

С. Торайғыров атындағы Павлодар мемлекеттік университетінің
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Павлодарского государственного университета имени С. Торайгырова

ШМУ ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК ПГУ

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

№ 2 (2018)

Павлодар

**А. С. Никифоров¹, Е. В. Приходько²,
А. К. Кинжибекова³, А. Е. Карманов⁴**

¹д.т.н, зав. кафедрой «Теплоэнергетика» Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан;

²к.т.н, профессор, кафедра «Теплоэнергетика», Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан;

³к.т.н, ассоц. профессор, кафедра «Теплоэнергетика», Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан;

⁴докторант, кафедра «Промышленной теплоэнергетики», Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Республика Казахстан
e-mail: ²john1380@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНОСТИ ОБМУРОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В этой статье рассматриваются режимы сушки обмуровочных материалов перед пусковыми операциями с целью разогрева высокотемпературных агрегатов. От правильного разогрева агрегата зависит его надежность работы и срок службы установки. При быстром разогреве обмуровки при определённой толщине обмуровки возможна ситуация при которой пар от нагретых участков, проходя через недогретые места кладки, будет охлаждаться и конденсироваться на поверхности. Таким образом, период сушки связан с толщиной высушиваемого материала. При этом, парообразование воды на любой ступени сушки кладки пропорционально её площади. Поэтому, если площадь увеличивать путём увеличения толщины материала, то скорость сушки возрастает. Нужно повысить рабочую температуру в агрегате с такой скоростью, которая диктуется назначением установки и видом обмуровочных материалов, из которых высокотемпературный агрегат выполнен.

Ключевые слова: сушка, обмуровка, высокотемпературные агрегаты.

ВВЕДЕНИЕ

Пусковые операции высокотемпературных агрегатов очень ответственны; для оборудования, обеспечивающего эти режимы, требуются максимально высокие значения таких показателей надежности, как готовность к использованию, достоверность функционирования и безотказность.

Последовательность операций при пуске и разогреве высокотемпературных агрегатов определяется как техникой безопасности, так и необходимостью повышать рабочую температуру в агрегате с такой скоростью, которая диктуется назначением установки и видом обмуровочных материалов, из которых высокотемпературный агрегат выполнен. Эти операции следующие: подготовка к разогреву агрегата и разогрев агрегата.

Подготовка к разогреву агрегата начинается с тщательного визуального осмотра установки и очистки установки от строительного мусора. Вслед за этим выполняется сушка агрегата. Различные виды растворов, которые применяют для выполнения обмуровочной кладки, а также сами обмуровочные материалы содержат влагу.

Например, для ультралегковесного пеношамота (применяется на стенках неэкранированной топочной камеры парового котла), начальная влажность которого равна 50–60 %, срок сушки составляет 5–7 сут, а для обычного шамотного кирпича полусухого прессования 8–12 ч. Для большинства обмуровок максимальные температуры в сушильных установках не превышают 120–180 °С [1].

Сушку, как правило, выполняют:

- воздухом или дымовыми газами (за счёт конвекции);
- открытым пламенем (за счёт излучения).

При проведении процесса сушки воздухом или дымовыми газами имеется значительное преимущество – легче разработать и использовать схему, в соответствии с которой проводить процесс регулирования температуры потока и, как следствие, температуры поверхности обмуровки и скорости её прогрева. При разогреве обмуровки излучением сложнее регулировать тепловой поток на обмуровку, особенно на начальном этапе разогрева. Для этого можно производить розжиг высокотемпературного агрегата с помощью ряда горелок, для которых необходимо предусмотреть последовательность включения при условии сохранения геометрического расположения контура факела. Так, например, в работе [2] регулирование тепловой мощности горелок в соответствии с графиком разогрева осуществляют путём изменения расхода подаваемых к горелкам газа и воздуха и путём последовательного включения в работу горелок.

Если не выполнить предварительную сушку агрегата, то при резком подъеме температуры, в момент, когда на обмуровочные материалы будут

действовать термические напряжения, вода начнет интенсивно испаряться, что приведёт к дополнительным силовым воздействиям и может закончиться растрескиванием кладки (микротрещинами). В связи с этим следует ограничивать скорость повышения температуры в период сушки, то есть проводить плавный разогрев обмуровки.

Количество удаляемой из материала влаги зависит не только от количества и свойств применяемых материалов, но и от условий хранения материала, т.к. в процессе сорбции влажность материала может значительно увеличиваться за счёт влажности окружающей среды. Таким образом, период сушки связан с толщиной (объёмом) высушиваемого материала.

Стандарты, определяющие скорость сушки и повышение температуры, ещё не разработаны. Сложность в данном случае заключается в многообразии используемых обмуровочных материалов, различных толщинах и количествах слоёв обмуровок, во множестве способов разогрева и др. Таким образом, при сушке обмуровок пользуются правилами, как правило, полученными на основании практики.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На процессы сушки стоит обратить внимание при температуре 100–110 °С (удаление капиллярной влаги), а также при температуре 450–550 °С (удаление химически связанной (структурной) влаги). Необходимо рассчитать количество влаги (капиллярной и химически связанной), по которому можно произвести расчёт длительности процесса сушки («полочки» на кривой разогрева) и энергетические затраты на этот процесс.

Методика определения длительности процесса выдержки при постоянной температуре в процессе нагрева заключается в следующем. Опытным путём определяется количество влаги в обмуровочном материале, например по ГОСТу [4]. Зная процент влаги в высушиваемом материале необходимо найти количество влаги, подлежащей испарению на начальном этапе (при температуре 100–110 °С), которое составит:

$$M_g = m_{об} \cdot W,$$

где $m_{об}$ – масса обмуровки агрегата, кг;

W – влажность обмуровочного материала, %.

Найдём количество теплоты, необходимое для испарения данного количества влаги из $Q_{вт}$, кДж:

$$Q_{вт} = M_g \cdot r,$$

где M_g – масса удаляемой влаги, кг;

r – удельная теплота парообразования воды равна 2258 кДж/кг.

Далее необходимо оценить количество теплоты в агрегате идущей на нагрев обмуровки. Например, для котельных агрегатов малой и средней мощности потери теплоты в окружающую среду (q_3) можно принять равными 5 % от теплоты, получаемой в агрегате. Количество теплоты, получаемой в агрегате, в свою очередь, можно получить, зная расход топлива (кг/ч или м³/ч) и теплоту его сгорания (кДж/кг).

Заключительным этапом является расчёт времени сушки τ по формуле, ч:

$$\tau = \frac{Q_{вт}}{Q_m^{обм}},$$

где $Q_m^{обм}$ – количество теплоты в агрегате идущей на нагрев обмуровки, кДж.

Количество теплоты для удаления химически связанной влаги определяется аналогично при использовании процентного содержания влаги определенного при температуре 450-550 °С.

В качестве примера было рассчитано время удаления капиллярной и структурной влаги для диатомита, который используется в качестве обмуровочного материала в котельном агрегате ДЕ 16–24, в котором общая масса диатомита составляет 10250 кг.

Нами было определено количество капиллярной влаги на анализаторе влажности ЭВЛАС-2М (рисунок 2) при температуре 110 °С в течение 60 мин соответствий с ГОСТ-ом [4].



Рисунок 2 – Анализатор влажности ЭВЛАС-2М

Динамика сушки при температуре 110 °С приведена на рисунке 3:

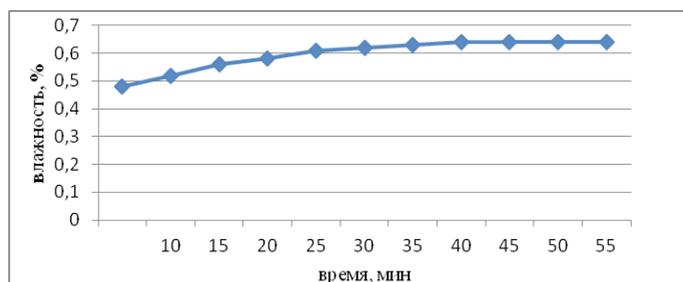


Рисунок 3 – Динамика сушки пенидиатомида

Таким образом, с учётом относительной влажности материала, количество влаги, подлежащей испарению на начальном этапе (при температуре 100–110 °С), составит 65,6 кг. Количество теплоты, необходимое для испарения данного количества влаги, которое составит 148124,8 кДж.

Далее рассчитаем теплоту сгорания топлива, с учётом того, что разогрев проводится посредством сжигания пропан-бутановой смеси (50 % пропана, 50 % бутана).

Теплоту сгорания смеси этих газов определим по формуле:

$$Q_{н.см}^P = Q_{н1}^P \cdot x + Q_{н2}^P \cdot (1 - x),$$

$$Q_{н.см}^P = 87200 \cdot 0,5 + 113200 \cdot (1 - 0,5) = 100200 \text{ кДж} / \text{м}^3$$

где $Q_{н1}^P$; $Q_{н2}^P$ – низшие теплоты сгорания газов, образующих смесь, кДж/м³; x – доля первого газа в смеси.

С учётом расхода газа на стадии разогрева, равного 0,3 м³/с, количество теплоты, выделяемое при горении топлива, будет равно 30060 кДж/с.

На нагрев обмуровки идёт около 5 % теплоты, получаемой в котельном агрегате. Так как количество теплоты, необходимое для удаления влаги из рабочего слоя обмуровки составляет 148124,8 кДж, то время, в течение которого испарится вся гигроскопическая влага, составит:

$$\tau = \frac{148124,8}{30060 \cdot 0,05} = 98,55 \text{ с} = 1,65 \text{ мин}$$

Для определения длительности удаления химически связанной влаги было определено её количество при нагреве до температуры 500 °С в

муфельной печи. Как показали измерения, масса образца изменяется в течение 30 минут. Было проведено исследование пяти образцов. Среднее значение структурной влаги составило 3,5 %.

Проведя аналогичные расчеты, получаем время для испарения структурной влаги, которое составляет 9 минут.

ВЫВОДЫ

В целом на разогрев котла ДЕ-16 из холодного состояния затрачивается около 150 минут без учёта затрат времени на сушку; сушка увеличит это время на 7 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 <https://arxivpedia.ru/teploizolyacionnye-i-ogneupornye-materialy/sushka-ogneupornyx-izdelij.html>

2 **Никифоров, А. С., Приходько, Е. В., Жумагулов, М. Г.** Патент № 18652 Республика Казахстан, МКИ F 23 C 5/00, опубл. 16.07.2007, бюл. № 7. – 3 с.

3 Временная инструкция по сушке обмуровок стационарных котлов ТЭС. – М., 1980.

4 ГОСТ 2642.1–2016 огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения содержания влаги.

Материал поступил в редакцию 01.06.18.

А. С. Никифоров¹, Е. В. Приходько², А. К. Кинжибекова³, А. Е. Карманов⁴
Оқшаулағыш материалдардың ылғалдылығын зерттеу

^{1,2,3}С. Торайғыров атындағы

Павлодар мемлекеттік университеті,

Павлодар қ., 140008, Қазақстан Республикасы;

⁴Алматы Энергетика және Байланыс Университеті,

Алматы қ., 050000, Қазақстан Республикасы.

Материал 01.06.18 баспаға түсті.

Investigation of refractory materials humidity^{1,2,3}S. Toraighyrov Pavlodar State University, Pavlodar, 140008, Republic of Kazakhstan.⁴Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan.

Material received on 01.06.18.

Бұл мақалада жоғары температуралық агрегаттарды іске қосу алдындағы оқшауын кептіру режимді операциялары оны жылыту мақсатында қарастырылған. Құрылғыны дұрыс жылыту оның сенімділігі мен қызмет ету мерзімі байланысты болады. Оқшауларды қалыңдығына байланысты тез қыздыру нәтижесінде қабырғаның қызып тұрған бөліктерінен бу өтіп, қабырғаның салқындау қабатында будың конденсациясы болады. Осылайша, кептіру кезеңі кептірілетін материалдың қалыңдығына байланысты. Сонымен қатар, кептірудің кез келген сатысында судың булануы оның аумағына пропорционалды. Сондықтан материалдың қалыңдығын арттыру арқылы аймақ ұлғайтылса, онда кептіру жылдамдығы артады. Құрылғының жұмыс температурасының біртіндеп көтерілуі, қондырғының жұмыс істеу режимі мен оның жасалған материалдарының түріне байланысты.

In this article there are considered the drying regimes of refractory materials before starting operations for the purpose of heating high-temperature aggregates. The reliability and the service life of the installation depend on the correct heating of the unit. With rapid heating of the lining with a certain thickness of masonry, a situation is possible in which the steam from the heated sections, passing through the underheated places of the masonry, will cool and condense on the surface. Thus, the drying period is related to the thickness of the material to be dried. At the same time, the evaporation of water at any stage of drying of the masonry is proportional to its area. Therefore, if the area is enlarged by increasing the thickness of the material, then the drying speed accelerates. It is necessary to raise the operating temperature in the unit at such a rate that is dictated by the purpose of the installation and the type of firing materials, of which a high-temperature unit is made.

**A. S. Никифоров¹, E. В. Приходько²,
A. K. Кинзhibekova³, A. E. Карманов⁴**¹д.т.н, зав. кафедрой «Теплоэнергетика» Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан;²к.т.н, профессор, кафедра «Теплоэнергетика», Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан;³к.т.н, ассоц. профессор, кафедра «Теплоэнергетика», Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар, 140008, Республика Казахстан;⁴докторант, кафедра «Промышленной теплоэнергетики», Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, 050000, Республика Казахстан
e-mail: ²john1380@mail.ru**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЁТА
ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФУТЕРОВКАХ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ**

В настоящей статье приводится описание разработанной программы для расчёта температурных напряжений, возникающих в футеровках высокотемпературных агрегатов. Исходный код программного обеспечения, разработанного в среде Delphi, написан на языке ObjectPascal, что позволяет использовать программный продукт на маломощных персональных компьютерах и терминалах. Программа позволяет рассчитывать температурные поля в футеровки при нестационарных режимах, а также возникающие температурные напряжения. По результатам расчётов программа строит графики зависимости температуры от времени и температурных напряжений от времени. Ввод такого начального параметра, как температура внутренней поверхности футеровки может производиться автоматически (при введении скорости разогрева на участке) и вручную (для каждого момента времени), что позволяет получать рациональные графики разогрева агрегатов.

Ключевые слова: температурные напряжения, математическое моделирование, футеровка.