

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»  
(ВлГУ)**

Институт прикладной математики, информатики, био- и нанотехнологий  
Кафедра химических технологий

Пикалов Евгений Сергеевич

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАССОПЕРЕНОСА

Методические указания к практическим занятиям  
по дисциплине «Теоретические основы массопереноса» для студентов ВлГУ,  
обучающихся по направлению 18.04.01 – Химическая технология

Владимир – 2015 г.

Данные методические указания включают рекомендации по проведению практических занятий и варианты заданий, выполняемых на практических занятиях по дисциплине «Теоретические основы массопереноса» для студентов направления 18.04.01. «Химическая технология» ВлГУ.

Методические указания составлены на основе требований ФГОС ВО и ОПОП направления 18.04.01. «Химическая технология», рабочей программы дисциплины «Теоретические основы массопереноса».

Рассмотрены и одобрены на  
заседании УМК направления  
18.04.01 «Химическая технология»  
Протокол №7 от 05.02.2015 г.  
**Рукописный фонд кафедры ХТ ВлГУ**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Практическое занятие 1. Расчеты компонентного состава различных смесей .....	4
Практическое занятие 2. Определение движущей силы и направления переноса вещества.....	8
Практическое занятие 3. Расчет параметров процесса абсорбции.....	11
Практическое занятие 4. Расчет параметров процессов перегонки и ректификации .....	15
Практическое занятие 5. Расчет параметров процесса жидкостной экстракции.....	19
Практическое занятие 6. Расчет параметров процесса адсорбции.....	23
Практическое занятие 7. Расчет параметров процесса ионного обмена.....	27
Практическое занятие 8. Расчет параметров процесса сушки.....	31
Практическое занятие 9. Расчет параметров мембранных процессов.....	35

## **Практическое занятие 1. Расчеты компонентного состава различных смесей**

**Цель практического занятия:** изучение методик выражения компонентного состава смесей в массовых молярных и объемных долях.

### **План проведения занятия**

Практическое занятие проводится в несколько этапов. Так как это первое практическое занятие, то в начале преподаватель рассказывает студентам о плане практических занятий на семестр, о целях и задачах, которые должны быть достигнуты при выполнении заданий на практических занятиях. На вводную беседу отводится 5 – 10 минут.

После этого проводится беседа со студентами по тематике занятия для оценки общего уровня знаний студентов по тематике занятия и выявления вопросов, которые большинству или всем неизвестны.

Затем преподаватель консультирует студентов по вопросам, которые вызвали у них трудности и по возможности сам приводит или просит привести студентов практические примеры для лучшего усвоения тематических основ.

После проведения консультации преподаватель дает студентам возможность задать ему возникшие у них вопросы по тематике занятия. При ответах желательно также приводить примеры и по возможности давать ответить другим студентам, знающим ответ для создания активного диалога с ними.

По завершению беседы, на которую в общей сложности отводится 20 – 25 минут, преподаватель объясняет студентам расчетную методику определения массовых, молярных и объемных долей компонентов в бинарных и многокомпонентных смесях, а также определении необходимых для расчета параметров. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы.

Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по определению массовых, молярных и объемных долей компонентов. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета по определению массовых, молярных и объемных долей компонентов и решение задач по ней отводится примерно 25 – 30 минут.

После этого каждому студенту выдается еще две задачи по тематике занятия. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой. На решение этих задач отводится 15 – 20 минут.

### **Используемые технологии преподавания**

При проведении данного практического занятия используются следующие технологии образования:

1. Практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений за счет установки междисциплинарных связей, при которых изучение дисциплины строится на основе ранее приобретенных знаний и умений, а полученные навыки необходимы для дальнейшего обучения по программе подготовки. Также эти технологии реализуются за счет того, что задачи связаны с практической деятельностью, предусмотренной программой подготовки.

2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие навыков проблемного мышления. Заключается в постановке основных проблем тематики дисциплины на практическом занятии, и предполагает проведение открытых индивидуальных и коллективных дискуссий по совместному с преподавателем поиску оптимальных решений.

3. Личностно-ориентированные технологии, учитывающие индивидуальные особенности и способности каждого обучающегося для обеспечения успешного изучения дисциплины. Заключаются в индивидуальных беседах со студентами во время занятий и проверке решения задач.

Большая часть занятий и образовательных технологий происходит в интерактивной форме, заключающемся в обмене информацией между преподавателем и студентами, совместному поиску путей решения практических задач и проблем, а также в возможности более детального совместного рассмотрения и актуализации вопросов, представляющих наибольший интерес для обучающихся в рамках тематики занятия.

### **Примерные варианты заданий**

1. Дана смесь из трех компонентов, известна масса каждого компонента. Определить массовую, молярную и объемную доли каждого компонента. Объемную долю рассчитать отдельно для смеси из газообразных и жидких компонентов.

Исходные данные:

Вари- ант	Компонент 1		Компонент 2		Компонент 3	
	вещество	масса, кг	вещество	масса, кг	вещество	масса, кг
1	бензол	120	толуол	75	этилбензол	25
2	метан	85	пропан	60	фенол	45
3	бутилен	60	циклопропан	136	этанол	189
4	этилацетилен	149	этилен	59	метилпропан	67
5	гексан	105	пропилен	145	циклогексан	145
6	2-метилбутан	200	пропанол	69	бутан	178
7	циклопентан	110	ацетилен	99	анилин	124
8	диметиламин	35	циклобутан	156	метанол	26
9	метилацетилен	144	нафталин	123	триэтиламин	76
10	пентан	141	этиламин	53	кумол	61

2. Известно объемное содержание компонентов в газовой смеси. Определить состав смеси в массовых, объемных и молярных долях.

Исходные данные:

Вари- ант	Компонент 1		Компонент 2		Компонент 3	
	вещество	об. %	вещество	об. %	вещество	об. %
1	циклобутан	35	хлорэтан	27	пропилен	38
2	толуол	38	метилен	20	бутан	42
3	этанол	40	иодметан	25	этилацетилен	35
4	пропан	21	формальдегид	32	бутанол	47
5	циклопентан	10	ксилол	42	метилпропан	48
6	пропанол	19	хлороформ	35	пентан	46
7	гексан	24	циклопропан	24	метанол	52
8	дифторметан	25	этан	20	фенол	55
9	ацетилен	18	циклогексан	49	бензол	33
10	метан	11	бутилен	40	анилин	49

3. Дан молярный состав жидкой смеси, определить общие массу и объем, занимаемые смесью, а также массы и объемы отдельных компонентов.

Исходные данные:

Вариант	Компонент 1		Компонент 2		Компонент 3	
	вещество	$x_{m1}$	вещество	$x_{m2}$	вещество	$x_{m3}$
1	метан	0,59	этиламин	0,29	хлорбензол	0,12
2	диметилкетон	0,39	этан	0,40	бутанол	0,21
3	пентан	0,26	пропин	0,24	триметиламин	0,50
4	метанол	0,23	хлорэтан	0,20	гексан	0,57
5	триметилбутан	0,65	метилен	0,15	пропилен	0,20
6	пропан	0,56	формальдегид	0,17	циклопентан	0,27
7	дифторметан	0,40	диметиламин	0,32	толуол	0,28
8	этилен	0,26	циклопропан	0,13	бутан	0,61
9	ацетилен	0,42	ксилол	0,45	этилацетилен	0,13
10	трихлорметан	0,64	этанол	0,18	бутилен	0,18

### Вопросы для обсуждения

1. Общие сведения о смесях, их фазовых и компонентных составах;
2. Расчет массовых, молярных и объемных долей;
3. Пересчет между массовыми, молярными и объемными долями;
4. Определение относительных массовых концентраций;
5. Определение плотности газов и газовых смесей;
6. Определение плотности жидкости и жидких смесей.

### Список литературы

1. Рудобашта С. П., Карташов Э. М. Диффузия в химико-технологических процессах. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2013. - 478 с. (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785953207140.html>) – стр. 8-14;
2. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учебник для вузов. – М. Издательский дом МЭИ, 2011. - 562 с. (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383005637.html>) – стр. 4-18;
3. Романков П.Г. и др. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>) – стр. 6-12;
4. Фролов В.Ф. Лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - 2-е изд., истр. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. - 608 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081581.html>) – стр. 10-16.

## **Практическое занятие 2. Определение движущей силы и направления переноса вещества**

**Цель практического занятия:** изучить построение фазовых диаграмм равновесия для систем «газ - жидкость» и «пар - жидкость»; изучить определение движущей силы и направления переноса вещества для массообменных процессов.

### **План проведения занятия**

Практическое занятие проводится в несколько этапов. В начале занятия проводится беседа со студентами для оценки общего уровня знаний студентов по тематике занятия и выявления вопросов, которые большинству или всем неизвестны.

Затем преподаватель консультирует студентов по вопросам, которые вызвали у них трудности и по возможности сам приводит или просит привести студентов практические примеры для лучшего усвоения тематических основ.

После проведения консультации преподаватель дает студентам возможность задать ему возникшие у них вопросы по тематике занятия. При ответах желательно также приводить примеры и по возможности давать ответить другим студентам, знающим ответ для создания активного диалога с ними.

По завершению беседы, на которую в общей сложности отводится 20 – 25 минут, преподаватель объясняет студентам общие принципы построения фазовых диаграмм равновесия для систем «газ - жидкость» и «пар - жидкость» и определения по ним движущей силы и направления переноса вещества для массообменных процессов. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы.

Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по построению фазовой диаграммы равновесия для систем «газ - жидкость» и «пар - жидкость» и определения по ней движущей силы и направления переноса вещества для массообменного процесса. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики построения фазовых диаграмм равновесия для систем «газ - жидкость» и «пар - жидкость» и определения по ним движущей силы и направления переноса



вещества для массообменных процессов, а также на решение задач по этой теме отводится примерно 30 – 40 минут.

После этого каждому студенту выдается еще две задачи по тематике занятия. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой. На решение этих задач отводится 15 – 20 минут.

### **Используемые технологии преподавания**

При проведении данного практического занятия используются следующие технологии образования:

1. Практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений за счет установки междисциплинарных связей, при которых изучение дисциплины строится на основе ранее приобретенных знаний и умений, а полученные навыки необходимы для дальнейшего обучения по программе подготовки. Также эти технологии реализуются за счет того, что задачи связаны с практической деятельностью, предусмотренной программой подготовки.

2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие навыков проблемного мышления. Заключается в постановке основных проблем тематики дисциплины на практическом занятии, и предполагает проведение открытых индивидуальных и коллективных дискуссий по совместному с преподавателем поиску оптимальных решений.

3. Личностно-ориентированные технологии, учитывающие индивидуальные особенности и способности каждого обучающегося для обеспечения успешного изучения дисциплины. Заключаются в индивидуальных беседах со студентами во время занятий и проверке решения задач.

Большая часть занятий и образовательных технологий происходит в интерактивной форме, заключающемся в обмене информацией между преподавателем и студентами, совместному поиску путей решения практических задач и проблем, а также в возможности более детального совместного рассмотрения и актуализации вопросов, представляющих наибольший интерес для обучающихся в рамках тематики занятия.

### **Примерные варианты заданий**

1. По справочным данным построить фазовую диаграмму равновесия для заданной системы. Произвольно провести две рабочих линии: одну над линией равновесия, другую под линией равновесия таким образом, чтобы они не касались равновесной линии. Определить

минимальную и максимальную движущую силу массообменного процесса для каждой рабочей линии, а также движущую силу для заданных текущих концентраций. Определить из какой фазы в какую будет переходить вещество для каждой рабочей линии.

Исходные данные:

Вариант	Равновесная система	Текущая концентрация, мол. %	
		в фазе $\Phi_x$	В фазе $\Phi_y$
1	метиловый спирт - вода	79	54
2	хлороформ - бензол	51	25
3	вода - уксусная кислота	58	63
4	ацетон - вода	60	69
5	бензол - толуол	70	53
6	этиленгликоль - вода	66	30
7	муравьиная кислота - вода	21	63
8	четырёххлористый углерод - этилацетат	68	53
9	1,2 - дихлорэтан - бензол	68	75
10	этиловый спирт - этилацетат	23	38

2. На фазовой диаграмме равновесия построить рабочую линию для изменения концентрации распределяемого вещества в начальной фазе от  $c_{нач}$  до  $c_{кон}$  и перехода этого вещества в заданную фазу. Провести рабочую линию таким образом, чтобы она не касалась линии равновесия. Определить движущую силу, поток массы, коэффициенты молекулярной диффузии, массоотдачи и массопередачи в начале процесса, при заданной концентрации  $c_T$  и в конце процесса. Площадь поверхности контакта фаз  $F$ , время проведения процесса  $\tau$ .

Исходные данные:

Вариант	Фаза-приемник	Концентрации, мол. %			$F, m^2$	$\tau, c$
		$c_{нач}$	$c_{кон}$	$c_T$		
1	жидкость	94	30	40	118	756
2	пар	82	27	42	66	420
3	жидкость	73	37	64	90	395
4	пар	79	36	46	39	347
5	жидкость	85	26	54	76	578
6	пар	93	38	57	93	768
7	жидкость	75	38	68	59	824
8	пар	89	34	65	53	380
9	жидкость	81	27	47	84	744

Вариант	Фаза-приемник	Концентрации, мол. %			F, м <sup>2</sup>	τ, с
		С <sub>нач</sub>	С <sub>кон</sub>	С <sub>т</sub>		
10	пар	75	33	55	31	793

### Вопросы для обсуждения

1. Движущая сила и средняя движущая сила массообменных процессов;
2. Фазовые диаграммы и равновесные составы массообменных процессов;
3. Определение движущей силы и направление массопереноса;
4. Равновесие массообменных процессов и влияющие на него факторы;
5. Подвижное фазовое равновесие и правило фаз Гиббса;
6. Основные уравнения массопереноса.

### Список литературы

1. Рудобашта С. П., Карташов Э. М. Диффузия в химико-технологических процессах. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2013. - 478 с. (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785953207140.html>) – стр. 22-28;
2. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учебник для вузов. – М. Издательский дом МЭИ, 2011. - 562 с. (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383005637.html>) – стр. 12-28;
3. Романков П.Г. и др. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>) – стр. 18-22;
4. Фролов В.Ф. Лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - 2-е изд., истр. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. - 608 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081581.html>) – стр. 17-24.

### Практическое занятие 3. Расчет параметров процесса абсорбции

**Цель практического занятия:** изучить методику составления материального баланса абсорбции; изучить методику определения движущей силы абсорбции через парциальные давления; изучить методику определения коэффициента массопередачи при абсорбции.

### План проведения занятия

Практическое занятие проводится в несколько этапов. В начале занятия проводится беседа со студентами для оценки общего уровня знаний студентов по тематике занятия и выявления вопросов, которые большинству или всем неизвестны.

Затем преподаватель консультирует студентов по вопросам, которые вызвали у них трудности и по возможности сам приводит или просит привести студентов практические примеры для лучшего усвоения тематических основ.

После проведения консультации преподаватель дает студентам возможность задать ему возникшие у них вопросы по тематике занятия. При ответах желательно также приводить примеры и по возможности давать ответить другим студентам, знающим ответ для создания активного диалога с ними.

По завершении беседы, на которую в общей сложности отводится 20 – 25 минут, преподаватель объясняет студентам методику расчета материального баланса и движущей силы процесса абсорбции. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету материального баланса и движущей силы процесса абсорбции. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета материального баланса и движущей силы процесса абсорбции и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

По завершении преподаватель объясняет студентам методику расчета коэффициента массопередачи при абсорбции. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету коэффициента массопередачи при абсорбции. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета коэффициентов массопереноса при адсорбции и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

## Используемые технологии преподавания

При проведении данного практического занятия используются следующие технологии образования:

1. Практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений за счет установки междисциплинарных связей, при которых изучение дисциплины строится на основе ранее приобретенных знаний и умений, а полученные навыки необходимы для дальнейшего обучения по программе подготовки. Также эти технологии реализуются за счет того, что задачи связаны с практической деятельностью, предусмотренной программой подготовки.

2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие навыков проблемного мышления. Заключается в постановке основных проблем тематики дисциплины на практическом занятии, и предполагает проведение открытых индивидуальных и коллективных дискуссий по совместному с преподавателем поиску оптимальных решений.

3. Личностно-ориентированные технологии, учитывающие индивидуальные особенности и способности каждого обучающегося для обеспечения успешного изучения дисциплины. Заключаются в индивидуальных беседах со студентами во время занятий и проверке решения задач.

Большая часть занятий и образовательных технологий происходит в интерактивной форме, заключающемся в обмене информацией между преподавателем и студентами, совместному поиску путей решения практических задач и проблем, а также в возможности более детального совместного рассмотрения и актуализации вопросов, представляющих наибольший интерес для обучающихся в рамках тематики занятия.

## Примерные варианты заданий

1. Рассчитать материальный баланс и движущую силу процесса абсорбции заданного компонента из воздуха водой. Количество разделяемой газовой смеси  $V$ , начальная концентрация компонента в ней  $u_{нач}$ . Степень извлечения компонента  $\varepsilon$ , степень насыщения воды  $\eta$ . Температура абсорбции  $t_a$ , давление абсорбции  $P_a$ . Принять, что начальная концентрация компонента в воде равна нулю.

Исходные данные:

Вариант	Компонент	$V$ , $\text{м}^3/\text{с}$	$u_{нач}$ , масс. %	$\varepsilon$	$\eta$	$t_a$ , $^{\circ}\text{C}$	$P_a$ , кПа
1	аммиак	5	6	0,95	0,75	25	141,5
2	хлористый водород	8	8	0,92	0,74	31	162,5

3	аммиак	8	7	0,96	0,77	17	120,8
4	хлористый водород	6	4	0,89	0,76	37	128,9
5	аммиак	10	8	0,92	0,85	22	154,4
6	хлористый водород	10	5	0,88	0,78	35	145,5
7	аммиак	8	5	0,94	0,78	15	132,5
8	хлористый водород	5	7	0,95	0,86	38	136,2
9	аммиак	6	6	0,98	0,72	21	160,0
10	хлористый водород	12	8	0,94	0,82	34	150,3

2. Рассчитать коэффициент массопередачи при абсорбции, используя результаты решения первой задачи и заданные параметры элемента насадки с удельной поверхностью  $f$ , свободным объемом  $V_{св}$  и эквивалентным диаметром  $d_э$ . Площадь сечения насадки  $F$ . В скобках указан тип укладки элементов.

Исходные данные:

Вариант	Тип насадки	Материал насадки	$F$ , м <sup>2</sup>	Размеры элемента, мм	$f$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$V_{св}$ , м <sup>3</sup>	$d_э$ , м
1	кольца Рашига (упоряд)	керамика	12,5	15 x 15 x 2	330	0,7	0,009
2	кольца Палля (упоряд)	керамика	14,2	35 x 35 x 4	220	0,74	0,014
3	кольца Рашига (неупоряд)	керамика	11,8	10 x 10 x 1,5	440	0,7	0,006
4	кольца Палля (неупоряд)	керамика	10,6	25 x 25 x 3	220	0,74	0,014
5	кольца Рашига (упоряд)	сталь	12,2	15 x 15 x 0,5	350	0,92	0,012
6	кольца Палля (упоряд)	сталь	13,7	25 x 25 x 0,6	235	0,9	0,015
7	кольца Рашига (неупоряд)	сталь	14,7	10 x 10 x 0,5	500	0,88	0,007
8	кольца Палля (неупоряд)	сталь	12,8	15 x 15 x 0,4	380	0,9	0,010
9	седла Берля	керамика	14,4	25	260	0,69	0,011

Вариант	Тип насадки	Материал насадки	F, м <sup>2</sup>	Размеры элемента, мм	f, м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	V <sub>св</sub> , м <sup>3</sup>	d <sub>э</sub> , м
10	седла «Инталлокс»	керамика	15,2	19	335	0,77	0,009

### Вопросы для обсуждения

1. Общие принципы абсорбции;
2. Промышленные абсорбенты;
3. Материальный баланс абсорбции;
4. Движущая сила абсорбции;
5. Типы насадок и их элементов;
6. Коэффициент массопередачи при абсорбции.

### Список литературы

1. Романков П.Г. и др. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>) – стр. 215-240;
2. Рудобашта С. П., Карташов Э. М. Диффузия в химико-технологических процессах. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: КолосС, 2013. - 478 с. (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785953207140.html>) – стр. 68-79;
3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - 2-е изд., истр. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. - 608 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081581.html>) – стр. 356-366.

### Практическое занятие 4. Расчет параметров процессов перегонки и ректификации

**Цель практического занятия:** изучить методику расчета материального баланса ректификации; изучить методику определения свойств пара и жидкости в ректификационной колонне; изучить методику определения коэффициента массопередачи при ректификации.

### План проведения занятия

Практическое занятие проводится в несколько этапов. В начале занятия проводится беседа со студентами для оценки общего уровня знаний студентов по тематике занятия и выявления вопросов, которые большинству или всем неизвестны.

Затем преподаватель консультирует студентов по вопросам, которые вызвали у них трудности и по возможности сам приводит или просит привести студентов практические примеры для лучшего усвоения тематических основ.

После проведения консультации преподаватель дает студентам возможность задать ему возникшие у них вопросы по тематике занятия. При ответах желательно также приводить примеры и по возможности давать ответить другим студентам, знающим ответ для создания активного диалога с ними.

По завершению беседы, на которую в общей сложности отводится 20 – 25 минут, преподаватель объясняет студентам методику расчета материального баланса процесса ректификации и определения свойств пара и жидкости в верхней и нижней частях колонны. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету материального баланса процесса ректификации и определения свойств пара и жидкости в верхней и нижней частях колонны. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета материального баланса процесса ректификации и определения свойств пара и жидкости в верхней и нижней частях колонны и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

По завершении преподаватель объясняет студентам методику расчета коэффициента массопередачи при ректификации. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету коэффициента массопередачи при ректификации. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета коэффициента массопередачи при ректификации и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.



## Используемые технологии преподавания

При проведении данного практического занятия используются следующие технологии образования:

1. Практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений за счет установки междисциплинарных связей, при которых изучение дисциплины строится на основе ранее приобретенных знаний и умений, а полученные навыки необходимы для дальнейшего обучения по программе подготовки. Также эти технологии реализуются за счет того, что задачи связаны с практической деятельностью, предусмотренной программой подготовки.

2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие навыков проблемного мышления. Заключается в постановке основных проблем тематики дисциплины на практическом занятии, и предполагает проведение открытых индивидуальных и коллективных дискуссий по совместному с преподавателем поиску оптимальных решений.

3. Личностно-ориентированные технологии, учитывающие индивидуальные особенности и способности каждого обучающегося для обеспечения успешного изучения дисциплины. Заключаются в индивидуальных беседах со студентами во время занятий и проверке решения задач.

Большая часть занятий и образовательных технологий происходит в интерактивной форме, заключающемся в обмене информацией между преподавателем и студентами, совместному поиску путей решения практических задач и проблем, а также в возможности более детального совместного рассмотрения и актуализации вопросов, представляющих наибольший интерес для обучающихся в рамках тематики занятия.

## Примерные варианты заданий

1. Рассчитать материальный баланс процесса ректификации заданной смеси с содержанием легколетучего компонента  $x_f$ . Расход исходной смеси  $F_{исх}$ . Содержание легколетучего компонента в дистилляте  $x_d$ , в кубовом остатке –  $x_w$ .

Исходные данные:

Вариант	Разделяемая смесь	F, т/ч	$x_f$ , масс. %	$x_d$ , масс. %	$x_w$ , масс. %
1	метиловый спирт - вода	18	44	90	11
2	хлороформ - бензол	14	49	96	12
3	вода - уксусная кислота	20	51	89	6
4	ацетон - вода	16	57	91	6

5	бензол - толуол	23	41	93	7
6	этиленгликоль - вода	19	53	93	9
7	муравьиная кислота - вода	22	46	97	11
8	четырёххлористый углерод - этилацетат	15	60	94	6
9	1,2 - дихлорэтан - бензол	21	53	90	9
10	этиловый спирт - этилацетат	17	41	89	11

2. Рассчитать коэффициент массопередачи при ректификации, используя результаты решения первой задачи и заданные параметры работы тарелки: плотность орошения в верхней и нижней частях колонны  $U_v$  и  $U_n$ , свободное сечение тарелки  $F_c$ , скорость пара в рабочем сечении  $w_T$ . Расчет провести для точки с рабочей концентрацией  $x$ .

Исходные данные:

Вариант	$U_v, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$U_n, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	$F_c, \%$	$w_T, \text{ м/с}$	$x, \text{ масс.}\%$
1	0,0019	0,0047	18,8	0,91	18
2	0,0022	0,0061	14,3	0,85	30
3	0,0024	0,0053	19,3	1,05	64
4	0,0015	0,0051	18,2	0,96	87
5	0,0017	0,0048	12,7	0,81	35
6	0,0023	0,0059	12,2	0,94	78
7	0,0025	0,0064	11,0	0,83	14
8	0,0021	0,0063	15,2	1,02	40
9	0,0016	0,0056	10,3	0,95	89
10	0,0020	0,0052	14,8	0,99	10

### Вопросы для обсуждения

1. Общие принципы ректификации;
2. Дефлегмация и ее влияние на параметры процесса;
3. Материальный баланс ректификации;
4. Движущая сила ректификации;
5. Типы тарелок ректификационных колонн;
6. Коэффициент массопередачи при ректификации.

## Список литературы

1. Романков П.Г. и др. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>) – стр. 215-240;
2. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учебник для вузов. – М. Издательский дом МЭИ, 2011. - 562 с. (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383005637.html>) – стр. 148-160;
3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - 2-е изд., истр. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. - 608 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081581.html>) – стр. 356-366.

### Практическое занятие 5. Расчет параметров процесса жидкостной экстракции

**Цель практического занятия:** изучить методику расчета параметров жидкостной экстракции; изучить методику расчета коэффициента массопередачи при жидкостной экстракции.

#### План проведения занятия

Практическое занятие проводится в несколько этапов. В начале занятия проводится беседа со студентами для оценки общего уровня знаний студентов по тематике занятия и выявления вопросов, которые большинству или всем неизвестны.

Затем преподаватель консультирует студентов по вопросам, которые вызвали у них трудности и по возможности сам приводит или просит привести студентов практические примеры для лучшего усвоения тематических основ.

После проведения консультации преподаватель дает студентам возможность задать ему возникшие у них вопросы по тематике занятия. При ответах желательно также приводить примеры и по возможности давать ответить другим студентам, знающим ответ для создания активного диалога с ними.

По завершению беседы, на которую в общей сложности отводится 20 – 25 минут, преподаватель объясняет студентам методику расчета параметров жидкостной экстракции. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету параметров жидкостной экстракции. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета и выбора параметров жидкостной экстракции и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

По завершении преподаватель объясняет студентам методику расчета коэффициента массопередачи при жидкостной экстракции. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету коэффициента массопередачи при жидкостной экстракции. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета коэффициента массопередачи при жидкостной экстракции и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

### **Используемые технологии преподавания**

При проведении данного практического занятия используются следующие технологии образования:

1. Практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений за счет установки междисциплинарных связей, при которых изучение дисциплины строится на основе ранее приобретенных знаний и умений, а полученные навыки необходимы для дальнейшего обучения по программе подготовки. Также эти технологии реализуются за счет того, что задачи связаны с практической деятельностью, предусмотренной программой подготовки.

2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие навыков проблемного мышления. Заключается в постановке основных проблем тематики дисциплины на практическом занятии, и предполагает проведение открытых индивидуальных и коллективных дискуссий по совместному с преподавателем поиску оптимальных решений.

3. Личностно-ориентированные технологии, учитывающие индивидуальные особенности и способности каждого обучающегося для обеспечения успешного изучения дисциплины.

Закljučаются в индивидуальных беседах со студентами во время занятий и проверке решения задач.

Большая часть занятий и образовательных технологий происходит в интерактивной форме, заключающемся в обмене информацией между преподавателем и студентами, совместному поиску путей решения практических задач и проблем, а также в возможности более детального совместного рассмотрения и актуализации вопросов, представляющих наибольший интерес для обучающихся в рамках тематики занятия.

### Примерные варианты заданий

1. Рассчитать параметры жидкостной экстракции заданного компонента из заданной жидкости заданным экстрагентом. Расход исходной смеси составляет  $V_x$ , начальная концентрация извлекаемого компонента  $c_{x,n}$ , конечная –  $c_{x,k}$ , начальная концентрация извлекаемого компонента в экстрагенте  $c_{y,n}$ , температура в экстракторе  $t$ .

Исходные данные:

Вариант	извлекаемый компонент	растворитель	экстрагент
1	ацетон	вода	толуол
2	борная кислота	глицерин	амиловый спирт
3	азотная кислота	вода	диэтиловый эфир
4	бром	вода	четырёххлористый углерод
5	иод	глицерин	хлороформ
6	фенол	вода	бензол
7	формальдегид	вода	хлороформ
8	иод	глицерин	диэтиловый эфир
9	аммиак	вода	амиловый спирт
10	иод	вода	нитробензол

Вариант	$V_x, \text{ м}^3/\text{ч}$	$c_{x,n}, \text{ кг/м}^3$	$c_{x,k}, \text{ кг/м}^3$	$c_{y,n}, \text{ кг/м}^3$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$
1	5,7	0,41	0,07	0,04	25
2	5,2	0,79	0,09	0,01	20
3	6,5	0,57	0,11	0,05	25
4	7,4	0,74	0,05	0,02	20
5	5,0	0,40	0,04	0,03	25
6	6,8	0,31	0,13	0,05	20

Вариант	$V_x, \text{м}^3/\text{ч}$	$c_{\text{хн}}, \text{кг}/\text{м}^3$	$c_{\text{хк}}, \text{кг}/\text{м}^3$	$c_{\text{ун}}, \text{кг}/\text{м}^3$	$t, \text{°C}$
7	7,0	0,45	0,15	0,02	25
8	6,0	0,87	0,12	0,01	20
9	7,7	0,34	0,10	0,04	25
10	7,1	0,53	0,08	0,02	20

2. По результатам решения первой задачи рассчитать коэффициенты диффузии, массоотдачи и массопередачи для каждой фазы при факторе ассоциации для растворителя  $\psi_1$  и для экстрагента  $\psi_2$ . Вязкость раствора принять равной вязкости растворителя.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\psi_1$	2,6	2,5	2,6	1,5	2,2	1,7	1,6	2,7	1,8	1,9
$\psi_2$	1,0	0,8	1,6	1,0	1,2	0,9	1,3	1,5	1,1	1,4

### Вопросы для обсуждения

1. Общие принципы жидкостной экстракции;
2. Промышленные экстрагенты;
3. Равновесие между фазами при экстракции;
4. Влияние размера капель на жидкостную экстракцию;
5. Режимы проведения экстракции;
6. Коэффициент массопередачи при жидкостной экстракции.

### Список литературы

1. Романков П.Г. и др. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>) – стр. 326-348;
2. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен: учебник для вузов. – М. Издательский дом МЭИ, 2011. - 562 с. (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383005637.html>) – стр. 344-371;
3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - 2-е изд., истр. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. - 608 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081581.html>) – стр. 459-472.

## **Практическое занятие 6. Расчет параметров процесса адсорбции**

**Цель практического занятия:** изучение методики расчета показателей работы слоя адсорбента; изучение методики расчета коэффициента массопередачи и удельной поверхности адсорбента при адсорбции.

### **План проведения занятия**

Практическое занятие проводится в несколько этапов. В начале занятия проводится беседа со студентами для оценки общего уровня знаний студентов по тематике занятия и выявления вопросов, которые большинству или всем неизвестны.

Затем преподаватель консультирует студентов по вопросам, которые вызвали у них трудности и по возможности сам приводит или просит привести студентов практические примеры для лучшего усвоения тематических основ.

После проведения консультации преподаватель дает студентам возможность задать ему возникшие у них вопросы по тематике занятия. При ответах желательно также приводить примеры и по возможности давать ответить другим студентам, знающим ответ для создания активного диалога с ними.

По завершению беседы, на которую в общей сложности отводится 20 – 25 минут, преподаватель объясняет студентам методику расчета показателей работы слоя адсорбента. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету показателей работы слоя адсорбента. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета показателей работы слоя адсорбента и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

По завершении преподаватель объясняет студентам методику расчета коэффициента массопередачи при адсорбции. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом

студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету коэффициента массопередачи при адсорбции. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой. При этом каждый студент должен изобразить схему получившегося адсорбера с соблюдением пропорциональности размеров.

На объяснение методики расчета коэффициента массопередачи при адсорбции и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

### **Используемые технологии преподавания**

При проведении данного практического занятия используются следующие технологии образования:

1. Практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений за счет установки междисциплинарных связей, при которых изучение дисциплины строится на основе ранее приобретенных знаний и умений, а полученные навыки необходимы для дальнейшего обучения по программе подготовки. Также эти технологии реализуются за счет того, что задачи связаны с практической деятельностью, предусмотренной программой подготовки.

2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие навыков проблемного мышления. Заключается в постановке основных проблем тематики дисциплины на практическом занятии, и предполагает проведение открытых индивидуальных и коллективных дискуссий по совместному с преподавателем поиску оптимальных решений.

3. Личностно-ориентированные технологии, учитывающие индивидуальные особенности и способности каждого обучающегося для обеспечения успешного изучения дисциплины. Заключаются в индивидуальных беседах со студентами во время занятий и проверке решения задач.

Большая часть занятий и образовательных технологий происходит в интерактивной форме, заключающемся в обмене информацией между преподавателем и студентами, совместному поиску путей решения практических задач и проблем, а также в возможности более детального совместного рассмотрения и актуализации вопросов, представляющих наибольший интерес для обучающихся в рамках тематики занятия.



### Примерные варианты заданий

1. Рассчитать влажность газа, проходящего осушку при прохождении через неподвижный слой заданного адсорбента через время  $\tau_1 - \tau_4$ , среднее содержание влаги в адсорбенте через время  $\tau_4$ , а также содержание влаги в адсорбенте на высоте  $h_1 - h_4$ . Диаметр слоя адсорбента  $D$ , высота слоя  $H = h_4$ . Расход газа составляет  $Q$ , давление в адсорбере  $P$ , температура  $t$ , снижение адсорбционной емкости через  $\tau_4$  составляет  $x$ .

Исходные данные:

Вариант	адсорбент	$Q$ , тыс. м <sup>3</sup> /сут	$P$ , ат	$t$ , °C	$x$ , %
1	активированный силикагель	507	57	30	37
2	активированный алюмогель	479	47	45	45
3	флорит	608	35	26	32
4	активированный силикагель	420	42	40	31
5	активированный алюмогель	603	45	35	34
6	флорит	757	41	44	33
7	активированный силикагель	673	39	34	43
8	активированный алюмогель	594	37	39	30
9	флорит	656	50	41	38
10	активированный силикагель	461	68	27	39

Вариант	Расчетные высоты слоя, м				Расчетное время работы, ч			
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$
1	0,4	2,6	4,8	6,1	2	5	12	16
2	0,6	1,2	2,6	3,5	1	6	14	20
3	0,5	2,5	3,5	4,1	3	8	12	15
4	0,8	1,9	4,0	5,6	4	9	14	18
5	0,2	2,5	4,5	5,3	2	5	13	22
6	0,3	1,5	3,2	4,2	5	9	11	12
7	0,7	1,5	2,8	3,7	3	7	12	14
8	0,9	1,1	2,0	3,8	4	6	13	17
9	1,0	2,7	3,0	5,5	2	5	7	10
10	0,4	2,0	3,8	4,6	1	9	16	19

2. Рассчитать объемный коэффициент массопередачи и удельную поверхность адсорбента при адсорбции метанола из воздуха при помощи активированного угля. Начальная концентрация метанола в воздухе  $C_n$ , Равновесная концентрация в сорбенте  $X^*$ . Температура паровоздушной смеси  $t$ , давление атмосферное. Насыпная плотность адсорбента  $\rho_{нас}$ , эквивалентный диаметр частиц  $d_э$ , порозность слоя  $\varepsilon$ . Коэффициент эффективной диффузии метанола в адсорбенте  $D_э$ .

Исходные данные:

Вариант	$C_n \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$X^* \cdot 10^{-3}$ , кг/кг	$t$ , °C	$\rho_{нас}$ , кг/м <sup>3</sup>	$d_э \cdot 10^{-3}$ , м	$\varepsilon$	$D_э$ , м <sup>2</sup> /с
1	1,1	3,8	26	543	2,4	0,356	2,9
2	1,4	4,2	18	497	3,0	0,414	3,5
3	1,3	4,4	20	477	2,9	0,309	4,0
4	1,2	2,9	28	561	1,9	0,335	3,2
5	2,2	4,0	17	428	1,8	0,366	3,9
6	2,3	3,4	27	562	1,7	0,331	3,6
7	2,0	2,8	23	412	1,5	0,251	3,0
8	2,4	3,7	15	526	2,1	0,404	3,3
9	1,6	3,3	22	490	2,2	0,296	2,8
10	2,1	3,0	16	405	2,3	0,271	3,4

### Вопросы для обсуждения

1. Общие принципы адсорбции;
2. Промышленные адсорбенты;
3. Равновесие и кинетика адсорбции;
4. Материальный баланс адсорбции;
5. Регенерация адсорбентов;
6. Коэффициент массопередачи при адсорбции.

### Список литературы

1. Разинов А.И., Суханов П.П. Процессы массопереноса с участием твердой фазы: учебное пособие - Казань: издательство КНИТУ, 2012. - 96 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/knitu-0004.html>) – стр. 34-38.

2. Романков П.Г. и др. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>) – стр. 255-261;

3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - 2-е изд., истр. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. - 608 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081581.html>) – стр. 400-423.

### **Практическое занятие 7. Расчет параметров процесса ионного обмена**

**Цель практического занятия:** изучение методики расчета коэффициента внешней массоотдачи и лимитирующего диффузионного сопротивления; изучение методики расчета времени пребывания частицы ионита в аппарате, высоты псевдооживленного слоя и объемного коэффициента массопередачи.

#### **План проведения занятия**

Практическое занятие проводится в несколько этапов. В начале занятия проводится беседа со студентами для оценки общего уровня знаний студентов по тематике занятия и выявления вопросов, которые большинству или всем неизвестны.

Затем преподаватель консультирует студентов по вопросам, которые вызвали у них трудности и по возможности сам приводит или просит привести студентов практические примеры для лучшего усвоения тематических основ.

После проведения консультации преподаватель дает студентам возможность задать ему возникшие у них вопросы по тематике занятия. При ответах желательно также приводить примеры и по возможности давать ответить другим студентам, знающим ответ для создания активного диалога с ними.

По завершению беседы, на которую в общей сложности отводится 20 – 25 минут, преподаватель объясняет студентам методику расчета коэффициента внешней массоотдачи и лимитирующего диффузионного сопротивления. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету коэффициента внешней массоотдачи и лимитирующего диффузионного сопротивления. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета коэффициента внешней массоотдачи и лимитирующего диффузионного сопротивления и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

По завершении преподаватель объясняет студентам методику расчета времени пребывания частицы ионита в аппарате, высоты псевдооживленного слоя и объемного коэффициента массопередачи. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету времени пребывания частицы ионита в аппарате, высоты псевдооживленного слоя и объемного коэффициента массопередачи. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета времени пребывания частицы ионита в аппарате, высоты псевдооживленного слоя и объемного коэффициента массопередачи и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

### **Используемые технологии преподавания**

При проведении данного практического занятия используются следующие технологии образования:

1. Практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений за счет установки междисциплинарных связей, при которых изучение дисциплины строится на основе ранее приобретенных знаний и умений, а полученные навыки необходимы для дальнейшего обучения по программе подготовки. Также эти технологии реализуются за счет того, что задачи связаны с практической деятельностью, предусмотренной программой подготовки.

2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие навыков проблемного мышления. Заключается в постановке основных проблем тематики дисциплины на практическом занятии, и предполагает проведение открытых

индивидуальных и коллективных дискуссий по совместному с преподавателем поиску оптимальных решений.

3. Личностно-ориентированные технологии, учитывающие индивидуальные особенности и способности каждого обучающегося для обеспечения успешного изучения дисциплины. Заключаются в индивидуальных беседах со студентами во время занятий и проверке решения задач.

Большая часть занятий и образовательных технологий происходит в интерактивной форме, заключающемся в обмене информацией между преподавателем и студентами, совместному поиску путей решения практических задач и проблем, а также в возможности более детального совместного рассмотрения и актуализации вопросов, представляющих наибольший интерес для обучающихся в рамках тематики занятия.

### Примерные варианты заданий

1. Рассчитать коэффициент внешней массоотдачи и лимитирующее диффузионное сопротивление при извлечении ионов натрия из раствора хлорида калия заданным ионитом. Производительность по исходному раствору  $V$ . Исходная концентрация раствора  $C_n$ , концентрация очищенного раствора  $C_k$ . Температура в аппарате  $t$ , порозность неподвижного слоя  $\epsilon_n$ . Регенерация ионита проводится 1 н раствором HCl.

Исходные данные:

Вариант	Марка ионита	$V$ , м <sup>3</sup> /ч	$C_n$ , моль-экв/м <sup>3</sup>	$C_k$ , моль-экв/м <sup>3</sup>	$t$ , °C	$\epsilon_n$
1	КУ-2	8	4,43	0,095	28	0,45
2	КУ-1	13	3,82	0,037	27	0,41
3	АВ-17-8	15	4,82	0,032	20	0,38
4	ЭДЭ-10П	12	5,22	0,052	24	0,43
5	АН-1	10	4,88	0,040	23	0,32
6	КУ-2	9	3,87	0,048	22	0,40
7	КУ-1	14	4,98	0,054	18	0,30
8	АВ-17-8	11	5,39	0,092	19	0,34
9	ЭДЭ-10П	15	5,00	0,091	25	0,33
10	АН-1	11	4,42	0,045	26	0,39

2. По результатам решения первой задачи рассчитать времени пребывания частицы ионита в аппарате, высоты псевдооживленного слоя и объемного коэффициента массопере-

дачи при равновесной концентрации ионов натрия в ионите  $X^*(C_k)$ , минимальном размере частиц ионита  $d_{\text{мин}}$ . Принять рабочий расход ионита в  $K$  раз больше минимального, а рабочую высоту псевдооживленного слоя на  $B$  процентов больше расчетной.

Исходные данные:

Вариант	$X^*(C_k)$ , кг/кг	$d_{\text{мин}}$ , мм	$K$	$B$ , %
1	0,105	0,3	1,1	26
2	0,045	0,3	1,2	27
3	0,04	0,4	1,3	28
4	0,062	0,4	1,3	32
5	0,049	0,3	1,2	30
6	0,058	0,3	1,2	30
7	0,064	0,3	1,3	35
8	0,103	0,4	1,1	34
9	0,102	0,4	1,1	21
10	0,054	0,3	1,3	33

### Вопросы для обсуждения

1. Общие принципы ионного обмена;
2. Промышленные иониты;
3. Равновесие и кинетика ионного обмена;
4. Изотермы ионного обмена;
5. Регенерация ионитов;
6. Коэффициенты массоотдачи и массопередачи при ионном обмене.

### Список литературы

1. Разинов А.И., Суханов П.П. Процессы массопереноса с участием твердой фазы: учебное пособие - Казань: издательство КНИТУ, 2012. - 96 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/knitu-0004.html>) – стр. 39-46.
2. Романков П.Г. и др. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>) – стр. 282 - 296;
3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - 2-е изд., истр. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. - 608 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081581.html>) – стр. 489-504.

## **Практическое занятие 8. Расчет параметров процесса сушки**

**Цель практического занятия:** изучить методику расчета параметров сушильного агента на входе в конвективную сушилку; изучить методику расчета параметров отработанного сушильного агента и его расхода для конвективной сушки.

### **План проведения занятия**

Практическое занятие проводится в несколько этапов. В начале занятия проводится беседа со студентами для оценки общего уровня знаний студентов по тематике занятия и выявления вопросов, которые большинству или всем неизвестны.

Затем преподаватель консультирует студентов по вопросам, которые вызвали у них трудности и по возможности сам приводит или просит привести студентов практические примеры для лучшего усвоения тематических основ.

После проведения консультации преподаватель дает студентам возможность задать ему возникшие у них вопросы по тематике занятия. При ответах желательно также приводить примеры и по возможности давать ответить другим студентам, знающим ответ для создания активного диалога с ними.

По завершению беседы, на которую в общей сложности отводится 20 – 25 минут, преподаватель объясняет студентам методику расчета параметров сушильного агента на входе в конвективную сушилку. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету параметров сушильного агента на входе в конвективную сушилку. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета параметров сушильного агента на входе в конвективную сушилку и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

По завершении преподаватель объясняет студентам методику расчета параметров отработанного сушильного агента и его расхода для конвективной сушки. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной

группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету параметров отработанного сушильного агента и его расхода для конвективной сушки. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета параметров отработанного сушильного агента и его расхода для конвективной сушки и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

### **Используемые технологии преподавания**

При проведении данного практического занятия используются следующие технологии образования:

1. Практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений за счет установки междисциплинарных связей, при которых изучение дисциплины строится на основе ранее приобретенных знаний и умений, а полученные навыки необходимы для дальнейшего обучения по программе подготовки. Также эти технологии реализуются за счет того, что задачи связаны с практической деятельностью, предусмотренной программой подготовки.

2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие навыков проблемного мышления. Заключается в постановке основных проблем тематики дисциплины на практическом занятии, и предполагает проведение открытых индивидуальных и коллективных дискуссий по совместному с преподавателем поиску оптимальных решений.

3. Личностно-ориентированные технологии, учитывающие индивидуальные особенности и способности каждого обучающегося для обеспечения успешного изучения дисциплины. Заключаются в индивидуальных беседах со студентами во время занятий и проверке решения задач.

Большая часть занятий и образовательных технологий происходит в интерактивной форме, заключающемся в обмене информацией между преподавателем и студентами, совместному поиску путей решения практических задач и проблем, а также в возможности более детального совместного рассмотрения и актуализации вопросов, представляющих наибольший интерес для обучающихся в рамках тематики занятия.

### **Примерные варианты заданий**

1. Рассчитать начальные влагосодержание и энтальпию топочных газов, образующихся при сжигании природного газа заданного состава, и подаваемых в конвективную сушилку.



Начальная температура топлива  $t_n$ , начальная температура топочных газов  $t_{см1}$ . Коэффициент полезного действия топки  $\eta$ , теплоемкость топлива  $c_T$ , начальная теплоемкость топочных газов  $c_{сг}$ , влагосодержание топочных газов на входе в сушилку  $x_0$ .

Исходные данные:

Вариант	$t_n$ , °C	$t_{см1}$ , °C	$\eta$	$c_T$ , кДж/(кг·°C)	$c_{сг}$ , кДж/(кг·°C)	$x_0$ , кг/кг
1	24	260	85	1,38	1,12	0,010
2	20	385	90	1,18	1,08	0,012
3	23	430	95	1,17	1,09	0,013
4	28	300	85	1,39	1,18	0,011
5	25	420	90	1,12	1,11	0,016
6	19	290	95	1,41	1,20	0,014
7	21	350	85	1,28	1,13	0,015
8	18	390	90	1,59	1,15	0,08
9	26	285	95	1,25	1,14	0,09
10	22	280	90	1,30	1,06	0,010

Вариант	Состав газа, об. %							
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	H <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>
1	93,0	3,4	0,8	0,6	0,3	0,1	0,8	1
2	94,0	1,2	0,7	0,4	0,2	0,2	2,8	0,5
3	91,6	1,6	0,8	0,4	0,2	0,6	3,3	1,5
4	96,4	0,3	0,1	0,1	0,5	0,3	1,2	1,1
5	91,3	1,7	1,5	1,5	0,7	0,2	1,9	1,2
6	92,7	1,8	1,3	0,6	0,3	0,7	1,7	0,9
7	95,0	0,8	0,6	0,3	0,6	0,4	2,1	0,2
8	92,1	1,3	1,1	0,8	0,8	0,6	2,2	1,1
9	93,6	2,0	0,4	0,2	0,5	0,5	1,8	1,0
10	91,9	1,4	1,2	0,4	0,4	0,3	2,7	1,7

2. По результатам решения первой задачи рассчитать начальное влагосодержание и энтальпию топочных газов на выходе из конвективной сушилки, определить расход топочных газов для производительности сушилки по высушенному материалу  $G_k$ . Начальное влагосодержание материала  $w_{нач}$ , конечное –  $w_{кон}$ . Теплоемкость высушенного материала  $c_m$ , конечная температура топочных газов  $t_{см2}$ .

Исходные данные:

Вариант	$G_K$ , т/ч	$W_{нач}$ , масс. %	$W_{кон}$ , масс. %	$c_m$ , кДж/(кг·°С)	$t_{см2}$ , °С
1	0,6	17	2,6	0,86	105
2	1,1	18	3,4	0,65	110
3	1,2	16	2,1	0,67	95
4	1,5	19	5,7	0,88	110
5	0,5	15	4,9	0,68	100
6	1,0	23	4,6	0,87	110
7	1,7	22	1,8	0,63	100
8	1,4	20	6,3	0,69	95
9	1,6	24	2,2	0,80	120
10	0,8	21	5,9	0,70	115

### Вопросы для обсуждения

1. Общие принципы сушки;
2. Виды сушки;
3. Формы связи влаги с материалом;
4. Параметры материала и сушильного агента;
5. Периоды сушки их характеристика;
6. Движущая сила и кинетика сушки.

### Список литературы

1. Разинов А.И., Суханов П.П. Процессы массопереноса с участием твердой фазы: учебное пособие - Казань: издательство КНИТУ, 2012. - 96 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/knitu-0004.html>) – стр. 48-59.
2. Романков П.Г. и др. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>) – стр. 380-404;
3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - 2-е изд., истр. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. - 608 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081581.html>) – стр. 540-575.

## **Практическое занятие 9. Расчет параметров мембранных процессов**

**Цель практического занятия:** изучение методики расчета параметров работы мембраны для обратного осмоса; изучение методики расчета параметров работы мембраны для разделения газовых смесей.

### **План проведения занятия**

Практическое занятие проводится в несколько этапов. В начале занятия проводится беседа со студентами для оценки общего уровня знаний студентов по тематике занятия и выявления вопросов, которые большинству или всем неизвестны.

Затем преподаватель консультирует студентов по вопросам, которые вызвали у них трудности и по возможности сам приводит или просит привести студентов практические примеры для лучшего усвоения тематических основ.

После проведения консультации преподаватель дает студентам возможность задать ему возникшие у них вопросы по тематике занятия. При ответах желательно также приводить примеры и по возможности давать ответить другим студентам, знающим ответ для создания активного диалога с ними.

По завершению беседы, на которую в общей сложности отводится 20 – 25 минут, преподаватель объясняет студентам методику расчета параметров работы мембраны для обратного осмоса. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету параметров работы мембраны для обратного осмоса. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета параметров работы мембраны для обратного осмоса и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

По завершении преподаватель объясняет студентам методику расчета параметров работы мембраны для разделения газовых смесей. Во время объяснения и по его завершении студенты могут задавать преподавателю вопросы. Затем преподаватель вызывает к доске одного из студентов по его желанию или по своему выбору. Этому студенту выдается задача в

качестве примера, которую он прорешивает у доски с участием остальной группы и преподавателя. При этом студенты получают начальный навык расчета по этой методике и в форме общегруппового диалога с преподавателем решают возникающие трудности.

После этого каждому студенту выдается индивидуальное задание по расчету параметров работы мембраны для разделения газовых смесей. В случае возникновения у одного или нескольких студентов трудностей, они решаются совместно с преподавателем и остальной группой.

На объяснение методики расчета параметров работы мембраны для разделения газовых смесей и решение задач отводится примерно 25 – 30 минут.

### **Используемые технологии преподавания**

При проведении данного практического занятия используются следующие технологии образования:

1. Практико-ориентированные технологии, направленные на формирование системы профессиональных практических умений за счет установки междисциплинарных связей, при которых изучение дисциплины строится на основе ранее приобретенных знаний и умений, а полученные навыки необходимы для дальнейшего обучения по программе подготовки. Также эти технологии реализуются за счет того, что задачи связаны с практической деятельностью, предусмотренной программой подготовки.

2. Развивающие проблемно-ориентированные технологии, направленные на формирование и развитие навыков проблемного мышления. Заключается в постановке основных проблем тематики дисциплины на практическом занятии, и предполагает проведение открытых индивидуальных и коллективных дискуссий по совместному с преподавателем поиску оптимальных решений.

3. Личностно-ориентированные технологии, учитывающие индивидуальные особенности и способности каждого обучающегося для обеспечения успешного изучения дисциплины. Заключаются в индивидуальных беседах со студентами во время занятий и проверке решения задач.

Большая часть занятий и образовательных технологий происходит в интерактивной форме, заключающемся в обмене информацией между преподавателем и студентами, совместному поиску путей решения практических задач и проблем, а также в возможности более детального совместного рассмотрения и актуализации вопросов, представляющих наибольший интерес для обучающихся в рамках тематики занятия.

### Примерные варианты заданий

1. Рассчитать параметры работы для концентрирования раствора заданного вещества в количестве  $L$  от концентрации  $x_{\text{нач}}$  до концентрации  $x_{\text{кон}}$  при помощи обратного осмоса и заданной мембраны. Окончательное концентрирование раствора проводится выпариванием. Потери соли с пермеатом не должны превышать 10 % от ее количества. Температура разделения равна  $t$ , перепад рабочего давления  $\Delta p$ .

Исходные данные:

Вариант	соль	мембрана	$L$ , кг/с	$x_{\text{нач}}$ , масс. %	$x_{\text{кон}}$ , масс. %	$t$ , °C	$\Delta p$ , МПа
1	BaCl <sub>2</sub>	МГА-100	6,56	0,9	34	20	5,2
2	CaCl <sub>2</sub>	МГА-80	5,70	1,1	39	20	5,9
3	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	МГА-95	6,47	1,0	40	21	6,0
4	CuSO <sub>4</sub>	МГА-90	5,38	0,7	27	25	5,4
5	KCl	МГА-100	4,91	0,8	31	23	5,0
6	KNO <sub>3</sub>	МГА-80	5,45	1,4	29	23	5,6
7	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	МГА-95	5,48	1,3	36	21	5,7
8	LiCl	МГА-90	7,53	0,4	35	25	5,2
9	MgSO <sub>4</sub>	МГА-95	5,26	0,6	32	22	5,9
10	NNO <sub>3</sub>	МГА-80	6,74	0,5	37	21	5,3

2. Рассчитать параметры работы для обогащения воздуха кислородом до содержания  $x$  при помощи заданной мембраны. Производительность по обогащенному воздуху  $Q$ . Давление воздуха в напорном канале атмосферное, в дренажном канале –  $p''$ . Температура разделения  $t$ . Принять состав воздуха равным 21 % кислорода и 79 % азота.

Исходные данные:

Вариант	Мембрана		$Q$ , м <sup>3</sup> /ч	$p''$ , кПа	$t$ , °C	$x$ , %
	материал	толщина, мкм				
1	полидиметилсилоксан	10	27	29	22	42
2	полисилоксанарилат	2	29	52	17	36
3	полисилоксанкарбонат	0,1	28	73	26	31
4	ПВТМС	0,2	31	32	27	40
5	полифениленоксид	0,005	26	20	19	35
6	полидиметилсилоксан	10	30	57	24	39
7	полисилоксанарилат	2	37	81	20	30

Вариант	Мембрана		Q, м <sup>3</sup> /ч	p", кПа	t, °С	x, %
	материал	толщина, мкм				
8	полисилоксанкарбонат	0,1	29	54	21	43
9	ПВТМС	0,2	40	87	18	37
10	полифениленоксид	0,005	33	69	23	33

### Вопросы для обсуждения

1. Общие принципы мембранного разделения;
2. Классификация мембранных процессов;
3. Классификация мембран;
4. Движущая сила мембранных процессов;
5. Селективность мембран;
6. Параметры работы мембран и кинетика мембранного разделения.

### Список литературы

1. Разинов А.И., Суханов П.П. Процессы массопереноса с участием твердой фазы: учебное пособие - Казань: издательство КНИТУ, 2012. - 96 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/knitu-0004.html>) – стр. 76-89.
2. Романков П.Г. и др. Массообменные процессы химической технологии: Учеб. пособие. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2011. - 440 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081949.html>) – стр. 405-428;
3. Фролов В.Ф. Лекции по курсу "Процессы и аппараты химической технологии". - 2-е изд., истр. - СПб.: ХИМИЗДАТ, 2008. - 608 с (доступ по интернет-ссылке <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785938081581.html>) – стр. 582-597.