

Д. т. н. **А. С. Никифоров** (✉), к. т. н. **Е. В. Приходько**, к. т. н. **А. К. Кинжибекова**,
доктор PhD **А. Е. Карманов**

Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова,
г. Павлодар, Республика Казахстан

УДК 666.76:669.046.412].004.942

УЧЕТ ВЛАЖНОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗОГРЕВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

Описана специфика процесса сушки футеровки высокотемпературных агрегатов, в частности, проанализирована средняя скорость сушки. Адекватность предлагаемых математических зависимостей подтверждается путем сравнения результатов, полученных расчетным путем, и экспериментальных данных, полученных на лабораторном стенде. Результаты исследований можно использовать при разработке графика разогрева высокотемпературных агрегатов после капитального ремонта для удаления влаги.

Ключевые слова: огнеупорные материалы, сушка, высокотемпературные агрегаты (ВТА), футеровка, коэффициент предельного содержания влаги.

ВВЕДЕНИЕ

Сушка высокотемпературных агрегатов (ВТА) — это удаление влаги (свободной и химически связанной) из материалов футеровки, попадающей в нее при изготовлении материалов или во время их хранения и монтажа. При разогреве кладки появляется водяной пар, который изначально содержится в футеровочных материалах. Это происходит за счет того, что резкий нагрев приводит к быстрому парообразованию и пар, проходя через зазоры в огнеупорных изделиях, размягчает швы между ними. При сушке огнеупорных бетонов и набивных масс с высокой скоростью возможно появление взрывных трещин. Более того, при быстром разогреве футеровки возможна ситуация, при которой пар от нагретых участков будет конденсироваться в зонах кладки с более низкой температурой.

Большой интерес представляет удаление свободной влаги (при температуре около 100 °С), так как именно на этой стадии идет значительное увеличение давления внутри огнеупорного материала вследствие парообразования, которое может вызвать растрескивание, или даже взрывного скола [1]. Исследования показывают [2, 3], что в процессе сушки возникают дополнительные нагрузки за счет давления пара, значения которого могут достигать 2 МПа, что до-

статочно для разрушения монолитной бетонной футеровки.

Стандарты, определяющие скорость подъема температуры футеровки в процессе сушки, еще не разработаны. Сложность заключается в многообразии используемых огнеупорных материалов, различных толщинах и количествах слоев футеровки, а также во множестве способов разогрева и др. Так, в статье [4] приводятся данные по сушке огнеупорного бетона, наносимого с помощью торкрет-машины, и наливной футеровки. Коэффициенты диффузии этих двух способов различаются примерно в 10 раз, в то время как расчетное время высыхания рабочего слоя футеровки различается в 5–7 раз. По этой причине при разогреве футеровки ВТА используют графики разогрева, разработанные предприятием-изготовителем для конкретного агрегата, или правила, полученные на основании опыта эксплуатации.

В качестве примеров сушки ВТА можно упомянуть публикации [5, 6], в которых описаны сушка и разогрев ВТА по графикам, предоставленным заводом — изготовителем огнеупорных материалов, и задача обслуживающего персонала сводилась лишь к корректировке тепловой мощности источника энергии на основании показаний датчиков температуры. В обоих примерах изменение тепловой мощности производится автоматически; для этого применены два контроллера с возможностью установки верхней и нижней температурных границ, подключаемых к термодарам. При достижении верхней границы подается сигнал на отключение горелочного устройства, при достижении нижней границы — сигнал на включение горелки [6].



А. С. Никифоров
E-mail: aleke4599@mail.ru

Однако даже графики, предоставляемые заводом-изготовителем, не являются оптимальными. Основная задача изготовителя — максимально продолжительная работа огнеупорных материалов в ВТА. Выдаваемые при этом графики сушки и разогрева должны избегать предельных скоростей сушки. Цель предприятий, эксплуатирующих ВТА, напротив, максимальное сокращение времени, порой даже с превышением нормируемых показателей для огнеупорных материалов. Так, в литературе [7] приводится пример сокращения времени сушки и разогрева футеровки ВТА от рекомендуемых 43 до 22 ч, полностью исключив при этом выдержку при температуре около 100 °С. Это привело к необходимости непрерывного мониторинга температуры футеровки вследствие ее ускоренного разрушения в результате несоблюдения графика сушки.

Исследования показывают, что сокращение срока сушки возможно при снижении плотности используемых огнеупоров. Высокая пористость позволяет образуемому при сушке пару проходить сквозь огнеупор с меньшими препятствиями и способствует снижению давления пара даже при высоких скоростях разогрева. Для изготовления футеровки высокой пористости (и меньшей плотности) применяют специальные добавки, вводимые в огнеупорный материал на стадии его изготовления. Так, авторы статьи [8] исследовали влияние добавок активных соединений, увеличивающих проницаемость образцов и препятствующих их разрушению во время нагрева. Но изменение свойств огнеупорного материала для повышения скорости сушки, как отмечено в статье [8], кроме положительного эффекта приводит к снижению прочности, изменению текучести и увеличению срока схватывания. С учетом того, что прочность огнеупоров является определяющим параметром при выборе скорости разогрева после проведения сушки и скорость повышения температуры пропорциональна прочности огнеупора, способ повышения скорости сушки за счет введения добавок в виде активных соединений не является общеприменимым и может быть использован только для определенных условий.

Сушку футеровки можно разделить на два этапа: внешнюю диффузию, при которой влага с поверхности футеровки испаряется в окружающую среду, и внутреннюю диффузию, при которой влага перемещается внутри футеровки от ее внутренних слоев к внешней поверхности. Процесс перемещения влаги продолжается в течение всего периода сушки. На испарение влаги с поверхности футеровки влияют следующие факторы: исходная влажность футеровки; температура, при которой осуществляется сушка; скорость движения сушильных газов и др. При этом скорость сушки не является постоянной

величиной на протяжении всего процесса сушки. Когда содержание влаги уменьшается до определенного значения, скорость сушки снижается. Скорость, при которой наступает этот переход, при обычных условиях сушки является примерно постоянной величиной для каждого огнеупорного материала. Этот переход называется коэффициентом предельного содержания влаги. Период сушки, наступающий после критического значения, проходит при уменьшающемся коэффициенте предельного содержания влаги [9]. Период сушки при постоянном коэффициенте предельного содержания влаги связан с соотношением объема футеровки и внешней поверхности, с которой происходит испарение влаги. Поэтому у разных ВТА с одинаковой вместимостью и футеровкой из одинаковых материалов может быть различная скорость сушки вследствие разных площадей поверхности.

Если говорить о количестве влаги, то футеровка ВТА включает влажность набивных огнеупорных масс (5–9 %), традиционных плотных огнеупорных бетонов с 25–30 % цемента при монтаже (10–12 %), низкоцементных бетонов (5–7 %) [10]. Очевидно, что монолитные футеровки имеют большее начальное количество влаги, чем футеровки из штучных огнеупоров. Это объясняет значительное количество работ, посвященное наливным футеровкам. Но кирпичная кладка кроме влаги, поглощаемой огнеупорами из атмосферы, содержит достаточно большое количество воды, вносимой с раствором, на котором она ведется. Поэтому необходимость расчета сушки важна для любой футеровки.

Следует отметить, что моделирование процессов сушки как в математическом, так и в физическом плане представляет достаточно трудную задачу. Сложность заключается в большом количестве факторов, влияющих на процесс сушки. Физическое моделирование предполагает использование топливных горелок, которыми, как правило, осуществляется разогрев, что вызывает ряд технических проблем при создании экспериментальных стендов. Поэтому физические модели ограничиваются изучением сушки отдельного элемента футеровки при его разогреве в электропечи [2, 4].

Таким образом, представляет интерес исследование задач, связанных как с математическим описанием процесса сушки футеровки, так и с моделированием на физической модели, включающей разогрев футеровки газовой горелкой и изучение сушки элементов футеровки ВТА.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Произведем математическое описание процесса сушки для определения ее средней скорости с целью практического применения и адаптации в реальных условиях. Для определения средней

скорости сушки примем ряд допущений. Будем считать, что в период сушки температура материала футеровки неизменна и вся теплота, передаваемая футеровке, идет на испарение влаги. Исходя из этого, можно записать следующее равенство:

$$q_{\text{прих}} = j_c r, \quad (1)$$

где $q_{\text{прих}}$ — плотность теплового потока прихода теплоты, Вт/м²; j_c — интенсивность сушки, кг/с; r — скрытая теплота парообразования, кДж/кг.

Обозначим скорость сушки через N :

$$N = \frac{dW}{d\tau}, \quad (2)$$

где dW — количество удаляемой из материала влаги, %; $d\tau$ — период времени сушки, с.

Таким образом, формулу (1) можно записать в виде [9]:

$$q_{\text{прих}} = \rho R N r, \quad (3)$$

где ρ — плотность сухого материала футеровки, кг/м³; R — отношение объема к поверхности, м.

Откуда можно выразить величину скорости сушки N :

$$N = \frac{q_{\text{прих}}}{\rho R r}. \quad (4)$$

Зная скорость сушки, можно рассчитать время, необходимое для сушки, по формуле (2).

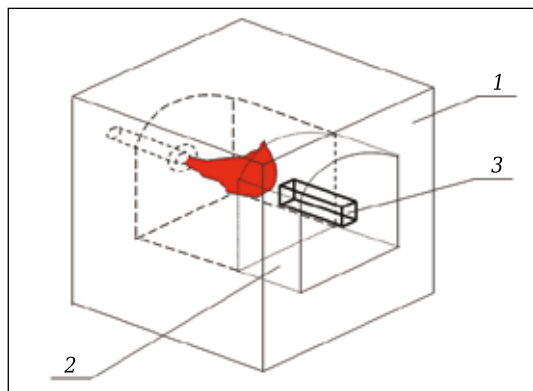


Рис. 1. Стенд для определения влажности огнеупорного образца

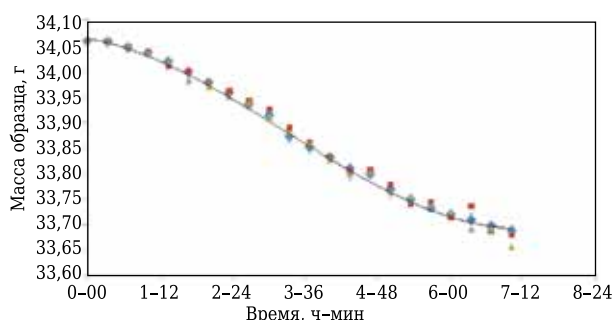


Рис. 2. График снижения массы шамотного образца при сушке

Анализ приведенных формул показывает, что при этом не учитывается ряд факторов, влияющих на тепловую работу футеровки: пористость высушиваемых материалов, наличие связующего и т. д. Для корректного применения формул на практике необходимо проверить адекватность методики расчета времени сушки экспериментальным способом. Для этого был разработан стенд, состоящий из муфельной печи 1 (рис. 1). Выходное окно печи закрыто кладкой из элементов шамотного кирпича 2. В кладке 2 имеется исследуемый образец 3. При проведении опытов печь разогревают до температуры $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ и исследуют сушку образца. Основное отличие сушки исследуемого образца таким способом заключается в том, что кладка 2 с исследуемым элементом 3 моделирует сушку футеровки ВТА: осуществляется разогрев с внутренней стороны средой с температурой $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$, при этом с внешней стороны находится окружающая среда для выхода влаги из футеровки. Образец располагается в толще кладки и со всех сторон окружен элементами кладки, в которых также идут процессы сушки.

Исследована скорость сушки образцов шамотного огнеупора при $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$. График снижения массы шамотного образца в течение первых 7 ч показан на рис. 2. На графике можно выделить три стадии: начальную стадию сушки, период постоянной скорости сушки и период падающей скорости. Скорость сушки в период постоянной скорости составляет в среднем $0,0025\%$ /ч.

Расчет скорости сушки N произведем по формуле (4) для вышеприведенных условий. Измерив температуру на внешней стороне поверхности кладки, можно оценить плотность теплового потока с поверхности кладки. Например, при температуре на поверхности 50°C плотность теплового потока с поверхности составит 250 Вт/м^2 . Приняв скрытую теплоту испарения в 2258 кДж/кг и плотность шамотного материала равной 2000 кг/м^3 , получаем среднюю скорость сушки при указанных условиях $0,0031\%$ /ч. Таким образом, разница в результатах при практических замерах меньше значения, полученного расчетным путем, не более чем на 20% .

В промышленности сушка ВТА часто осуществляется при значительно больших значениях теплового потока. Это объясняется тем, что при сушке пламенем от горелок или электрической дугой нет возможности выдерживать уровень температуры около 100°C . При этом сам процесс сушки идет со значительной составляющей вынужденной конвекции за счет работы топливной горелки. В этой связи возникает необходимость проведения дополнительных экспериментов с моделированием процесса сушки при открытом пламени. Исследовательский стенд был усовершенствован и электроразогрев был заменен на разогрев от газовой го-

релки посредством сжигания пропан-бутановой смеси (50 % пропана и 50 % бутана). На стенде с использованием газовой горелки были проведены замеры скорости сушки в период постоянной скорости, среднее значение которой составило 0,00375 %/ч. Скорость сушки при использовании газовой горелки оказалась в 1,5 раза выше скорости сушки при электронагреве. Сравнение экспериментально полученной скорости сушки шамота со скоростью сушки, определенной по формуле (4), показывает, что разность между этими значениями не более 17,5 %. На основании проведенного исследования можно сделать вывод о возможности применения формулы (4) для расчета времени сушки футеровки действующих ВТА.

Произведем расчет скорости и времени сушки для сталеразливочного ковша вместимостью 25 т. При сжигании пропан-бутановой смеси в качестве топлива плотность теплового потока

через футеровку составит 18 кВт/м². С учетом толщины периклазоуглеродистого слоя (135 мм) и плотности материала (3000 кг/м³) получаем скорость сушки, равную 0,07 %/ч. При данной скорости для удаления влаги в количестве 0,38 % требуется 5,43 ч. Полученное значение можно использовать при разработке графика разогрева ВТА после капитального ремонта для удаления влаги при температуре 100 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные испытания показывают, что разность расчетного метода и экспериментально полученных данных на стенде при сушке шамота электронагревом не более 17,5 %, а при сушке при сжигании пропан-бутановой смеси — не более 20 %. Таким образом, возможно использование полученных математических зависимостей для практического применения.

Библиографический список

1. **Innocentini, M. D. M.** Vaporization process and pressure build-up during dewatering of dense refractory castables / M. D. M. Innocentini, M. F. S. Miranda, F. A. Cardoso, V. C. Pandolfelli // J. Am. Ceram. Soc. — 2003. — Vol. 86, № 9. — P. 1500–1503.
2. **Ramal, F. T.** Water content and its effect on the drying behavior of refractory castables, refractories / F. T. Ramal, Jr. R. Salomao, V. S. Pandolfelli // Applications and News. — 2005. — Vol. 10, № 3. — P. 10–13.
3. **Salomao, R.** The particle size distribution effect on the drying efficiency of polymeric fibers containing castables / R. Salomao // Ceram. Int. — 2008. — № 34. — P. 173–180.
4. **Zabolotskii, A. V.** Mathematical modeling of the movement of moisture in refractory concrete and gunni bodies during drying / A. V. Zabolotskii, L. M. Aksel'rod, R. A. Donich [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 6. — P. 578–584. <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0026-y>.
5. **Заболотский, А. В.** Математическое моделирование движения влаги в огнеупорных бетонах и торкрет-массах во время сушки / А. В. Заболотский, Л. М. Аксельрод, Р. А. Донич [и др.] // Новые огнеупоры. — 2016. — № 12. — С. 6–12.

5. **Baboo, Prem.** Secondary reformer refractory dry out operation / Prem Baboo // Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT). — 2019. — Vol. 8, № 5. — P. 536–545.
6. Проект сушки огнеупорной антикоррозионной защиты оборудования серного потока «Соликамскбумпром». <http://wellons.pro/en/articles/drying-project-refractory-sulfur-flow-plant-jsc-solikamskbumprom>.
7. **Jenkins, Jim.** Important considerations for refractory dryouts, startups & shutdowns 2011 sulfur recovery symposium in vail, CO / Jim Jenkins, Andy Piper, Jeff Proctor. — Brimstone STS Limited — September 13–16, 2011. — P. 3–15.
8. **Luz, A. P.** Drying behavior optimization of dense refractory castables by adding a permeability enhancing active compound / A. P. Luz, M. H. Moreira, C. Wöhrmeyer [et al.] // Ceram. Int. — 2019. — Vol. 45, № 7. — P. 9048–9060.
9. **Лыков, А. В.** Теория сушки / А. В. Лыков. — М.: Энергия, 1968. — 600 с.
10. **Тимошенко, Д. А.** Сушка футеровки тепловых агрегатов / Д. А. Тимошенко, Е. Е. Коломыцев // Новые огнеупоры. — 2013. — № 12. — С. 12–14. ■

Получено 30.11.19

© А. С. Никифоров, Е. В. Приходько,
А. К. Кинжибекова, А. Е. Карманов, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



26th International Conference on
Advanced Materials,
Nanotechnology and Engineering

June 22-23, 2020 | Brisbane, Australia

Advanced Materials 2020