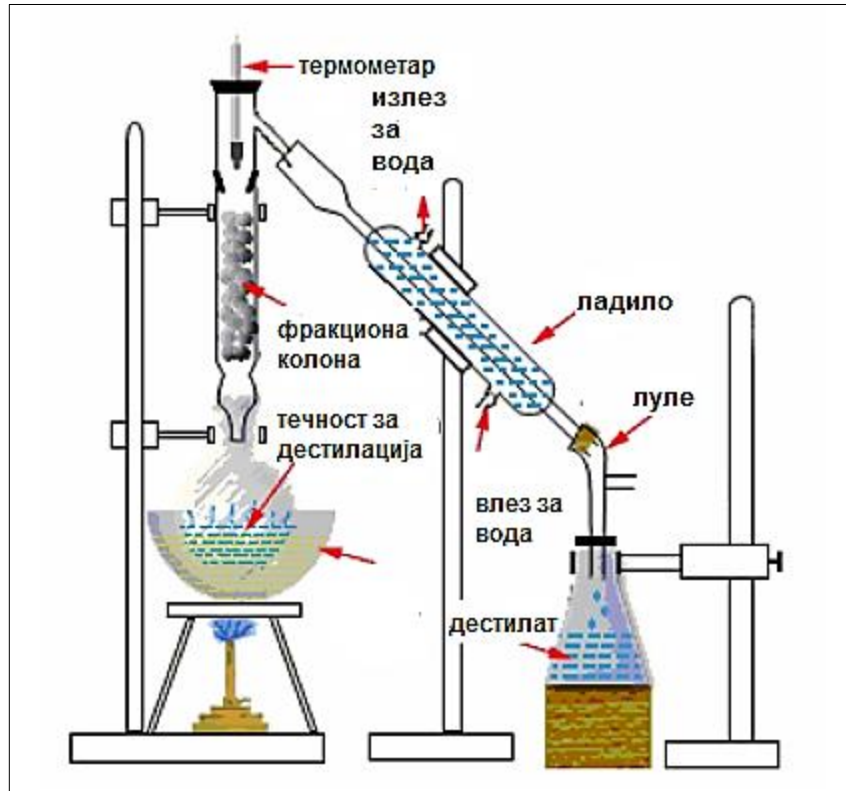
Слика 8.2.1: Дестилација со водена пареа

### 8.3. Фракциона дестилација

Како што е споменато во претходниот дел, главниот недостаток на дестилацијата под атмосферски притисок е неможноста со оваа постапка да се раздвојат компоненти чии точки на вриење ( $T_v$ ) се разликуваат за помалку од 80 °C. Еден од начините да се раздели ваква смеса е да се изведат повеќе едноставни дестилации, меѓутоа недостаток на овој процес е тоа што тој би се одвивал предолго. Заради тоа, во пракса најчесто се користи постапка на **фракциона дестилација**. Апаратурата за фракциона дестилација (слика 8.3.1) се разликува од онаа за дестилација под атмосферски притисок по присуството на **фракциона колона**.

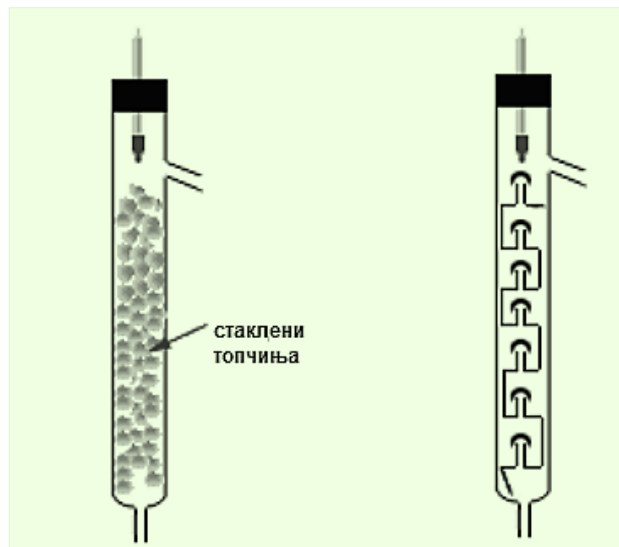
При загревање, пареата која излегува од колбата за дестилација преминува во фракционата колона каде што во допир со сидовите (или полнењето) на колоната се кондензира, а потоа (поради топлата пареа што доаѓаат одоздола) повторно испарува. Секоја реевапоризација одговара на една обична дестилација и води кон создавање на кондензат побогат со полесно испарливата компонента. Така, на врвот од фракционата колона, поради континуирираниот процес на кондензација и реевапоризација, ќе има само пареи од полесно испарливата компонента со пониска точка на вриење.





Слика 8.3.1: Апаратура за фракциона дестилација

Постојат неколку типови на фракциони колони кои се разликуваат по површината на која се одвиваат процесите на кондензацијата и реевапоризацијата, како на пример стаклени топчиња, спирала и слично (слика 8.3.2).



Слика 7.3.2: Фракциони колони

**Ефикасноста на фракционата колона** зависи од нејзината **должина** и од **пакувањето** во самата колона. Кај колони со иста должина ефикасноста се зголемува со зголемување на површината и спроводливоста на топлина на пакувањето.

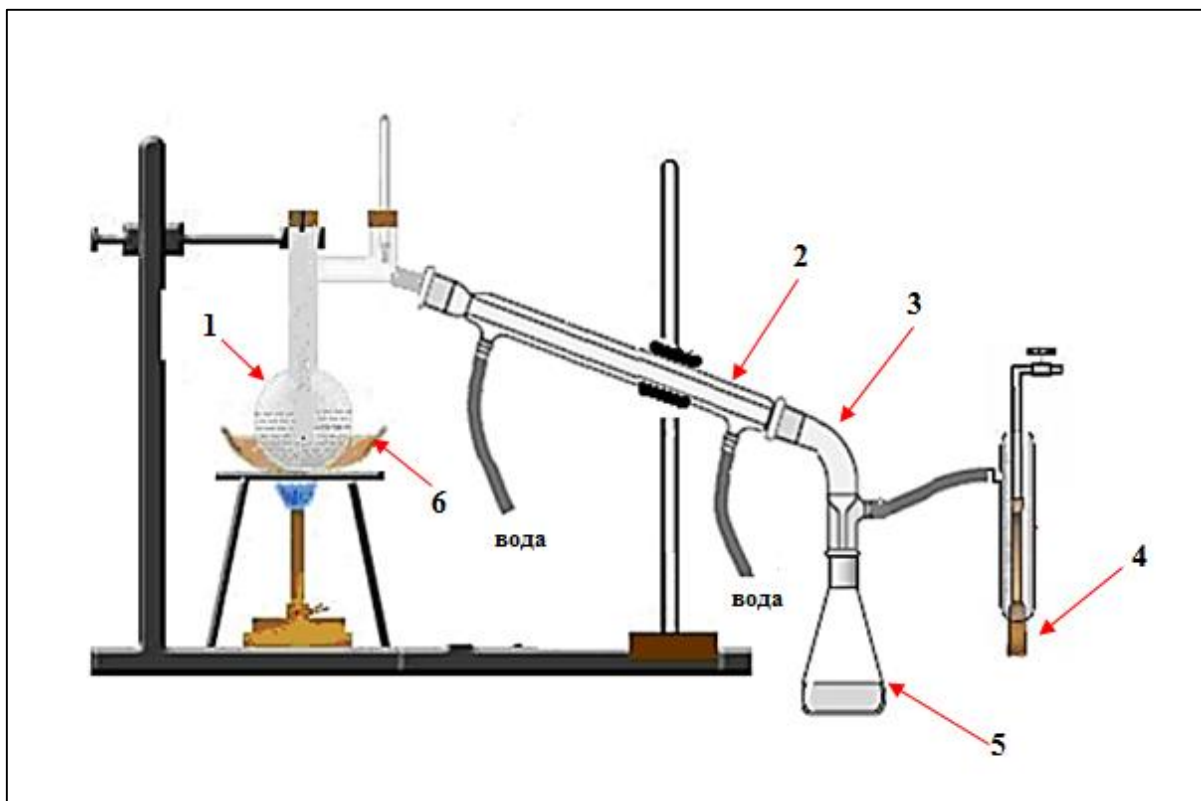
Попрецизно, ефикасноста на фракционата колона се изразува во **теоретски подови** каде што еден теоретски под е еквивалентен на една обична дестилација. Така, колона со  $n$  – теоретски подови е еднаква на изведување на  $n$  – обични дестилации.

Кога имаме смеса од течности во однос 1:1 со разлики во парниот притисок за фактор 3 (разлики во точките на вриење за 20 – 30 °C), теоретски би требало да употребиме фракциона колона со најмалку 3 теоретски подови за да добиеме најмалку 95 % од поиспарливата компонента. Во пракса, лабораториските фракциони колони имаат од 2-15 теоретски подови. Денес, најефикасните колони разделуваат соединенија кои се разликуваат во точките на вриење само за 0,5 °C.

#### 8.4. Дестилација под намален притисок (вакуумска дестилација)

Една течност врие кога нејзиниот парен притисок ќе се изедначи со притисокот кој дејствува над површината на течноста. Според тоа, доколку се намали надворешниот притисок, ќе се намали и точката на вриење на течноста. Ова својство е искористено во постапката за дестилација под намален притисок (слика 8.3.1) која како лабораториска техника најчесто се користи за пречистување на течности кои имаат високи точки на вриење и со загревање подлежат на распаѓање.

Бидејќи најголем дел од органските соединенија се распаѓаат со загревање и со зголемување на температурата, препорачливо е сите супстанции кои имаат точка на вриење повисока од 150 °C да се дестилираат под намален притисок.



Слика 8.4.1: Апаратури за дестилација под намален притисок

(1 – Клајзенова колба, 2 – Либигово ладило, 3 – луле, 4 – вакуум, 5 – приемник,  
6 - маслена бања)

Во оваа дестилација се употребуваат Клајзенова колба со Клајзенов продолжеток, уред за произведување на вакуум, Либигово ладило и приемник.

Сите делови на апаратурата се стаклени, па од овие причини тие не смеат да имаат никакви пукнатини, а тоа се проверува пред почетокот на секоја дестилација.

За да се обезбеди рамномерно загревање на течноста, наместо парчиња на неглазиран порцелан може да се постави мошне тенка капилара која ќе обезбедува воведување на струја од воздух (во вид на ситни меурчиња) во реакционата мешавина или, пак, да се користи магнетна мешалка. Ладилото и приемникот се поврзани со адаптер кој со едноставно ротирање овозможува менување на приемниците и собирање на неколку фракции без притоа да ги вадиме приемниците.

Пред да се започне со работа потребно е да се определи колкаво намалување на притисокот е потребно. Во литературата може да се најдат податоци дека со намалување на притисокот за половина, точката на вриење се намалува за 20 °C. Водената вакуумска пумпа која произведува вакуум од 10-20 (mm Hg) значи намалување на точката на вриење до 100 °C. Вакуумската пумпа која создава вакуум од 0,1 (mm Hg), може да ја намали точката на вриење и до 150 °C. Нешто попрецизна проценка на намалувањето на точката на вриење може да се постигне со отчитување на посебно изработени номограми.

## 9. ЕКСТРАКЦИЈА

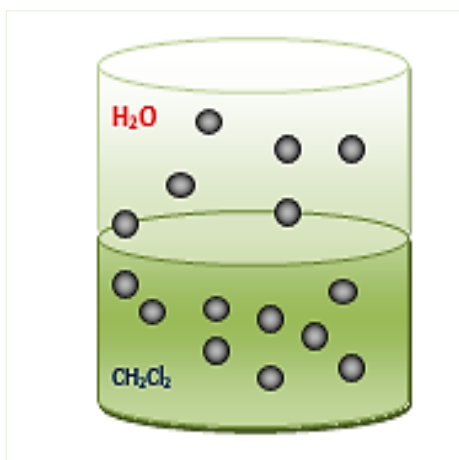
Терминот екстракција подразбира „**извлекување**“ на супстанција, и тоа најчесто од една течна или цврста фаза во друга течна фаза, врз основа на нејзината различна растворливост во нив. При екстракција течните фази најчесто ги сочинуваат:

- вода или воден раствор;
- органски растворувач.

Ваквата лабораториска техника е позната како **течно-течна екстракција** или само **екстракција**.

### 9.1. Водено-органска екстракција

Кога едно органско соединение (*A*) ќе се стави во одделителна инка во која има две течности кои не се мешаат, како на пример вода ( $H_2O$ ) и дихлорометан ( $CH_2Cl_2$ ) соединението (*A*) ќе се раствори и во водата и во дихлорометанот (под претпоставка дека (*A*) не реагира со ниеден од двата растворувачи). Може да се каже дека соединението (*A*) се **распределува, т.е. се дистрибуира** помеѓу двете течности, а точната количина на (*A*) во секој од двата растворувачи ќе зависи од неговата релативна растворливост во нив.



Слика 9.1.1: Течности кои не се мешаат

Односот на концентрациите на (*A*) во секоја од фазите се нарекува **распределбен (партиционен) коефициент** или **коефициент на дистрибуција** кој при константна температура за дадена супстанција претставува константа и се дефинира како:

$$K = \frac{\text{концентрација на (A) во органскиот растворувач}}{\text{концентрација на (A) во вода}}$$

Со одредена апроксимација **коэффициентот на дистрибуција** претставува однос на растворливоста на  $A$  во дихлорометан и вода (измерени одделно):

$$K \sim \frac{\text{концентрација на } (A) \text{ во органскиот } CH_2Cl_2}{\text{концентрација на } (A) \text{ во } H_2O}$$

Доколку претпоставиме дека растворливоста на  $(A)$  во дихлорометан е 35 (g/100 ml), а растворливоста во вода е 5 (g/100 ml) (на константа температура), партициониот коэффициент  $K$  може приближно да се претстави на следниот начин:

$$K = \frac{35}{5} = 7$$

Ако е позната вредноста за партициониот коэффициент за определен систем, може да се пресмета која количина од соединението  $(A)$  може да се екстрахира од водениот раствор во органскиот растворувач (дихлорометан).

#### Пример 9.1.1:

Во 100 (ml) вода се растворени 5 (g) на супстанцијата  $(A)$  и се екстрахираат со 100 (ml) на дихлорометан.

#### Да се пресмета:

Колкава количина од  $(A)$  ќе се екстрахира во дихлорометанот ако коэффициентот на дистрибуција  $K = 7$ .

#### Решение:

Ако количината на  $A$  која ќе се екстрахира во дихлорометанот ја обележиме со  $x$  (g) количината која ќе остане во водениот слој ќе биде еднаква на  $5 - x$  (g), односно:

$$7 = \frac{x}{5 - x}$$

Со решавање на равенката се добива дека:

$$x = 4,375 \text{ (g)}$$

Користејќи 100 (ml) дихлорометан може да се екстрахираат 4,375 (g) од супстанцијата  $(A)$  од 100 (ml) вода во која првично се растворени 5 (g) на соединението  $(A)$ . 0,625 (g) остануваат во водата. Кај оваа екстракција **ефикасноста е 87,5 %**, односно **87,5 %** од  $(A)$  се екстрахирани од водата во дихлорометанот.

Подобра екстракција без користење на поголема количина на органски растворувач може да се постигне со намалување на количината на користен растворувач на сметка на зголемувањето на бројот на екстракции, односно **2 или 3 екстракции со помала количина на растворувач се поефикасни од една со поголема количина на растворувач.**

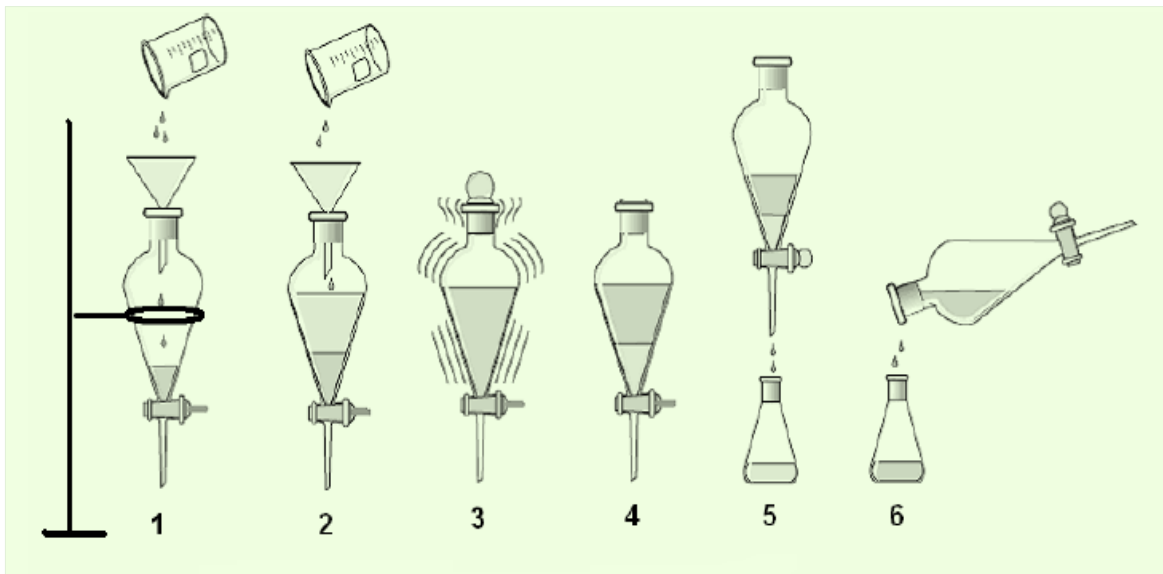
Ако количината од 100 (ml) на дихлорометан од претходниот пример се подели во два дела од 50 (ml) и со нив се изврши екстракција (два пати), тогаш ќе се добие дека првата екстракција дава 3,89 (g)  $(A)$ , оставајќи 1,11 (g) во водата, додека втората екстракција дава 0,863 (g) на  $(A)$  во дихлорометан. Збирно од двете екстракции 4,753 (g)

или 95 % од (A) е екстрахиран во дихлорометанскиот слој поради што и екстракцијата е поуспешна.

Во согласност со теоријата на екстракција поефикасно е да се изведат 2 екстракции со половина количина, отколку една со целата количина на растворувач. **Колку што е поголем бројот на екстракции (со помала количина на растворувач) толку е поголема ефикасноста.**

Ако соединението е порастворливо во вода отколку во некој органски растворувач, партициониот коефициент е помал од 1 и многу мала количина ќе може да се екстрахира. Сепак, партициониот коефициент на едно органско соединението може во извесна мера да се смени (зголеми) со додавање на неорганска сол (на пример *NaCl*) во водената фаза. Притоа органското соединението кое се екстрахира ќе биде помалку растворливо во раствор на *NaCl* отколку во „чиста“ вода, поради што партициониот коефициент ќе се зголеми и екстракцијата во органскиот растворувач ќе биде поефикасна. Оваа техника е позната како **исолување** и во пракса често се користи, бидејќи значително ја подобрува екстракцијата на органските супстанции кои се порастворливи во вода. Понекогаш, одредени органски соединенија не може ефикасно да се екстрахираат од водени раствори, дури и по исолувањето. Во вакви случаи се користи апаратура за континуирана екстракција (како замена за одделителна инка) кај која растворувачот континуирано циркулира низ водената фаза, при што при секое поминување екстрахира одредена мала количина на супстанција. Постојат два основни типа на апаратури и тоа за растворувачи кои се полесни од вода и за растворувачи кои се потешки од вода. Кај континуираната екстракција растворувачот постојано се рециклира. Оваа екстракција трае подолго (неколку часа).

Практичната изведба на екстракцијата во 6 чекори е прикажана на слика 9.1.2.



Слика 9.1.2: Практична изведба на екстракција

1. Во првиот чекор во одделителната инка се истура смесата која треба да се екстрахира.
2. Во вториот чекор се додава растворот со кој ќе се врши екстракцијата.
3. Во третиот чекор смесата во одделителната инка се меша со изедначување на притисокот преку вентилот.

4. Потоа во четвртиот чекор се чека да се раздвојат два слоја на течност.
5. Во петтиот чекор долниот слој од течноста се испушта и се собира во ерленмаер.
6. На крајот во шестиот чекор преостанатиот горен слој на течност се собира во друг ерленмаер.

Многу важен момент за екстракцијата е изборот на погоден растворувач. Во течностната екстракција водата речиси секогаш е еден од растворувачите, додека изборот на органски растворувачи е мошне голем. Потребно е органскиот растворувач кој се користи за екстракција:

- добро да ја раствора супстанцијата;
- да не се меша со вода;
- да има различна густина од водата;
- да е хемиски стабилен;
- да е лесно испарлив за да може лесно да се отстрани од органското соединение;
- да е нетоксичен и незапалив.

**Растворувачите за екстракција може да се поделат на:**

- **полесни од вода** (растворувачи со помала густина од водата) – тука влегуваат диетилетерот, етилацетатот, јаглеводороди (хексан, толуен) и други;
- **потешки од вода** (растворувачи со поголема густина од водата) – тука влегуваат разни хлорирани растворувачи како хлороформ, дихлорометан (незапалив). Сепак овие хлорирани растворувачи имаат поголема тенденција да формираат емулзии отколку нехлорираниите.

Во табелата 9.1.1 е даден општ приказ на растворливоста на различни типови на органски соединенија.

Табела 9.1.1: Општи правила на растворливост на органските соединенија

| Тип на соединение | Органски растворувач | Вода | Кисел воден раствор | Базен воден раствор |
|-------------------|----------------------|------|---------------------|---------------------|
| сол               | -                    | +    | /                   | /                   |
| неутрално         | +                    | -    | -                   | -                   |
| киселина          | +                    | -    | -                   | +                   |
| база              | +                    | -    | +                   | -                   |

**Силните органски киселини** (на пример главно карбоксилни и сулфонски) при реакција со неоргански бази (натриум бикарбонат/натриум хидроксид) лесно преминуваат во соли (натриумови) на соодветните киселини и тие се растворливи во вода.

**Послабите органски киселини** (на пример феноли) преминуваат во соодветни соли (натриумови) растворливи во вода, само при реакција со јака база, како на пример натриум хидроксид ( $NaOH$ ).

Спротивно на киселините, **органските бази**, како на пример амините, при реакција со силни неоргански киселини, на пример хлороводородната киселина ( $HCl$ ), преминуваат во хидрохлоридни соли растворливи во вода.

**Неутралните органски соединенија** не реагираат ниту со раствори на киселини ниту со раствори на бази и главно се растворливи само во органски растворувач.

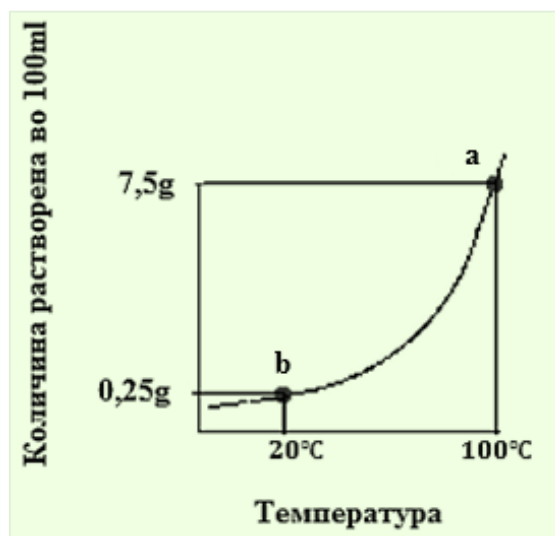
## 10. КРИСТАЛИЗАЦИЈА

Кристализацијата е лабораториска техника која во органската лабораторија се користи за пречистување на цврсти супстанции кои содржат релативно мали количини на нечистотиите. Принципот на разделување е различна растворливост на главната супстанција и на нечистотиите во растворувачот кој се користи за кристализација.

При кристализацијата, смеса од цврсти супстанции може да се раздели на нејзините составни компоненти врз основа на различните растворливости на компонентите во ист растворувач. На пример, ако едната од компонентите во смесата е многу растворлива во вода, а преостанатите не се, раздвојувањето може да се изведе наједноставно со растворање во растворувач-вода и обична гравитациона филтрација на нерастворливите компоненти.

Растворувачот за кристализација не смее да реагира со супстанцијата која се пречистува и потребно е да има добар коефициент на растворливост, т.е на собна температура малку или воопшто да не ја раствора супстанцијата, а добро да ја раствора на повисока температура. Потребно е идеалниот растворувач да е лесно испарлив, односно лесно да се отстранува од кристалите, да има точка на вриење ( $T_v$ ) пониска од точката на топење ( $T_t$ ) на соединението кое се прекристализира, да има што помала токсичност како и да не е запалив.

Во случаите кога не постои еден растворувач кој ги поседува сите карактеристики на погоден растворувач за да се изведе кристализација, се користи смеса од два растворувачи. Идеален пар на растворувачи претставува комбинација на **растворувач кој добро ја раствора супстанцијата** дури и на собна температура и **растворувач кој не ја раствора супстанцијата** ниту на повисоки температури. Исто така, растворувачите кои се користат мора **да се мешаат во сите односи** еден со друг и препорачливо е тие да имаат блиски точки на вриење. Иако сами по себе не се добри растворувачи за кристализација, нивната смеса се однесува како погоден растворувач на високи температури и слаб растворувач на ниски. Генерално, растворливоста на цврстите соединенија во даден растворувач се зголемува со зголемување на температурата. Растворливоста на супстанциите на различна температура може да се прикаже преку **криви на растворливост** каде што графички е претставена максималната растворливост наспроти температурата (слика 10.1).



Слика 10.1: Крива на растворливост на салицилна киселина во вода



Од графиконот може да се заклучи дека:

- на 100 °C (температура на вриење на водата) во 100 (ml) вода може да се растворот 7,5 (g) на салицилна киселина. Во точката **a** растворливоста на 100 °C е  $7,5 \left(\frac{\text{g}}{100 \text{ ml}}\right)$ ;
- на 20 °C (собна температура) само 0,25 (g) на салицилна киселина може да се растворот во 100 (ml) вода. Во точката **b** растворливоста на 20 °C е  $0,25 \left(\frac{\text{g}}{100 \text{ ml}}\right)$ .

Доколку ни е позната растворливоста на собна температура (20 – 25 °C) може да заклучиме колкав дел од супстанцијата ќе се добие по кристализацијата.

### Пример 10.1:

Направен е заситен раствор на 100 °C, со растворање на 7,5 (g) салицилна киселина во 100 (ml) вода. Што ќе се случи со растворот ако се излади на 100 °C?

### Решение:

На 20 °C само 0,25 (g) може да се растворот  $7,5 - 0,25 = 7,25$  (g).

7,25 (g) остануваат нерастворени и тие ќе кристализираат.

Знаејќи ја растворливоста на супстанцијата на температура на вриење на растворувачот може да се пресмета волуменот на растворувачот потребен за кристализација.

### Пример 10.2:

Колку растворувач (вода) е потребно за кристализација на 6 (g) салицилна киселина?

### Решение:

Бидејќи е потребно да се добие заситен топол раствор на супстанцијата се користи растворливоста на 100 °C од каде за растворање на 7,5 (g) потребни се 100 (ml) вода.

$$7,5 \text{ (g)} \rightarrow 100 \text{ (ml)}$$

$$6 \text{ (g)} \rightarrow x \text{ (ml)}$$

---


$$6 \cdot 100 = 7,5 \cdot x \rightarrow x = 80 \text{ (ml)}$$

За 6 (g) ќе бидат потребни 80 (ml) вода за да се изведе кристализацијата.

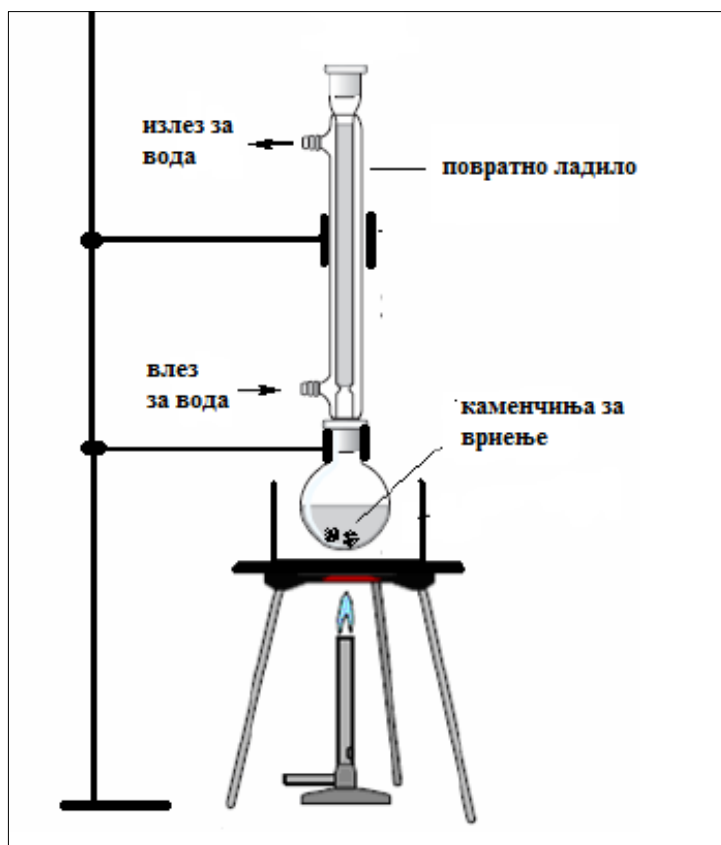
**Практичната изведба на кристализацијата** се врши според следниот редослед:

#### 1. Растворање на цврстата супстанција

Кристалиите на цврстата супстанција се раствораат во мала количина на растворувач кој се додава постепено во мали количини. Во зависност од видот на растворувачот, вода (слика 10.1) или органско соединение, апаратурата за практична изведба е различна ( слика 10.2).



Слика 10.1: Апаратура за кристализација од вода



Слика 10.2: Апаратура за кристализација од органски растворувач

Ако растворувачот е вода, растворањето се изведува во ерленмаер, а загревањето се врши со пламеник. За да се постигне рамномерно вриење пред почетокот на загревањето во ерленмаерот, претходно се додаваат каменчиња за вриење.

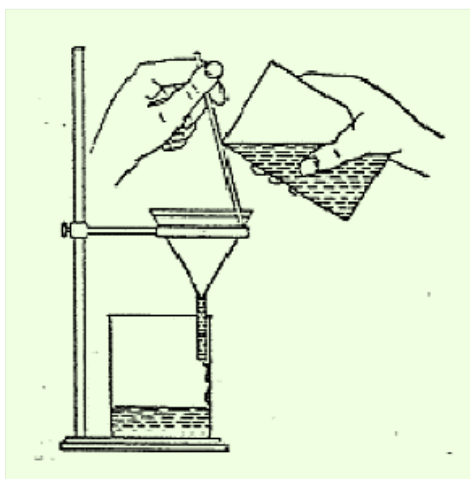
Растворањето во органски растворувачи кои се главно отровни и запаливи се изведува во колба која се поврзува со повратно ладило. Оваа апаратура се нарекува апаратура за рефлуksiрање. Рефлуksiрање е постапка на преведување на раствор во пара и повторно кондензирање на течноста која се враќа во реакциската смеса.

## 2. Обезбојување на растворот

Ако растворот е обоен поради присутни нечистотии, тој треба да се обезбои. Обезбојувањето се врши со додавање на мала количина активен јаглен веднаш по топењето на цврстата супстанција. Обоените нечистотии се обично молекули со голема молекулска маса, а активниот јаглен ги адсорбира. По неколку минути вриење со активниот јаглен растворот се филтрира.

## 3. Филтрирање на растворот

Филтрирањето на растворот се врши преку стаклена инка и филтерна хартија (слика 9.3).



Слика 9.3: Филтрирање на растворот

## 4. Ладење на матичниот раствор и формирање на кристали

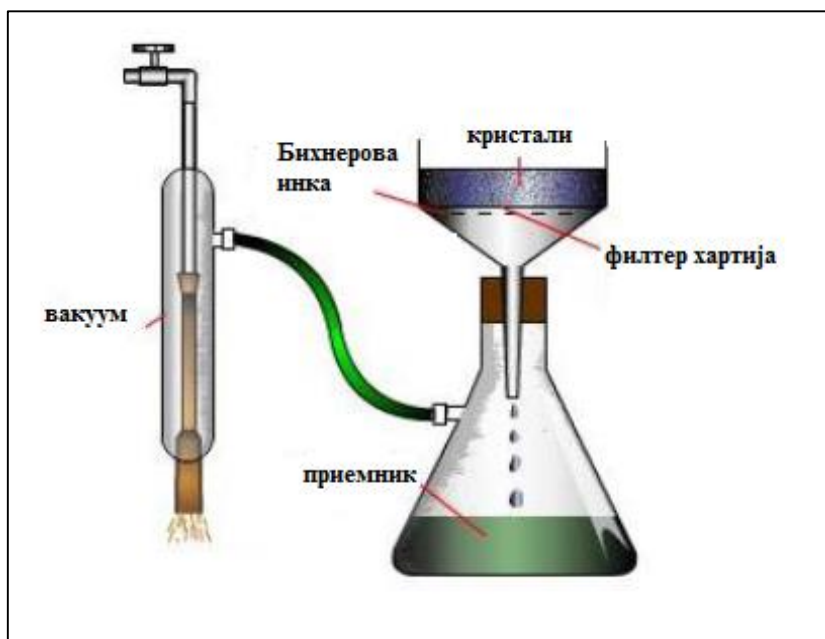
Филтратот се лади постепено на собна температура и започнува формирањето на кристали. Откако растворот ќе се излади до собна температура, доколку е потребно може да се лади на температура од околу 0 °C или пониско. Брзото ладење, а со тоа и **брзото** формирање на кристали, резултира со создавање на мали кристали кои може да ги адсорбираат нечистотиите на нивната површина. Исто така, нечистотии може да се најдат заробени и во кристалната решетка на прекристализираното соединение. Ако кристализацијата изостане, потребно е со стаклено стапче да се промеша филтратот или, пак, да се додаде мала количина на кристали од супстанцијата што треба да кристализира кои ќе служат како јадро за понатамошната кристализација.

## 5. Вшмукување на кристалите

Вшмукувањето на кристалите се изведува со филтрирање под намален притисок. Апаратурата која во овој случај се користи се состои од Бихнерова инка (Büchner funnel) која со гумен чеп е поврзана со вакуумска пумпа (слика 9.4).

## 6. Сушење на кристалите

Кристалите од филтерната хартија се префрлаат најчесто на саатно стакло и се сушат најчесто на воздух или, пак, во сушилница. За хигроскопни супстанции и супстанции со непријатен мирис се користат ексикатори.



Слика 10.3: Вшмукување на кристали при намален притисок

## 11. СУШЕЊЕ

### 11.1. Конвективно сушење на цврст материјал

Конвективното сушење на цврст материјал е процес во кој се отстранува течноста од влажен цврст материјал со испарување во незаситен воздух. Во текот на овој процес загреаниот воздух струи преку влажниот материјал донесувајќи топлина, а истовремено со конвекција ја одведува влагата од меѓуфазната површина. За сушење се користи воздух кој се добива со кондиционирање на атмосферскиот воздух.

#### Пример 11.1.1:

Во сушилница се отстрануваат  $100 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)$  влага. Атмосферскиот воздух има температура  $15^\circ\text{C}$ , а релативната влажност на воздухот  $\varphi = 0,8$ . Воздухот кој излегува од сушилницата е загреан на температура од  $45^\circ\text{C}$ , а релативната влажност му е  $\varphi = 0,5$ .

#### Да се одреди:

- потрошувачката на воздух;
- потрошувачката на топлина.

#### Решение:

На дијаграмот со точка **A** е прикажана состојбата на атмосферскиот воздух, а со точката **B** состојбата на излезниот воздух.

$$\text{a) } w_A = 0,009 \left(\frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{sv}}}\right)$$

$$w_B = 0,031 \left(\frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{sv}}}\right)$$

Секој килограм сув воздух носи:

$$\Delta w = w_B - w_A = 0,031 - 0,009 = 0,022 \left(\frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{sv}}}\right)$$

За одведување на  $100 \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right)$  влага потребно е:

$$\dot{m}_{sv} = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{\Delta w} = \frac{100}{0,022} = 4545 \left(\frac{\text{kg}_{\text{sv}}}{\text{h}}\right)$$

б) Количината топлина што е потребна за испарување на 1 (kg) влага е:

$$q = \dot{m}_{sv}(h_B - h_A)$$

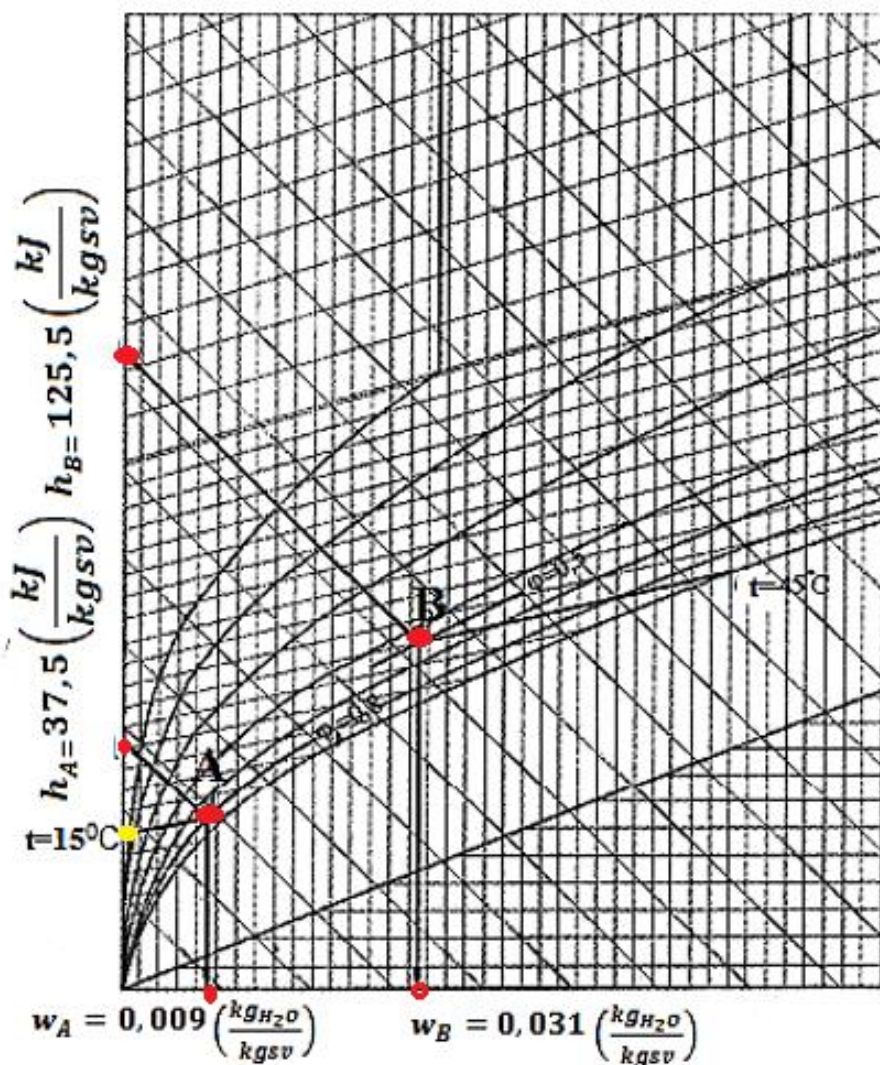
Енталпиите на влезниот и излезниот воздух (од дијаграмот 11.1.1) се:

$$h_B = 125,5 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{sv}}}\right)$$

$$h_A = 37,5 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}} \right)$$

од каде што следува дека топлината  $q$  ќе биде:

$$q = 4545 (125,5 - 37,5) = 400 \cdot 10^3 \text{ (kJ/h)}$$



Слика 11.1.1: Дијаграм за примерот 11.1.1

**Пример 11.1.2:**

За сушење се користи смеса на воздух со температура од 15 °C и релативна влажност 0,5 и воздух со температура од 50 °C и релативна влажност 0,9. Масениот однос на поладниот и потоплиот воздух изнесува 1:3 сметано на сув воздух.

**Да се одреди:**

- a) температурата, влажноста и енталпијата на смесата пред и по загревањето;
- б) количината на топлина потребна за да се загрее смесата до 75 °C.

**Решение:**

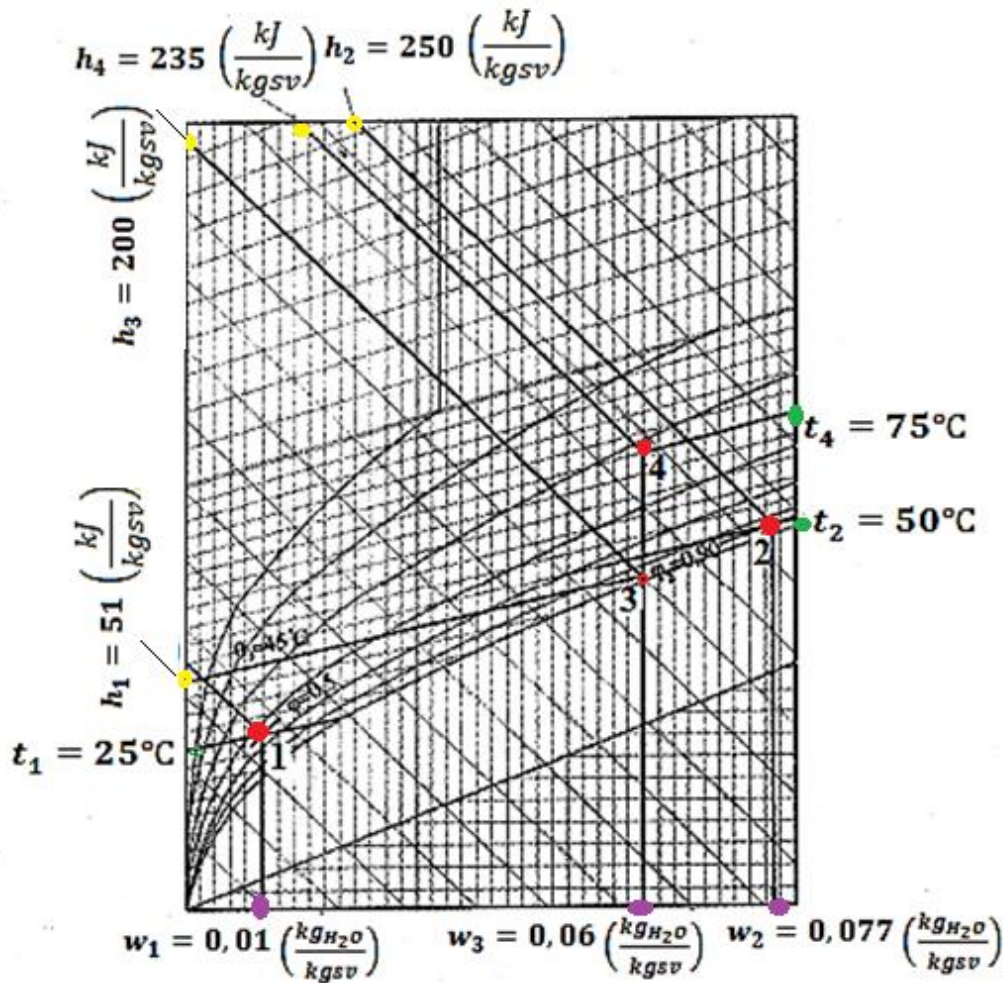
a) Влажноста и енталпијата на поладниот воздух (точка 1) и на потоплиот (точка 2) се читаат од дијаграмот енталпија-влажност од слика 11.1.2 и изнесуваат:

$$w_1 = 0,01 \left( \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{sv}}} \right)$$

$$h_1 = 51 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{sv}}} \right)$$

$$w_2 = 0,077 \left( \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{sv}}} \right)$$

$$h_2 = 250 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{sv}}} \right)$$



Слика 11.1.2: Дијаграм за примерот 11.1.2

Врз основа на масениот однос (1:3) на воздухот што ја сочинува смесата (точка 3) следува дека влажноста на смесата,  $w_3$  ќе биде:

$$w_3 = 0,25w_1 + 0,75w_2 = 0,25 \cdot 0,01 + 0,75 \cdot 0,077 = 0,06 \left( \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kgsv}} \right)$$

**Енталпијата на смесата**, пак, ќе биде:

$$h_3 = 0,25h_1 + 0,75h_2 = 0,25 \cdot 51 + 0,75 \cdot 250 = 200 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}} \right)$$

На дијаграмот, врз основа на влажноста и енталпијата на смесата, се одредува состојбата на смесата во точката 3 и според ова:

$$t_3 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\varphi_3 = 98 \%$$

Состојбата на смесата може да се одреди и врз основа на правилото на „лост“, бидејќи состојбата 3 се наоѓа на должина која ги спојува состојбите 1 и 2 на растојание  $\frac{3}{4}$  подолго од состојбата 1.

**б)** При загревање на смесата апсолутната влажност останува непроменета. Точката со координатите  $w_3 = 0,06 \left( \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kgsv}} \right)$  и  $t_4 = 75 \text{ }^\circ\text{C}$  ја претставува енталпијата и релативната влажност на смесата по нејзиното загревање во калориферот, т.е. точка 4, односно:

$$h_4 = 235 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}} \right)$$

Потребната количина топлина ќе биде:

$$Q = h_4 - h_3 = 235 - 200 = 35 \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kgsv}} \right).$$

## 11.2. Брзина на сушење

Брзината на сушење се дефинира како промена на содржината на влага во материјалот по единица меѓуфазна површина.

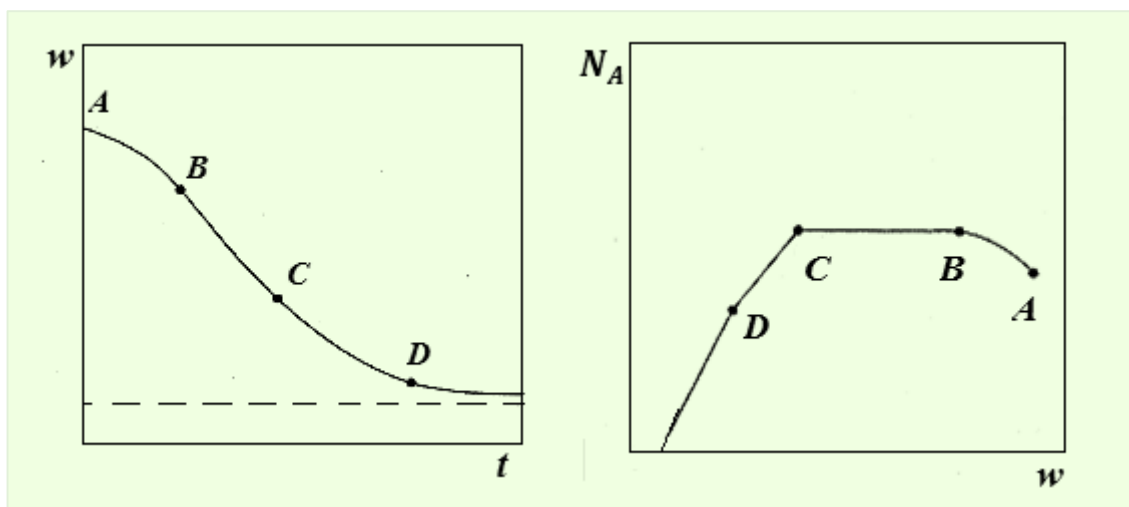
$$N_A = -\frac{1}{A} \frac{dm_A}{dt} \left( \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{m}^2\text{s}} \right) \quad (11.2.1)$$

Брзината на сушење е функција од влажноста на материјалот која, пак, се дефинира како масен однос од влагата  $m_A$  и цврстата фаза  $m_{sm}$ , така да брзината на сушење може да се изрази преку протокот на влага и ќе биде:

$$N_A = -\frac{m_{sm}}{A} \frac{dw}{dt} \left( \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{m}^2\text{s}} \right) \quad (11.2.2)$$



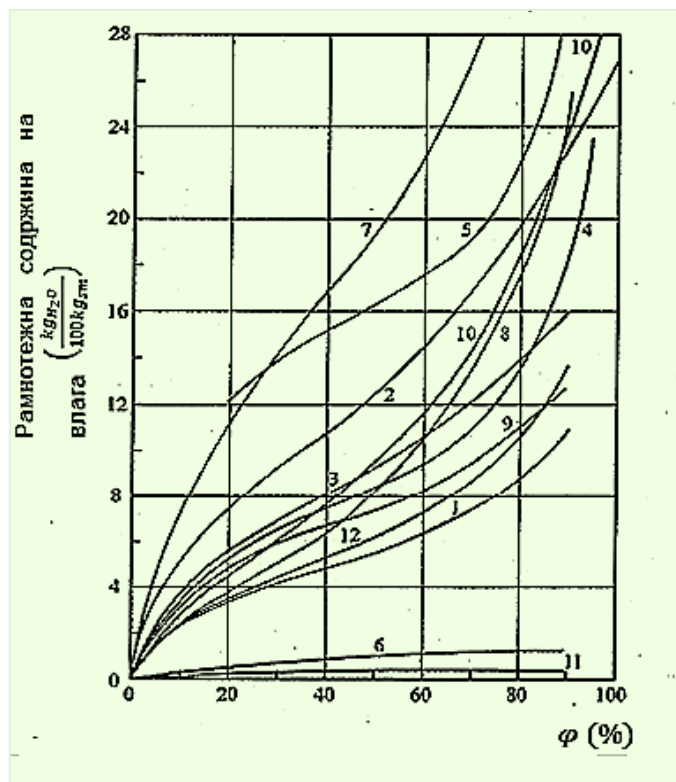
Зависноста на влажноста од времетраењето на сушењето се нарекува **крива на сушење** (слика 11.2.1), а зависноста на брзината на сушење од влажноста на материјалот се нарекува **крива на брзината на сушење** (слика 11.2.2).



Слика 11.2.1: Крива на сушење

Слика 11.2.2: Крива на брзина на сушење

Процесот на сушење престанува кога ќе се воспостави рамнотежен контакт на влажниот материјал и влажниот воздух.



Слика 11.2.3: Дијаграм на рамнотежна влажност на некои материјали на 25 °C

Таков контакт се воспоставува кога парцијалниот притисок на влагата на меѓуфазната површина и во материјалот е еднаков на парцијалниот притисок на водената пара во воздухот. Рамнотежната влажност во зависност од релативната влажност на воздухот и видот на материјалот е прикажана на слика 11.2.3.

Парцијалниот притисок на водата на меѓуфазната површина зависи од видот и од влажноста на материјалот. При поголема влажност, односно во влажна состојба на материјалот, парцијалниот притисок е ист со парниот напон.

Времето што е потребно за сушење на материјалот од почетна влажност  $w_1$  до крајна влажност  $w_2$  се добива со интеграција на кривата на сушење:

$$t = -\frac{m_{sm}}{A} \int_{w_1}^{w_2} \frac{dw}{N_A} \quad (11.2.3)$$

#### Пример 11.2.1:

Хартија со 10 % влажност сметано на сув материјал се суши со воздух чија почетна влажност е 40 %. Ако температурата е 25 °C, до која влажност може да се исуши хартијата со овој воздух.

#### Решение:

Рамнотежната влажност на хартијата во контакт со дадениот воздух ќе се одреди од дијаграмот за рамнотежна влажност на 25 °C. Всушност, од него се отчитува дека хартијата може да се исуши до влажност од 4,75 % сметано на сув материјал.

#### Пример 11.2.2:

Во некоја индустриска сушилница се суши материјал со почетна влажност од 25 масени проценти. Влажноста на производот изнесува 6 %. Даден е дијаграмот на сушење на материјалот за конкретните услови. Почетната маса на влажниот цврст материјал е 150 (kg), а површината на сушење 0,00125 (m<sup>2</sup>).

#### Да се одреди:

а) времето на сушење.

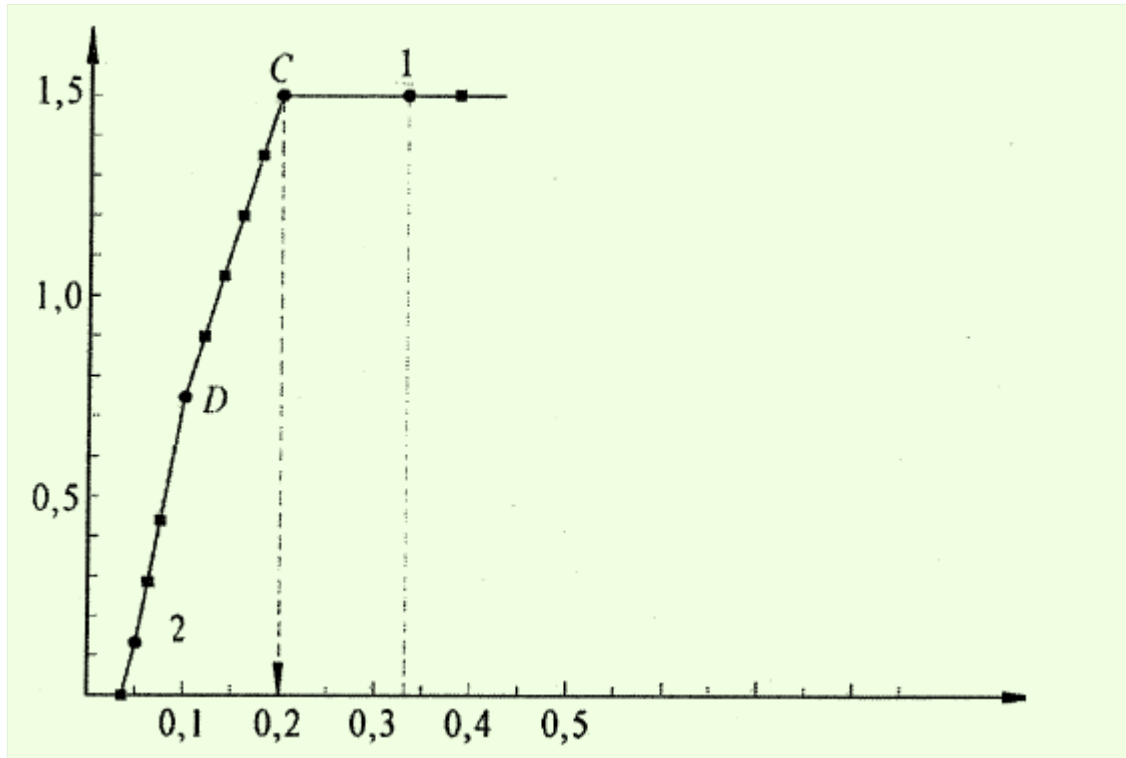
#### Решение:

Почетната апсолутна влажност на материјалот е:

$$w_1 = \frac{0,25}{0,75} = 0,333 \left( \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{sm}}} \right)$$

Влажноста на материјалот на крајот на процесот на сушење  $w_2$  ќе биде:

$$w_1 = \frac{0,06}{0,94} = 0,064 \left( \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{sm}}} \right)$$



Слика 11.2.4: Дијаграм за примерот 11.2.1

Од дијаграмот на сушење се гледа дека сушењето се одвива во област на константна брзина на сушење и во област на опаѓачка брзина на сушење, и тоа како во нејзиниот линеарен дел така и во нелинеарниот дел на опаѓачката брзина на сушење. Брзината на сушење ќе биде:

$$N_A = -\frac{1}{A} \frac{dm_A}{dt} = -\frac{m_{sm}}{A} \frac{dw}{dt} \left( \frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{m}^2\text{s}} \right),$$

така што за периодот на константната брзина на сушење следува:

$$\Delta t_1 = -\frac{m_{sm} \Delta w}{A N_A}$$

Од дијаграмот, брзината на сушење за овој период е:

$$N_A = 1,5 \text{ (kg/m}^2\text{h)}$$

додека критичната влажност е:

$$w_c = 0,20$$

Масата на сувиот материјал ќе биде:

$$m_{sm} = w_1 \cdot 0,150 = 0,333 \cdot 0,150 = 0,05 \text{ (kg)}$$

Сега може да се пресмета времетраењето на **периодот на константна брзина на сушење**:

$$\Delta t_1 = -\frac{m_{sm} \Delta w}{A N_A} = \frac{0,05 \Delta w}{A N_A} = \frac{0,05 (0,333 - 0,20)}{0,00125 \cdot 1,5} = 3,55 \text{ (h)}$$

Времетраењето на периодот на опаѓачката брзина на сушење ќе биде:

$$\Delta t_2 = \frac{m_{sm}}{A} \int_{w_2}^{w_c} \frac{dw}{N_A}$$

Вредноста на интегралот од критичната до крајната влажност ќе се одреди нумерички од податоците во табелата 11.1.1.

Табела 11.1.1: Податоци за решавање на пример 11.2.2

| $w$                     | 0,200 | 0,183 | 0,166 | 0,149 | 0,132 | 0,115 | 0,098 | 0,081 | 0,064 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\frac{N_A}{(kg/m^2h)}$ | 1,5   | 1,35  | 1,21  | 1,12  | 1,03  | 0,85  | 0,75  | 0,35  | 0,16  |
| $1/N_A$                 | 0,667 | 0,741 | 0,826 | 0,893 | 0,971 | 1,176 | 1,333 | 2,857 | 6,25  |

$$\int_{w_2}^{w_c} \frac{dw}{N_A} = \frac{h}{3} [f(x_1) + 4f(x_2) + 2f(x_3) + 4f(x_4) + 2f(x_5) + \dots + f(x_n)] =$$

$$\frac{0,017}{3} [0,667 + 4 \cdot 0,741 + 2 \cdot 0,826 + 4 \cdot 0,893 + 2 \cdot 0,971 + 4 \cdot 1,176 + 2 \cdot 1,333 + 4 \cdot 2,857 + 6,25] = 0,203 \text{ (m}^2\text{h/kg}_{sm}\text{)}$$

Времетраењето на опаѓачката брзина на сушење ќе биде:

$$\Delta t_2 = -\frac{m_{sm}}{A} \int_{w_2}^{w_c} \frac{dw}{N_A} = \frac{0,05}{0,00125} \cdot 0,203 = 8,12 \text{ (h)}$$

Вкупното време на сушење ќе биде збир од  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , односно:

$$t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = 3,55 + 8,12 = 11,67 \text{ (h)}$$

## 12. Библиографија

Cvijović D.S., Bošković-Vragolović N., Pjanović V.R., Difuzione operacije, zadatci sa izvadocima iz teorije. Akademska misao, Beograd, 2007.

Cvijović S., Simonović D., Vuković D., Končar-Đurđević S., Tehnološke operacije, II toplinske. Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1985.

Popović G., Tehnološke operacije-zbirka zadataka iz difuzionih operacija-I deo, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1988.

Popović G., Tehnološke operacije-zbirka zadataka iz difuzionih operacija-II deo, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1988.

Поповска-Павловска Ф., Принципи и пресметка на основните технолошки операции. Универзитет „Св. Кирил и Методиј“, Завод за испитување на материјали и развој на нови технологии „Скопје“, Скопје, 2003.

Simonović D., Vuković D., Cvijović S., Končar-Đurđević S., Tehnološke operacije, I mehaničke. Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1985.

Tasić A., Radosavljević R., Cvijović S., Zdanski F., Tehnološke operacije, Zbirka zadataka, mehaničke operacije. Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 1986.