

Министерство образования Республики Беларусь
УО «Полесский государственный университет»

Е.С. ГУК, Е.В. ТАРАЗЕВИЧ

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Курс лекций

Часть I

Теоретические основы. Механические, гидравлические
и гидромеханические процессы

Для студентов биотехнологического факультета
специальности 1-74 03 03 «Промышленное рыбоводство»
специализации 1-74 03 03 02 «Технология переработки рыбной продукции»

Пинск
ПолесГУ
2019

УДК 664(042.4)
ББК 36.81я73
Г93

Рецензенты:
кандидат технических наук Г.А. Райлян;
кандидат технических наук Д.В. Куземкин

Утверждено
научно-методическим советом ПолесГУ

Гук, Е.С.

Г93 Процессы и аппараты пищевых производств : курс лекций : в 2-х ч. / Е.С. Гук, Е.В. Таразевич. – ПолесГУ : Пинск, 2019. – Ч. I : Теоретические основы. Механические, гидравлические и гидромеханические процессы. – 30 с.

ISBN 978-985-516-585-0 (Ч. I)
ISBN 978-985-516-584-3

В первой части курса лекций по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» изложены теоретические основы курса, представлена классификация процессов, протекающих в пищевой промышленности, физические основы тепловых и массообменных процессов, гидравлики, а также основные закономерности протекания, аппаратное обеспечение механических и гидромеханических процессов.

Курс лекций составлен в соответствии с программой курса «Процессы и аппараты пищевых производств»; адресовано студентам биотехнологического факультета специальности 1-74 03 03 «Промышленное рыбоводство» специализации 1-74 03 02 «Технология переработки рыбной продукции».

УДК 664(042.4)
ББК 36.81я73

ISBN 978-985-516-585-0 (Ч. I)
ISBN 978-985-516-584-3

© УО «Полесский государственный университет», 2019.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Т е м а 1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОТЕКАЮЩИХ В ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ.....	5
1. Теоретические основы курса.....	5
2. Классификация процессов пищевых производств.....	6
Т е м а 2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	9
1. Физические основы измельчения.....	9
2. Обобщенный закон процесса измельчения.....	10
3. Основные виды измельчительных машин.....	11
Т е м а 3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	14
1. Гидростатика. Основные определения гидравлики.....	14
2. Гидродинамика.....	19
Т е м а 4. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ.....	22
1. Осаждение в гравитационном поле.....	22
2. Очистка воздуха и промышленных газов.....	25
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА.....	29

ВВЕДЕНИЕ

Пищевая промышленность неразрывно связана с человеком и его деятельностью. Знание фундаментальных основ процессов, происходящих на пищевых производствах, совместно с изучением технологии и аппаратного обеспечения этих процессов играет ключевую роль в формировании профессиональных компетенций инженеров-технологов пищевой промышленности.

Овладение данной дисциплиной позволит осуществлять в производственных условиях наилучшие технологические режимы, повышать производительность аппаратуры и улучшать качество продукции; даст возможность разрабатывать более рациональные технологические схемы и типы аппаратов при проектировании новых производств, правильно оценить результаты научных исследований в лабораторных условиях и реализовать их на практике.

В данном издании рассмотрены теоретические основы дисциплины «Процессы и аппараты пищевых производств». Представлена классификация процессов, протекающих в пищевой промышленности, физические основы тепловых, массообменных процессов и гидравлики, а также основные закономерности протекания, аппаратное обеспечение механических и гидромеханических процессов.

Курс лекций по дисциплине «Процессы и аппараты пищевых производств» предназначен для студентов, обучающихся по специальности 1-74 03 03 Промышленное рыбководство. Они включают названия тем, вопросы, рассматриваемые в лекциях и непосредственно лекционный материал.

Т е м а 1. АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ПРОТЕКАЮЩИХ В ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Вопросы

1. Теоретические основы курса.
2. Классификация процессов пищевых производств.

1. Теоретические основы курса

Предмет курса. Пищевая промышленность включает много различных по назначению производств: крахмалопаточное, бродильное, хлебопекарное, производство сахара, мучных кондитерских и макаронных изделий и т.д. К пищевой промышленности относится также производство напитков, различных добавок, табачных изделий, мыла и моющих средств на жировой основе, производство парфюмерной и косметической продукции. Однако при всем разнообразии технологических процессов в пищевой промышленности многие из них являются общими для различных производств.

В любом пищевом производстве встречается перемешивание. Его цель – обеспечить хороший контакт между различными веществами и таким образом интенсифицировать процесс либо растворения, либо химической реакции, либо поглощения одного вещества другим, либо теплообмена и т.д. Во многих производствах (сахарном, кондитерском, консервном и др.) применяют выпаривание для повышения концентрации сухих веществ в растворе, например для обеспечения кристаллизации сахара, глюкозы и фруктозы. При хранении и переработке зерна, в консервном, макаронном, сахарном, кондитерском и во многих других производствах используют сушку.

Таким образом, процессы пищевых производств могут быть разделены на общие и специфические. Приоритет в изучении курса отдается процессам, имеющим общий характер и применимым в нескольких производствах.

Процессы и аппараты как в пищевых производствах, так и в химической технологии не имеют принципиальных различий. В них используются одни и те же фундаментальные законы и методы расчета оборудования. Тем не менее, специфика, связанная с пищевыми производствами, находит естественное отражение в изложении курса, в методиках расчета ряда процессов и аппаратов, в конструкциях аппаратов и машин.

Производственный процесс (от лат. *processus* – продвижение) – это совокупность последовательных действий для достижения определенного результата; процесс – производственный процесс, когда исходные материалы в результате физического, химического, механического и других воздействий превращаются в пищевые продукты. Эти превращения сопровождаются изменением агрегатного состояния, внутренней структуры и химического состава вещества. Процессы протекают в технологических аппаратах (от лат. *apparatus* – прибор, оборудование) или в машинах.

Технология – это ряд приемов, проводимых направленно с целью получения из исходного сырья продукта с наперед заданными свойствами. Задача технологии как науки заключается в выявлении физических, химических, механических и других закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных и экономичных производственных процессов.

Технологический аппарат (от лат. *apparatus* – оборудование) – это устройство, приспособление, оборудование, предназначенное для проведения технологических процессов. Чаще всего аппарат представляет собой емкость, в которой неподвижно располагаются различные трубы, решетки, полки, кольца, тарелки, сепараторы для отделения капелек жидкости и т.д. Иногда в аппаратах монтируют вращающиеся механизмы для перемешивания жидких сред.

Машина – устройство, выполняющее механические движения с целью преобразования энергии или материалов.

Технологические машины преобразуют форму, свойства и положение обрабатываемого материала. В отличие от них машина – это механизм с внешним приводом, совершающий рабочими органами те же самые операции, которые выполняет человек подобными орудиями труда для совершения подобной работы.

2. Классификация процессов пищевых производств

Процессы пищевых производств можно разделить на простые и сложные. Вместе с тем практически любой реальный процесс переработки продукта достаточно сложный. Он неизбежно включает не только процессы, относящиеся непосредственно к переработке, но и подготовительно-заключительные операции (подача продукта в рабочую зону и отвод из нее). Таким образом, почти каждый так называемый простой процесс можно разделить на еще более простые.

Само понятие «процесс» предполагает некоторое преобразование материи, протекающее в пространстве и во времени. Оно происходит под воздействием побуждающих факторов и характеризуется начальным и конечным состояниями. Каждый элементарный акт проявления побуждающего фактора и его воздействия на продукт можно рассматривать как процесс, который, с одной стороны, является относительно простым, так как не приводит к полному преобразованию продукта, а с другой – допускает дальнейшее разбиение на более простые составляющие.

Введенное представление о степени сложности процессов, хотя и достаточно условное, позволяет относительно произвольно выделить удобные для рассмотрения и дальнейшего использования их модели, из которых при необходимости можно строить более сложные комбинации. Одно из таких удобных разбиений процессов пищевых производств – классификация по научным дисциплинам, методы которых служат основой для объяснения их закономерностей. Такой классификацией является показанное на **Рис. 1.1** разделение процессов на гидравлические, механические, гидромеханические, тепловые, массообменные, биохимические, физико-химические.



Рис. 1.1 – Классификация процессов пищевых производств

Соответственно данной классификации курс «Процессы и аппараты пищевых производств» можно представить состоящим из разделов, направленных на изучение специфики простых процессов, каждого в отдельности и их комплексов, образующих сложные процессы, а также объединяющих (обобщающих) разделов. В качестве объединяющих в данном курсе выделены общие вопросы указанных базовых дисциплин, применяемые к большинству процессов.

Гидравлические процессы. Реализуются при течении ньютоновских жидкостей по трубопроводам и элементам гидравлических систем, а также в гидравлических машинах – насосах и двигателях. Это весьма распространенный класс процессов, подчиняющихся специфическим закономерностям.

Без изучения гидравлических процессов невозможно правильное понимание большинства процессов в пищевых производствах. Этим объясняется их включение в классификацию.

Ньютоновская жидкость (названная в честь Исаака Ньютона) – вязкая жидкость, подчиняющаяся в своём течении *закону вязкого трения Ньютона*. Касательное напряжение и градиент скорости в такой жидкости линейно зависимы. Коэффициент пропорциональности между этими величинами известен как вязкость.

Течение *неньютоновских жидкостей*, к которым относятся многие продукты пищевых производств, изучает выделившаяся в самостоятельную науку *реология* (*реология* – раздел физики, изучающий деформации и текучесть вещества). Неньютоновские жидкости являются в большинстве полимерами. Их механика – это целый мир своеобразных закономерностей, не имеющих аналогов в механике мономеров. Без их понимания невозможно понять многие процессы пищевых производств.

Механические процессы. К ним относят процессы измельчения (дробление и резание), сортирования, прессования, окатывания, округления и др. Они протекают под действием механических усилий, а их результатом является изменение размеров частиц продукта.

Эти процессы реализуются в мельничных комплексах, дробилках, крупорушках, терках, волчках, измельчителях овощей и корнеплодов, очистителях их поверхностей, очистителях лука и чеснока и других продуктов от поверхностной шелухи, просеивающих машинах (ситовых поставках, буратах и др.), триерах, веялках, прессах, штампах, валковых и шнековых нагнетателях, устройствах сепарирования сыпучих веществ и др.

Гидромеханические процессы. К ним относят процессы перемешивания жидких и сыпучих продуктов, фильтрования, осаждения, мойки корнеплодов, пневмо- и гидротранспортирования, псевдооживления сыпучих продуктов и др. Они протекают под влиянием суммы механических (в частности, центробежных или гравитационных) и гидродинамических воздействий, а их результатом является пространственное перемещение отдельных агломератов продукта или элементов смеси продуктов.

Эти процессы реализуются в пневматических и гидравлических классификаторах, фильтрах, осадителях, центрифугах, сепараторах, циклонах, пневмо-, гидро- и аэрозольных транспортирующих устройствах, гидромеханических моечных машинах, смесителях жидких и сыпучих продуктов, сушилках и др.

Тепловые и массообменные процессы. К тепловым процессам относят нагревание, охлаждение, выпаривание и конденсацию, к массообменным – сушку, сорбцию, перегонку, кристаллизацию, растворение, экстрагирование, экстракцию и др. Они протекают под действием разностей температур или концентраций веществ. Результатом их является перемещение в пространстве теплоты (тепловой энергии) или отдельных компонентов смеси веществ. Данные процессы реализуются в нагревателях, охладителях, разварниках, абсорберах, адсорберах, перегонных устройствах (кубовые аппараты, ректификационные колонны и др.), выпарных аппаратах, сушилках, конденсаторах, кристаллизаторах, растворителях, экстракторах и др.

К тепловым процессам примыкают процессы получения холода. Они используют одни и те же термодинамические зависимости, одинаковые принципы решения теплотехнических проблем; часть теплотехнических устройств, используемых в них, являются одинаковыми. Однако традиционно тепловые и холодильные процессы рассматривают обособленно.

Химические процессы. Многочисленные химические процессы пищевых производств выделены в самостоятельную группу, включающую биохимические и физико-химические процессы. К биохимическим относят процессы ферментации, брожения, стерилизации, пастеризации, дезинфекции, промывки тары и ее чистки и др. Результатом этих процессов является изменение в объеме продукта или на поверхности тары концентрации сахаров, дрожжевых культур, бактерий и продуктов их жизнедеятельности, спор, загрязняющих веществ и др.

К физико-химическим процессам относят горение и взрывы. Подробно они изучаются специальными научными дисциплинами.

Т е м а 2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1. Физические основы измельчения.
2. Способы измельчения.
3. Основные виды измельчительных машин.

1. Физические основы измельчения

Измельчение – процесс механического воздействия на продукт рабочими органами, который приводит к преодолению сил взаимного сцепления и разрушению продукта под действием внешних нагрузок, а также к увеличению поверхности твердых материалов.

В пищевой промышленности измельчение применяют в следующих целях: для подготовки сырья к приготовлению пищи, придания продукту требуемой консистенции, порционирования продукта, утилизации отходов сырья и остатков пищи, для увеличения поверхности твердых материалов с целью повышения скорости биохимических и диффузионных процессов при переработке фруктов, овощей и т.д. Измельчение широко используют в мукомольном, мясном, свеклосахарном, спиртовом, пивоваренном, консервном и другом производстве. Измельчение (**Рис. 2.1**) подразделяют на следующие способы:

- раздавливание;
- раскалывание;
- разламывание,
- резание;
- распиливание;
- истирание;
- измельчение с помощью удара.

В каждой измельчающей машине реализуются, как правило, все способы измельчения, но главную роль играет тот, для которого она создана. При раздавливании (**Рис. 2.1, а**) под действием статической нагрузки, создаваемой силой F на нажимную плиту, определяющими являются напряжения сжатия. При (**Рис. 2.1, б, в**) в материале возникают в основном изгибающие напряжения. Процесс разламывания (**Рис. 2.1, з**) совершается за счет воздействия изгибающих сил F . Размеры и форма получаемых частиц примерно такие же, как и при раскалывании. Процесс резания (**Рис. 2.1, д**)

осуществляется лезвиями (ножами), под действием которых создается усилие F , направленное под определенным углом к измельчаемому материалу. Кроме того, ножи совершают движение в плоскости, параллельной плоскости разделения материала. При резании в материале возникают напряжения сдвига. Резание используется в измельчителях для плодов фруктов и овощей, а также туш животных, причем сырье можно измельчить на части заранее выбранных размеров и форм. Распиливание (**Рис. 2.1, ж**) осуществляется за счет использования пил, зубья которых представляют собой ножи. Измельчение материала происходит

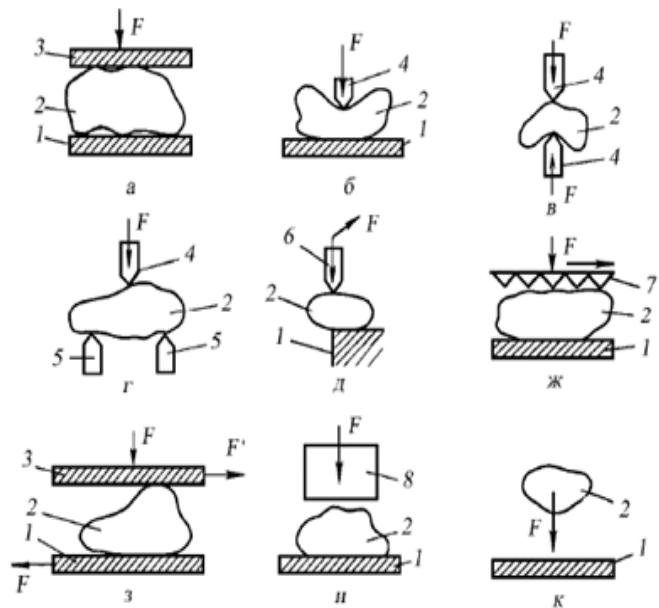


Рис. 2.1 – Способы измельчения продуктов

а – раздавливание; *б* – раскалывание с опорной плитой; *в* – раскалывание между клинообразными рабочими элементами; *г* – разламывание; *д* – резание; *ж* – распиливание; *з* – истирание; *и* – измельчение при стесненном ударе; *к* – измельчение при свободном ударе; *1* – опорная плита; *2* – измельчаемый материал

при нажиме на пилу и ее перемещении в плоскости измельчения. Процесс распиливания позволяет получить куски требуемых размеров. Процесс истирания применяется при тонком и коллоидном помолах. При истирании (**Рис. 2.1, з**) разрушение происходит главным образом от напряжений сдвига. На материал действуют силы, возникающие при перемещении опорной и нажимной плит в противоположные стороны. Процесс дробления за счет удара осуществляется под действием динамических нагрузок на продукт, в результате которых возникают динамические напряжения, приводящие к его разрушению. В продуктах измельчения должны отсутствовать металлические, минеральные и другие примеси, являющиеся случайными или образующиеся в результате износа рабочих органов машин.

Процессы измельчения разделяются на дробление (крупное, среднее и мелкое), помол (грубый, средний, тонкий и сверхтонкий) и резание. Резание применяют, когда требуется не только уменьшить размер кусков, но и придать им определенную форму (овощи и фрукты, конфетная и тестовая масса, мясо и другие продукты).

Таблица 2.1 – Классификация дробления и помола

Класс измельчения	Размер кусков, мм	
	До измельчения d_n	После измельчения d_k
Дробление:		
крупное	1000	250
среднее	250	20
мелкое	20	1...5
Помол:		
грубый	1...5	0,10...0,04
средний	0,10...0,04	0,015...0,005
тонкий	0,10...0,04	0,005...0,001
сверхтонкий	0,100	< 0,001

Степень измельчения i равна:

$$i = D/d,$$

где D – средний характерный размер частицы продукта до измельчения, м;
 d – средний характерный размер частиц продукта после измельчения, м.

Для уменьшения энергоемкости процесса измельчения надо снижать оборот продукта в технологическом процессе, использовать рациональные режимы подготовки и измельчения продукта, сокращать протяженность технологического цикла, правильно подбирать геометрические и кинематические параметры измельчающих машин.

2. Обобщенный закон процесса измельчения

Процесс деформации и измельчения твердых тел сопровождается затратой энергии. Она расходуется на образование упругих и пластических деформаций, преодоление сил молекулярного сцепления, после чего тело разрушается, и образуются новые тела с большей суммарной поверхностью.

Получая упругую деформацию, тело накапливает энергию. После прекращения действия внешних сил оно возвращает не всю затраченную энергию, а только часть ее. Как при упругой, так и при пластической деформации происходит частичное преобразование механической энергии в тепловую. В результате температура деформируемого тела повышается. В процессе измельчения некоторая часть энергии затрачивается на электризацию частиц продукта и рабочих поверхностей машин. Кроме того, энергия расходуется и на преодоление сопротивлений в измельчающей машине (трение и деформация деталей, их нагрев и т.п.).

Угол между скоростью и точки лезвия и нормалью к нему в этой точке называется **углом скольжения** лезвия ρ .

Тангенс угла скольжения лезвия ν называется **коэффициентом скольжения**.

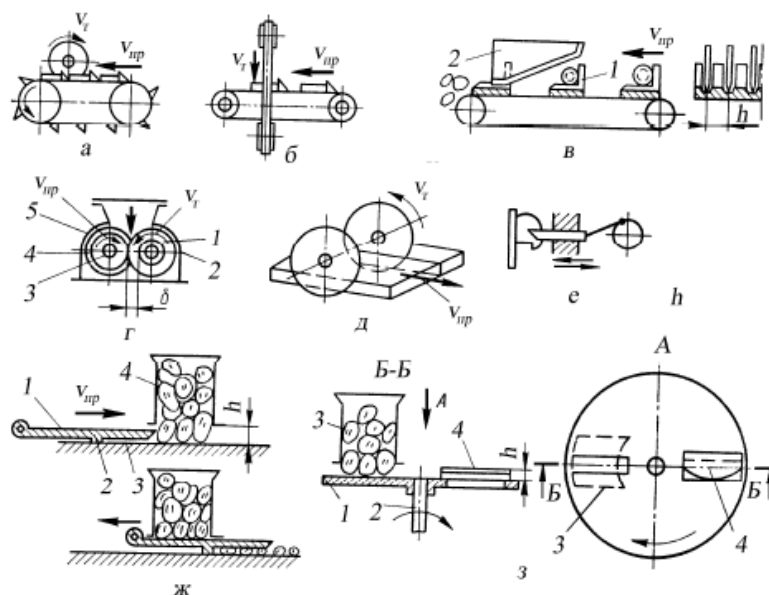


Рис. 2.2 – Схемы механизмов с дисковыми ножами:

а, б – комбинированный режущий инструмент для резки в двух плоскостях; *в* – режущий механизм с неподвижным плоским ножом (1 – плоский нож; 2 – гребневидная опора); *г* – режущий механизм с дисковыми ножами и ротационной подачей продукта (1 – дисковый нож; 2, 3 – вал; 4 – барабан; 5 – кожух)

Гомогенизацией называется процесс измельчения жидких и пюреобразных пищевых продуктов за счет пропускания под большим давлением с высокой скоростью через узкие кольцевые щели. В результате воздействия на продукт различных гидродинамических факторов происходит дробление твердых частиц продуктов и их интенсивная механическая обработка. Гомогенизация не только изменяет дисперсность компонентов продукта, но и влияет на физико-химические свойства продукта (плотность, вязкость, однородность состава и др.). Основными рабочими органами гомогенизирующей головки являются седло и клапан, от конструкции которых в известной мере зависит степень дисперсности частиц при гомогенизации. Разнообразие конструкций гомогенизирующих устройств обусловлено стремлением повысить гомогенизирующий эффект за счет повышения турбулентности потока гомогенизируемой жидкости, усиления явлений кавитации, повышения скорости движения жидкости на входе в клапанную щель. Клапанная щель может быть гладкой и волнообразной с постоянным или переменным сечением. Гомогенизаторы подразделяются на клапанные, дисковые, или центробежные, и ультразвуковые.

Протираание – это процесс отделения массы плодоовощного сырья от косточек, семян, кожуры путем продавливания на ситах через отверстия с диаметром 0,7...5,0 мм.

Финиширование – это более тонкое измельчение протертой массы путем пропускания через сито с диаметром отверстий менее 0,4 мм.

В процессе протираания или финиширования перерабатываемая масса попадает на поверхность движущегося бича. Под действием центробежной силы она прижимается к рабочему сити. Полуфабрикат через отверстия проходит в сборник, а отходы под действием силы, обусловленной углом опережения бичей, продвигаются к выходу рабочего сита.

3. Основные виды измельчительных машин

Измельчительные машины, применяемые в пищевой промышленности, характеризуются большим многообразием конструктивных форм (**Рис. 2.3**). Они подразделяются на следующие типы: дробилки, гомогенизаторы, протирачные машины; валковые мельницы, резательные машины, мельницы, волчки, куттера и т.д.

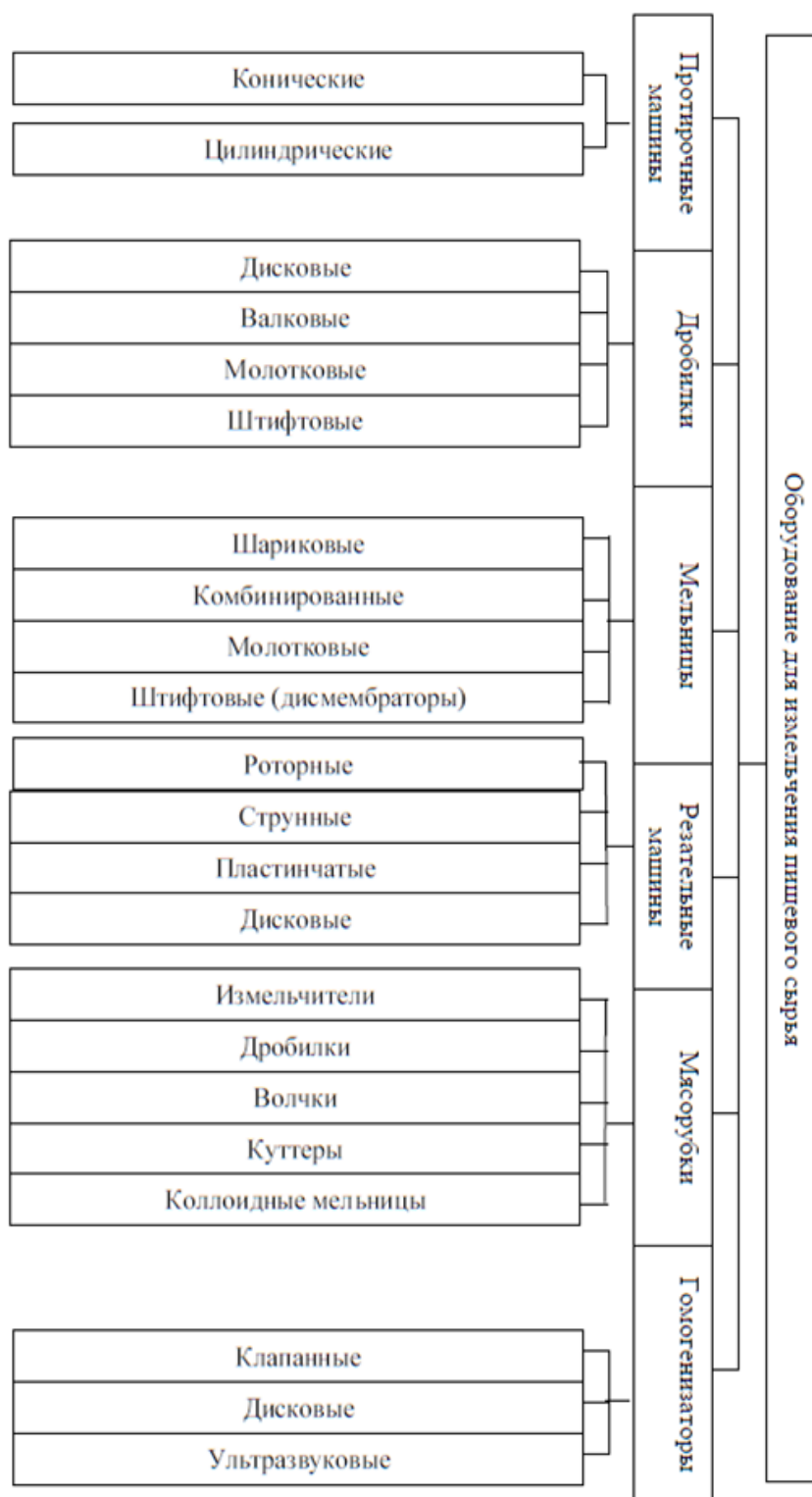


Рис. 2.3 – Классификация оборудования для измельчения пищевого сыра

Резательные машины бывают пластинчатыми, дисковыми, роторными, струнными и др. **Резательные машины** предназначены для измельчения растительного сырья на частицы правильной формы (столбики, кружки, кубики) и определенных размеров для соблюдения одинаковых режимов при дальнейшей обработке и дозировке. Качество резки зависит от конструктивных особенностей машины, режима ее эксплуатации, от вида и состояния сыра.

Вальцовые станки применяют на мукомольных заводах для размола зерна и продуктов его переработки. Эффективность работы вальцовых станков определяется степенью измельчения зерна или его частиц, производительностью каждой пары валцов и удельным расходом электроэнергии.

Дробилки используют для дробления зерна, бобов, кристаллического сахара и других компонентов при приготовлении пищевых смесей.

Валковые мельницы предназначены для тонкого измельчения жиросодержащих рецептурных смесей при производстве кондитерских изделий.

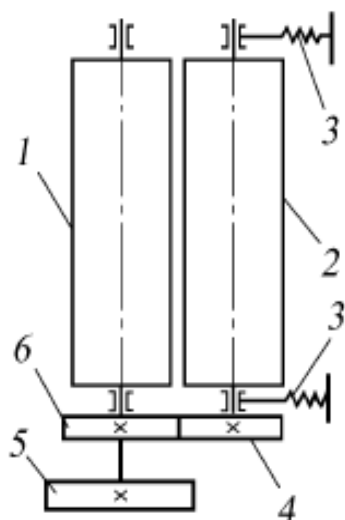


Рис. 2.4 – Схема валковой дробилки:
1, 2 – рифленые валки; 3 – пружина;
4, 5, 6 – шестерни

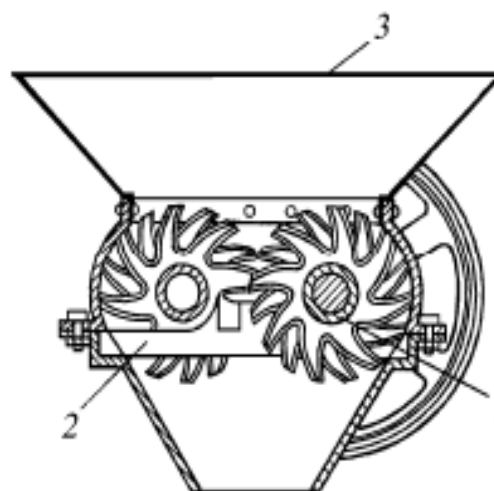


Рис. 2.5 – Схема двухбарабанной дробилки:
1 – зубчатые диски; 2 – колосниковая решетка;
3 – бункер

Валковая дробилка (Рис. 2.4) применяется для измельчения винограда с гроздьями, которые затем отделяются от ягод и направляются на сокоотделение. В **ножевой дробилке (Рис. 2.5)**, предназначенной для измельчения сушеных овощей, картофеля, прямой зелени, процесс измельчения носит в большей степени характер строгания, чем дробления.

Штифтовые мельницы имеют штифты или била, расположенные на одном или двух вращающихся дисках. Дисковые штифтовые мельницы с одним вращающимся диском называются *дисмембраторами*. Дисмембратор предназначен для измельчения пряностей и других продуктов.

Коллоидная мельница представляет собой дисковую мельницу, измельчающий механизм которой имеет разное исполнение.

Протирачная машина предназначена для протираания мякоти вишен, слив, абрикосов и персиков с отделением косточек от мякоти.

Т е м а 3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

1. Гидростатика. Основные определения гидравлики.
2. Гидродинамика.

1. Гидростатика. Основные определения гидравлики

Гидравлика изучает жидкости и газы как рабочие тела технических (гидравлических) систем. Рабочие тела передают энергию от ее источника исполнительным механизмам (потребителям), т.е. участвуют в преобразовании форм механической энергии и передаче ее в пространстве. Гидравлика состоит из гидростатики и гидродинамики.

Основная особенность жидкостей и газов как рабочих тел – их сплошность. Предполагается, что любой объем заполняется ими равномерно, без образования пустот. Все характеристики сплошной среды (давление, плотность, температура, скорость и др.) – непрерывные и дифференцируемые функции координат. В широком смысле жидкости можно разделить на капельные и газообразные. Капельные жидкости (или просто жидкости в малых количествах) собираются в капли, форма которых определяется силами тяжести и поверхностного натяжения. В больших количествах капельные жидкости принимают форму сосуда, в котором они находятся, с образованием поверхности раздела между жидкостью и окружающей средой. Газы не образуют капель, а замкнутые сосуды заполняют целиком без образования поверхностей раздела. С молекулярно-кинетических позиций о строении вещества различия капельных жидкостей и газов определяются количеством химических или силовых связей молекул вещества. Если в твердом кристаллическом теле практически каждая молекула связана с соседней, то в капельной жидкости половина этих связей разорвана. В газах межмолекулярные силовые связи отсутствуют полностью. В результате расстояния между молекулами жидкости почти столь же малы, как в твердом кристаллическом теле, но в газах они существенно больше. Следствием является то, что уменьшить эти расстояния, т.е. сжать капельную жидкость, затруднительно, а газ – относительно легко. Поэтому капельные жидкости считаются несжимаемыми, а газы – сжимаемыми. На основании этого деление сплошных сред на жидкости и газы может заменяться делением на сжимаемые и несжимаемые жидкости.

При изучении законов гидравлики рассматривают три типа капельных жидкостей:

1. **Идеальная жидкость.** Это абстрактная модель жидкости, характеризующаяся абсолютной текучестью и неизменяемостью объема при изменении внешних условий (абсолютной несжимаемостью). Вязкость в таких жидкостях отсутствует;
2. **Реальные, или вязкие, жидкости.** Это – физические тела, обладающие большой подвижностью и способные изменять свой объем при изменении внешних условий. При движении таких жидкостей возникают вследствие внутреннего трения касательные напряжения. Называют такие жидкости ньютоновскими;
3. **Неньютоновские, или реологические, жидкости.** Они имеют специфические свойства, часть из которых рассматривается далее.

Жидкость в гидравлике рассматривается как непрерывная среда, т.е. в гидравлике отвлекаются от ее молекулярного строения. В покоящейся жидкости нет перемещения слоев относительно друг друга. Это показывает, что в жидкости действуют не сосредоточенные силы, а силы, непрерывно распределенные по ее объему (массе) или по поверхности. В связи с этим силы, действующие на жидкость, разделяют на массовые (объемные) и поверхностные.

Массовые силы пропорциональны массе жидкости и, если жидкость однородна, пропорциональны ее объему. К массовым силам относятся сила тяжести и сила инерции, которая действует на жидкость при относительно ее покое во вращающихся или ускоренно движущихся сосудах. *Поверхностные силы* непрерывно распределены по поверхности жидкости и в случае равномерности распределения пропорциональны площади этой поверхно-

сти. Если массовые силы обусловлены силами тяжести и инерции, то поверхностные вызваны непосредственным воздействием других тел (твердых или газообразных), соприкасающихся с данной жидкостью. Согласно третьему закону Ньютона жидкость действует на другие тела с той же силой, но в противоположном направлении. Массовые силы относят к единице массы (Н/кг), а поверхностные – к единице площади поверхности ($1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$).

Давление. Давлением P называют отношение:

$$p = \frac{F}{S},$$

где F – сила, Н;

S – площадь поверхности (на которую эта сила действует), м^2 .

Молекулярная физика объясняет возникновение давления тем, что стенки сосудов непрерывно бомбардируются молекулами жидкости и газов. С повышением скорости молекул давление увеличивается, так как при этом возрастает сила, действующая с их стороны на стенки, а следовательно, и число ударов. Поэтому давление пропорционально квадрату скорости молекул и их массе ($mV^2/2$).

Давление p при температуре T , по закону Гей-Люссака, равно:

$$p = p_0 \frac{T}{T_0},$$

где p_0 – давление при 0°C .

$$T = T_0 + r, \quad T_0 = 273\text{K}.$$

В системе СИ давление измеряется в ньютонах на квадратный метр; эту единицу давления называют паскалем: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

В расчетах давление часто выражают также в физических и технических атмосферах или единицах высоты h столба жидкости (воды, ртути и т.д.). Между давлениями, выраженными в паскалях и в единицах высоты столба жидкости, существует связь:

$$p = \rho gh.$$

Сила, равна 1 ньютому, сообщает массе, равной 1 кг, ускорение, равное 1 м/с^2 , т.е. $1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2$. Найдем единицу давления из анализа последней формулы:

$$[(\text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с}^2) \text{ м}] = [\text{Н/м}^2],$$

т. е.

$$p = \rho gh [\text{Па}].$$

Существуют следующие соотношения между различными единицами давления:

$$1 \text{ атмосфера физическая (1 атм)} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 10,33 \text{ мм вод. ст.} = 101\,300 \text{ Па}.$$

Физическую атмосферу называют также нормальной атмосферой. Техническая атмосфера связана с другими единицами соотношениями:

$$1 \text{ атмосфера техническая (1 атм)} = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 10 \text{ мм вод. ст.} = 98\,100 \text{ Па}.$$

Есть два способа отсчета давления.

Первый способ – отсчет от давления, равного нулю, т.е. абсолютного вакуума. В этом случае значение давления называют **абсолютным**. На практике применяют более удобный способ – отсчет от атмосферного (барометрического) давления, равного 760 мм рт. ст. В этом случае давление называют **избыточным** $p_{\text{изб}}$ или **манометрическим**.

Таким образом, избыточное давление равно разности между абсолютным давлением в рассматриваемой точке и атмосферным давлением в помещении. На избыточное давление рассчитывают сосуды, работающие под давлением. Для измерения давления применяют барометры, манометры, вакуумметры и пьезометры.

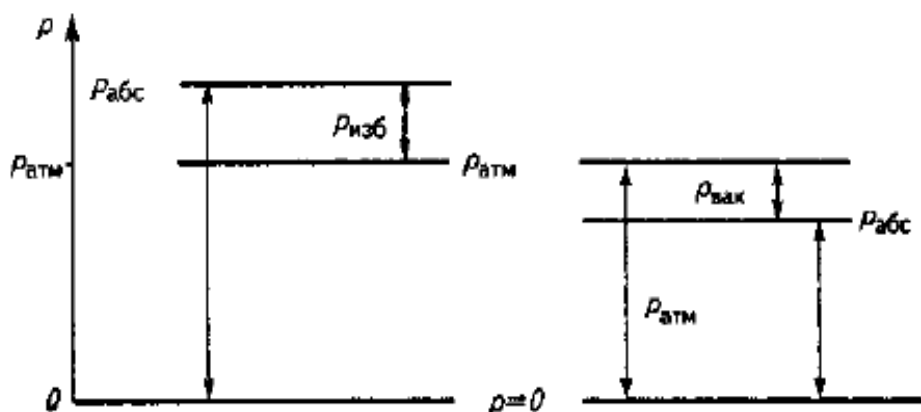


Рис. 3.1 – Связь абсолютного, избыточного давления и разряжения

Барометрами измеряют атмосферное давление $P_{атм}$, которое отсчитывается от абсолютного вакуума. Манометры и вакуумметры показывают не абсолютное давление $P_{абс}$ внутри замкнутого объема, а разность давлений.

Манометром измеряют избыточное давление, т.е. превышение абсолютного давления над атмосферным (Рис. 3.1):

$$P_{изб} = P_{абс} - P_{атм}.$$

Абсолютное давление равно сумме показаний барометра и манометра:

$$P_{абс} = P_{атм} + P_{изб}.$$

Вакуумметром измеряют разряжение $P_{вак}$ (вакуум), вакуумметр показывает, насколько давление в сосуде меньше (ниже) атмосферного. Абсолютное давление в емкости в этом случае определяется по следующему уравнению:

$$P_{абс} = P_{атм} - P_{вак}.$$

В качестве **пьезометров** (Рис 3.2) обычно используют стеклянные трубки диаметром не менее 5 мм. При меньших диаметрах трубок образуется заметный мениск, что связано с необходимостью внесения поправок в показания.

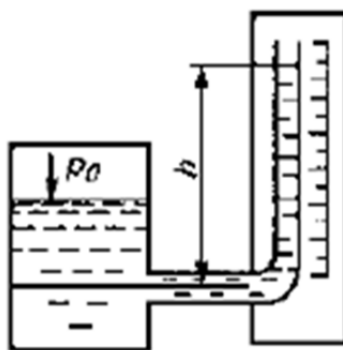


Рис. 3.2 – Схема измерения давления пьезометром

Отличительная особенность пьезометра состоит в том, что в трубке содержится та же жидкость, что и в резервуаре. Нижний конец трубки пьезометра соединяется с той областью, где измеряют давление. Верхний конец трубки открыт. При измерении давления жидкость в пьезометре поднимается на пьезометрическую высоту h .

Давление в месте присоединения пьезометра рассчитывают по следующим уравнениям:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{изб}} ;$$

$$P_{\text{изб}} = \rho g h ,$$

или

$$h = p_{\text{изб}} / (\rho g) .$$

Из последней формулы следует, что гидростатическое давление может выражаться и высотой столба жидкости. Это удобно, если в резервуаре рода или ртуть, для которых известна высота столба, соответствующая атмосферному давлению. Однако при измерении давлений выше 0,03...0,04 МПа с помощью жидкостных (в частности водяных) пьезометров требуются стеклянные трубки и шкалы высотой более 3...4 м. В эксплуатационном отношении эта конструкция неудобна вследствие ее громоздкости, и в этом случае жидкостные пьезометры заменяют ртутными. Первым пьезометров, в котором была использована ртуть, по праву можно назвать барометр Торричелли. Пьезометры применяют для измерения малых давлений в основном при лабораторных гидравлических исследованиях.

Уравнение гидростатики. Рассмотрим случай равновесия жидкости, когда на нее действует лишь одна массовая сила – сила тяжести, и получим уравнение, позволяющее находить гидростатическое давление в любой точке рассматриваемого объекта.

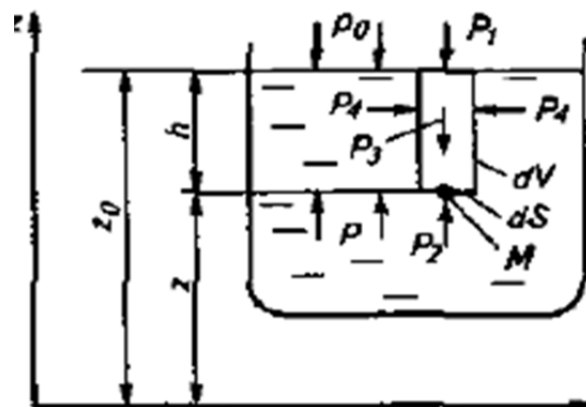


Рис. 3.3 – Силы, действующие в жидкости

Пусть жидкость находится в сосуде и на ее свободную поверхность действует давление p_0 (Рис. 3.3). Найдём гидростатическое давление p в произвольно взятой точке M элементарную площадку dS и построим на ней прямой цилиндрический объём dV высотой h . Рассмотрим условия равновесия указанного объёма dV . Давление p жидкости на нижнее основание цилиндра dS будет внешним и направлено вверх. Рассмотрим силы, действующие на элементарный объём dV . Сила P_1 действует на верхнюю площадку прямого цилиндра:

$$P_1 = p_0 dS.$$

Сила P_2 действует на нижнюю площадку цилиндра dV :

$$P_2 = p dS.$$

Сила тяжести P_3 объема dV :

$$P_3 = dm g,$$

где d_m – масса элементарного объема dV ;

$$d_m = \rho dV;$$

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3 .

Элементарный объем:

$$dV = dSh.$$

Из приведенных выражений получим:

$$P_3 = \rho dShg.$$

Проекция на ось z горизонтальных сил P_4 , действующих нормально боковым поверхностям рассматриваемого объема, равно нулю:

$$\sum P_4 = 0.$$

Условия равновесия цилиндра:

$$-P_1 + P_2 - P_3 = 0.$$

Подставляя рассмотренные выше формулы в уравнение, получим:

$$-p_0 dS + p dS - \rho gh dS = 0.$$

или

$$p = p_0 + \rho gh.$$

Полученное уравнение называют **основным уравнением гидростатики**. Оно позволяет рассчитывать давление в любой точке покоящейся жидкости. Величина p_0 в этом уравнении является одинаковой для всех точек объема жидкости.

Отсюда следует **закон Паскаля: давление, приложенное к внешней поверхности жидкости, передается всем точкам в этой жидкости и по всем направлениям одинаково.**

На использовании закона Паскаля основана работа таких гидростатических машин, как гидростатический пресс, гидравлический аккумулятор и гидравлический мультипликатор. Схема гидравлического пресса показана на **Рис. 3.4**. Если приложить относительно небольшую силу P_1 к поршню 1, который движется в цилиндре меньшего диаметра d_1 , и создать давление p под поршнем, то, согласно закону Паскаля, такое же давление p будет действовать на поршень 2 в цилиндре большого диаметра d_2 .

При этом сила давления на поршень 1:

$$P_1 = pS_1,$$

где S_1 – площадь поршня 1.

Сила воздействия давления на поршень 2:

$$P_2 = pS_2,$$

где S_2 – площадь поршня 2. Соотношение сил:

$$P_2/P_1 = d_2^2/d_1^2.$$

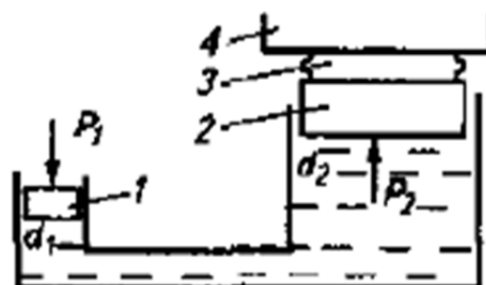


Рис. 3.4 – Схема гидравлического пресса:
1, 2 – первый и второй поршни;
3 – прессуемый материал;
4 – опорная плита

Примем $d_2 = 5d$, тогда P_2 будет в 25 раз больше силы P_1 .

Таким образом, с помощью сравнительно небольших усилий, создаваемых в гидравлическом прессе, осуществляется прессование материала 3, помещенного между поршнем 2 и неподвижной плитой 4.

Таким образом, **основные теоретические положения гидростатики:**

1. Основная особенность жидкостей и газов как рабочих тел – их сплошность. Капельные жидкости (или просто жидкости) в малых количествах собираются в капли, а в больших количествах принимают форму сосуда, в котором они находятся, с образованием поверхности раздела между жидкостью и окружающей средой. Газы не образуют капель, а замкнутые сосуды заполняют целиком без образования поверхностей раздела.

2. Идеальная жидкость несжимаема; вязкость в ней отсутствует. Это абстрактная модель жидкости, имеющая абсолютную текучесть. Реальные, или вязкие, жидкости – это ньютоновские тела, характеризующиеся ньютоновским трением. Неньютоновские или реологические жидкости имеют специфические реологические свойства.

3. Плотность – отношение массы жидкости к объему. Давление – отношение силы к площади поверхности. Вязкость – сопротивление жидкости относительно перемещения ее частиц при ламинарном течении.

4. Поверхностное натяжение определяется природой жидкости.

Коэффициент поверхностного натяжения численно равен силе, действующей на единицу длины поверхности раздела и соприкасающейся с ней среды.

5. В жидкости действуют не сосредоточенные силы, а силы, непрерывно распределенные по объему (массе) или по поверхности. В связи с этим силы, действующие на жидкость, разделяют на массовые (объемные) и поверхностные.

6. В жидкости невозможно действие сосредоточенных сил. На нее можно воздействовать только со всех сторон одновременно. На часть их поверхностей могут действовать реакции сосуда, в который налита жидкость.

7. Гидростатическое давление в жидкости определяется весом столба жидкости над рассматриваемой точкой при единичной площади этого столба.

8. Основное уравнение гидростатики определяет давление в любой точке жидкой капельной среды как сумму давления над зеркалом жидкости и давления, создаваемого весом вышележащего столба жидкости.

2. Гидродинамика

Движение жидкостей и газов характеризуется скоростями w и ускорениями a частиц в различных точках потока жидкости, а также давлением p в этих точках. Различают установившееся и неустановившееся движение жидкостей.

Установившимся движением называют такое, при котором скорость частиц, плотность, температура, давление и расход жидкости в каждой фиксированной точке пространства не изменяется во времени. Для установившегося движения можно записать:

$$w_x = f(x, y, z); \quad \partial w / \partial \tau = 0.$$

Пусть, например, жидкость движется в трубопроводе переменного сечения. Скорость жидкости при этом то увеличивается, то уменьшается в зависимости от места расположения сечения в трубопроводе, но в каждом фиксированном сечении она неизменна во времени. Такое движение называют стационарным. При неустановившемся, или нестационарном, движении все факторы изменяются во времени, т.е. скорость является функцией не только координаты, но и времени:

$$w_x = f(x, y, z, \tau); \quad \partial w / \partial \tau \neq 0.$$

Примером **неустановившегося движения** может служить истечение жидкости из резервуара при переменном ее уровне в резервуаре. Неустановившиеся режимы движения реализуются главным образом в периодических процессах или возникают кратковременно при пусках, остановках, а также изменениях режима работы аппаратов непрерывного действия. Исследование механизма движения вязкой жидкости показало, что имеют место два режима, резко отличающихся один от другого. Это различие подтверждено в 1883 г. Опытами английского физика О. Рейнольдса.

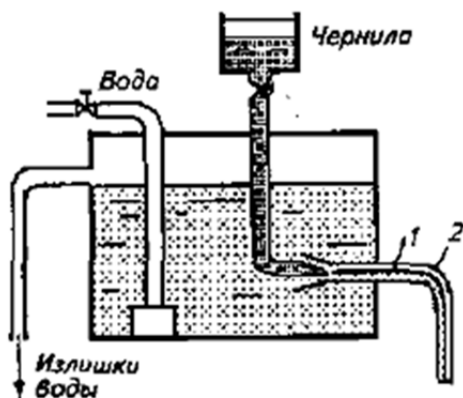


Рис. 3.5 – Схема опыта Рейнольдса:
1 – струйка чернил, 2 – трубка

При малых скоростях струйка чернил 1 (Рис. 3.5) движется параллельно стенкам трубки 2. Этот режим движения называют *ламинарным* или *слоистым* («ламина» в переводе с латинского означает «слой»). При увеличении скорости движения жидкости линия тока струйки закручивается в виде вихря, а при еще большей скорости движение становится неупорядоченным, частицы движутся по хаотическим траекториям. Линии тока в трубке турбулентного движения. Этот режим называется *турбулентным* («турбулентус» – беспорядочный). Исходя из опытных данных и некоторых теоретических соображений О. Рейнольдс установил общие условия, при которых возможно существование того или другого режима

и переход из одного режима в другой, а именно: характер движения жидкости зависит от вязкости μ , скорости ее движения w , плотности жидкости ρ и диаметра трубки d . Для характеристики режима движения введен безразмерный комплекс, учитывающий влияние перечисленных факторов. Этот комплекс впоследствии был назван *критерием Рейнольдса*:

$$Re = \rho w d / \mu = w d / \nu,$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости.

Границы существования того или иного режима определяются двумя критическими значениями **критерия Рейнольдса**: нижним $Re_{кр.н}$ и верхним $Re_{кр.в}$. При $Re \leq Re_{кр.н}$ всегда имеет место ламинарный режим; при $Re \geq Re_{кр.в}$ режим устойчиво турбулентный. Для воды $Re_{кр.н} = 2320$ и $Re_{кр.в} = 10\,000$. В диапазоне $Re_{кр.н} \leq Re \leq Re_{кр.в}$ режим движения жидкости чаще всего турбулентный, однако он неустойчивый, поэтому этот режим называется переходным, хотя точнее этот диапазон значений критерия Рейнольдса следовало бы называть «переходной зоной». В критерий Рейнольдса входит величина *d-определяющий размер канала*, по которому течет жидкость.

Для круглой трубы:

$$R_r = (\pi d^2 / 4) (\pi d) = d/4.$$

Если труба некруглого сечения, то вводится понятие гидравлического радиуса:

$$R_r = S / \Pi,$$

где S – площадь сечения потока;

Π – смоченный периметр.

Смоченным периметром Π называют линию контакта (соприкосновения) живого сечения потока жидкости со стенками, вдоль которых движется поток.

Для открытого канала:

$$R_r = Bh / (2h + B).$$

Уравнение Бернулли. Это уравнение устанавливает связь между давлением в потоке жидкости и скоростью его движения в гидравлических системах.

Закон Бернулли – в установившемся движении идеальной жидкости общее давление, складывающееся из динамического, гидростатического и статического, одинаково для всех поперечных сечений трубки тока.

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const.$$

Здесь ρ – плотность жидкости;

v – скорость потока;

h – высота, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости;

p – давление в точке пространства, где расположен центр массы рассматриваемого элемента жидкости;

g – ускорение свободного падения.

Проанализировав уравнение Бернулли для горизонтальной трубки тока, можно сделать выводы, что при течении жидкости по горизонтальной трубе, владеющей различными сечениями, в узких местах давление на стенки трубы меньше, но скорость жидкости больше, статическое давление больше в широких местах, т.е. там, где скорость меньше.

Основные положения гидродинамики

1. Установившимся называется движение, в котором скорость частиц, плотность, температура, давление и расход в каждой фиксированной точке пространства не изменяются во времени.

2. Имеют место два резко отличающихся друг от друга режима движения жидкости – ламинарное и турбулентное. Переход от одного из них к другому связан с переходом критерия Рейнольдса через критическое значение, равное 2320.

3. Если уравнение Бернулли дополняется членом, учитывающим потери энергии, оно описывает энергетический баланс реальной жидкости.

4. На базе использования уравнения Бернулли расходом Вентури созданы расходомерная диафрагма, трубка Пито-Прандтля, струйный насос и многие другие устройства.

Т е м а 4. ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

1. Осаждение в гравитационном поле.
2. Очистка воздуха и промышленных газов.

1. Осаждение в гравитационном поле

Осаждение тяжелых частиц в жидкости или газе – это разделение неоднородной системы по признаку различия плотностей. Процесс заключается в опускании более плотных частиц на твердые ограничивающие поверхности или во всплывании менее плотных частиц на зеркало жидкой дисперсионной среды под действием массовых сил: тяжести или инерции. Теоретической основой процесса осаждения служат закономерности движения сферических частиц в вязкой среде. Процесс осаждения твёрдых частиц используют в практических целях для разделения пылей и суспензий, а также для разделения твёрдых частиц по фракциям (размеру, плотности). В лабораторной практике этот процесс применяют для определения геометрических размеров осаждаемых частиц или физических констант, входящих в выражения для скорости осаждения. Если форма осаждающихся частиц отличается от сферической, сопротивление их движению возрастает, а скорость уменьшается в соответствии с поправочным коэффициентом ϕ в зависимости от формы частиц приведены ниже:

Округлая 0,77
Угловатая 0,66
Продолговатая 0,58
Пластинчатая 0,43.

При осаждении частиц в стесненных условиях, когда их концентрация велика проявляются следующие эффекты: столкновение частиц, приводящее к гашению скорости и к увеличению сопротивления; увлечение тихходных частиц (малых) более быстроходными (большими). Поэтому в стесненных условия расчетную скорость осаждения v_1 умножают на поправочный коэффициент λ , зависящий от концентрации C . Одна из известных формул для определения этой поправки – формула Андерса:

$$\lambda = \frac{(1-C_V)^2}{1+2,5C_V+7,35C_V^2}.$$

Тогда окончательно скорость: $v_2 = \lambda v_1 = \lambda \rho v$.

Оборудование для осаждения в поле силы тяжести.

Твердые частицы осаждают из жидкостей в отстойниках. Различают отстойники периодического, полунепрерывного и непрерывного действия. *Отстойник периодического действия* изображен на **Рис. 4.1**. Отстаивающаяся смесь заливается в чан отстойника и выдерживается. Если отделяемое вещество более плотное, чем среда ($\rho_{\text{ч}} > \rho_{\text{с}}$), например, при разделении крахмального молочка, то частицы плотностью $\rho_{\text{ч}}$ оседают на дно, образуя концентрированный осадок (шлам). В верхней части отстойника собирается осветленная жидкость (**декантат**). Высота его слоя h_0 . Если же $\rho_{\text{ч}} < \rho_{\text{с}}$, что имеет место, например, при отстаивании молока, то частицы дисперсной фазы поднимаются вверх, образуя слой сливок на поверхности осветленной жидкости. Во всех случаях из отстойника вначале сливается верхний слой (декантат в первом случае и сливки – во втором). После этого выгружается оса-

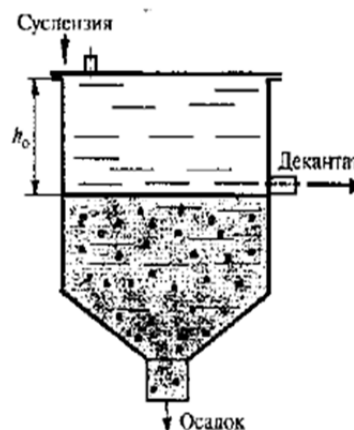


Рис. 4.1 – Схема отстойника периодического действия

док или сливается осветленный продукт из нижней части отстойника. Расчёт отстойника сводится к определению площади поверхности осаждения F и объема аппарата. Производительность отстойника зависит только от его площади, потому что скорость осаждения постоянная, определяемая свойствами продукта. От высоты отстойника его производительность не зависит, так как с ее увеличением пропорционально возрастает время отстаивания.

Отстойники полунепрерывного действия устраивают в виде лотков или каналов (Рис. 4.2). Разделяемая смесь вводится на одном его конце, а декантат выводится на другом. По мере движения смеси на дне лотка осажается осадок. По такому принципу работают грязевые отстойники сахарных заводов, отстойники крахмала из крахмального молочка, отстойные газоходы для улавливания пыли на дымовых газах и др. Рекомендуемые размеры канатов грязеулавливания: длина 200 м, ширина 50, глубина 2 м. Размеры деревянных лотков улавливания крахмала: длина 30 м, ширина 0,5, глубина до 0,4 м. Скорость движения суспензий и дымов по каналам отстойников не должна быть выше некоторой критической, чтобы осажденные частицы не уносились потоком. Эта скорость определяется из условия, что сила трения частицы по осажденному слою $R_T (H)$ не должна быть меньше силы лобового сопротивления движению частицы в потоке $R (H)$:

$$R_T = \frac{\pi d^3}{6} (p_q - p_c) g f \geq R = \frac{\pi d^3}{8} p_c v^2.$$

Тогда скорость (м/с):

$$v \leq \sqrt{\frac{4d}{3\xi} f \frac{p_q - p_c}{p_c} g},$$

где f – коэффициент трения;
 ξ – гидравлический коэффициент сопротивления.

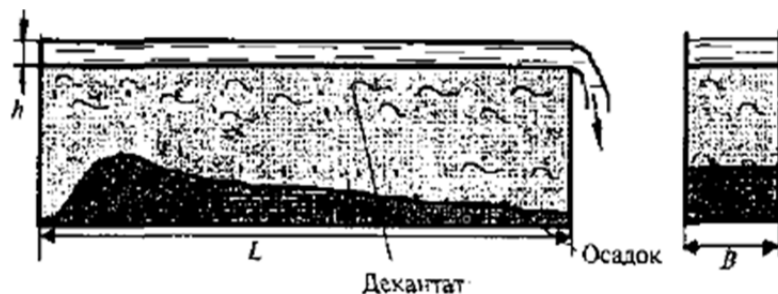


Рис. 4.2 – Отстойник полунепрерывного действия лоткового типа

Кроме того, скорость движения среды (v_c) должна соответствовать ламинарному режиму течения для обеспечения приемлемых условий осаждения. За время движения потока вдоль отстойника t_0 частица должна успеть осесть на его дно, т.е. должно выполняться условие:

$$t_0 = \frac{h_0}{v} = \frac{L}{v_c}; \quad v_c = v \frac{L}{h_0},$$

где L – длина отстойника.

Объёмный расход Q жидкой фазы, протекающей через поперечное сечение отстойника, равно произведению ширины лотка B на высоту осветленного слоя h_0 и скорость v_c , т.е. $Q = v_c B h_0$. Подставив в эту формулу $v_c = v(L/h)$, получим:

$$Q = vLB = VF; \quad F = BL.$$

Как и для отстойника периодического действия, установлено, что производительность отстойника полунепрерывного действия определяется не глубиной, а площадью поверхности.

В отстойнике полунепрерывного действия осадок разделяется по фракциям. Более крупные частицы располагаются ближе ко входу суспензии. Вблизи её выхода наблюдается уменьшение глубины осадка вследствие дополнительной турбулизации суспензии. Зависимость глубины осадка по длине лотка можно рассчитать по данным седиментометрического (осадочного) анализа суспензии.

Отстойники непрерывного действия изготавливают в виде низких цилиндров с коническими днищами. На Рис. 4.3 изображен пятирусный отстойник, применяемый в сахарном производстве для очистки сатурационного сока. По конструкции отстойника непрерывного действия отличаются один от другого наличием устройств для подвода фильтруемой суспензии, отвода декантата и удаления сгущенной суспензии. В отстойниках получается 75...80% осветленного сока 20...25% сгущенного осадка. Обычно оба продукта направляются на дальнейшее фильтрование.

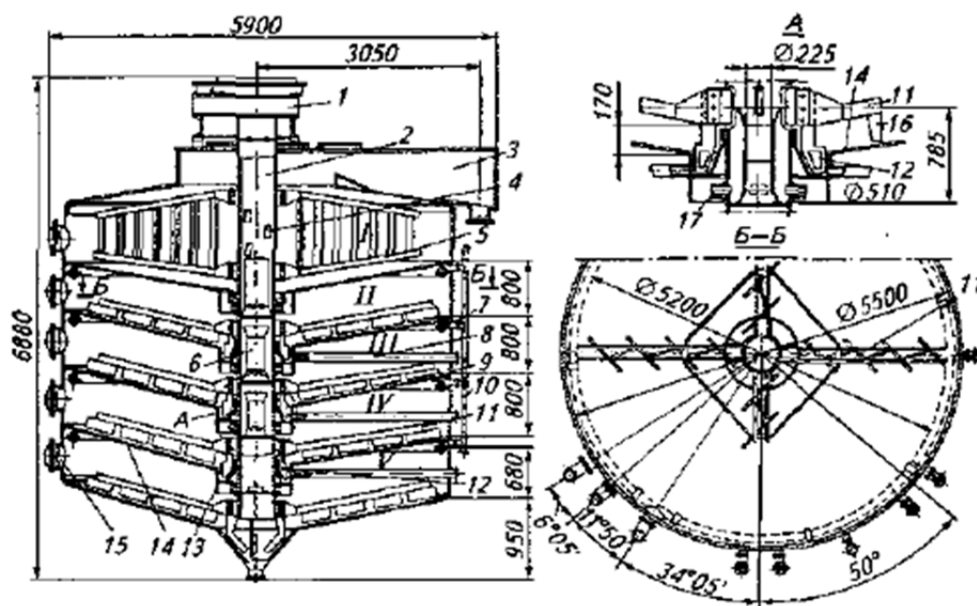


Рис. 4.3 – Пятирусный отстойник для сахарного производства:

1 – подготовительная секция; 2 – трубовал; 3 – приемник пены; 4 – окно трубовала; 5 – мешалка подготовительной секции; 6 – вставка равномерного распределения сока по секциям; 7 – периферийные кольцевые трубы для отвода декантата; 8 – трубы для отвода осадка; 9 – корпус; 10 – воздушная оттяжка; 11 – мешалки; 12 – лопатки сборников осадка; 13 – кольцевые перегородки, предотвращающие перемешивание декантата и суспензии; 14 – днище; 15 – насадок для удаления декантата; 16 – лопасти; 17 – насадок для ввода суспензии в секции отстойника

Сок вводится в секции многорусных отстойников через отверстия трубовала, а отвод осветленного сока – через кольцевые трубы, расположенные по периферии в верхней части секций. Такая организация подвода и отвода сока предотвращает взмучивание неотстоявшегося и осветленного сока. Возможен и обратный ввод и вывод продуктов. В отстойнике (см. Рис. 4.3) сок первой сатурации поступает в подготовительную секцию 1, имеющую мешалку 5. Здесь от него отделяется пена и при помощи специальной лопасти направляется в приёмник пены 3, а затем – на переработку (на вторую сатурацию). Далее сок через окно 4 направляется во внутреннюю часть трубовала 2, откуда через насадки 17 – в отдельные секции отстойника. Чтобы неосветленный сок меньше перемешивался с осветленным, установлены кольцевые перегородки 13. Равномерное распределение сока по отдельным секциям достигается при помощи вставок 6. Сгущенная суспензия с днищ 14 отдельных секций лопастями 16 мешалок 11 направляется в сборники в которых перемешивается лопатками 12. Отвод сгущенной суспензии осуществляется из каждой секции по трубам 8.

Осветлённый сок из каждой секции отводится с помощью периферийных кольцевых труб 7. Корпус 9 отстойника имеет воздушную оттяжку 10, через которую отсасывается избыточное количество воздуха, деаэрируемого в секциях отстойника. Скорость потока, при которой возможно отстаивание осадка, в расчётах принимают в пределах 0,03...0,05 м/с. В случае превышения этой скорости отстаивание прекращается; осадок взмучивается и уносится осветлённой жидкостью. Более простая в механическом исполнении конструкция отстойника непрерывного действия изображена на **Рис. 4.4**. В нём суспензия, поступающая в верхнюю часть корпуса 1, заполняет весь внутренний объём 2 и медленно движется по коническим разделительным ярусам 3. Осадок выпадает на разделительные конуса (ярусы) и по ним сползает вниз и падает на дно. При выгрузке осадок перемешивается разрыхлителем 4, вращающимся вместе с валом.

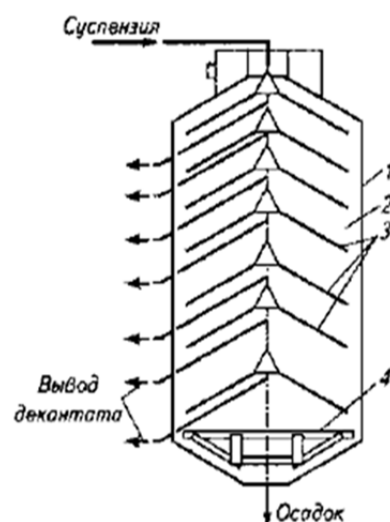


Рис. 4.4 – Схема конического многоярусного отстойника

- 1 – корпус; 2 – внутренний объем корпуса;
3 – конические разделительные ярусы;
4 – разрыхлитель осадка

Основные положения теории осаждения в гравитационном поле

1. **Осаждение** – это разделение неоднородной системы по признаку различия плотностей, заключающееся в опускании более плотных частиц на твёрдые ограничивающие поверхности или во всплывании менее плотных частиц на поверхности жидкости под действием массовых сил – тяжести или инерции.

2. В процессе осаждения твёрдые частицы приобретают ускорение в направлении действия массовых сил. Возникающая при этом инерционная сила уравнивается сопротивлением окружающей среды, и частицы приобретает устойчивую скорость, являющуюся максимальной из всех возможных.

3. Расчётные формулы для осаждения, полученные из этих представлений, записываются в виде зависимости критерия Ньютона от критерия Рейнольдса или в виде зависимостей рассчитывают максимальную скорость осаждения.

4. Производительность отстойника определяется площадью его поперечного сечения и не зависит от глубины.

5. Применяют отстойники периодического, полунепрерывного и непрерывного действия.

6. Из отстойников периодического действия в первую очередь должна сливаться менее плотная составляющая.

7. Скорость течения жидкости в отстойнике непрерывного действия, как и в других аппаратах с течением жидкости поверх твёрдых частиц, ограничивается условием, которое состоит в том, чтобы не допустить взмучивания и смысла осадка.

2. Очистка воздуха и промышленных газов

Очистку газов от взвешенных твердых или жидких частиц проводят в целях уменьшения загрязненности атмосферы и улавливания из отходящих газов ценных продуктов.

Эффективность аппаратов для очистки газов оценивается степенью очистки:

$$\eta = \frac{V_1 X_1 - V_2 X_2}{V_1 X_1} 100 \%,$$

где V_1 и V_2 – объемные расходы соответственно запыленного и очищенного газа, м³/ч;
 x_1 и x_2 – концентрация взвешенных частиц соответственно в запыленном и очищенном газе, кг/м³.

Для очистки газовых потоков от взвешенных частиц используют несколько способов: **гравитационное осаждение, осаждение под действием инерционных и центробежных сил (центрифугирование), фильтрование газового потока через пористую перегородку, мокрую очистку, которая осуществляется в орошаемых водой скрубберах, осаждение в электрическом поле.** Первые два способа применяют для очистки газов от крупных (свыше 100 мкм) взвешенных частиц, остальные – для тонкой очистки газов от частиц размером менее 20 мкм. Для достижения требуемой степени очистки газового потока способы часто комбинируют. Закономерности процессов осаждения и фильтрования газовых неоднородных систем аналогичны закономерностям процессов осаждения и фильтрования твердых частиц в капельной жидкости.

Мокрая очистка газов. Мокрую очистку газов применяют тогда, когда допустимы увлажнение и охлаждение газа, а взвешенные частицы имеют незначительную ценность. Охлаждение газа ниже температуры конденсации находящихся в нем паров способствует увеличению плотности взвешенных частиц. При этом частицы играют роль центров конденсации и тем самым обеспечивают выделение их из газового потока. Если взвешенные частицы не смачиваются жидкостью, то очистка газов в мокрых пылеулавливателях малоэффективна. В этом случае для повышения степени очистки к жидкости добавляют поверхностно-активные вещества. Степень очистки газов от пыли в мокрых пылеулавливателях колеблется в зависимости от конструкции от 60 до 99 %. Недостаток мокрой очистки – образование сточных вод, которые также должны очищаться.

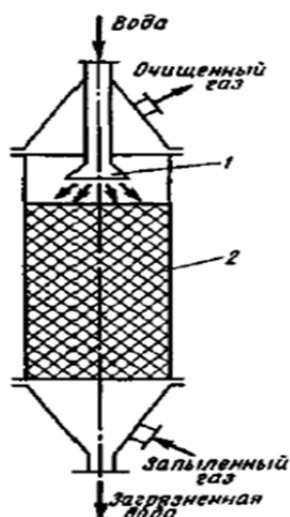


Рис. 4.5 – Насадочный скруббер:

- 1 – разбрызгиватель;
- 2 – насадка

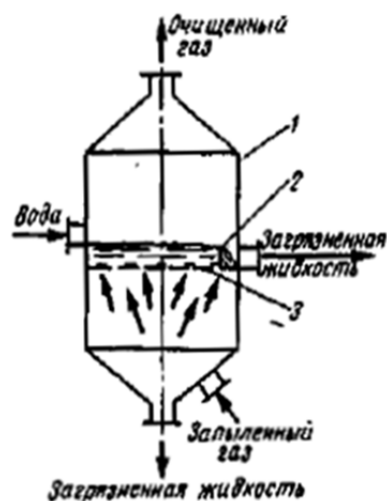


Рис. 4.6 – Пенный скруббер:

- 1 – корпус;
- 2 – регулирующий порог;
- 3 – перфорированная тарелка

Скрубберы, полые или насадочные (Рис. 4.5), являются простейшими мокрыми пылеулавливателями для очистки и охлаждения газов. Запыленный газ подается в нижнюю часть скруббера и движется противотоком к жидкости, подаваемой через разбрызгиватель или форсунки со скоростью около 1 м/с. При взаимодействии газа и жидкости происходит механическая очистка газа. Степень очистки достигает 75...85 %. В качестве насадки используют хордовые или кольцевые элементы.

Пенные барботажные пылеулавливатели предназначены для очистки сильно запыленных газов. Барботажный пылеулавливатель представляет собой тарельчатый скруббер (Рис. 4.6). Запыленный газ подается в нижнюю часть скруббера и движется вверх. Попадая на перфорированную тарелку, куда подается промывная жидкость, газ барботирует через нее, в результате чего создается подвижная пена, которая обеспечивает большую поверхность контакта и высокую степень очистки газа. В слое пены взвешенные частицы погло-

щаются жидкостью. Загрязненная жидкость сливается через регулирующий порог. Пенные скрубберы имеют, как правило, несколько перфорированных тарелок. Степень очистки газа в таких аппаратах достигает 99 %.

Скрубберы Вентури также применяются для мокрой очистки воздуха. В них достигается высокая степень очистки, равная 98 %. Недостаток их – большое гидравлическое сопротивление (порядка 1500...7500 Па) и необходимость установки каплеотбойника. Скруббер Вентури (**Рис. 4.7**) состоит из двух частей: трубы Вентури, в которой происходит очистка воздуха, и разделителя, предназначенного для отделения капелек воды от газового потока.

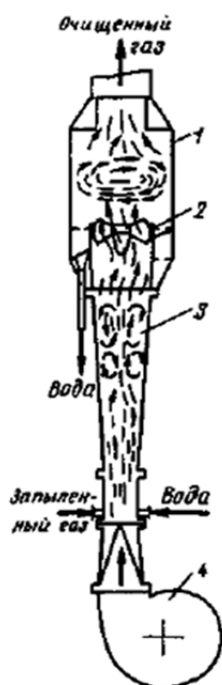


Рис. 4.7 – Скруббер Вентури:

- 1 – разделитель; 2 – завихритель потока;
3 – труба Вентури; 4 – вентилятор

Воздух, подлежащий очистке, поступает снизу в вертикальный патрубок, на выходе из которого создается разрежение. За счет разрежения в трубу Вентури из бачка подсасывается через коллектор вода. В результате в трубе Вентури как на стенках, так и по всему объему происходит интенсивное образование жидкостных пленок, что приводит к очистке газового потока. Осаждению капелек жидкости из газового потока способствует завихритель потока. Жидкость, выделяемая в разделителе, стекает в сборный бачок. Очищенный газовый поток выбрасывается в атмосферу.

Осаждение под действием электрического поля. В электрическом поле тонкодисперсным частицам сообщается электрический заряд, под действием которого происходит их осаждение. Разделение пылей, дымов и туманов в электрическом поле имеет значительные преимущества перед другими способами осаждения. Разделение газовых неоднородных смесей в электрическом поле осуществляется на электродах. Для разделения пыли и дымов применяются сухие фильтры, для разделения туманов – мокрые.

Простейший электрофильтр – это два электрода, один из которых – анод – выполняется в виде трубы или пластины, а другой – катод – в виде проволоки, которая натянута внутри трубчатого анода либо между пластинчатыми анодами, выполненными из проволочной сетки. Аноды заземляют. При соединении электродов с источником постоянного тока на электродах создается разность потенциалов, равная 4...6 кВ/см, обеспечивающая плотность тока 0,05...0,5 мА на 1 м длины катода. Газовая смесь поступает внутрь трубчатых электродов или между пластинчатыми. Благодаря высокой разности потенциалов на электродах и неоднородности электрического поля (сгущение силовых линий происходит у электрода с меньшей площадью поверхности – катода) в слое газа у отрицательного электрода – катода – образуется поток электронов, направленный к аноду. В результате соударений электронов с нейтральными молекулами газа газ ионизируется. Такая ионизация называется ударной. Признаком ионизации газа является образование «коронь» у катода, поэтому катод называют коронирующим электродом. В результате ионизации образуются положительные и отрицательные ионы. Положительные ионы собираются около катода, а отрицательные с большой скоростью движутся к аноду, заряжая взвешенные в газе частицы и увлекая их с собой. Частицы пыли или тумана оседают на аноде, покрывая его слоем осадка. На заряженную частицу электрическое поле действует с силой:

$$F = ne_0 E_x,$$

где n – заряд, полученный частицей;

e_0 – величина элементарного заряда;

E_x – градиент потенциала электрического поля на расстоянии x от оси катода).

Скорость электроосаждения определяется по уравнению:

$$V_0 = \frac{ne_0 E_x}{3\pi d\mu}$$

Продолжительность осаждения частицы:

$$\tau_0 = \int_r^R \frac{dx}{v_0}$$

где R – расстояние от оси катода до поверхности анода;
 r – радиус катода;
 μ – динамическая вязкость воздуха.

Трубчатый электрофильтр изображен на **Рис. 4.8**. Пыль или дым поступают в нижнюю часть фильтра под решетку 6, в которой закреплены электроды, и распределяются по трубчатым электродам-анодам. Внутри трубчатых электродов расположены коронирующие электроды-катоды. Электроды закреплены на общей раме, опирающейся на изоляторы 2. Под действием электрического поля происходит электроосаждение взвешенных в газе частиц. Осевшие на аноде частицы периодически встряхиваются ударным приспособлением 1 и собираются в конической нижней части фильтра. Осадок из фильтра удаляется с помощью выгрузного устройства, а очищенный газ выходит из верхней части фильтра. Разработаны секционные электрофильтры, в которых газ проходит через ряд последовательно соединенных секций. В электрофильтре с пластинчатыми электродами анодами служат пластины, а коронирующими электродами (катодами) – проволока, натянутая между пластинами. Величина тока в электрофильтре:

$$I = iL,$$

где i – плотность тока;
 L – длина коронирующих электродов.

При 25 °С и давлении 0,1 МПа находят критический градиент потенциала, и, зная расстояние между электродами, определяют разность потенциалов на электродах, по выражению:

$$E_k = 31 + 9,54 \sqrt{(\delta/r)},$$

где δ – отношение плотности воздуха при данных условиях к его плотности.

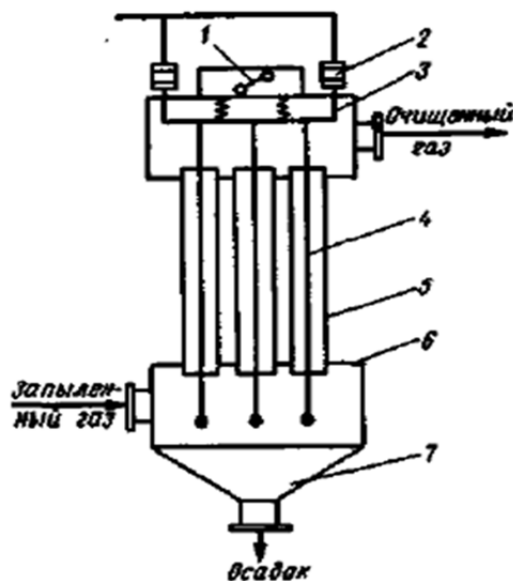


Рис. 4.8 – Трубчатый электрофильтр:
 1 – встряхивающее устройство; 2 – изолятор;
 3 – рама; 4 – коронирующий электрод;
 5 – трубчатый электрод – анод; 6 – решетка;
 7 – сборник для пыли

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Плаксин, Ю.М. Процессы и аппараты пищевых производств / Ю.М. Плаксин, Н.Н. Малахов, В.А. Ларин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : КолосС, 2007. – 759 с.
2. Гриценко, В.В. Процессы и аппараты пищевых производств : учебное пособие для студентов очной и заочной форм обучения направления 151000.62 «Технологические машины и оборудование» / Рубцовский индустриальный институт. – Рубцовск, 2014. – 208 с.
3. Пилипенко, Н.И. Процессы и аппараты, учебник для студентов учреждений профобразования / Н.И. Пилипенко, Л.Ф. Пелевина. – М. : Академия, 2013. – 336 с.
4. Остриков, А.Н. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник / А.Н. Остриков [и др.]. – СПб. : ГИОРД, 2012. – 616 с.
5. Стабников, В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.И. Баранцев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Академия, 2011. – 349 с.
6. Пилипенко, Н.И. Процессы и аппараты пищевых производств / Н.И. Пилипенко, Л.В. Пелевина. – М. : Академия. – 336 с.

Учебное издание

Гук Екатерина Сергеевна
Таразевич Елена Васильевна

Процессы и аппараты пищевых производств

Курс лекций

Часть I. Теоретические основы. Механические, гидравлические
и гидромеханические процессы

Ответственный за выпуск *П.Б. Пигаль*

Корректор *Митянок Е.М.*
Редактор *Андросюк Т.И.*

Подписано в печать 05.09.2018 г. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс». Ризография.
Усл. печ. л. 3,49. Уч.-изд. л. 1,52.
Тираж 45 экз. Заказ №

Отпечатано в редакционно-издательском отделе
Полесского государственного университета.
225710, г. Пинск, ул. Днепровской флотилии, 23.