



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

# ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

РАЗДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

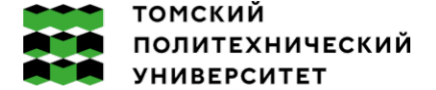
**к.т.н., старший преподаватель  
НОЦ им. Кижнера  
Богданов Илья Александрович**

четверг, 21 ноября 2024 г.



# НЕОДНОРОДНЫЕ СИСТЕМЫ

Неоднородные, или гетерогенные, системы - это системы, состоящие из двух или нескольких фаз. Фазы, составляющие систему, могут быть, в принципе, механически отделены одна от другой.



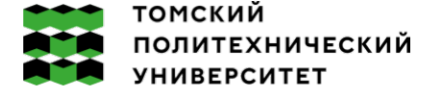
В зависимости от физического состояния фаз различают: **суспензии, эмульсии, пены, дымы и туманы.**



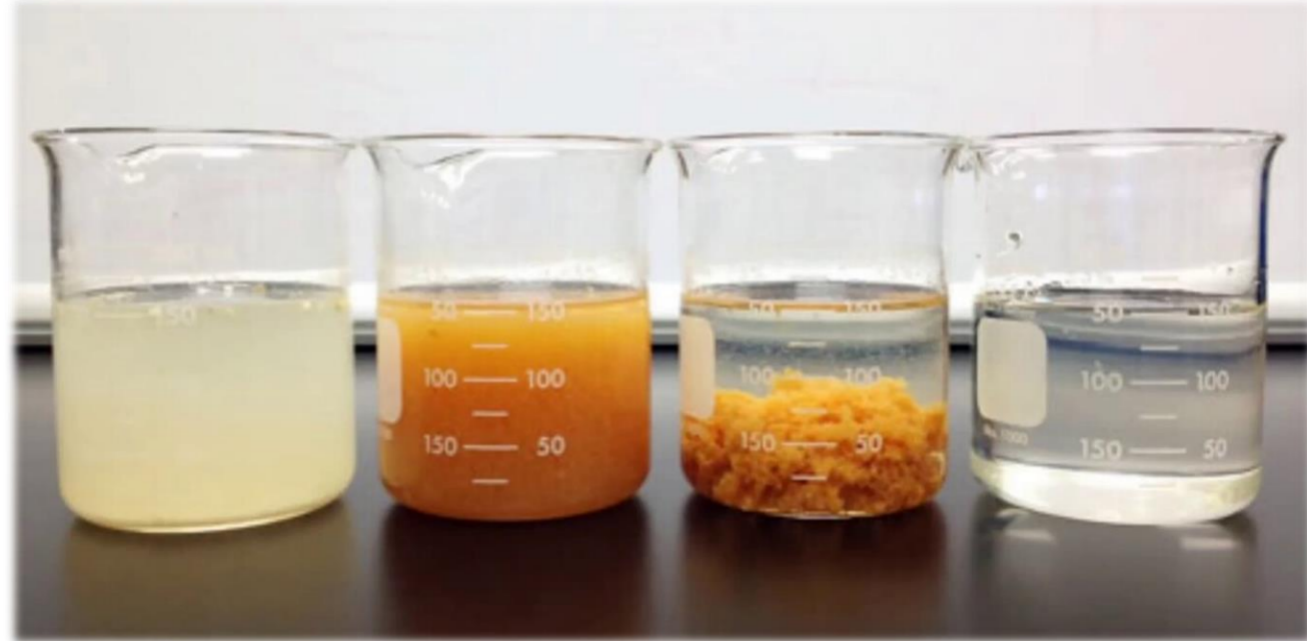
Любая неоднородная бинарная система состоит из дисперсной (**внутренней**) фазы и дисперсионной среды, или сплошной (**внешней**) фазы, в которой распределены частицы дисперсной фазы.

# СУСПЕНЗИИ

**Суспензии** — неоднородные системы, состоящие из жидкости и взвешенных в ней твердых частиц.



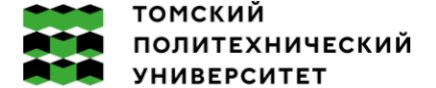
В зависимости от размеров твердых частиц (в мкм) суспензии условно подразделяют на **грубые** (более 100), **тонкие** (0,5-100) и **мути** (0,1-0,5).



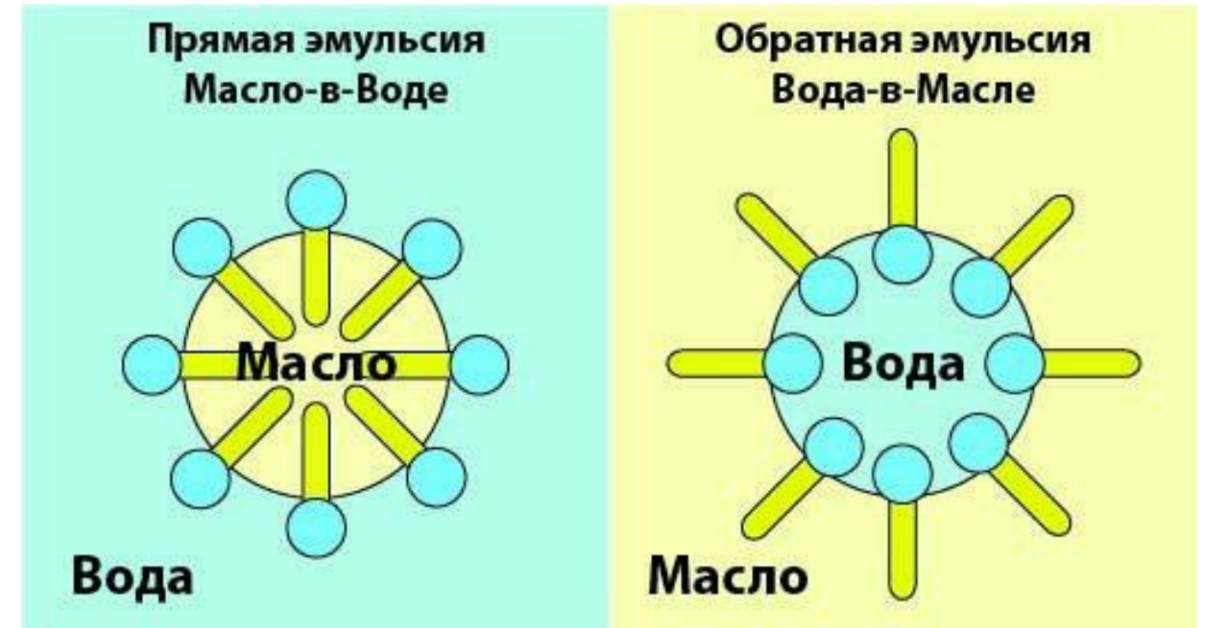
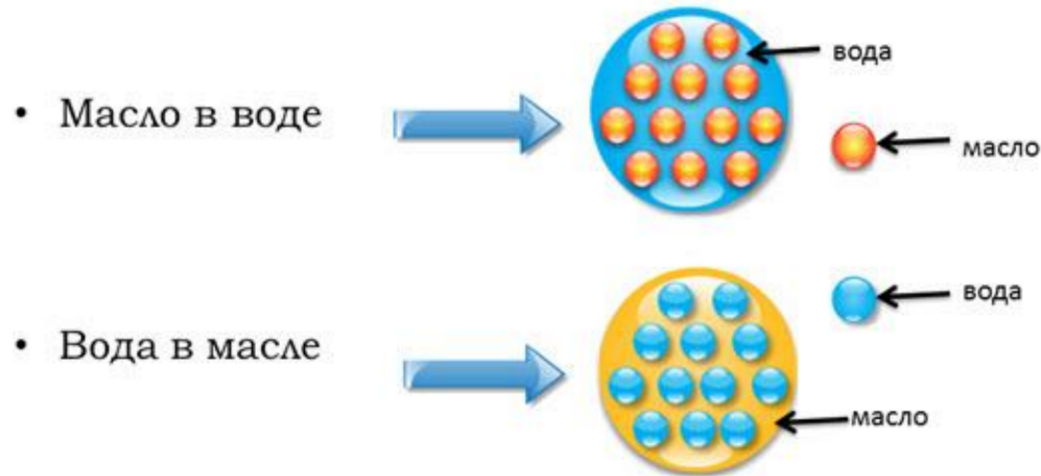
Переходную область между суспензиями и истинными растворами занимают коллоидные растворы, в которых размеры частиц, находящихся в жидкости, являются средними между размерами молекул и частиц взвесей. Граница между суспензиями и коллоидными растворами может быть в первом приближении охарактеризована появлением **броуновского движения** твердых частиц, с возникновением которого эти частицы не могут осесть под действием силы тяжести.

# ЭМУЛЬСИИ

**Эмульсии** — системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней капель другой жидкости, не смешивающейся с первой.



Размер частиц дисперсной фазы может колебаться в широких пределах. Под действием силы тяжести эмульсии расслаиваются, однако при незначительных размерах капель (менее 0,4-0,5 мкм) или при добавлении стабилизаторов эмульсии становятся устойчивыми и не расслаиваются в течение длительного времени.



С увеличением концентрации дисперсной фазы появляется возможность обращения (*инверсии*) фаз. В результате слияния (*коалесценции*) капель дисперсная фаза становится сплошной; в ней оказываются взвешенными частицы фазы, бывшей до этого внешней.

# СВОЙСТВА ЭМУЛЬСИЙ И СУСПЕНЗИЙ

Физические свойства (плотность, вязкость) суспензий и эмульсий определяются объемным соотношением фаз, составляющих систему, и их физическими свойствами.

Средняя плотность суспензий и эмульсии ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) вычисляется по уравнению:

$$\rho_{\text{см}} = \rho_{\text{д}} + \rho_{\text{с}}(1-\varphi)$$

где  $\rho_{\text{д}}$  и  $\rho_{\text{с}}$  — плотность дисперсной и сплошной фаз,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\varphi$  — объемная доля дисперсной фазы.

$$\mu_{\text{эм}} = \mu_{\text{с}} \left[ 1 + 2,5\varphi \left( \frac{\mu_{\text{д}} + \frac{2}{5}\mu_{\text{с}}}{\mu_{\text{д}} + \mu_{\text{с}}} \right) \right]$$

при объемной концентрации дисперсной фазы не более 50%

где  $\mu_{\text{с}}$  и  $\mu_{\text{д}}$  — вязкость сплошной и дисперсной фаз,  $\text{н}\cdot\text{сек}/\text{м}^2$ .



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

Вязкость суспензии  $\mu_{\text{см}}$  ( $\text{н}\cdot\text{сек}/\text{м}^2$ ) зависит от концентрации твердой фазы, но не зависит от размера твердых частиц.

Вязкость суспензий определяется следующим образом:

$$\mu_{\text{см}} = \mu_{\text{с}}(1+2,5\varphi) \quad \mu_{\text{см}} = \mu_{\text{с}}(1+4,5\varphi)$$

не более 10% более 10%

(при объемной концентрации твердой фазы)

где  $\mu_{\text{с}}$  — вязкость сплошной фазы,  $\text{н}\cdot\text{сек}/\text{м}^2$ .

$$\mu_{\text{эм}} = \mu_{\text{с}} \frac{\sqrt[3]{\frac{1}{\varphi}}}{\sqrt{\frac{1}{\varphi} - 1}}$$

при объемной концентрации дисперсной фазы более 50%

# ПЕНЫ, ПЫЛИ И ДЫМЫ

**Пены** — системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней пузырьков газа. Эти газо-жидкостные системы по своим свойствам близки к эмульсиям.



**Пыли и дымы** — системы, состоящие из газа и распределенных, в нем частиц твердого вещества. Размеры твердых частиц пылей составляют приблизительно 3-70 мкм. Дымов — 0,3-5 мкм. При образовании дисперсной фазы из частиц жидкости примерно таких же размеров (0,3—5 мкм) возникают системы, называемые туманами. Пыли, дымы и туманы представляют собой аэродисперсные системы, или аэрозоли.

Указанные системы могут образовываться также при химическом взаимодействии газов, протекающем с образованием твердой или жидкой фазы. При этом дисперсность системы будет определяться скоростью образования центров (ядер) конденсации и скоростью их роста.

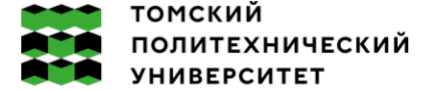


Пыли образуются обычно при механическом распределении частиц в газе (при дроблении, смешивании и транспортировке твердых материалов и др.).

Дымы получаются в процессах конденсации паров (газов) при переходе их в жидкое или твердое состояние

# МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ

В химической технологии широко распространены процессы, связанные с разделением жидких и газовых неоднородных систем. Выбор метода их разделения обуславливается, главным образом, размерами взвешенных частиц, разностью плотностей дисперсной и сплошной фаз, а также вязкостью сплошной фазы.



**Осаждение** представляет собой процесс разделения, при котором взвешенные в жидкости или газе твердые или жидкие частицы отделяются от сплошной фазы под действием гравитации, сил инерции (в том числе центробежных) или электростатических сил. Осаждение, происходящее под действием силы тяжести, называется отстаиванием. В основном отстаивание применяется для предварительного, грубого разделения неоднородных систем.

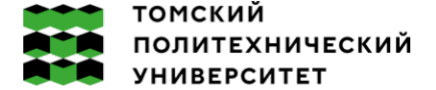
**Фильтрование** — процесс разделения с помощью пористой перегородки, способной пропускать жидкость или газ, но задерживать взвешенные в среде твердые частицы. Оно осуществляется под действием сил давления или центробежных сил и применяется для более тонкого разделения суспензий и пылей, чем путем осаждения.

**Центрифугирование** — процесс разделения суспензий и эмульсий в поле центробежных сил. Под действием этих сил осаждение сочетается с уплотнением образующегося осадка, а фильтрование — с уплотнением и механической сушкой осадка.

**Мокрое разделение** — процесс улавливания взвешенных в газе частиц какой-либо жидкостью. Оно происходит под действием сил тяжести или сил инерции и применяется для очистки газов и разделения суспензий. При обработке суспензий мокрое разделение используют в комбинации с другими способами разделения (промывка осадков в процессах отстаивания и фильтрования).

# МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ

Пусть разделению подлежит система, состоящая из вещества **a** (**сплошной фазы**) и взвешенных частиц вещества **b** (**дисперсной фазы**).



Введем обозначения:

$G_{\text{см}}, G_{\text{осв}}, G_{\text{ос}}$  — масса исходной смеси, осветленной жидкости и получаемого осадка, кг

$x_{\text{см}}, x_{\text{осв}}, x_{\text{ос}}$  — содержание вещества **b** в исходной смеси, осветленной жидкости и осадке, массовые доли.

При отсутствии потерь вещества в процессе разделения уравнения материального баланса имеют вид:

По общему количеству веществ:

$$G_{\text{см}} = G_{\text{осв}} + G_{\text{ос}}$$

По дисперсной фазе (веществу **b**):

$$G_{\text{см}} x_{\text{см}} = G_{\text{осв}} x_{\text{осв}} + G_{\text{ос}} x_{\text{ос}}$$

Совместное решение этих уравнений позволяет определить массу осветленной жидкости  $G_{\text{осв}}$  и массу осадка  $G_{\text{ос}}$ , получаемых при заданном содержании вещества **b** в осадке и осветленной жидкости:

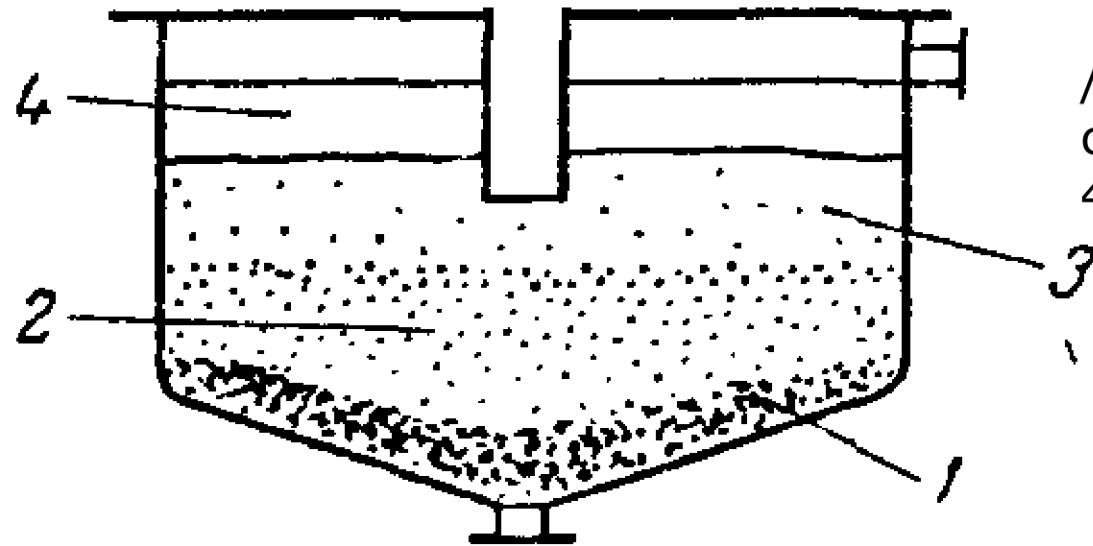
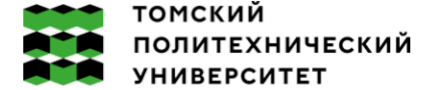
$$G_{\text{осв}} = G_{\text{см}} \frac{x_{\text{ос}} - x_{\text{см}}}{x_{\text{ос}} - x_{\text{осв}}}$$

$$G_{\text{ос}} = G_{\text{см}} \frac{x_{\text{см}} - x_{\text{осв}}}{x_{\text{ос}} - x_{\text{осв}}}$$



# ОТСТАИВАНИЕ

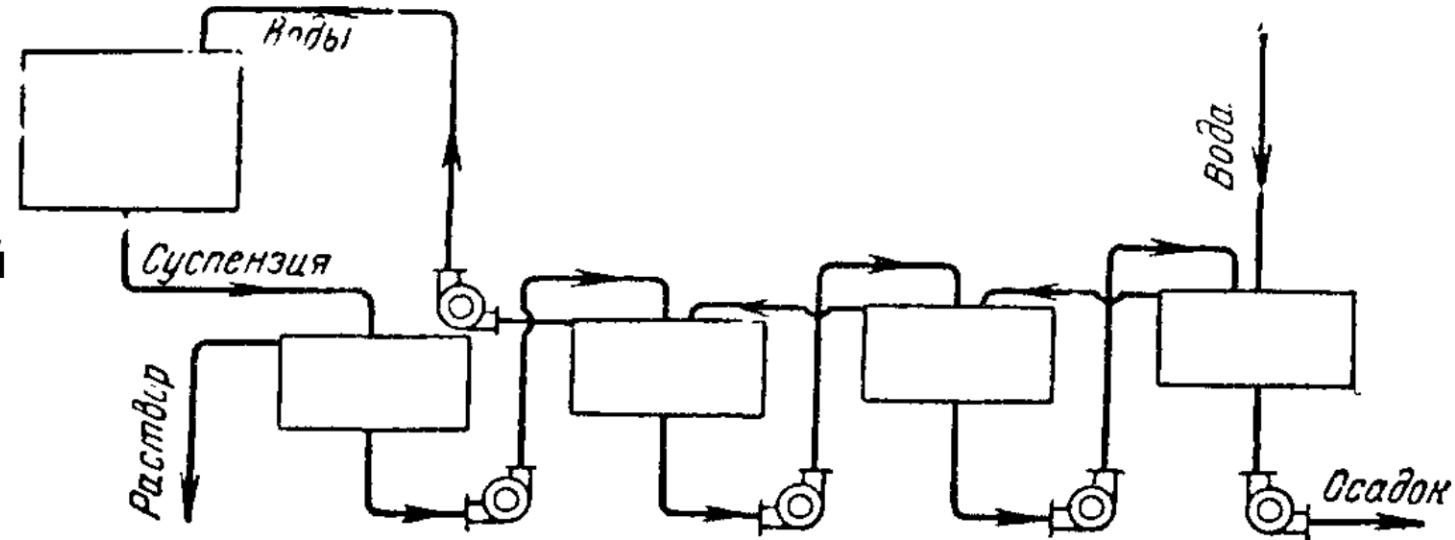
В промышленности процессы осаждения очень часто проводятся в ограниченном объеме при большой концентрации дисперсной фазы, т. е. в условиях, когда оседающие частицы могут влиять на движение друг друга.



**Схема непрерывной противоточной отмывки осадка от жидкости**

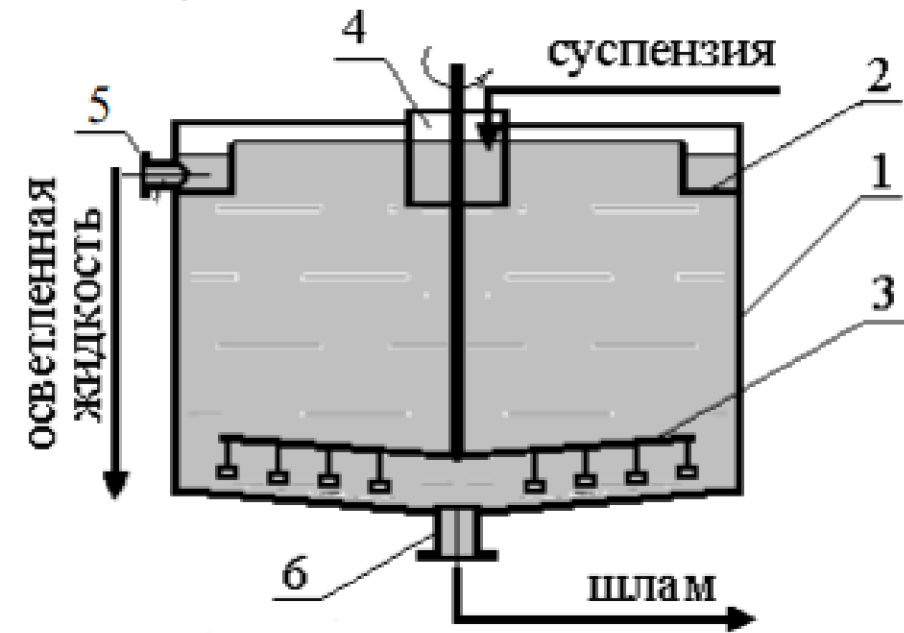
## Схема процесса отстаивания:

1 — слой осадка (шлама); 2 — зона сгущенной суспензии; 3 — зона свободного осаждения; 4 — осветленная жидкость.



# ОТСТОЙНИК С ГРЕБКОВОЙ МЕШАЛКОЙ

При осаждении взвешенные частицы (твердые или жидкие), распределенные в жидкости или в газе, отделяются от сплошной фазы под действием гравитационных (отстаивание), инерционных (в т.ч. центробежных), а также электростатических сил



1 – корпус 2 – кольцевой желоб 3 – мешалка  
4 – штуцер для подвода суспензии 5 – штуцер для отвода осветленной жидкости  
6 – штуцер для удаления шлама

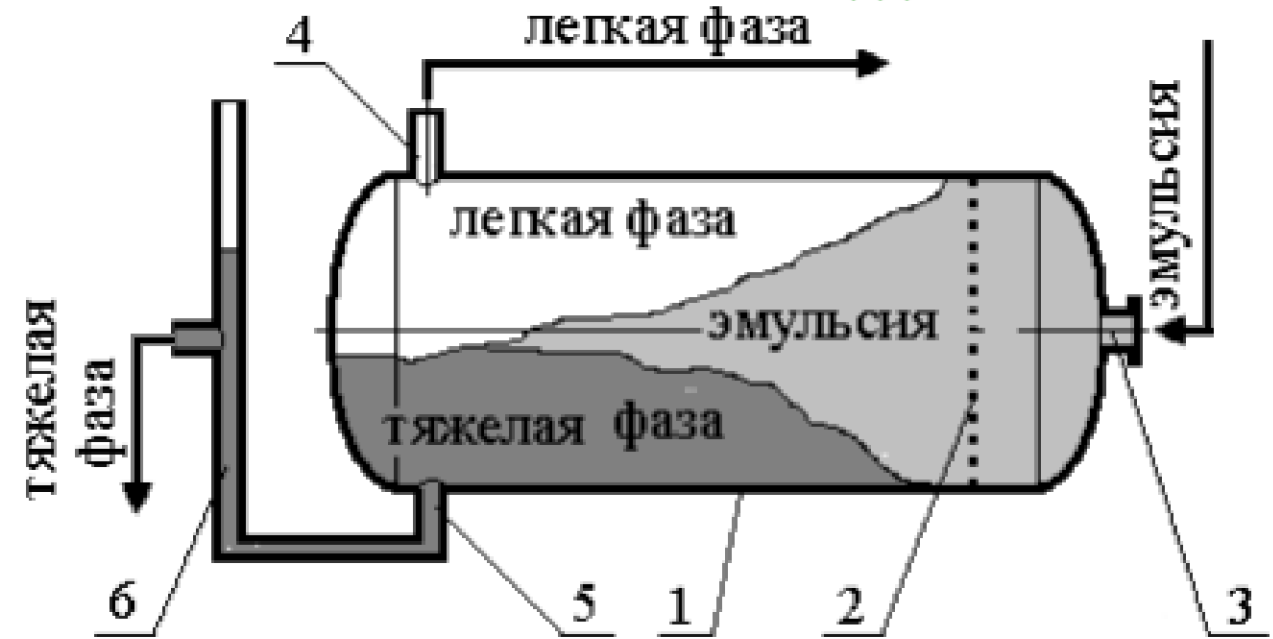
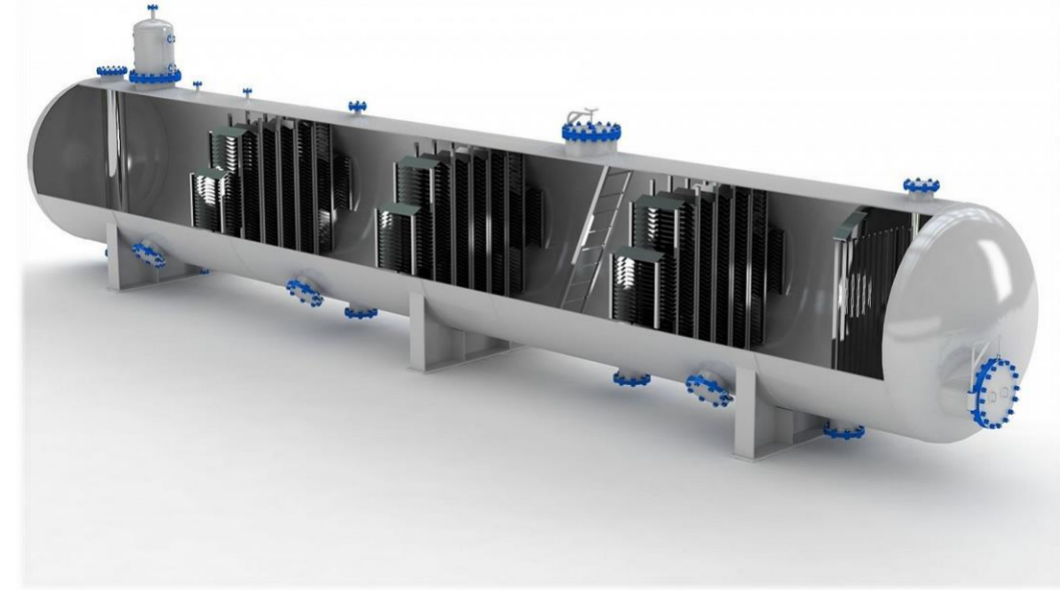
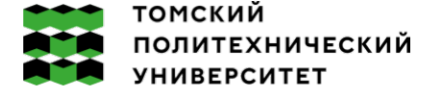


Суспензия через штуцер 4 поступает в центральную зону аппарата. За счет наличия кольцевого желоба 2 для отвода осветленной жидкости она равномерно распределяется по сечению аппарата и движется от центра к периферии. При этом происходит осаждение взвешенных частиц на днище. Слой осевших частиц (шлам) взмучивается медленно вращающейся гребковой мешалкой 3, шлам перемещается к штуцеру 6 и через него отводится из отстойника.

*\*Отстойник с гребковой мешалкой предназначен для разделения (осветления) больших количеств суспензий. Производительность его по сгущенному осадку может достигать 3000 тонн в сутки.*

# ОТСТОЙНИК ДЛЯ ЭМУЛЬСИЙ

Назначение отстойника для эмульсий – разделение нестойких эмульсий

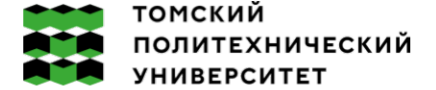


*1 – корпус 2 – распределительная перегородка 3 – штуцер для подвода эмульсии 4 и 5 – штуцера для отвода легкой и тяжелой фаз соответственно 6 – устройство для разрыва сифона*

Жидкость подается в отстойник через штуцер 3, равномерно распределяется по его сечению с помощью перегородки 2. Перемещение жидкости по отстойнику ламинарное, продольная скорость составляет несколько миллиметров в секунду. Под действием сил тяжести из эмульсии выделяются легкая и тяжелая фазы. Легкая фаза поднимается вверх, а тяжелая – опускается вниз. На каком-то расстоянии от перегородки между легкой и тяжелой фазами устанавливается четкая граница раздела. Легкую фазу в этой зоне отстойника отводят через штуцер 5, а тяжелую – через штуцер 4.

# РАСЧЕТ

Пусть в отстойнике прямоугольного сечения, имеющем длину  $l$  (м) и ширину  $b$  (м), суспензия разделяется на осадок и слой осветленной жидкости высотой  $h$  (м).



Производительность отстойника по осветленной жидкости  $Q_{\text{осв}}$  (м<sup>3</sup>/сек) в этом случае выразится уравнением:

$$Q_{\text{осв}} = \omega_{\text{п}} bh$$

где  $\omega_{\text{п}}$  — скорость потока жидкости вдоль аппарата, м/сек.

За это же время частицы, осаждающиеся со скоростью  $\omega_{\text{ос}}$  (м/сек), должны пройти наибольший путь  $h$  (м). Следовательно, время отстаивания определится из уравнения:

$$\tau = \frac{h}{\omega_{\text{ос}}} \quad \frac{h}{\omega_{\text{ос}}} = \frac{l}{\omega_{\text{п}}} = \frac{lhb}{Q_{\text{осв}}}$$

$$Q_{\text{осв}} = \omega_{\text{ос}} lb = \omega_{\text{ос}} F$$

где  $F$  — поверхность отстойника в плане, м<sup>2</sup>.

*производительность отстойника не зависит в явном виде от его высоты, а зависит только от скорости и поверхности осаждения*

Необходимая поверхность осаждения (в м<sup>2</sup>):

$$F = \frac{Q_{\text{осв}}}{\omega_{\text{ст}}}$$

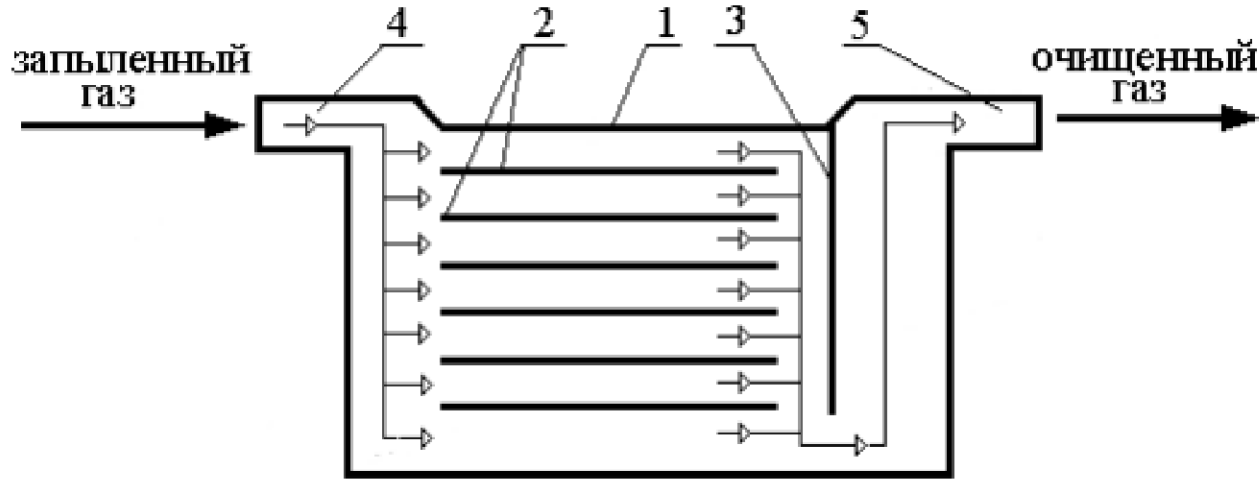
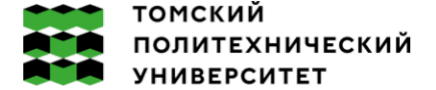
$\omega_{\text{ст}}$  — скорость стесненного осаждения относительно стенок аппарата

Объемный расход осветленной жидкости  $Q_{\text{осв}}$  при ее плотности  $\rho_{\text{осв}}$  (кг/м<sup>3</sup>) составляет  $Q_{\text{осв}} = G_{\text{осв}} / \rho_{\text{осв}}$ , где  $G_{\text{осв}}$  — массовый расход осветленной жидкости в кг/сек.

$$F = \frac{G_{\text{см}}}{\rho_{\text{осв}} \omega_{\text{ст}}} \left( \frac{x_{\text{ос}} - x_{\text{см}}}{x_{\text{ос}} - x_{\text{осв}}} \right)$$

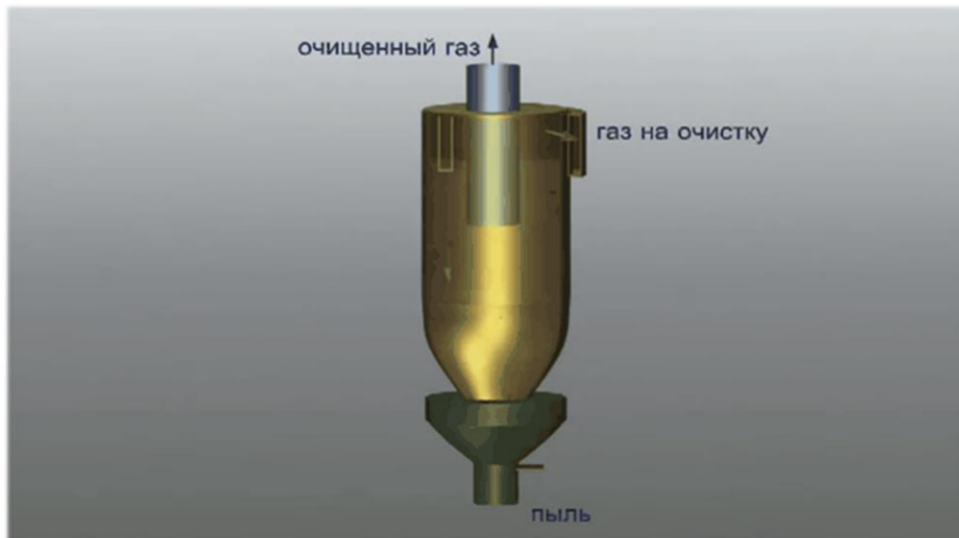
# ПЫЛЕОСАДИТЕЛЬНЫЕ КАМЕРЫ

Назначение пылеосадительной камеры – предварительная (грубая) очистка газов от пыли (механических частиц)

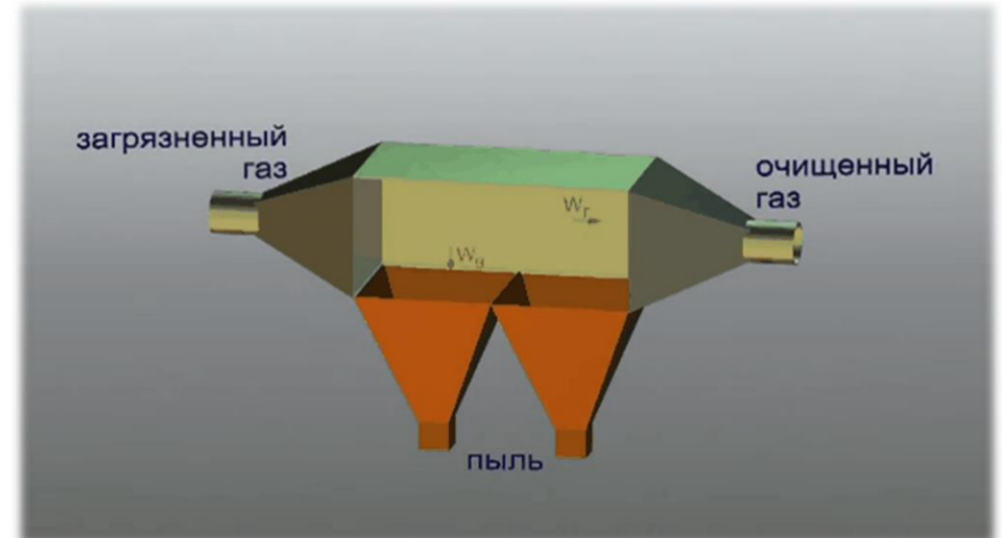


Полочная пылеосадительная камера

- 1 – корпус
- 2 – полки
- 3 – распределительная перегородка
- 4 – штуцер для подачи запыленного газа
- 5 – штуцер для выхода очищенного газа

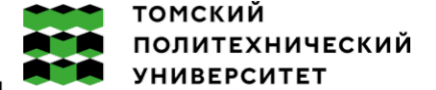


Циклон



Пылеосадительная камера

# ТОНКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ. МОКРАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ. СКРУБЕРЫ

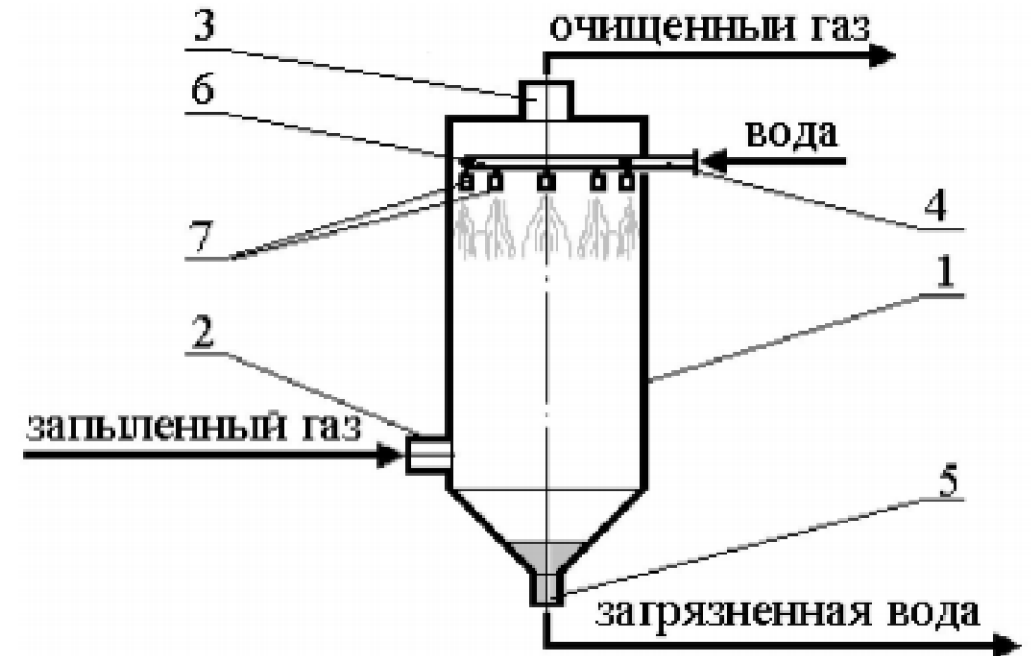


ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

При мокрой очистке газов пыль улавливается за счет соприкосновения пылевых частиц с жидкостью и захвата ею данных частиц. Мокрая очистка применима для тонкой очистки газов в тех случаях, если допускается увлажнение и охлаждение газа.



**Скруббер-пылеуловитель Вентури**



- 1 – корпус (цилиндрическая колонка)
- 2 – штуцер для входа запыленного газа
- 3 – штуцер для отвода очищенного газа
- 4 – штуцер для подвода воды
- 5 – штуцер для отвода загрязненной воды
- 6 – коллектор
- 7 – форсунки

**Полый распылительный  
скруббер-пылеуловитель**