

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»  
Кафедра «Машины и аппараты химических производств»

## **РАСЧЕТ ЗМЕЕВИКА ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ**

Методические указания к практическим работам по дисциплине  
«Конструирование и расчет машин и аппаратов отрасли»  
для студентов направления 241000.06 – «Энерго- и ресурсосберегающие  
процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии»  
очной формы обучения

Комсомольск-на-Амуре  
2015

УДК 621.822

Расчет змеевика трубчатых печей : методические указания к практическим работам по дисциплине «Конструирование и расчет машин и аппаратов отрасли» для студентов направления 241000.62 – «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии» очной формы обучения / сост. : М. Ю. Сарилов, Н. М. Липецкий. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015. – 10 с.

Представлены механические расчеты трубчатых печей. Рассмотрена классификация, типы и разновидности трубчатых печей. Даны примеры расчета и варианты заданий для самостоятельной работы.

Печатается по решению учебно-методического совета ФГБОУ ВПО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет».

Согласовано с отделом менеджмента качества.

Рецензент А. В. Ступин

Редактор Е. В. Безолукова

---

Подписано в печать 16.04.2015.

Формат 60 × 84 1/16. Бумага писчая. Ризограф RISO RZ 370EP.

Усл. печ. л. 0,70. Уч.-изд. л. 0,60. Тираж 30. Заказ 27009.

Редакционно-издательский отдел Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

**Цели работы:** изучить классификацию, область применения и принцип работы трубчатых печей; приобрести навыки расчета трубчатых печей.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Трубчатые печи предназначены для высокотемпературного нагрева нефти и нефтепродуктов в технологических процессах нефтеперерабатывающей, нефтехимической и газовой отраслях промышленности.

В зависимости от специфики технологического процесса, физико-химических свойств нагреваемой среды и вида топлива применяют печи различных конструкций и параметров: трубчатые, узкокамерные, секционные с вертикальными трубами, цилиндрические, многокамерные.

Конструктивно трубчатые печи состоят из камеры радиации, камеры конвекции, продуктового змеевика, газосборника, дымовой трубы или газохода. Трубчатые печи снабжены горелками. Для обслуживания трубчатых печей предусматриваются лестницы и площадки, стремянки, выхлопные окна, гляделки, двери, штуцера КИП.

Для футеровки внутренней поверхности печи применяются легко-весные бетоны и волокнистые муллитокремнеземистые материалы.

Для повышения КПД печей предусматривается изготовление печей с оребренными трубами в конвективной части печи, а так же оборудование печей системой утилизации тепла.

## **1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

### **1.1 Область применения**

Трубчатые печи широко используются во всех отраслях промышленности. Основным потребителем оборудования такого рода является энергоемкое производство. В частности самое большое распространение трубчатые печи получили в нефтеперерабатывающей и нефтехимической отраслях промышленности, где они используются для огневого нагрева, испарения и перегрева жидких и газообразных сред, а также для проведения высокотемпературных термотехнологических и химических процессов. Большая группа печей применяется в качестве нагревателей сырья, и они характеризуются высокой производительностью и умеренными температурами нагрева (300 - 500 °С) углеводородных сред (установки АТ, АВТ, при вторичной перегонке бензина, ГФУ). Впервые были предложены русскими инженерами-технологами В. Г. Шуховым и С. П. Гавриловым и вначале применялись для деэмульгирования нефти на промыслах. С развитием химического машиностроения процессы деэмульгирования стали проводить в других, более эффективных аппаратах, а печи использовать в

основном для нагрева сырья и нефтепродукта. Основными характеристиками трубчатых печей являются производительность печи, полезная тепловая нагрузка, теплонапряженность поверхности нагрева и коэффициент полезного действия печи. В промышленности применяют трубчатые печи с поверхностью нагрева радиантных труб 15 - 2000 м<sup>2</sup>. Теплопроизводительность трубчатых печей различных конструкций изменяется от 0,12 до 240 МВт, а производительность по нагреваемой среде достигает 8 - 105 кг/ч. Температура нагреваемой среды на входе и выходе из печи в зависимости от технологического процесса изменяется в диапазоне от 70 до 900 °С, а давление – от 0,1 до 30 МПа. Для трубчатых печей КПД колеблется в пределах от 0,65 до 0,85.

## 1.2 Классификация трубчатых печей

Классификация печей – это упорядоченное разделение их в логической последовательности и соподчинении на основе признаков содержания на классы, виды, типы и фиксирование закономерных связей между ними с целью определения точного места в классификационной системе, которое указывает на их свойства. Она служит средством кодирования, хранения и поиска информации, содержащейся в ней, дает возможность распространения обобщенного опыта, полученного теорией и промышленной практикой эксплуатации печей, в виде готовых блоков, комплексных типовых решений и рекомендаций для разработки оптимальных конструкций печей и условий осуществления в них термотехнологических и теплотехнических процессов.

Главными и естественными по степени существенности основаниями для классификации печей в логической последовательности являются следующие признаки:

1 технологические:

- а) нагревательные,
- б) реакционно-нагревательные,

2 теплотехнические:

- а) конвективные,
- б) радиационные,
- в) радиационно-конвективные;

3 конструктивные:

а) по форме каркаса:

- коробчатые ширококамерные, узкокамерные,
- цилиндрические,
- кольцевые,
- секционные;

- б) по числу камер радиации:
  - однокамерные,
  - двухкамерные,
  - многокамерные;
- в) по расположению трубного змеевика:
  - горизонтальное,
  - вертикальное;
- г) по расположению горелок:
  - боковое,
  - подовое;
- д) по топливной системе:
  - на жидком топливе (Ж),
  - на газообразном топливе (Г),
  - на жидком и газообразном топливе (Ж+Г);
- е) по способу сжигания топлива:
  - факельное,
  - беспламенное сжигание;
- ж) по расположению дымовой трубы:
  - вне трубчатой печи,
  - над камерой конвекции;
- з) по направлению движения дымовых газов:
  - с восходящим потоком газов,
  - с нисходящим потоком газов,
  - с горизонтальным потоком газов.

По технологическому назначению различают печи нагревательные и реакционно-нагревательные. В первом случае целью является нагрев сырья до заданной температуры. Это большая группа печей, применяемых в качестве нагревателей сырья, характеризуется высокой производительностью и умеренными температурами нагрева (300 – 500 °С) углеводородных сред (установки АТ, АВТ, ГФУ). Во втором случае кроме нагрева в определенных участках трубного змеевика обеспечиваются условия для протекания направленной реакции. Эта группа печей многих нефтехимических производств одновременно с нагревом и перегревом сырья используется в качестве реакторов. Их рабочие условия отличаются параметрами высокотемпературного процесса деструкции углеводородного сырья и невысокой массовой скоростью (установки пиролиза, конверсии углеводородных газов и др.).

По способу передачи тепла (теплотехнические характеристики) нагреваемому продукту печи подразделяются: на конвективные, радиационные, радиационно-конвективные.

**Конвективные печи** – это один из старейших типов печей. Они являются как бы переходными от нефтеперегонных установок к печам радиационно-конвективного типа. В настоящее время эти печи практически не применяются, так как по сравнению с печами радиационными или радиационно-конвективными они требуют больше затрат как на их строительство, так и во время эксплуатации. Исключение составляют только специальные случаи, когда необходимо нагревать чувствительные к температуре вещества сравнительно холодными дымовыми газами.

**В радиационной печи** все трубы, через которые проходит нагреваемое вещество, помещены на стенах камеры сгорания, поэтому у радиационных печей камера сгорания значительно больше, чем у конвективных. Все трубы подвергаются прямому воздействию газообразной среды, которая имеет высокую температуру. Этим достигается:

а) уменьшение общей площади теплоотдачи печи, так как количество тепла, отданное единице площади труб, путем радиации при одинаковой температуре среды (особенно при высоких температурах этой среды), значительно больше, чем количество тепла, которое можно передать путем конвекции;

б) хорошая сохранность футеровки за трубчатыми змеевиками, благодаря тому, что снижается ее температура, во-первых, за счет прямого закрытия части ее трубами, во-вторых, за счет отдачи тепла футеровкой более холодным трубам.

**Радиационно-конвективная печь** имеет две отделенные друг от друга секции: радиационную и конвективную. Большая часть используемого тепла передается в радиационной секции (обычно 60 – 80 % от всего использованного тепла), остальное – в конвективной секции.

Конвективная секция служит для использования физического тепла продуктов сгорания, выходящих из радиационной секции обычно с температурой 700 – 900 °С, при экономически приемлемой температуре нагрева 350 – 500 °С (соответственно температуре перегонки).

Величина конвективной секции, как правило, подбирается с таким расчетом, чтобы температура продуктов сгорания, выходящих в боров, была почти на 150 °С выше, чем температура нагреваемых веществ при входе в печь. Поэтому тепловая нагрузка труб в конвективной секции меньше, чем в радиационной, что обусловлено низким коэффициентом теплоотдачи со стороны дымовых газов.

Почти все печи, эксплуатируемые в настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах, являются радиационно-конвекционными. В печах такого типа трубные змеевики размещены и в конвекционной, и в радиантной камерах.

### 1.3 Основные характеристики

Каждая трубчатая печь характеризуется тремя основными показателями:

- 1) производительностью;
- 2) полезной тепловой нагрузкой;
- 3) коэффициентом полезного действия.

Производительность печи выражается количеством сырья, нагреваемого в трубных змеевиках в единицу времени (обычно в т/сут). Она определяет пропускную способность печи, т. е. количество нагреваемого сырья, которое прокачивается через змеевики при установленных параметрах работы (температуре сырья на входе в печь и на выходе из нее, свойствах сырья и т. д.). Таким образом, для каждой печи производительность является наиболее полной ее характеристикой.

Полезная тепловая нагрузка – это количество тепла, переданного в печи сырью (МВт, Гкал/ч). Она зависит от тепловой мощности и размеров печи. Тепловая нагрузка большинства эксплуатируемых печей 8 - 16 МВт. Перспективными являются более мощные печи с тепловой нагрузкой 40 - 100 МВт и более. Коэффициент полезного действия печи характеризует экономичность ее эксплуатации и выражается отношением количества полезно используемого тепла  $Q_{\text{пол}}$  к общему количеству тепла  $Q_{\text{общ}}$ , которое выделяется при полном сгорании топлива. Полезно использованным считается тепло, воспринятое всеми нагреваемыми продуктами (потоками): сырьем, перегреваемым в печи паром и в некоторых случаях воздухом, нагреваемым в рекуператорах (воздухоподогревателях).

Значение коэффициента полезного действия зависит от полноты сгорания топлива, а также от потерь тепла через обмуровку печи и с уходящими в дымовую трубу газами. Трубчатые печи, эксплуатируемые в настоящее время на нефтеперерабатывающих заводах, имеют КПД в пределах 0,65 - 0,87. Повышение коэффициента полезного действия печи за счет более полного использования тепла дымовых газов возможно до значения, определяемого их минимальной температурой. Как правило, температура дымовых газов, покидающих конвекционную камеру, должна быть выше начальной температуры нагреваемого сырья не менее чем на 120 - 180 °С.

## 2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Диаметр змеевика зависит от объемного расхода нагреваемого продукта ( $V$ ), числа потоков ( $n$ ), допустимой линейной скорости продукта ( $W$ ).

Объемный расход  $V$  зависит от производительности печи ( $G_c$ ) и плотности продукта ( $\rho_t$ ). При расчете плотности продукта температурную поправку  $\alpha$  считать равной 0,00064. Относительная плотность  $\rho_4^{20}$  для данных условий равна 0,9.

Число потоков, а также допустимая скорость продукта и средняя температура указаны в таблице 1 для каждого варианта индивидуального задания.

Выбрав искомые значения согласно варианту задания и рассчитав внутренний диаметр трубы, округляем полученное значение в большую сторону до ближайшего стандартного значения из таблицы 2.

### 3 ПРИМЕР РАСЧЕТА ДИАМЕТРА ЗМЕЕВИКА ПЕЧИ

Рассмотрим пример расчета диаметра змеевика печи, используя следующие параметры:

$$G_c = 3800 \frac{\text{т}}{\text{сут}}; \quad t_{\text{ср}} = 240 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad n = 2; \quad W = 2 \text{ м/с}.$$

Объемный расход нагреваемого продукта рассчитывается по формуле

$$V = \frac{G_c * 1000}{24 * 3600 * \rho_t},$$

где  $G_c$  – производительность печи по сырью, т/сут;  $\rho_t$  – плотность продукта при средней температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$$\rho_t = \left( \rho_4^{20} - \alpha * (t_{\text{ср}} - 20) \right) * 1000,$$

где  $\alpha$  – температурная поправка;  $\rho_4^{20}$  – относительная плотность.

$$\alpha = 0,00064,$$

$$\rho_4^{20} = 0,9.$$

Подставляя заданные значения, получим:

$$V = \frac{3800 * 1000}{24 * 3600 * 759,2} = 0,058 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Площадь поперечного сечения змеевика определяется уравнением:

$$S = \frac{V}{n * W} = \frac{\pi * d_{\text{вн}}^2}{4},$$

где  $n$  – число потоков;  $W$  – допустимая линейная скорость продукта,  $W = 2 \text{ м/с}$ ;  $d_{\text{вн}}$  – расчетный внутренний диаметр трубы, м.

Из этого уравнения находим:

$$d_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4 * V}{n * \pi * W}} = \sqrt{\frac{4 * 0,058}{2 * 3,14 * 2}} = 0,136 \text{ м}.$$

Из стандартных значений (таблица 2) выбираем диаметр трубы змеевика, м.



#### 4 ВАРИАНТЫ НА САМОСТОЯТЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Варианты на самостоятельную работу выдает преподаватель согласно порядковому номеру в журнале.

Таблица 1

Номер варианта	$G_C$ , кг/ч	$t_{cp}$ , °C	$n$	$W$ , м/с
1	150 000	220	2	1,8
2	160 000	221	4	1,8
3	170 000	222	3	1,85
4	180 000	223	2	1,85
5	100 000	224	2	1,9
6	110 000	225	2	1,9
7	120 000	226	3	2
8	130 000	227	3	2
9	140 000	228	2	2,1
10	190 000	229	3	2,1
11	180 000	230	2	2,2
12	170 000	231	2	2,2
13	160 000	232	2	2,3
14	50 000	233	3	2,3
15	60 000	234	2	2,4
16	70 000	235	2	2,4
17	80 000	236	2	2,5
18	90 000	237	3	2,6
19	105 000	299,21	4	2,78
20	105 525	289,41	4	2,87

Таблица 2

Диаметр трубы, мм	57	76	89	102	108	114	127	152	159	219	273	326
Толщина стенки, мм	4	5	8	8	8	8	8	8	10	10	10	10

## 5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1) Опишите область применения трубчатых печей. Кто впервые предложил использовать именно их?
- 2) Классификация трубчатых печей. По каким признакам различают трубчатые печи?
- 3) Какие основные виды топлив используются в трубчатых печах?
- 4) Какой способ передачи тепла в трубчатых печах получил наибольшее распространение в нефтехимической промышленности?
- 5) Назовите основные показатели работы трубчатых печей.
- 6) От чего зависит КПД печи? Как можно повысить этот показатель?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : В 2 т. Т. 1 / В. И. Анурьев. – М. : Машиностроение, 1979. – 728 с.
- 2 Бажан, П. И. Справочник по теплообменным аппаратам / П. И. Бажан, Г. Е. Каневец, В. М. Селиверстов. – М. : Машиностроение, 1989. – 366 с.
- 3 Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. Ф. Шор, Р. М. Шнейдерович. – М. : Машиностроение, 1966. – 212 с.
- 4 Кузнецов, А. А. Расчеты процессов и аппаратов нефтегазоперерабатывающей промышленности / А. А. Кузнецов, С. М. Кагерманов, Е. И. Судаков. – Л. : Химия, 1974. – 343 с.
- 5 Лашинский, А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.
- 6 Поникаров, И. И. Расчеты машин и аппаратов химических производств и нефтегазопереработки : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / И. И. Поникаров, С. И. Поникаров, С. В. Рачковский. – М. : Альфа-М, 2008. – 717 с.
- 7 Поникаров, И. И. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки / И. И. Поникаров, М. Г. Гайнуллин. – М. : Альфа-М., 2006. – 605 с.
- 8 Серенсен, С. В. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – М. : Машгиз, 1963. – 244 с.
- 9 Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования. В 3 т. Т. 2 / А. С. Тимонин. – 2-е изд., перераб. – Калуга, 2001.