

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным и практическим занятиям  
по дисциплине «Огнеупорные материалы»  
(для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия»,  
магистерской программы «Металлургия стали»)

Донецк, 2018

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Металлургия стали и сплавов»

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторным и практическим занятиям  
по дисциплине «Огнеупорные материалы»  
(для студентов направления подготовки 22.04.02 «Металлургия»,  
магистерской программы «Металлургия стали»)

Рассмотрено на заседании  
кафедры «Металлургия стали  
и сплавов».

Протокол № 9 от 28.03.2018 г.

Донецк, 2018



## СОДЕРЖАНИЕ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	4
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АККУМУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОГНЕУПОРА.....	10
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРО- ПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА.....	12
4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ФУТЕРИВКИ ЦИЛИНДРОВОЙ ЧАСТИ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА.....	20
5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТУ ТЕПЛОПРОВОДИМОСТИ ТЕЛ САМОЙ ПРОСТОЙ ФОРМЫ.....	24
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК.....	33

## 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Огнеупорами называют материалы, которые изготавливаются на основе минерального сырья и отличаются способностью сохранять без существенных нарушений свои функциональные свойства в разнообразных условиях службы при высоких температурах. К огнеупорным материалам относят материалы с огнеупорностью выше  $1580^{\circ}\text{C}$ ; в некоторых странах нижний предел огнеупорности составляет  $1500^{\circ}\text{C}$ , в США она не нормируется.

Значение огнеупоров в народном хозяйстве определяется тем, что без них практически не есть целесообразного способа поддержки высоких температур в промышленных печах. В индустриально развитых странах частица стоимости огнеупоров составляет приблизительно 0,1% валового национального продукта и составляет до 8-10% в себестоимости металла.

Классификация огнеупоров производится по основным признакам: химико-минеральному составу, огнеупорности, пористости, способу формирования, термической обработке, форме и размерам.

В зависимости от огнеупорности огнеупоры подразделяют на материалы средней ( $1580-1770^{\circ}\text{C}$ ), высокой ( $1770-2000^{\circ}\text{C}$ ) и высшей ( $>2000^{\circ}\text{C}$ ) огнеупорности.

У табл. 1 представлена классификация огнеупорных изделий по химико-минералогическому составу. Огнеупорные материалы бывают искусственными изделиями (цеглами, блоками, отдельными изделиями) и неформуемыми, к которым относят огнеупорные бетоны смеси и массы, материалы для покрытий, мертели, заправочные порошки, волокнистые теплоизоляционные материалы, огнеупорный цемент, специальные матрицы, наполнители и другие, специальные набивные и массы, которые формируются, которые применяют для огнеупорных бетонов и торкретирования. Огнеупорные материалы кроме этого классифицируют за формой и размерами, пористости, способу формирования, характера термической обработки. Например, по способу формирования огнеупоры подразделяют на полусухого формирования из порошковых малопластичных масс методами гидравлического прессования (стандартные кирпичи для миксеров и ковшей); виброуплотнение или трамбование (набивная футеровка олов доменных печей, гнездовые блоки); пластичного формирования из пластичных масс методами выдавливания (фильтры для жидких металлов), допрессовки; литые и вибролитые из текучих масс (керамобетон, пеноматериалы для теплоизоляции); что саморозтрискуються (дилатантні бетонні смеси для футерівок сталковшів); центробежного формування (кварцеві сталеразливні стакани), а также горячего прессования; торкретовані (торкрет слой в проковшах); напиляні из плазмы (защитний износостойкий слой из тугоплавких нанопорошков на огнеупорах с повышенными требованиями - стаканов и стопоров МБЛЗ) и др.

Огнеупорные изделия различают также по назначению, например, шамотные изделия для кладки доменных печей, безстопорного разливания стали, внепечного вакуумования и тому подобное

В зависимости от химических свойств огнеупорных материалов их разделяют на три основных вида - кислые, нейтральные и основные.

Таблица 1 - Классификация огнеупорных изделий по химико-минералогическому составу

Тип	Группа	Содержание определяющих химических компонентов на прожаренное вещество %	Примечание
1. Кремені-земісті	Из кварцевого (кремнеземного) стекла	$SiO_2 \geq 97$	Относятся огнеупоры из кварцитов и кварцевых песков
	Динасу	$SiO_2 > 93$	
	Динасу с добавками	$80 \leq SiO_2 \leq 93$	
	Кварцевые	$SiO_2 \geq 85$	
2. Алюмо-силікатні	Полукислые	$65 < SiO_2 < 85, 14 < Al_2O_3 < 28$	Алюмосиликатни огнеупоры с массовой частицей $Al_2O_3$ больше 45% совмещают за названием "высокоглиноземистые"
	Из глиноземисто-кремнеземного стекла	$40 \leq Al_2O_3 \leq 90$	
	Шамотные	$28 < Al_2O_3 \leq 45$	
	Муллитокремнеземисты	$45 < Al_2O_3 \leq 62$	
	Муллитовы	$62 < Al_2O_3 \leq 72$	
Муллитокорундовы	$72 < Al_2O_3 \leq 95$		
3. Глиноземистые	Корундовые Корундовые с добавками	$Al_2O_3 > 95$ $Al_2O_3 \geq 85$	Относятся огнеупоры в аморфном (стекловидном состоянии)
4. Глиноземо-Вапняні	Алюминаткальцийовы	$Al_2O_3 > 65, 10 < CaO < 35$	
5. Високо-магнезиальні	Периклазу	$MgO \geq 85$	Огнеупоры типов 5, 6, 7, 8 совмещают под общим названием "магнезиальні"
6. Магнезиаль-носілікатні	Периклазофорстеритовы	$50 < MgO < 85, SiO_2 \geq 7$	
	Форстериту	$50 < MgO \leq 65, 20 < SiO_2 \leq 45$	
	Форстеритохромитовы	$45 < MgO \leq 60, 15 < SiO_2 \leq 30$ $5 < Cr_2O_3 \leq 15$	
7. Магнези-альношпінелідні	Периклазохромитовы	$MgO \geq 60, 5 \leq Cr_2O_3 \leq 20$	
	Хромитопериклазовы	$40 < MgO < 60, 15 \leq Cr_2O_3 \leq 35$	
	Хромитовы	$40 \leq MgO, Cr_2O_3 > 30$	
	Периклазошпинелидни	$50 < MgO < 85, 5 \leq Cr_2O_3 \leq 20$ $Al_2O_3 \leq 25$	
	Периклазошпинельни	$40 < MgO, 5 \leq Al_2O_3 \leq 55$	
Шпинельни	$25 \leq MgO \leq 40,$ $55 < Al_2O_3 \leq 70$		
8. Магнезиаль-новапняні	Периклазоизвестковые	$50 < MgO < 85, 10 \leq CaO < 45$	
	Периклазовапняни стабилизированы	$35 \leq MgO \leq 75, 15 < CaO \leq 40$ $CaO/SiO_2 > 2$	
	Вапнянопериклазовы	$10 \leq MgO \leq 50, 45 \leq CaO \leq 85$	
9. Известковые	Известковые	$CaO \geq 85$	
10. Хромистые	Хромоксидни	$Cr_2O_3 \geq 90$	
	Високохромисти	$60 < Cr_2O_3 < 90$	
11. Цирконісті	Оксидциркониевы	$ZrO_2 > 85$	
	Бадделейтокорундовы	$20 \leq ZrO_2 \leq 90, Al_2O_3 \leq 65$	
	Цирконовые	$ZrO_2 > 50, SiO_2 > 25$	
	Оксидцирконий-вмещающие	$ZrO_2 \leq 20$	
12. Окислы	Окислы	$BeO, MgO, CaO, Al_2O_3, Cr_2O_3, SiO_2, ZrO_2,$ окислы P3э, $Y_2O_3, SnO_2, HfO_2, ThO_2, UO_2$ но др. или соединения, тверди растворы и смеси на их основе - не менее 97.	
	Оксидвмищаючи	Сиалоны, оксинитриды, оксикарбиды но др. - не менее 97	
13. Вуглицеви	Графитизировавшие	$C > 96$	
	Угольные	$C > 85$	
	Вуглецьвмищаючи	$4 \leq C \leq 40$	
14. Карбід-кремнієві	Карбідкремнієви	$SiC > 70$	
	Карбідкремнія-вмищаючи	$15 \leq C \leq 70$	
15. Бескислородные	Бескислородные	Нитриды, бориды, карбиды, силициды, и инци бескислородные соединения (в частности углицевых) - не менее 50	

Поводом для такого деления служит способность при высоких температурах кислых и основных огнеупоров взаимодействовать между собой. Определяющим компонентом кислых огнеупоров является  $\text{SiO}_2$ , основных –  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ . Чисто нейтральными являются вуглицеві огнеупоры; к ним относят также алюмосилікатні огнеупоры, которые содержат больше 45%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и хромвміщаючі, в состав которых входит больше 15%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

С учетом зависимости многих свойств огнеупорных изделий от пористости установлено 8 групп пористости, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Классификация огнеупорных изделий по пористости

Наименование изделий	Пористость	
	открытая	общая
Особоцильни	До 3	-
Высокоплотные	Свыше 3 до 10	-
Пидвищеноцильни	Свыше 10 до 16	-
Плотнящие	Свыше 16 до 20	-
Среднецильни	Свыше 20 до 30	-
Низькоцильни	Свыше 30	Менее 45
Высокопористые	-	От 45 до 75
Ультрапористые	-	Свыше 75

Неформуемые материалы (огнеупорные бетоны, набивные массы, огнеупорные растворы, мертели, покрытие и тому подобное) классифицируют по специальным признакам и в зависимости от назначения разделяют на группы (табл. 3).

В зависимости от максимального размера зерна неформуемые огнеупоры подразделяют на группы (табл. 4), а по типу связки по аналогии с изделиями подразделяют на группы (табл. 5).

По физическом состоянии во время поставки неформуемые огнеупоры подразделяют на сухие, пластичные и жидкотекучии. Кроме того, огнеупорные массы, покрытия и смеси, по способу нанесения, заключения и уплотнения, дополнительно подразделяют на полученных литьем, торкретированием, обмазкой, виброуплотнением, трамбованием, прессованием, напильванием, набиванием.

Кроме того огнеупорные массы, покрытия и смеси, по способу нанесения, заключения и уплотнения, дополнительно подразделяют на: полученные литьем, торкретированием, обмазкой, виброуплотнением, трамбованием, прессованием, напильванием, набиванием.

Часто применяют другую классификацию, в соответствии с которой различают:

а) мертели, что используются после затвору водой у вида растворов для связывания отдельных изделий и заполнения швов кладки. Это одна из разновидностей неформуемых огнеупоров;

Таблица 3 - Классификация неформуемых огнеупоров по специальным признакам

Группа	Характеристика	Назначение
Огнеупорные порошки и заполнители	Огнеупорные материалы определенного зернового состава	Для изготовления огнеупорных изделий, масс, мертелей, изготовления и ремонта тепловых агрегатов, теплоизоляции и др.
Огнеупорный цемент	Микрозернистые, тонкодисперсные и ультрадисперсные огнеупорные материалы, которые отвердевают после смешивания со связкой	Для изготовления бетонных изделий, смесей, масс, покрытий, и мертелей
Огнеупорные массы и смеси в т.ч. и бетонные	Маси- огнеупорные материалы, которые состоят из огнеупорных порошков и заполнителей, связки (бетонные маси-вяжущего) и в необходимых случаях добавок (пластифицирующих, структуроутворяющих но др.), готовые к применению. Смеси - огнеупорные материалы, которые состоят из огнеупорных порошков и заполнителей (бетонные смеси - также из огнеупорного цемента), которые требуют введения связки	Для изготовления изделий, в т.о. бетонных монолитных футерівок и их элементов, а также ремонтов огнеупорной кладки
Огнеупорные материалы для покрытий	Смесь тонкодисперсных огнеупорных материалов со связкой или без ее	Для нанесения в виде слоя, который не несет строительной нагрузки на рабочую поверхность огнеупорной или металлической конструкции с целью защиты ее от изнашивания
Огнеупорные мертели	Смесь мелкозернистых огнеупорных материалов с пластифицирующими добавками и без них	Для заполнения швов и связывания огнеупорных изделий в кладке
Огнеупорные кусковые и порошковые полуфабрикаты	Огнеупорные материалы, которые требуют дополнительную технологическую обработку (плавление, дробление, здрібнювання, смешивание, формирование, рассеяние, но др.)	Для изготовления огнеупоров
Волокнистые теплоизоляционные материалы	Огнеупорные материалы, которые состоят преимущественно из частиц, которые имеют форму волокна	Для изготовления теплоизоляционных изделий и футерівок, уплотнение огнеупорной кладки и заполнение компенсационных швов

Таблица 4- Классификации неформован огнеупоров по максимальному размеру зерен.

Группа	Максимальный размер зерна, мм	Группа	Максимальный размер зерна, мм
Кусковые	>40	Тонкозернистые	0,5
Грубозернистые	40	Микрозернистые	0,09
Грубозернистые	10	Тонкодисперси	0,05
Среднезернистые	5	Ультрадисперсные	0,0001
Мелкозернистые	2		



б) набивные массы, которые применяют для выполнения монолитных огнеупорных футеровок вместо кирпичной кладки. По способе выполнения и технологическим приемам набивные массы могут быть отнесены и к огнеупорным бетонам, но по ряду специфических требований их выделяют в самостоятельную группу, потому что они добывают прочность при не за счет гидравлического или химического влияния своих компонентов при нормальных температурах или сушении, а в результате керамического спекания при высоких температурах, когда в набивной массе образуется грузлий расплав, который связывает отдельные частицы в крепкий вогнетрив;

в) массы для наваривания и заправляния, которые получают путем смешивания соответствующих порошков со связкой и применяются для ремонта подин івідкосів разных печей (электросталеплавильных, мартеновских но др.);

г) огнеупорные покрытия (торкрет-маси и обмазки), которые применяются для повышения стойкости футерівки против влияния шлаков и резких колебаний температур;

д) внешние газоплотнящие покрытия, которые применяются для уплотнения внешних поверхностей кадки промышленных печей;

е) покрытия по металлу, которые защищают металлическую поверхность от разрушающего влияния разных кородиентів (газов, пыли, шлаков) при температуре эксплуатации.

Таблица 5 - Типы святок, используемые для неформуемых огнеупоров

Группа	Тип связки	Подавляющий механизм отвердевания
На неорганических связках	Глины, бентониты (в соединении с водой) и другие	Отвердевание происходит в результате коагуляционных процессов
	Вязущие, что отвердевают гидравлически	Отвердевание осуществляется в результате взаимодействия цемента с водой
	Высококонцентрированные вязкие суспензии	Отвердевание в результате полимеризации
	Растворы фосфатов, хлоридов, сульфатов, щелочных силикатов и других солей	Отвердевание происходит в результате взаимодействия с водными и другими растворами разных соединений, а также в результате поликонденсации
На органических связках	Смолы термопластичі и термореактивные, пеки, битумы, елементоорганічні соединения, латексы, сульфонат технический, клеи и тому подобное	Отвердевание происходит в результате процесса полимеризации (поликонденсации) и коксовании при нагревании

По виду инертного заполнителя, как и в случае обжиговых огнеупоров, различают огнеупорные массы, растворы и покрытия: кремнеземные (динасу), алюмосилікатні (полукислые, шамотные, високоглиноземісті, хромитопериклазові и др.), вуглицеві и др. По составі наполнитель массы, растворы и покрытия, отличаются большей разнообразностью. В

окончательном итоге всякая огнеупорный бьющийся материал может быть наполнителем.

Огнеупорные мертели и растворы бывают пластифицированными и непластифицированными. Пластифицированные растворы, как правило, содержат в 1,5-2 раза меньше количество воды, позволяют выполнять кладку с минимальной толщиной шва, имеют постоянство объема при нагревании, большую плотность, шлаковитривалість.

Использование неформуемых огнеупоров в черной металлургии обусловлено рядом экономических и социальных факторов, из которых нужно в первую очередь следует отметить возможность механизации ремонтных работ при одновременном сокращении удельных расходов на производство стали. Кроме того, в емкостях для транспортировки жидкого металла позволяет получить однородный (без швов) рабочий слой футерівки. Формирование рабочего слоя монолитной футерівки путем спекания в ходе технологического процесса обеспечивает значительную экономию энергоресурсов в результате исключения операции опавшую гладких изделий.

Наибольшее изнашивание огнеупорных футерівок отмечено в сталеплавильных агрегатах и средствах для транспортировки жидкого металла. Поэтому интерес представляет использование неформуемых огнеупоров для ремонта способом торкретирования футерівки сталеплавильных агрегатов, сталерозливочних ковшей и промежуточных ковшей МБЛЗ, а также изготовления монолитных футерівок ковшей.

Под определение неформуемых огнеупоров попадают достаточно широкий набор продуктов разного назначения, которые могут содержать больше 15 разных компонентов. Эти огнеупоры обычно классифицируют не столько по составу, сколько по способам применения, выделяя как основные группы бетоны, пластичные массы и смеси, для торкретирования.

Приблизительный химический состав огнеупорного материала можно определить по его цвету и размеру зерен. Да, например, динасу огнеупоры - желтые с зеленоватым оттенком; полукислые - бели, едва желтоватые; шамотные - светло-желтые; высокоглиноземісті - бели, мелкозернистые; периклазу - темно-красные, бури; периклазохромітові и хромопериклазові - почти черные.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АККУМУЛИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОГНЕУПОРА

Аккумулярующая способность огнеупора характеризует способность огнеупорного материала принимать при нагревании и отдавать при охлаждении футеровки теплоту. Она выражается формулой:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho_{\text{каж}} \cdot c} \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C}) \quad (1)$$

где  $\lambda$  – теплопроводимость материала, Вт/(м·°C);

$\rho_{\text{каж}}$  – средняя плотность, г/см<sup>3</sup>;

$c$  – теплоемкость, кДж/(кг·°C).

Эта величина имеет большое значение при характеристике огнеупоров, которые работают в периодических условиях (кладка печей).

Характеристика теплофизических свойств огнеупоров приведена в таблице 6

Таблица 6 – Теплофизические свойства огнеупорных изделий и материалов.

Наименование огнеупора	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>		Теплоемкость кДж/(кг·°C)	Коэффициент теплопроводимости $\lambda$ , Вт/(м·°C)
	с порами	без пор		
Графитовые изделия	1,6	2,6	0,837	162,8-40,7·10 <sup>-3</sup> ·t
Динасова кирпич	1,9-1,93	2,3-8-2	0,837+0,25·10 <sup>-3</sup> ·t	0,93+0,69·10 <sup>-3</sup> ·t
Карборунду изделия (карбофракс)	2,3-2,6	3,1-3,2	0,96+0,147·10 <sup>-3</sup> ·t	20,9-10,5·10 <sup>-3</sup> ·t
Корундовые (алундові) изделия	2,6-2,9	3,7-3,9	0,79+0,42·10 <sup>-3</sup> ·t	2,1+1,9·10 <sup>-3</sup> ·t
Рекристаллизованный корунд	3,75-3,85	3,8-3,9	-	5,8 <sup>*2</sup>
Магнезитовый кирпич	2,6-2,8	3,0-3,2	1,05+0,29·10 <sup>-3</sup> ·t	4,7-1,7·10 <sup>-3</sup> ·t
Изделию из плавимого мулиту	2,1-2,4	3,0-3,3	1,05+0,25·10 <sup>-3</sup> ·t	-
Плавимый магнезитовый кирпич	2,7-2,8	3,5-3,6	-	-
Окиснул бериллию	-	3,0	0,13+0,52·10 <sup>-3</sup> ·t	1,9-3,7 <sup>*3</sup>
Окиснул торию		10,0	0,25 <sup>*1</sup>	Очень низкий
Полукислый огнеупорный кирпич	1,85-1,95	2,5-2,6	0,88+0,23·10 <sup>-3</sup> ·t	0,87+0,52·10 <sup>-3</sup> ·t
Строительный (красный) кирпич	1,4-1,6	2,5-2,6	0,92	0,81+0,47·10 <sup>-3</sup> ·t
Силоманитови и мулитові изделия	2,2-2,4	2,8-3,0	0,84+0,25·10 <sup>-3</sup> ·t	1,69-0,23·10 <sup>-3</sup> ·t
Угольные изделия	1,35-1,5	1,8-2,1	0,837	23,3±34,9·10 <sup>-3</sup> ·t <sup>*4</sup>
Хромитова кирпич	3,0-3,2	3,8-4,2	0,84+0,29·10 <sup>-3</sup> ·t	1,28+0,41·10 <sup>-3</sup> ·t
Хромомagneзитова кирпич	2,8-2,9	3,7-3,8	-	1,9-2,1 <sup>*5</sup>
Термостойкий хромомagneзитова кирпич	2,75-2,85	3,6-3,8	-	4,1-1,11·10 <sup>-3</sup> ·t
Циркониевые изделия	3,3	4,5-5,0	0,54+0,13·10 <sup>-3</sup> ·t	1,3-0,64·10 <sup>-3</sup> ·t
Цирконовые изделия	3,2-3,3	4,0-4,5	0,63+0,13·10 <sup>-3</sup> ·t	-
Шамотный кирпич	1,8-1,9	2,54-2,62	0,88+0,23·10 <sup>-3</sup> ·t	0,84+0,58·10 <sup>-3</sup> ·t

\*<sup>1</sup> При 25 °C \*<sup>2</sup> При 100 °C \*<sup>3</sup> При 200 °C \*<sup>4</sup> До 1000 °C \*<sup>5</sup> От 0 до 70 °C

Пример: Определить, что аккумулярует способность динасового огнеупорного изделия при температуре эксплуатации 1500°C.

Решение. Для определения способности, которая аккумулярует, динасового огнеупора согласно формуле (1) нам необходимо знать плотность

пористого изделия, а также его теплоемкость и коэффициент теплопроводности. Воспользовавшись данными из табл. определим теплоемкость и коэффициент теплопроводности динаса при температуре 1500 °С:

$$c_{дин} = 0,837 + 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot t = 0,837 + 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 = 1,212 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)}$$

$$\lambda_{дин} = 0,93 + 0,69 \cdot 10^{-3} \cdot t = 0,93 + 0,69 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 = 1,965 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}.$$

С помощью уравнения (1), которое аккумулирует способность динасового огнеупорного изделия:

$$b_{дин} = \sqrt{\lambda_{дин} \cdot \rho_{каж / дин} \cdot c_{дин}} = 1,212 \cdot 1,965 \cdot 1,915 = 2,14 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5} / (\text{м}^2 \cdot \text{°С}).$$

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ РЕГУЛЯРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

Для тел самой простой" формы (неограниченная пластина, неограниченный цилиндр, пуля) при нагревании (охлаждении) в среде с постоянной температурой (предельные условия третьего рода) температурное поле в теле описывается уравнениями, которые имеют одинаковую структуру и являются суммой бесконечного ряда (ряд Фурье). Например, для неограниченной" пластины при нагревании (охлаждении) постоянной температурой среды и постоянным коэффициентом теплоотдачи температурное поле в теле описывается уравнением

$$\Theta = \frac{t_c - t}{t_c - t_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos\left(\frac{\mu_n \cdot x}{\delta}\right) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot F_0), \quad (2)$$

где:  $Q$  – относительная избыточная температура;

$$F_0 = \frac{a\tau}{\delta^2} - \text{критерий Фурье};$$

$t_c$  – температура среды;

$t_0$  – начальная температура неограниченной пластины;

$t$  – текущая температура;

$\delta$  – толщина пластины;

$x, \phi$  – соответственно, текущие координаты, и время;

$a$  – коэффициент теплопроводности пластины;

$A_n$  – начальная тепловая амплитуда;

В уравнении (2) параметр  $\mu_n$  является корнем характеристического уравнения. Для неограниченной пластины характеристическое уравнение имеет выражение:

$$\text{ctg}\mu = \frac{\mu}{Bi}, \quad (3)$$

где – критерий Био;

$a$  – коэффициент теплоотдаче от среды к пластине, или наоборот;

$\lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности пластины.

Из обзора неравенств корней характеристического уравнения каждый следующий член ряда (2) с увеличением критерия  $F_0$  будет несравненно малым относительно предыдущего, а сумма всех членов ряда будет отличаться лишь на малую величину от значения первого члена. Следовательно, начиная с некоторого значения критерия  $F_0$  для определения температурного поля можно воспользоваться уравнением:

$$\Theta = \frac{t_c - t}{t_c - t_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot U_n \cdot \exp(-m \cdot \tau) \quad (4)$$

где – множитель  $\cos\left(\frac{\mu_n \cdot x}{\delta}\right)$ ;

$m$  – комплекс что являет собой постоянное позитивное число.

Начиная с этого момента времени зависимость между относительной температурой ( $\Theta$ ) и временами ( $\tau$ ) будет описываться простой экспонентой. Логарифмируя (4) одержимо:

$$\ln(t_c - t) = -m\tau + C, \quad (5)$$

где  $C$  – параметр, который зависит от координаты ( $x$ ), начальной температуры

тела ( $t_0$ ) и температуры среды ( $t_c$ ).

При постоянных температурах  $t_0$  и  $t_c$  и фиксированной координате  $x$ , параметр  $C$  является величиной постоянная.

Из уравнения (5) выплывает, что натуральный логарифм избыточной температуры  $\ln(t_c - t)$  для всех точек тела изменяется во времени за линейным законом. При длительном нагревании (охлаждении), то есть при  $F_0 >: (\phi >:)$  температура во всех точках тела становится одинаковой и равной температуре среды (состояние теплового равновесия или стационарное состояние).

Графическая зависимость  $\ln(t_c - t)$  от времени представлена на рис. 1.

На рисунок 1 приведены кривые изменения логарифма избыточной температуры  $\ln(t_c - t)$  для фиксированных точек, в частности, в центре пластины ( $x = 0$ ) и на п поверхности ( $x = \delta$ ).

Следовательно, весь процесс нагревания (охлаждение) можно разделить на три стадии'.

Первая стадия - стадия неупорядоченного режима, который характеризуется тем, что определяющую роль в нем играет начальное распределение температуры в теле. Любая неравномерность температуры в начальном моменте отражается на ее' распределении в теле в следующие периоды.

В этот период распределение температуры, в том числе и изменение  $S = t_c - t$  во времени ( $\phi$ ), описывается уравнением (2).

В последующем (с увеличением  $\phi$ ) влияние начальных условий на следующий

распределение температуры постепенно теряется. Вместе с тем, влияние условий нагревания или охлаждения и физических свойств тела становятся определяющими. Наступает вторая стадия - стадия регулярного теплового режима. В этот период зависимость между  $(t_c - t)$  и  $\phi$  описывается простой экспонентой (рисунок 1). Для стадии регулярного теплового режима

логарифм избыточной температуры в любой точке тела изменяется во времени за линейным законом (уравнение (4)).

Третья стадия отвечает стационарному состоянию, которое имеет место при  $m \gg \dots$ .

Этот период характеризуется тем, что температура во всех точках тела одинакова и равняется температуре окружающей среды (состояние теплового равновесия).

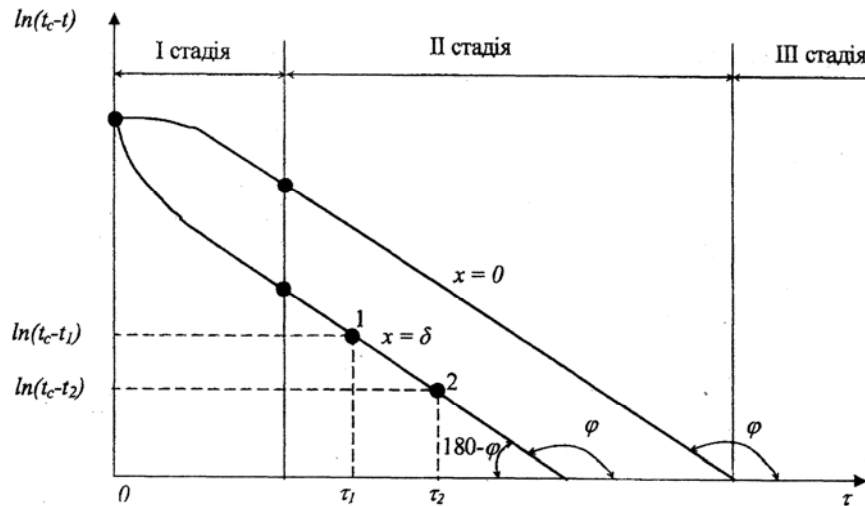


Рисунок 1– Логарифма избыточной температуры, как функция времени в процессе нагревания (охлаждение).

Нужно отметить, что графика, представленная на рис. 1 справедливые для тел любой геометрической формы.

Величина  $m$  имеет размерность  $1/c$  и называется темпом нагревания или

охлаждение. При наступлении стадии регулярного теплового режима темп нагревания (охлаждение) не зависит ни от координат, ни от времени и является постоянной величиной для всех точек тела. Численное значение темпа нагревания (охлаждение)  $m$  определяется теплофизическими свойствами тела, а также, его геометрической формой и размерами. Темп нагревания или охлаждения ( $m$ ) можно определить за формулой:

$$m = \frac{\ln(t_c - t_1) - \ln(t_c - t_2)}{\tau_2 - \tau_1} \quad (6)$$

Выражение для определения темпа нагревания (охлаждение) при интенсивном теплообмене  $Bi \gg 1$ :

для неограниченной пластины:

$$m = \alpha \cdot \left( \frac{\pi}{2\delta} \right)^2; \quad (7)$$

для неограниченного цилиндра:

$$m = 5,79 \cdot \frac{\alpha}{R^2}; \quad (8)$$

для пули:

$$m = \frac{\alpha}{R^2} \cdot \pi^2; \quad (9)$$

Отсюда имеем:

для неограниченной пластины:

$$\alpha = m \cdot \frac{1}{\left(\frac{\pi}{2\delta}\right)^2} = k_{nl} \cdot m; \quad (10)$$

для неограниченного цилиндра:

$$\alpha = m \cdot \frac{R^2}{5,79} = k_{цил} \cdot m; \quad (11)$$

для пули:

$$\alpha = m \cdot \frac{1}{\left(\frac{\pi}{R}\right)^2} = k_k \cdot m; \quad (12)$$

Коэффициенты пропорциональности  $k$  для геометрических тел конечных размеров имеют следующие значения:

для параллелепипеда со сторонами  $d_1$   $d_2$   $d_3$ :

$$k_{nl} = \frac{1}{\left(\frac{2\pi}{\delta_1}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\delta_2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi}{\delta_3}\right)^2}; \quad (13)$$

для цилиндра радиусом  $R$  и конечной длиной  $h$ :

$$k_u = \frac{1}{\frac{5,79}{R^2} + \left(\frac{\pi}{h}\right)^2}. \quad (14)$$



## 2. Установка для определения коэффициента температуры теплопроводности материалов

Общий вид и принципиальная схема установки для определения коэффициента теплопроводности монолитных и сыпучих материалов изображены на рисунках 2 и 3.

Установка включает воздушный (1) и жидкостный (2) термостаты, калориметр (3), блок соединения с объектом (4), персональную электронно-вычислительную машину (5) и дисплей (6).

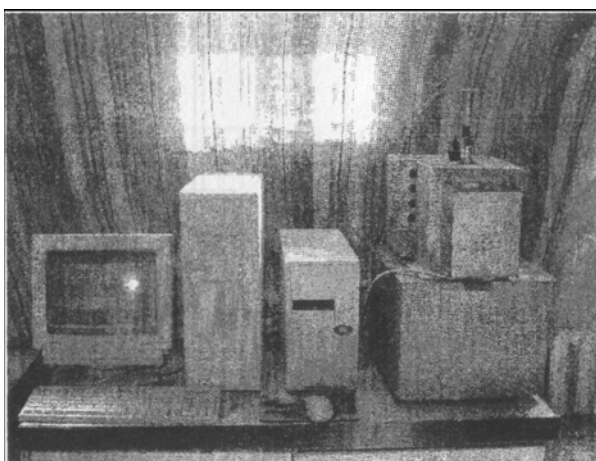


Рисунок 2 - Общий вид установки

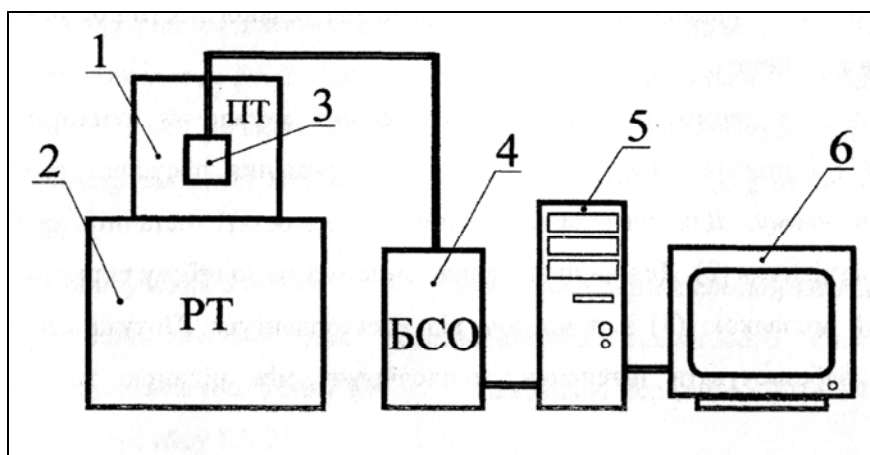


Рисунок 3 – Принципиальная схема установки.

Воздушный термостат (рисунок 4) предназначен для нагревания калориметра к равновесному состоянию с заданной температурой. Он состоит из металлического теплоизолированного корпуса (1), электронагревателя (2), вентилятора (3) и блока управления БУ-1 (4).

Крышка и днище корпуса воздушного термостату оборудованные отверстиями с заслонками (5). Отверстие в верхней крышке термостата предназначается для введения в него калориметра с исследуемым

материалом (6). Через отверстие в днище термостата нагретый калориметр подается в жидкостный термостат.

Блок управления БУ-1 (4) состоит из датчика температуры и реле-регулятора, который предназначен для поддержания заданной постоянной температуры воздуха в термостате.

Жидкостный термостат (рисунок 5) является собой металлический теплоизолированный корпус (1) и предназначен для нагрева и поддержания постоянной температуры жидкости в нем. Для нагревания жидкости в термостате последний оборудован электронагревателем (2). Для выравнивания температуры по объему жидкости термостат наделен мешалкой (3) с приводом от электродвигателя. Мощность мешалки должна обеспечивать интенсивную теплоотдачу между жидкостью и поверхностью калориметра (4). Температура жидкости в термостате фиксируется с помощью контактного термометра (5).

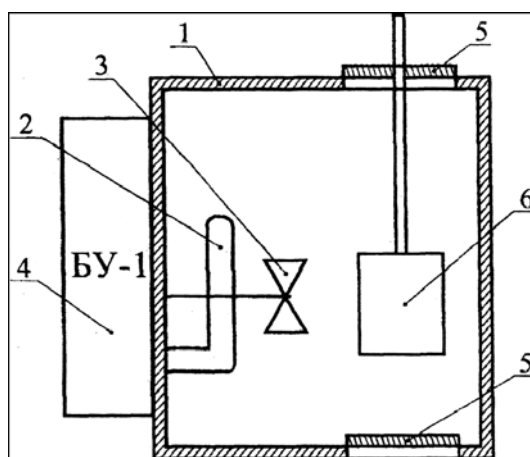


Рисунок 4 - Воздушный термостат

За жидкость в термостате используется вода (6). Если эксперименты проводятся при высоких температурах (больше  $100^{\circ}\text{C}$ ) за термостатную жидкость применяется масло. Для обеспечения стабильной температуры жидкости в процессе эксперимента объем жидкости (6) в термостате должен быть намного больше объема калориметра (4).

Для поддержания постоянной температуры жидкости в термостате последний наделенный блоком управления - БУ-2 (7).

Калориметр (рисунок 6) выполнен из червоно\* меди является собой цилиндрический сосуд (1) с внутренним диаметром  $d = 22$  ММ и высотой  $h = 55$  ММ. Толщина стенок калориметра составляет  $d = 2$  мм. Калориметр заполняется исследуемым материалом (2) в центре которого содержится один из спаев дифференциальной термопары (3). Калориметр закрыт медной крышкой (4) в центре которой есть отверстие для вводу термопары (3).

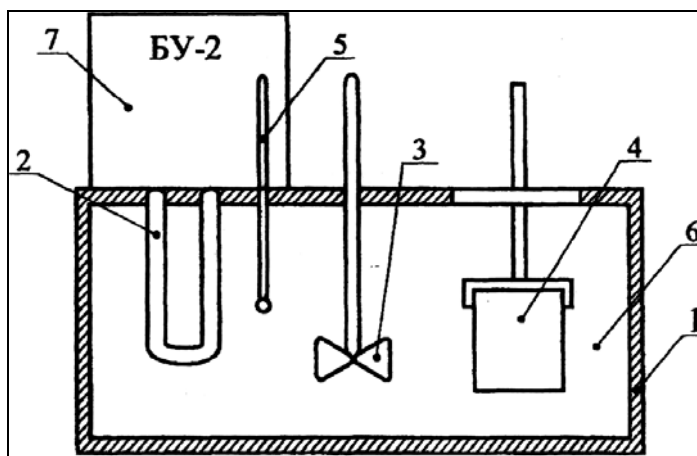


Рисунок 5 - Жидкостный термостат

Блок соединения с объектом (БСО) связан с термоперетворювачами ТП-1 и ТП-2 и предназначается для преобразовывания аналогового сигнала от термоперетворювачів в цифровую форму с последующей передачей его в ПЕОМ с помощью интерфейса RS-232.

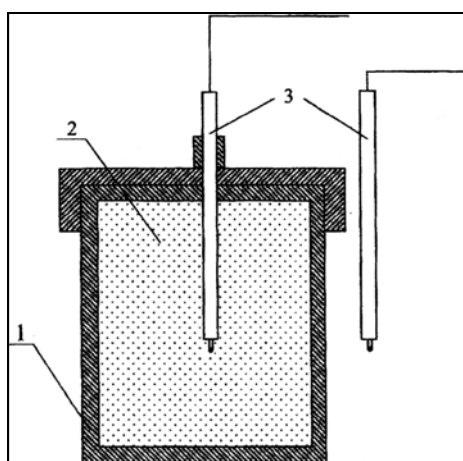


Рисунок 6 - Калориметр

С помощью сервисной" программы проводится запам'ятання переменных значений температур, визуализация их в графической форме и сохранения данные в виде файлов.

### 3. Порядок выполнения работы

При определенне коэффицента температуропроводності сыпучего материала последний загружается в калориметр. В центре калориметра устанавливается один из спаів диференційноГтермопары ТП-1. Калориметр закрывается крышкой.

При определенных коэффициента температуропроводности монолитного материала предварительно из этого материала готовится образец, который отвечает внутренней геометрической форме калориметра. Внешние размеры образца должны обеспечивать плотный контакт его внешней поверхности с внутренней поверхностью калориметра. В центре монолитного образца сверлится цилиндрический канал диаметром  $d = 2$  мм на глубину  $h = 27$  мм для введения у него одного из спаив дифференциальной термопары ТП-1.

За 15 минут до начала проведения эксперимента включается ПЕОМ и блок БСО, а также воздушный и жидкостный термостаты для прогрева. Одновременно запускается программа реестраций из директории C:/e - лаб/E - REG.EXE.

Из главного окна программы через кнопку "TOOLS" и окна "Options" определяются параметры, необходимые для работы блока БСО: номер Сопорта, номер блока ПСО параметры интерфейса та скорость передачи данные.

После проведенных операций необходимо войти в главное окно и запустить программу в режим съемки данные эксперимента. При этом должны наблюдаться изменение данных в цифровой и графической формах.

За время подготовки к эксперименту необходимо убедиться в потому, что воздушный и жидкостный термостаты вышли на необходимый температурный режим:

температура воздуха – 100оС, температура жидкости 85 оС.

После выхода на необходимую температуру воздушного термостата у него вводится для прогрева калориметр, заполненный исследуемым материалом. Прогрев считается завершенным, когда показатели термодатчиков ТП-1 и ТП-2 уравниваются с температурой воздуха в термостате ПТ (условие теплового равновесия).

По окончании прогрева калориметр перемещается из термостата ПТ в термостат РТ на необходимый уровень.

В процессе охлаждения калориметра в жидкостном термостате (РТ) фиксируется линейный отрезок на графике  $\ln(t - t_p)$  -ф, что отвечает стадии регулярного теплового режима охлаждения исследуемого материала.

На графике выбирается два фиксированных отрезка времени  $\phi_1$  и  $\phi_2$ , которым отвечают значения  $\ln(t_1 - t_p)$  и  $\ln(t_2 - t_p)$  и за формулой (6) определяется темп охлаждения.

За формулой (11) из использования (14) определяется коэффициент температуропроводности исследуемого материала.

По окончании эксперимента данные хранят в файле.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ФУТЕРИВКИ ЦИЛИНДРОВОЙ ЧАСТИ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА.

Огнеупоры в кислородных конвертерах поддаются влиянию основных шлаков, окислительно восстановительных газов, металла, при температуре ~ 1700°С и выше, и интенсивному стиранию в результате турбулентной циркуляции металла и шлаков.

Для футеривки конвертеров применяют огнеупоры системы CaO-MgO-S. В первую очередь, это - смолодоломитові, смолопериклазові и смолодоломитопериклазові безобпалювальні изделия, которые получают из обожженного доломита и периклазового порошка на смоляной связке. По мере интенсификации работы конвертеров наблюдается непрерывное увеличение соотношения MgO/CaO.

В последние годы у футерівці конвертеров применяют огнеупоры с высшим содержанием углерода (до 30%), который вводят в изделия в виде графита: БПГК (безобпалювальні периклазовуглицеві) и ПУ (периклазовуглицеві), а в качестве зв'язувальної вещества применяют фенольные связки.

Для футеривки рабочего пространства кислородного конвертера могут применяться огнеупорные изделия нормальных размеров как прямых (230Ч(114,115) Ч (65,75) мм) так и клиновых (230Ч (114,115) Ч (65Ч55; 65Ч45; 75Ч65; 75Ч55) мм) формы. Однако в последние годы наметилась тенденция по использованию для футеривки кислородных конвертеров специальных огнеупорных блоков разных размеров (например 1100Ч120Ч (190?110)), которые изготавливаются как правило по заказу.

Ориентировочное количество огнеупорных изделий, которые используются для кладки, определяют из расчетов для каждого кольца кладки. При этом необходимо определить количество изделий каждого номера с учетом его габаритов.

Пример. Определить ориентировочное количество огнеупорных изделий для футеривки цилиндрической части конвертера с внутренним диаметром  $d_k = 8760$  мм, толщиной  $l_k = 1150$  мм и высотой  $h_k = 3500$  мм

Решение. Футеривку цилиндрической части конвертера будем осуществлять из изделий как прямой (рисунок 7 а), так и трапецієподібних формы (рисунок 7 б). Линейные размеры изделий для футеривки конвертера приведены в таблице 7.

Футеривку будем выкладывать в 3 концентрических кольца (слои), причем первое кольцо будет изготовлено из изделий №1 и №2, второе из изделий №3 и №4, а третье из изделий №5 и №6.

Для определения ориентировочного количества изделий в каждом из слоев футеривки сначала рассчитаем длину окружностей конвертера и огнеупорных колец:

$$L_k = \pi \cdot d_k = 3,14 \cdot 8760 = 27506,4 \text{ мм}; (4.1)$$

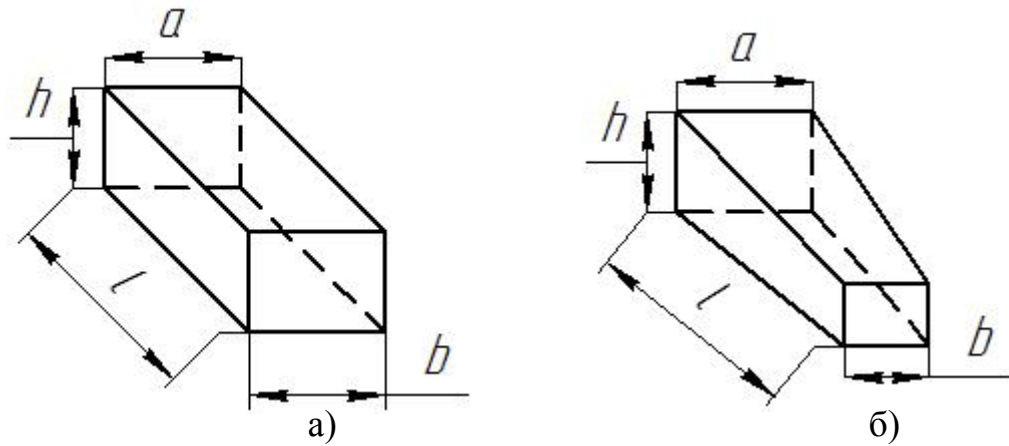


Рисунок 7 – Внешний вид огнеупоров, которые применяются для футеровки цилиндрической части конвертера.

Таблица 7 - Линейные размеры изделий для футеровки конвертера.

Наименование изделия	a, мм	b, мм	h, мм	l, мм
Изделие №1	160	160	50	230
Изделие №2	160	150	50	230
Изделие №3	150	150	50	460
Изделие №4	150	130	50	460
Изделие №5	130	130	50	460
Изделие №6	130	110	50	460

$$L1 = p \cdot (dk - 2 \cdot l1) = 3,14 \cdot (8760 - 2 \cdot 230) = 26062 \text{ мм};$$

$$L2 = p \cdot (dk - 2 \cdot l1 - 2 \cdot l3) = 3,14 \cdot (8760 - 2 \cdot 230 - 2 \cdot 460) = 23173,2 \text{ мм};$$

$$L3 = p \cdot (dk - 2 \cdot l1 - 2 \cdot l3 - 2 \cdot l5) = 3,14 \cdot (8760 - 2 \cdot 230 - 2 \cdot 460 - 2 \cdot 460) = 20284,4 \text{ мм}$$

Определим общее количество огнеупорных изделий №1 и №2, что необходимы для кладки первого кольца футеровки:

$$n_1 = \frac{L_1}{a_1} = \frac{28950,8}{160} = 163 \text{ шт. (4.2)}$$

Количество трапециевидных кирпичей для кладки первого кольца рассчитаем с помощью следующего уравнения:

$$n_{\text{№2}} = \frac{L_k - L_1}{a_2 - b_2} = \frac{27506,4 - 26062}{160 - 150} = 145 \text{ шт. (4.3)}$$

Количество прямых изделий для футеровки первого кольца рассчитаем с помощью уравнения:

$$n_{\text{№1}} = n_1 - n_{\text{№2}} = 163 - 145 = 18 \text{ шт.}$$

Используя вышеприведенную методику, определим количество огнеупорных изделий №3 и №4, а также №5 и №6 для футеровки второго и третьего кольца:

$$n_2 = \frac{L_2}{a_3} = \frac{23173,3}{150} = 155 \text{ шт}$$

$$n_{\text{№4}} = \frac{L_1 - L_2}{a_4 - b_4} = \frac{26062 - 23173,2}{150 - 130} = 145 \text{ шт}$$

$$n_{\text{№3}} = n_2 - n_{\text{№4}} = 155 - 145 = 10 \text{ шт};$$

$$n_3 = \frac{L_3}{a_5} = \frac{20284,4}{130} = 156 \text{ шт}$$

$$n_{\text{№6}} = \frac{L_2 - L_3}{a_6 - b_6} = \frac{23173,2 - 20284,4}{130 - 110} = 145 \text{ шт}$$

$$n_{\text{№5}} = n_3 - n_{\text{№6}} = 156 - 145 = 11 \text{ шт.}$$

Количество огнеупоров каждого из изделий для футеровки цилиндрической части конвертера можно определить с помощью следующего уравнения:

$$N_{\text{№n}} = n_{\text{№n}} \cdot \left( \frac{h_{\text{к}}}{h_{\text{№n}}} \right),$$

следовательно

$$N_{\text{№1}} = n_{\text{№1}} \cdot \left( \frac{h_{\text{к}}}{h_{\text{№1}}} \right) = 18 \cdot \left( \frac{3500}{50} \right) = 1260 \text{ шт (4.4)}$$

$$N_{\text{№2}} = n_{\text{№2}} \cdot \left( \frac{h_{\text{к}}}{h_{\text{№2}}} \right) = 145 \cdot \left( \frac{3500}{50} \right) = 10150 \text{ шт}$$

$$N_{\text{№3}} = n_{\text{№3}} \cdot \left( \frac{h_{\kappa}}{h_{\text{№3}}} \right) = 10 \cdot \left( \frac{3500}{50} \right) = 700 \text{ шт}$$

$$N_{\text{№4}} = n_{\text{№4}} \cdot \left( \frac{h_{\kappa}}{h_{\text{№4}}} \right) = 145 \cdot \left( \frac{3500}{50} \right) = 10150 \text{ шт}$$

$$N_{\text{№5}} = n_{\text{№5}} \cdot \left( \frac{h_{\kappa}}{h_{\text{№5}}} \right) = 11 \cdot \left( \frac{3500}{50} \right) = 770 \text{ шт}$$

$$N_{\text{№6}} = n_{\text{№6}} \cdot \left( \frac{h_{\kappa}}{h_{\text{№6}}} \right) = 145 \cdot \left( \frac{3500}{50} \right) = 10150 \text{ шт.}$$

Используя вышеприведенную методику возможно рассчитать количество огнеупоров любых типоразмеров для кладки любой части агрегата.



## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТУ ТЕПЛОПРОВОДИМОСТИ ТЕЛ САМОЙ ПРОСТОЙ ФОРМЫ.

Для тел самой простой формы (неограниченная пластина, неограниченный цилиндр и пуля) унифицировано дифференциальное уравнение теплопроводности для одномерной задачи имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{m}{x} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) \pm \frac{q_v}{C_p \rho}, \quad (15)$$

где  $t$  – температура, К;

$a$  – коэффициент температуропроводности среды, м<sup>2</sup>/с;

$x$  – соответствующая координата, м;

$\phi$  – время, с;

$m$  – коэффициент формы тела (для неограниченной пластины  $m = 0$ , для неограниченный цилиндр и пулю он приобретает значение соответственно  $m = 1$  и  $m = 2$ );

$q_v$  – мощность внутреннего источника тепла, Вт/м<sup>3</sup>;

$C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;

$\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

Имеем однослойную плоскую стенку толщиной  $\delta$ , причем ее толщина значительно меньше линейных размеров боковой поверхности (рисунку 8)

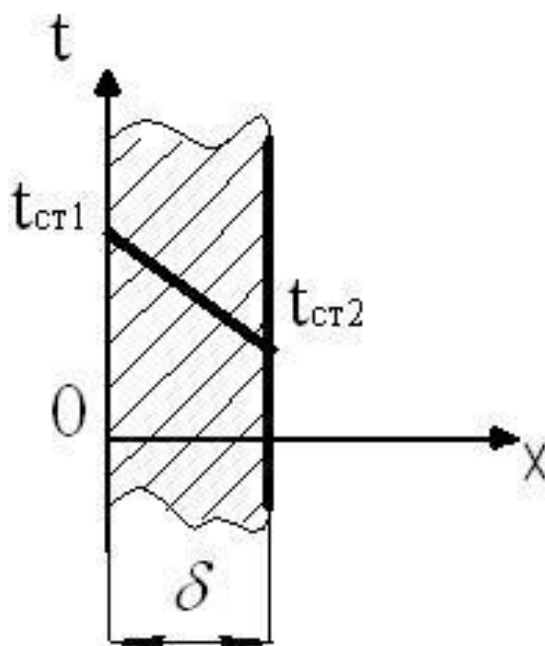


Рисунок 8 – Теплопроводимость однослойной плоской стенки.

Температура на левой и правой гранях постоянные и равные соответственно  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ . нужно знать распределение температуры в стенке и количество переданного теплопроводимостью тепла.

Для стационарного процесса  $\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0\right)$  при отсутствии внутренних источников тепла ( $qv = 0$ ) в плоской стенке ( $m = 0$ ) уравнения (1) принимает вид:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0. \quad (16)$$

Для приведенной задачи температура ( $t$ ) зависит только от координаты  $x$ , потому в уравнении (16) частичную производную можно заменить на полную:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0. \quad (17)$$

После двойного интегрирования уравнения (17) получаем:

$$\frac{dt}{dx} = C_1; \quad (18)$$

$$t = C_1 x + C_2. \quad (19)$$

Располагая начало координат на левой грани стенки, находим постоянное интегрирование  $C_1$  и  $C_2$  из условий:

$$1) \quad \text{при} \quad x = 0, \quad t = t_{c1} \quad (20)$$

$$2) \quad \text{при} \quad x = \delta, \quad t = t_{c2} \quad (21)$$

Решая совместно уравнение (19) с предельными условиями (20) и (21), одержимо:

$$C_2 = t_{c1}; \quad C_1 = \frac{t_{c2} - t_{c1}}{\delta}.$$

Подставляя значение  $C_1$  и  $C_2$  в уравнение (19), получаем распределение температуры в плоской стенке:

$$t = t_{c1} + \frac{(t_{c2} - t_{c1})}{\delta} x. \quad (22)$$

Согласно выражению (22) в плоской стенке устанавливается линейное распределение температуры.

Для определения количества переданного тепла воспользуемся уравнением Фурье:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}, \quad (23)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Но согласно (4)  $\frac{dt}{dx} = C_1$ , следовательно:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{t_{cm2} - t_{cm1}}{\delta}.$$

После подстановки  $\frac{dt}{dx}$  в уравнение (23) одержимо:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{cm1} - t_{cm2}), \text{ Вт/м}^2.$$
$$(24) q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{cm1} - t_{cm2})$$

Отношение коэффициента теплопроводности к толщине стенки называется тепловой проводимостью стенки, а обратная ей величина, которая отражается буквой  $R$ , называется термическим сопротивлением стенки:

$$R = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (25)$$

Единицей измерения термического сопротивления является К·м<sup>2</sup>/Вт. С физической точки зрения термическое сопротивление являет собой перепад температуры, которая влечет единичный поток тепла (Вт/м<sup>2</sup>). Очевидно, чем большее термическое сопротивление стенки, тем меньший тепловой поток.

Получено решение задачи теплопроводности однослойной стенки можно распространить и на случай многослойной стенки за условия, когда исключаются дополнительные термические опоры переноса тепла на стыках слоев (идеальный контакт).

Сначала рассмотрим теплопроводность двухслойной стенки из толщина мы рдел  $d_1$  и  $d_2$ , потом полученный результат распространим на стенку, которая состоит из  $n$  рдел (рисунок 9). Обозначим через  $t_{ct1}$  и  $t_{ct3}$  температуры на левой и правой гранях двухслойной стенки, а температуру на стыке слоев через  $t_{ct2}$ .

Как отмечено выше, при стационарном процессе количество тепла, которое проходит через будь какую изотермическую поверхность является величиной постоянной. Следовательно, количество тепла, которое проходит через левую и правую грани двухслойной стенки, одинаково. Поэтому

количество тепла, которое прошло через первый слой ( $q_1$ ), равняется количеству тепла, которое проходит через второй слой ( $q_2$ ), то есть:

$$q_1 = q_2 = q = \text{const.}$$

Согласно уравнению (24) можно записать:

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{cm1} - t_{cm2}),$$

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_{cm2} - t_{cm3}), \quad (26)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности слоев.

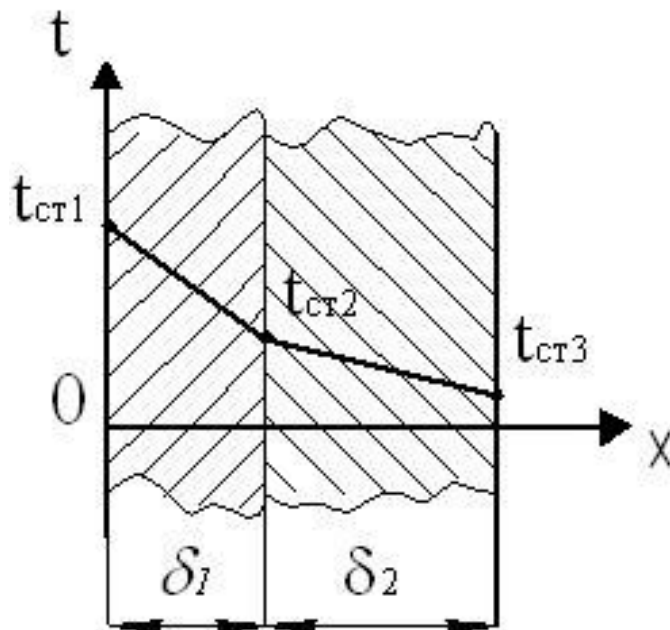


Рисунок 9 – Теплопроводность двухслойной стенки

Из условия (26) можно определить температурные перепады первого ( $t_{ст1} - t_{ст2}$ ) и второе ( $t_{ст2} - t_{ст3}$ ) рдел. Прибавив их, находим температурный перепад двухслойной стенки:

$$t_{cm1} - t_{cm3} = q \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right).$$

Из полученного выражения находим тепловой поток через двухслойную стенку:

$$q = \frac{t_{cm1} - t_{cm3}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}. \quad (27)$$

Нетрудно показать, что для трехслойной стенки уравнения (27) приобретает вид:

$$q = \frac{t_{cm1} - t_{cm4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}.$$

Для стенки, которая состоит из n слоев, можно записать:

$$q = \frac{t_{cm1} - t_{cm_{n+1}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{t_{cm1} - t_{cm_{n+1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (28)$$

$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = R_{\Sigma}$  и называется полным термическим сопротивлением многослойной стенки.

Для построения температурного поля многослойной стенки необходимо оценить температуру на стыке слоев. Система уравнений (26) позволяет определить температуру на поверхности будь какого слоя. Например температура на стыке первого и второго слоев равняется:

$$t_{cm2} = t_{cm1} - q \frac{\delta_1}{\lambda_1} = t_{cm1} - qR_1, \quad (29)$$

где  $R_1$  – термическое сопротивление первого слоя.

Из уравнения (29) vyplывает, что:

$$t_{cm1} - t_{cm2} = qR_1.$$

Следовательно температурный перепад каждого слоя определяется произведением плотности теплового потока на термическое сопротивление соответствующего слоя.

Температурное поле двухслойной стенки изображено на рис. как видим из рисунку наклон температурных линий в слоях разный. Это объясняется тем, что при одинаковом тепловом потоке слои с меньшим коэффициентом теплопроводности имеют больший температурный градиент и, следовательно, больший наклон температурной линии.

Задача 1 Дана плоская железобетонная стенка шириной  $a=5$  м, высотой  $h=2,8$  м, и толщиной  $d = 200$  мм (рисунок 10). Коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda = 1,55$  Вт/(м·К). На расстоянии  $x_1=50$

мм от левой грани стенки температура составляет  $t_{x1} = 27^\circ\text{C}$ , а на расстоянии  $x_2 = 125$  мм –  $t_{x2} = 23^\circ\text{C}$ . Определить температуру на левой ( $t_{ct1}$ ) и правой ( $t_{ct2}$ ) гранях стенки и количество тепла, которое проходит через стенку за единицу времени.

*Решение.* Начало координат располагается на левой грани стенки (Рис.). Згідно с условием задачи перенос тепла происходит от левой к правой грани.

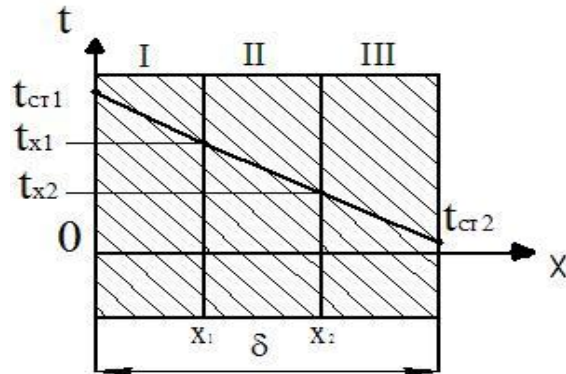


Рисунок 10 – К задаче 1

Для решения задачи воспользуемся уравнением (22)

$$t = t_{cm1} + \frac{(t_{cm2} - t_{cm1})}{\delta} x.$$

Согласно условию задачи имеем:

$$t_{x1} = t_{cm1} + \frac{(t_{cm2} - t_{cm1})}{\delta} x_1;$$

$$t_{x2} = t_{cm1} + \frac{(t_{cm2} - t_{cm1})}{\delta} x_2.$$

Имеем два уравнения с двумя неизвестными  $t_{ct1}$  и  $t_{ct2}$ . Решая их совместно, одержимо:

$$t_{cm2} = \frac{t_{x1} \cdot \delta - t_{cm1} \cdot (\delta - x_1)}{x_1};$$

$$t_{cm1} = \frac{t_{x1} x_2 - t_{x2} x_1}{x_2 - x_1}.$$

Отсюда находим:

$$t_{cm1} = \frac{0,125 \cdot 27 - 0,05 \cdot 23}{0,125 - 0,050} = 29,67^\circ\text{C},$$

$$t_{cm2} = \frac{27 \cdot 0,2 - 29,67 \cdot (0,2 - 0,05)}{0,05} = 18,98^\circ C.$$

Плотность теплового потока через стенку согласно (24) равняется

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{cm1} - t_{cm2}) = \frac{1,55}{0,2}(29,67 - 18,98) = 82,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Через стенку площадью  $F = a \cdot h = 5 \cdot 2,8 = 14 \text{ м}^2$  проходит тепло в количестве:

$$Q = q \cdot F = 82,7 \cdot 14 = 1157,8 \text{ Вт.}$$

Задачу можно развязать другим, более простым способом. Для этого для этого железобетона стенку представим себе как стенку, которая состоит из трех рдел толщиной  $x_1$ ,  $x_2 - x_1$  и  $d - x_2$ . Температура на внешних поверхностях условных слоев соответственно равняется  $t_{ct1}$  и  $t_{x1}$ ;  $t_{x1}$  и  $t_{x2}$ ; и  $t_{ct2}$ . Для второго слоя имеем все необходимые даны, чтобы с помощью уравнения (24) определить плотность теплового потока, который проходит через этот слой, а следовательно, и через всю стенку:

$$q = \frac{\lambda}{x_2 - x_1}(t_{x1} - t_{x2}) = \frac{1,55}{0,075}(27 - 23) = 82,7 \text{ Вт/м}^2.$$

Запишем уравнение (24) для первого слоя:

$$q = \frac{\lambda}{x_1}(t_{cm1} - t_{x1}),$$

откуда находим  $t_{ct1}$ :

$$t_{cm1} = t_{x1} + q \frac{x_1}{\lambda} = 29,67^\circ C.$$

Температуру на правой грани стенки ( $t_{ct2}$ ) определим из выражения:

$$t_{cm2} = t_{x2} + q \frac{\delta - x_2}{\lambda} = 23 - \frac{0,2 - 0,125}{1,55} 82,7 = 19^\circ C.$$

Если рассматривать теплопроводимость через стенку толщиной  $d$ , то с помощью уравнения  $q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{cm1} - t_{cm2})$  находим температуру  $t_{ct2}$ :

$$t_{cm2} = t_{cm1} + q \frac{\delta}{\lambda} = 29,67 - \frac{0,2}{1,55} 8,7 = 19 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

**Задача 2** Дана трехслойная стенка (рисунок 11) из товщинами рдел  $\delta_1=20$  мм,  $\delta_2= 120$  мм,  $\delta_3= 50$  мм Коэффициенты теплопроводимости слоев равняются соответственно:  $\lambda_1=0,2$  Вт/м·к;  $\lambda_2=0,15$  Вт/м·к;  $\lambda_3=2,5$  Вт/м·к. Температура на левой грани стенки  $10^\circ\text{C}$ , а на стыке второго и третьего рдел  $13^\circ\text{C}$ . Определить температуру на правой грани стенки и количество тепла, которое проходит через стенку за единицу времени, если известно, что ширина стенки равняется  $a=2,5$  м, а высота  $h = 3$  м.

*Решение.* Обозначим температуру на лівій и правій гранях стенки через  $t_{cr1}$  и  $t_{cr4}$ , на стыке первого и второго рдел через  $t_{cr2}$ , второго и третьего рдел через  $t_{cr3}$ .

Для решения задачи воспользуемся правилом стационарного процесса, а именно количество тепла, которое проходит через многослойную стенку, равняется количеству тепла, которое проходит через отдельные слои, то есть:

$$q=q_1=q_2=q_3$$

где  $q_1$ ,  $q_2$  и  $q_3$  – количество теплое, которое проходит через первый, второй и третий

слои соответственно.

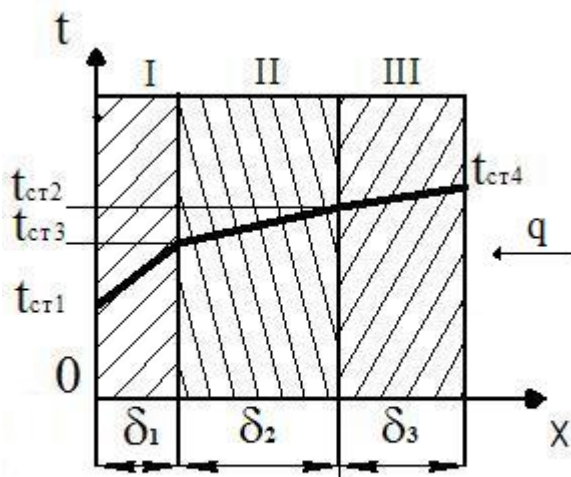


Рисунок 11 – К задаче 2

Для первого и второго слоя можно определить плотность теплового потока ( $q$ ) с помощью уравнения (27):



$$q = \frac{t_{cm3} - t_{cm1}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{13 - 1}{\frac{0,02}{0,2} + \frac{0,12}{0,15}} = 13,3 \text{ Вт/м}^2.$$

Из уравнения

$$q = \frac{t_{cm4} - t_{cm1}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{t_{cm4} - t_{cm1}}{R_\Sigma},$$

находим температуру правой грани стенки ( $t_{cm4}$ ):

$$t_{cm4} = 1 + 13,3 \cdot \left( \frac{0,02}{0,2} + \frac{0,12}{0,15} + \frac{0,05}{2,5} \right) = 17,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Количество тепла, которое проходит через стенку поверхностью  $F=a \cdot h$ , равняется:

$$Q = q \cdot F = 13,3 \cdot 2,5 \cdot 3 = 99,75 \text{ Вт}.$$

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Огнеупорные материалы» для студентов направления подготовки 6.090401 «Металлургия» / Дюдкин Д.А., Ухин В.Е., Жук В.Л. – Донецк, ГВУЗ «ДОННТУ», 2012. – 34 с.