

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА «ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКИХ И ПИЩЕВЫХ
ПРОИЗВОДСТВ»

А. А. Шагарава, П. С. Васильев, С. А. Трусков

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ
ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНО-СЕМЕСТРОВОЙ
РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ОЖИЖЕНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ»**



Волгоград
2017

УДК 66.094.2.5 (075)

Рецензент:

канд. хим. наук, доцент *В. А. Козловцев*

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Методические указания для выполнения контрольно-семестровой работы по дисциплине «Ожижение сыпучих материалов»: метод. указания / сост. А. А. Шагара, П. С. Васильев, **С. А. Трусов**. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2017. – 16 с.

В методических указаниях приводятся расчётные зависимости основных гидродинамических параметров процесса газового псевдоожижения твёрдого сыпучего материала, а также основных геометрических размеров технологических аппаратов, в которых он осуществляется. Методические указания содержат набор индивидуальных вариантов заданий для выполнения студентами контрольно-семестровой работы.

Предназначены для студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

Ил. 5. Табл. 2. Библиогр.: 7 назв.

© Волгоградский государственный
технический университет, 2017

Составители:

Анжелика Анатольевна **Шагара**

Пётр Сергеевич **Васильев**

Станислав Александрович Трусов

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ
КОНТРОЛЬНО-СЕМЕСТРОВОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ОЖИЖЕНИЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ»**

Темплан 2017 г. (учебно-методическая литература). Поз. № ____.

Подписано в печать __. __. 2017 г. Формат 60×84 1/16. Бумага газетная.

Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 10 экз. Заказ ____.

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28 корп.1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 7.

Содержание

Введение.....	4
1. Гидродинамика псевдооживленного слоя.....	5
2. Основные характеристики зернистого слоя сыпучего материала.....	9
3. Методика расчёта контрольно-семестровой работы.....	10
4. Задание контрольно-семестровой работы.....	15
Список рекомендуемой литературы для самостоятельного изучения.....	16

Введение

Освоение учебной дисциплины «Ожижение сыпучих материалов» подразумевает изучение основ гидродинамического процесса, протекающего в технологических аппаратах с псевдоожиженным слоем твёрдого сыпучего материала.

Принцип псевдоожиженного (**ПС**) или кипящего (**КС**) слоя – bubbling bed (англ.), fluidization bed (англ.) был известен ещё Д. И. Менделееву и даже М. Агриколе, а в настоящее время эффективно используется более чем в 250 различных технологических процессах.

Широкое распространение технологии псевдоожижения в конце 1950-х годов XX века стало уникальным событием в химической, нефтехимической, фармацевтической, строительной и других отраслях промышленности.

В создание современной теории псевдоожижения большой вклад внесли такие учёные как Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша, Д. Кунии, О. Левеншпиль, И. Дэвидсон, Д. Харрисон, И. П. Мухленов, Б. С. Сажин, В. Ф. Фролов и другие учёные как в нашей стране так и за рубежом.

Широкомасштабные исследования, проведённые в прошлом веке, значительно прояснили физическую сущность явлений в **ПС** и выявили взаимосвязь различных параметров и степень их влияния на процессы переноса теплоты и массы.

ПС применяют в технологических аппаратах, где необходим тесный контакт между твёрдой и газовой (или жидкой) фазами (диффузионные, каталитические процессы и др.), так как **ПС** позволяет достичь практически на порядок большую интенсивность тепло- и массопереноса. В настоящее время трудно назвать хотя бы одну отрасль промышленности, где не используется **ПС**.

Целью контрольно-семестрового задания по дисциплине «Ожижение сыпучих материалов» является расчёт основных гидродинамических параметров процесса газового псевдоожижения твёрдого сыпучего материала и основных геометрических размеров технологического аппарата, в котором он осуществляется.

Настоящие методические указания предназначены для студентов очной и очно-заочной форм обучения по направлению 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» при выполнении контрольно-семестровой работы по дисциплине «Ожижение сыпучих материалов» и призваны помочь студентам в приобретении ими нужных навыков проведения технологических расчётов, связанных с использованием **ПС**.

1. Гидродинамика псевдооживленного слоя

Одним из важнейших достижений техники за последние годы является использование **ПС** и его модификаций.

ПС или **КС** – легкоподвижное (взвешенное) состояние слоя твёрдого сыпучего (зернистого) материала, при котором под влиянием проходящего через него потока газа или жидкости (ожижающего агента) его твёрдые частицы интенсивно перемещаются одна относительно другой. В этом состоянии зернистый слой напоминает кипящую жидкость, приобретая её свойства, и его поведение подчиняется законам гидростатики.

В состоянии псевдооживления двухфазная система твёрдые частицы – газ (жидкость) может существовать только при определённых условиях. Её внутренняя структура характеризуется перемещением твёрдых частиц относительно друг друга за счёт динамического воздействия потока ожижающего агента или вибрации. Так как система в таком состоянии обладает многими свойствами капельных жидкостей, то её можно использовать для интенсификации многих технологических процессов.

Различные варианты организации на практике **ПС** связаны, главным образом, с различными ожижающими агентами или механическими побудителями, которые способствуют достижению равномерного и устойчивого псевдооживления, ликвидации каналаобразования и комкования зернистого материала, увеличению поверхности контакта фаз и относительной скорости их движения. Роль механических побудителей очень велика, так как они позволяют значительно расширить область эффективного применения **КС**.

В самом простом варианте организации псевдооживленное состояние возникает при вертикальном движении потока газа или жидкости через слой твёрдого сыпучего (зернистого) материала. При этом наиболее простой способ получения **ПС** – продувка его снизу вверх газом.

Существует два качественных состояния **ПС**: однородное и неоднородное. Однородное состояние характеризуется равномерным, плавным псевдооживлением без каких-либо внутренних и внешних пульсаций. При этом **ПС** напоминает спокойную жидкость. Неоднородное состояние характеризуется наличием внутренних и/или внешних пульсаций, а именно всплесками на свободной поверхности **ПС** с выбросами частиц из его основного объёма. При этом **ПС** напоминает бурно кипящую жидкость или жидкость, через которую барботирует газ.

Гидродинамическая картина **ПС** складывается из ряда особенностей, которые определяются скоростью протекающего через зернистый слой газа. При малой скорости движения газа его прохождение через **ПС** напоминает процесс фильтрации. При малом размере частиц и сравнительно невысоких скоростях газа в **ПС** развивается ламинарный режим его движения с постоянным поддержанием однородного псевдооживления по всему

объёму зернистого слоя. При крупном размере частиц и сравнительно высоких скоростях газа в **ПС** развивается турбулентный режим его движения с постоянным поддержанием неоднородного псевдооживления по всему объёму зернистого слоя. При малом размере частиц и сравнительно высоких скоростях газа осуществляется унос частиц зернистого слоя из аппарата **КС**.

В зависимости от геометрии аппарата имеют место различные физические картины процесса псевдооживления:

- при соотношении диаметра аппарата (газораспределительной решётки) и его высоты 1:1 имеет место однородный **ПС**;
- для конических и коническо-цилиндрических аппаратов, либо в случае, когда площадь газораспределительной решётки значительно меньше площади поперечного сечения аппарата, имеет место фонтанирующий слой при котором чётко заметна внутренняя неравномерность скорости перемещения частиц зернистого материала по продольному сечению аппарата;
- при соотношении высоты и диаметра аппарата больше единицы имеет место псевдооживление с поршнеобразованием;
- при соотношении высоты и диаметра аппарата меньше единицы имеет место псевдооживление с каналообразованием.

На рис. 1 показаны различные состояния слоя сыпучего (зернистого) материала при продувке его газом.

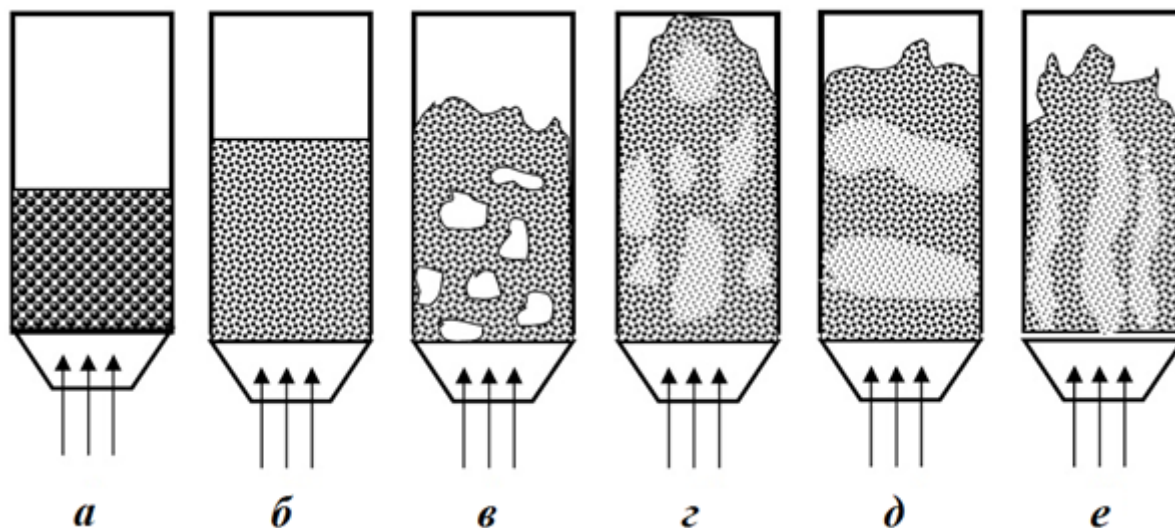


Рис. 1. Состояния зернистого слоя при продувке его газом:

- а* – неподвижный слой (режим фильтрации);
б – однородный **ПС**; *в* – неоднородный **ПС**; *г* – унос частиц;
д – **ПС** с поршнеобразованием; *е* – **ПС** с каналообразованием

Практическое изучение псевдооживленных систем позволила выявить как преимущества, так и недостатки применения **ПС**, основные из которых приведены в табл. 1.

Особенности применения ПС

Преимущества	Недостатки
интенсивное перемешивание твёрдой фазы, которое приводит к выравниванию температур и концентраций в рабочем объёме аппарата КС ;	вследствие интенсивного перемешивания твёрдой фазы в пределах одной секции аппарата КС движущая сила по сравнению с максимально возможной снижается;
гидравлическое сопротивление аппарата КС невелико и не зависит от скорости ожижающего агента в пределах существования ПС ;	время пребывания твёрдых частиц и ожижающего агента в пределах одной секции аппарата КС неодинаково;
увеличение площади поверхности тепло- и массопереноса и снижение диффузионных сопротивлений в результате использования частиц малого размера с большой удельной поверхностью;	эрозионный износ стенок аппарата КС и интенсивное истирание твёрдых частиц;
диапазон свойств твёрдых частиц и ожижающих агентов (газов, паров, капельных жидкостей) достаточно широк и включает в себя в том числе пастообразные материалы и суспензии;	пыль, образующаяся при истирании твёрдых частиц уносится из аппарата КС , что вызывает необходимость установки мощных систем пылеулавливания и аспирации;
аппараты КС для проведения процесса довольно просты по конструкции, легко механизуются и автоматизируются.	при псевдоожижении твёрдых частиц диэлектрических материалов возможно возникновение значительных зарядов статического электричества.

Положительные особенности **ПС** находят применение в различных основных технологических процессах:

- 1) механических (перемешивание, гранулирование и транспортировка твёрдых сыпучих материалов и др.);
- 2) массообменных (сушка в **КС**, сушка суспензий на твёрдых инертных телах и др.);
- 3) химических (катализ, обжиг и др.).

Негативные особенности **ПС** не являются определяющими и могут быть устранены или сведены к минимуму разработкой и внедрением рациональных технологических режимов и конструктивных решений.

Основной гидравлической характеристикой **ПС** слоя является кривая псевдоожижения, представляющая собой зависимость между его гидравлическим сопротивлением и фиктивной скоростью ожижающего агента (рис. 2).

Кривую, показанную на рис. 2, а, принято называть кривой идеального псевдоожижения монодисперсного слоя твёрдых частиц сыпучего (зернистого) материала, т. е. частиц одинакового размера. Учитывая зависимость от значений скорости w_{ϕ} на ней различают области фильтрации ожижа-

ющего агента через неподвижный слой ($0 < w_{\phi} < w_{кр1}$), псевдооживления ($w_{кр1} < w_{\phi} < w_{кр2}$) и уноса ($w_{\phi} > w_{кр2}$).

Рабочая (фиктивная) скорость w_{ϕ} – скорость потока оживающего агента, отнесённая ко всему поперечному сечению аппарата.

Действительная скорость газа в каналах между частицами связана с рабочей скоростью соотношением: $w = w_{\phi} / \varepsilon$.

Скорость $w_{кр1}$ называется скоростью начала псевдооживления. При достижении рабочей скорости этой величины слой материала переходит из неподвижного в псевдооживлённое состояние.

Скорость $w_{кр2}$ – скорость витания или уноса, при которой частицы зернистого слоя выносятся из аппарата КС.

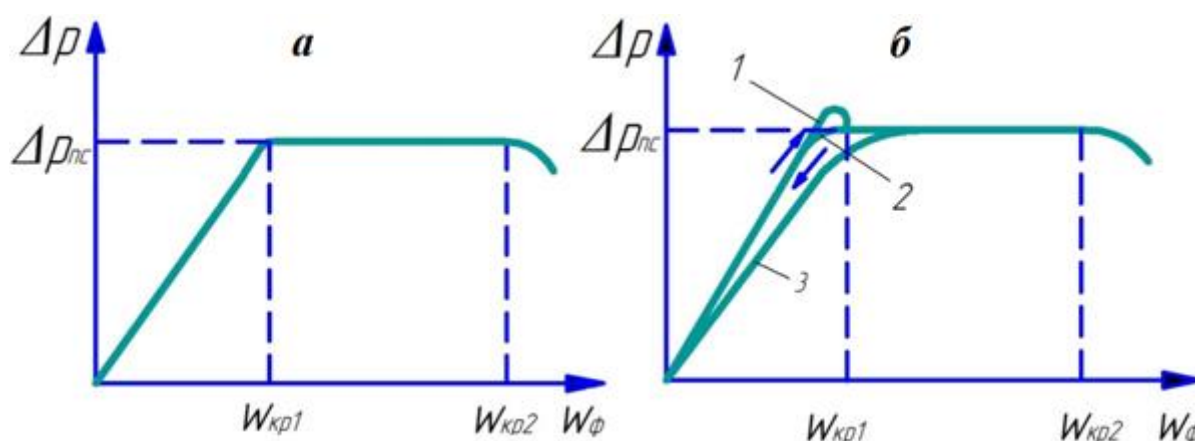


Рис. 2. Кривые псевдооживления:

а – идеальная; *б* – реальные:

- 1 – для монодисперсного зернистого слоя при увеличении w_{ϕ} ;
- 2 – для перехода от неподвижного слоя к псевдооживлённому;
- 3 – для полидисперсного ПС

Реальная кривая псевдооживления (рис. 2, б) монодисперсного слоя сыпучего (зернистого) материала, т. е. слоя с частицами одинакового размера, отличается от идеальной тем, что в момент перехода в псевдооживлённое состояние имеет место скачок давления (кривая 1), который объясняется затратой дополнительной энергии на преодоление сил сцепления между частицами. Величина этого пика зависит от формы и состояния поверхности твёрдых частиц, а также плотности их упаковки. В случае снижения скорости w_{ϕ} переход от ПС к неподвижному происходит по кривой 2, на которой пик отсутствует. В случае псевдооживления полидисперсного зернистого слоя (слоя с частицами разного размера) чётко выраженная скорость $w_{кр1}$ отсутствует (кривая 3), так как переход слоя в псевдооживлённое состояние происходит постепенно (пофракционно) – от мелких к крупным.

2. Основные характеристики зернистого слоя сыпучего материала

Зернистый слой твёрдого сыпучего материала занимает больший объём V , чем суммарный объём его твёрдых частиц V_T . Разность между этими величинами является объёмом пустот между частицами. Отношение объёма пустот между частицами к общему объёму слоя, называется **порозностью слоя** и определяется соотношением:

$$\varepsilon = \frac{V - V_T}{V} = 1 - \frac{V_T}{V}. \quad (2.1)$$

Если слой частиц является неподвижным, то $V = V_0$ – объём неподвижного слоя. Порозность неподвижного слоя является функцией формы, размеров частиц, способа их укладки и уплотнения. По теоретическим оценкам для сферических частиц одного диаметра она равна $\varepsilon = 0,259 \div 0,476$.

Относительная пористость частиц (внутренняя пористость) ε_{BH} определяется как отношение объёма пустот внутри частиц к их общему объёму.

Порозность слоя оказывает влияние на гидродинамические характеристики **ПС**, в то время, как относительная порозность влияет лишь на плотность твёрдых частиц.

В связи с наличием пустот как в слое, так и внутри частиц, для сыпучего материала следует различать истинную, насыпную и кажущуюся плотность.

Истинная плотность – плотность твёрдой фазы определяется отношением массы твёрдого вещества M_T к его объёму:

$$\rho_T = \frac{M_T}{V_T}. \quad (2.2)$$

Насыпная плотность – плотность свободного насыпного слоя дисперсного материала определяется взвешиванием материала, занимающего известный объём и зависит от плотности зернистого материала и порозности слоя:

$$\rho_{НАС} = \frac{M_T}{V}. \quad (2.3)$$

Кажущаяся плотность – плотность твёрдых частиц с учётом их внутренней пористости определяется отношением массы твёрдого вещества к объёму, занимаемому материалом V_M :

$$\rho_{КАЖ} = \frac{M_T}{V_M}. \quad (2.4)$$

Разница между истинной и кажущейся плотностями материала объясняется наличием внутренних пор в частицах: $\rho_T > \rho_{КАЖ} > \rho_{НАС}$.

Тогда можно выразить порозность неподвижного слоя через соответствующие плотности:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{\text{НАС}}}{\rho_T}, \quad \text{где} \quad \rho_{\text{НАС}} = \rho_T \cdot (1 - \varepsilon_0). \quad (2.5)$$

Большинство сыпучих материалов со сферической формой частиц в неподвижном состоянии имеют порозность $\varepsilon_0=0,4$.

Аналогичная связь существует между ρ_T , $\rho_{\text{КАЖ}}$ и $\varepsilon_{\text{ВН}}$:

$$\varepsilon_{\text{ВН}} = 1 - \frac{\rho_{\text{КАЖ}}}{\rho_T}, \quad \text{где} \quad \rho_{\text{КАЖ}} = \rho_T \cdot (1 - \varepsilon_{\text{ВН}}). \quad (2.6)$$

3. Методика расчёта контрольно-семестровой работы

1) Плотность ожижающего газа при рабочей температуре определяется следующим образом:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273}{273 + T}, \quad (3.1)$$

где ρ_0 – плотность ожижающего газа при 0 °С, кг/м³;

p_0 – абсолютное давление ожижающего газа при 0 °С, Па;

p – абсолютное рабочее давление ожижающего газа (т. е. давление при его рабочей температуре), Па;

T – рабочая температура ожижающего газа, °С.

Для воздуха в качестве ожижающего газа $\rho_0=1,293$ кг/м³, $p_0=1,013 \cdot 10^5$ Па.

2) Вязкость ожижающего газа при рабочей температуре находится по формуле Сатерленда:

$$\mu = \mu_0 \cdot \frac{273 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}, \quad (3.2)$$

где μ_0 – вязкость ожижающего газа при 0 °С, Па·с;

C – постоянная Сатерленда.

Для воздуха в качестве ожижающего газа $\mu_0=1,73 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $C=124$.

3) Значение критерия Архимеда рассчитывается по формуле:

$$Ar = \frac{d_{\text{э}}^3 \cdot g \cdot \rho_T \cdot \rho}{\mu^2}, \quad (3.3)$$

где $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр твёрдых частиц, м;

ρ_T – плотность твёрдых частиц, кг/м³.

4) По найденному значению критерия Архимеда при $\varepsilon_0=0,4$ по графику рис. 3 определяется значение критерия Лященко $Lu_{\text{кр1}}$, соответствующее первой критической скорости газового потока.

5) Значение скорости начала псевдоожижения рассчитывается как:

$$w_{\text{кр1}} = \sqrt[3]{\frac{Lu_{\text{кр1}} \cdot g \cdot \rho_T \cdot \mu}{\rho^2}} \quad (3.4)$$

или исходя из универсальной формулы О. М. Тодеса с учётом $\varepsilon_0=0,4$:

$$Re_{\text{кр1}} = \frac{w_{\text{кр1}} \cdot d_{\text{э}} \cdot \rho}{\mu},$$

$$w_{кр1} = \frac{\mu}{d_3 \cdot \rho} \cdot \left(\frac{Ar \cdot \varepsilon_0}{18 + 0,576 \cdot \sqrt{Ar \cdot \varepsilon_0}} \right). \quad (3.5)$$

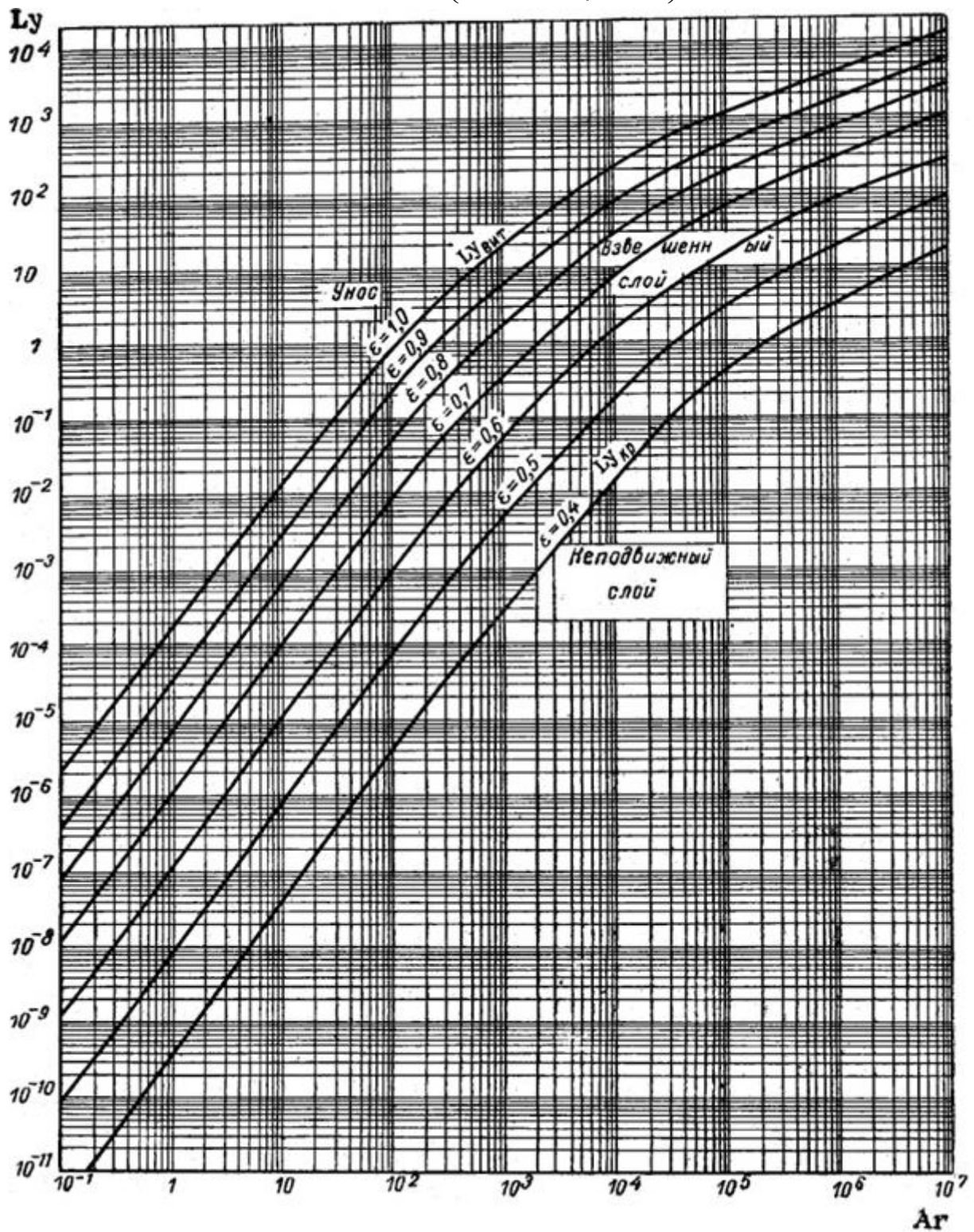


Рис. 3. Зависимость $Ly=f(Ar, \varepsilon)$:
 $Ly_{кр} = Ly_{кр1}$; $Ly_{лит} = Ly_{кр2}$

6) Определяется рабочая скорость ожижающего газа в зависимости от числа псевдоожижения W , значение которого выбирается из диапазона $1,6 \div 2,2$:

$$w = W \cdot w_{кр1}. \quad (3.6)$$

7) Корректируются значения критериев Лященко и Рейнольдса для принятого значения числа псевдоожижения:

$$Ly = W^3 \cdot Ly_{кр1}, \quad (3.7)$$

$$Re = W \cdot Re_{кр1}. \quad (3.8)$$

8) Порозность **ПС** определяется по графику рис. 3 (по найденному значению критерия Лященко Ly с учётом значения критерия Архимеда Ar) или по уравнению:

$$\varepsilon = \left(\frac{0,3 \cdot Re + \sqrt{(0,3 \cdot Re)^2 + 18 \cdot Re}}{\sqrt{Ar}} \right)^{0,42}. \quad (3.9)$$

9) Действительная скорость ожижающего газа в свободном сечении **ПС** рассчитывается следующим образом:

$$w_o = w / \varepsilon. \quad (3.10)$$

10) Диаметр аппарата рассчитывается следующим образом.

Если расход ожижающего газа даётся в нормальных $\text{м}^3/\text{с}$, т. е. при 0°C и $0,1013 \text{ МПа}$, то при рабочих условиях его объёмная производительность будет равна:

$$Q = Q_0 \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \frac{273 + T}{273}. \quad (3.11)$$

Тогда площадь поперечного сечения аппарата **КС** будет равна:

$$S = Q / w, \quad (3.12)$$

а диаметр аппарата **КС** –

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}. \quad (3.13)$$

Рассчитанное значение диаметра округляется до ближайшего стандартного значения и площадь поперечного сечения уточняется:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}.$$

11) Высота и порозность неподвижного слоя сыпучего (зернистого) материала рассчитываются следующим образом.

Так как масса твёрдого материала в аппарате **КС** составляет:

$$M_T \cdot \tau_0, \quad (3.14)$$

где τ_0 – среднее время его пребывания в аппарате **КС**, с,

а объём неподвижного слоя –

$$V_0 = M_T / \rho_{нас}, \quad (3.15)$$

то высота неподвижного слоя сыпучего (зернистого) материала определяется по формуле:

$$h_H = V_0 / S. \quad (3.16)$$

Порозность неподвижного слоя равна:

$$\varepsilon_H = 1 - \frac{\rho_{HAC}}{\rho_T}. \quad (3.17)$$

12) Определяется высота **КС** при заданном числе псевдоожижения W :

$$h = \frac{1 - \varepsilon_H}{1 - \varepsilon} \cdot h_H. \quad (3.18)$$

13) Наименьшая высота **ПС**, состоящего из эквивалентных шаровых твёрдых частиц и соответствующая первой критической скорости оживающего агента, т. е. при $w = w_{кр1}$ и $\varepsilon_0 = 0,4$, равна:

$$h_0 = \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon_0} \cdot h. \quad (3.19)$$

14) Гидравлическое сопротивление **ПС** определяется по формуле:

$$\Delta p_{ПС} = \rho \cdot g \cdot (1 - \varepsilon_H) \cdot h_H = \rho \cdot g \cdot (1 - \varepsilon) \cdot h = \rho \cdot g \cdot (1 - \varepsilon_0) \cdot h_0. \quad (3.20)$$

15) Гидравлическое сопротивление газораспределительной решётки рассчитывается следующим образом:

$$\Delta p_{РЕШ} = \frac{0,503 \cdot w_0^2 \cdot \rho \cdot (1 - \varphi^2)}{C^2}, \quad (3.21)$$

где w_0 – скорость оживающего газа в отверстиях решётки при её живом сечении φ :

$$w_0 = \frac{w}{\varphi}, \quad (3.22)$$

C – коэффициент сопротивления решётки, определяемый при заданных диаметре отверстий решётки d_0 и толщине решётки δ в зависимости от отношения диаметра к толщине d_0/δ по рис. 4.

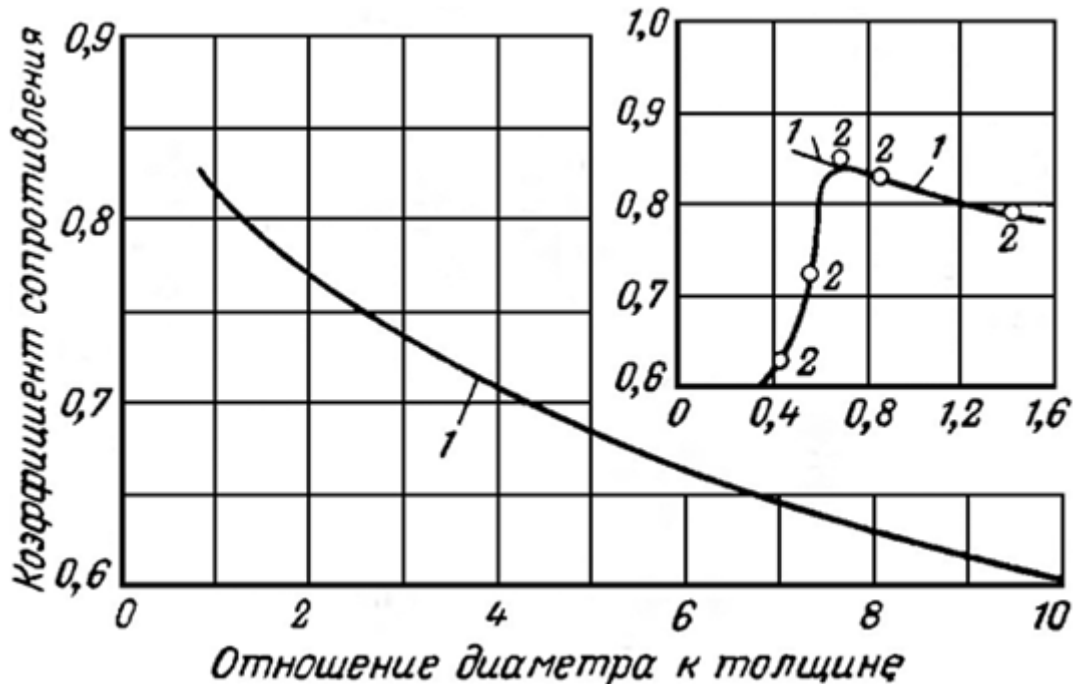


Рис. 4. Коэффициент сопротивления газораспределительных решёток:
1 – данные Г. Хьюмарка и Х. О'Коннела; 2 – данные Д. И. Орошко и др.

16) Общее гидравлическое сопротивление аппарата **КС**:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ТС}} + \Delta p_{\text{РЕШ}} . \quad (3.23)$$

Все расчёты необходимо выполнять в соответствии с международной системой единиц измерения СИ. Оформление работы производить в соответствии с требованиями СТП ВолгГТУ. После проведённых расчётов согласно индивидуальному варианту задания в соответствии с нормами ЕСКД составляется эскиз аппарата (рис. 5).

Существуют следующие типы конструкций корпусов аппаратов **КС**:

- 1) аппараты с вертикальными стенками постоянного кругового, квадратного или прямоугольного сечения;
- 2) аппараты с расширенной сепарационной частью для уменьшения уноса твёрдых частиц;
- 3) аппараты с расширенной рабочей зоной для использования при небольших размерах, так как в больших аппаратах конусность не дает значительного эффекта снижения скорости (угол наклона стенок не рекомендуется делать более $10 \div 20^\circ$).

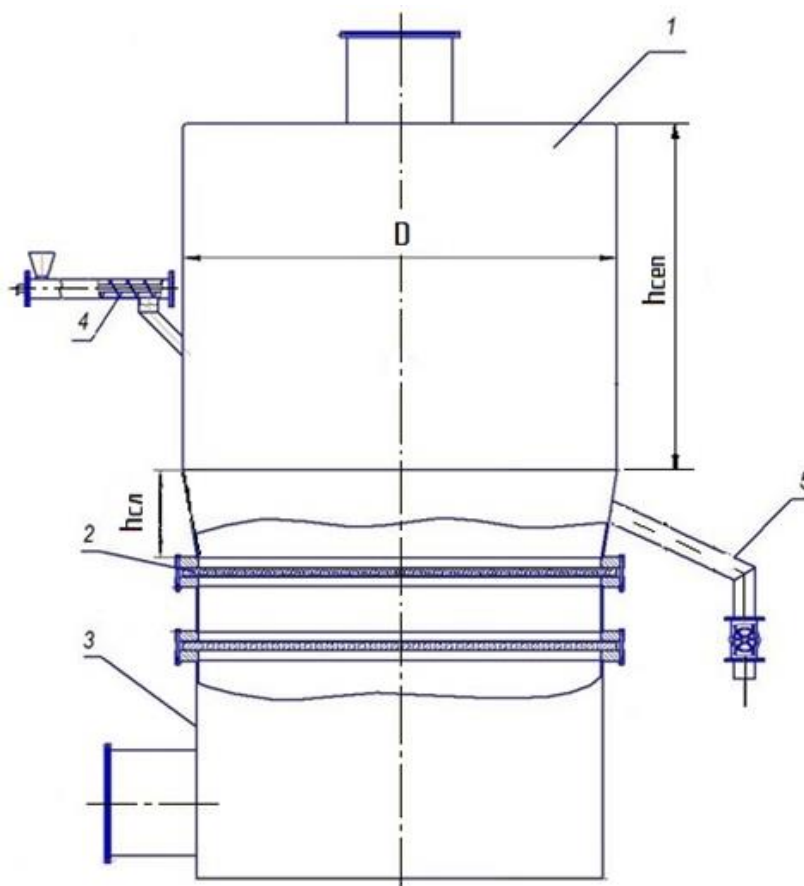


Рис. 5. Пример эскиза аппарата **КС** (сушилка **КС**):

- 1 – корпус; 2 – газораспределительная решётка; 3 – камера смешения ожижающего (сушильного) агента; 4 – узел непрерывной загрузки зернистого материала; 5 – узел непрерывной выгрузки зернистого материала

4. Задание контрольно-семестровой работы

Определить размеры и гидравлическое сопротивление аппарата **КС**:

- производительность аппарата по зернистому материалу G , кг/ч;
- насыпная плотность зернистого материала $\rho_{нас}$, кг/м³;
- плотность твёрдых частиц ρ_T , кг/м³
- температура оживающего воздуха t , °С;
- эквивалентный диаметр твёрдых частиц $d_{э}$, мм;
- среднее время пребывания зернистого материала в аппарате τ_0 , мин.;
- расход воздуха в рабочих условиях Q_0 , м³/час;
- толщина газораспределительной решётки δ , мм;
- диаметр отверстий газораспределительной решетки d_0 , мм.

Живое сечение газораспределительной решётки $\phi=0,015$. Составить эскиз аппарата.

Таблица 2

Индивидуальные варианты задания для выполнения
контрольно-семестровой работы

Вариант	G , кг/час	$\rho_{нас}$, кг/м ³	ρ_T , кг/м ³	t , °С	$d_{э}$, мм	τ_0 , мин.	Q_0 , м ³ /час	δ , мм	d_0 , мм	Материал
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2550	1300	1800	150	1,2	10	4100	3,0	1,0	Мел
2	2600	1400	2300	160	1,2	8	4200	3,0	1,0	Кварц
3	2650	1020	1600	170	1,2	7	4300	3,0	1,0	Соль
4	2700	800	1200	180	1,2	11	4350	3,0	1,0	Сода
5	2750	1250	2000	190	1,2	12	4400	3,0	1,0	Гипс
6	2800	3200	4800	200	1,5	10	4450	4,0	1,3	Колчедан
7	2850	850	1300	180	1,5	8	4500	4,0	1,3	Уголь
8	2900	1080	1800	170	1,5	12	4550	4,0	1,3	Соль
9	2950	1180	1800	150	1,5	15	4600	4,0	1,3	Песок
10	2900	1250	1900	120	1,5	12	4650	3,0	1,3	Песок
11	2850	800	1400	180	1,0	10	4700	2,0	0,8	Уголь
12	2800	1380	1900	150	1,0	8	4750	2,0	0,8	Гипс
13	2750	1200	1700	180	1,0	12	4800	2,0	0,8	Мел
14	2700	800	1300	200	1,0	15	4850	2,0	0,8	Сода
15	2650	1450	2200	220	1,0	10	4900	2,0	0,8	Кварц
16	2600	3200	4800	200	1,2	12	4950	2,5	1,0	Колчедан
17	2550	1000	1550	160	1,2	15	4950	2,5	1,2	Соль
18	3000	1250	1650	20	1,5	10	5000	2,5	1,2	Мел
19	3000	1350	1850	180	1,5	12	5050	2,5	1,2	Кварц
20	3050	1000	1400	160	1,5	14	5100	2,5	1,2	Соль
21	3100	820	1200	120	1,5	16	5000	2,5	1,2	Сода
22	3150	1200	1600	200	1,5	14	4900	2,5	1,2	Гипс
23	3200	3250	4200	180	1,0	12	4850	2,0	0,8	Колчедан
24	3000	880	1150	160	1,0	10	4800	2,0	0,8	Уголь
25	3000	1100	1600	140	1,0	12	4700	2,0	0,8	Соль
26	2900	1220	1900	120	1,0	14	4600	2,0	0,8	Песок

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
27	2800	1300	1900	140	1,0	10	4500	2,0	0,8	Песок
28	2700	800	1200	160	1,2	11	4500	2,0	1,0	Уголь
29	3000	1380	1800	180	1,2	13	4600	2,0	1,0	Гипс
30	2600	1200	1800	200	1,2	10	4700	2,0	1,0	Мел
31	2500	800	1400	220	1,2	10	4300	2,0	1,0	Сода
32	2400	1050	1350	150	1,4	10	4200	2,5	1,0	Соль
33	2300	1300	1800	170	1,3	10	5000	2,0	1,0	Кварц
34	2200	3200	4000	180	1,4	12	4500	2,5	1,2	Колчедан
35	2100	1300	2000	150	1,0	10	4000	2,0	0,8	Мел
36	2000	1450	2500	150	1,0	15	3800	3,0	0,8	Кварц
37	2000	1020	1900	180	1,0	10	3700	2,0	0,8	Соль
38	2000	800	1400	120	1,0	15	3600	3,0	0,8	Сода
39	2100	1250	2100	100	1,0	10	3500	2,0	0,8	Гипс
40	2200	3300	5000	150	1,2	15	4000	3,0	1,0	Колчедан
41	2000	850	1420	120	1,2	10	4000	2,0	1,0	Уголь
42	2400	1400	2450	145	1,2	12	3800	2,5	1,2	Кварц
43	2300	1050	2200	150	1,2	10	3000	2,0	1,0	Соль
44	2100	1200	1800	140	1,2	15	4000	3,0	1,0	Песок
45	2200	1200	2200	140	1,2	10	3500	2,0	1,0	Селитра

Список рекомендуемой литературы для самостоятельного изучения

1. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособ. для студ. хим.-технолог. спец. вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2013. – 576 с.

2. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вызов / А. Г. Касаткин. – изд. 14-е, стер. – М.: Альянс, 2008. – 750 с.

3. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдоожижения / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Г. Кваша; под ред. Н. И. Гельперина. – М.: Химия, 1967. – 664 с.

4. Псевдоожижение / под ред. И. Дэвидсона, Д. Харрисона, пер. с англ., под ред. Н. И. Гельперина. – М.: Химия, 1974. – 728 с.

5. Расчёты аппаратов кипящего слоя: справочник / под ред. И. П. Мухлёнова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.

6. Кунии, Д. Промышленное псевдоожижение / Д. Кунии, О. Левеншпиль, пер. с англ. В. С. Шепелева, А. М. Гулюка, под ред. М. Г. Слинько, Г. С. Яблонского. – М.: Химия, 1976. – 448 с.

7. Катализ в кипящем слое / под ред. И. П. Мухлёнова. – Л.: Химия, 1971. – 312 с.