

А.С. Никифоров¹, Е.В. Приходько¹, А.К. Кинжибекова¹,
М.Г. Жумагулов², А.Е. Карманов¹, Ш.М. Нуркина¹

¹Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан

²Евразийский национальный университет им.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

(E-mail: akmaral70@mail.ru)

Расчёт скорости и времени сушки огнеупорных материалов

Аннотация. В статье представлены результаты расчетов скорости и времени сушки огнеупорных материалов, используемых в высокотемпературных агрегатах. Применение регламентированных режимов сушки вызывает трудности, связанные с неравномерным разогревом футеровки и отсутствием учета эксплуатационных особенностей конкретного высокотемпературного агрегата. В связи с этим возникла необходимость определения средней скорости сушки с учетом специфики эксплуатации самого агрегата.

В статье приведена методика расчёта времени сушки (скорости сушки). Величина скорости сушки позволила рассчитать время, необходимое для сушки. Была проверена адекватность методики расчёта времени сушки экспериментальным способом.

Сравнение экспериментально полученной скорости сушки шамота со скоростью сушки, определенной по формуле, показало, что разность между этими значениями составила не более 17,5 %. Таким образом, проведенные исследования доказывают, что определение скорости сушки огнеупорных материалов возможно по приведенной методике. Использование полученных данных позволило произвести расчёт времени сушки футеровки 25-тонного сталеразливочного ковша.

Ключевые слова: огнеупорные материалы, сушка, скорость разогрева, футеровка, высокотемпературный агрегат, график разогрева.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-68-36-2020-133-4-85-91>

Введение. Важной задачей при построении графиков разогрева высокотемпературных агрегатов является решение вопроса о необходимости делать выдержку при температуре около 110 оС или продолжении нагрева с меньшими скоростями в процессе сушки.

Производители огнеупорной продукции, как правило, прилагают рекомендации по использованию, где оговаривается время выдержки, температура и пр. Однако на практике применение регламентированных режимов сушки вызывает трудности, связанные с неравномерным разогревом футеровки, обусловленным работой горелочных устройств [1]. Кроме этого, выданные рекомендации могут быть общего плана и не учитывать эксплуатационные особенности конкретного высокотемпературного агрегата.

Постановка задачи. Процесс разогрева высокотемпературных агрегатов содержит важную составляющую – сушку, для определения продолжительности которой необходимо знать скорость удаления влаги из футеровочного материала. Задачей является сопоставление значений скоростей сушки, полученных расчётным и экспериментальным путями и оценка времени сушки в общем времени разогрева 25-тонного сталеразливочного ковша.

История. В ряде работ предлагается вести процесс сушки при параллельном подъёме температуры, так, например, в работе [2] говорится, что для магнезиально-известковых бетонных футеровок в интервале от 150 до 200 °С скорость нагрева не должна превышать 15 – 20 °С/ч.

В других источниках [3] предлагается делать первую выдержку при температуре выше 600 оС (Рисунок 1).

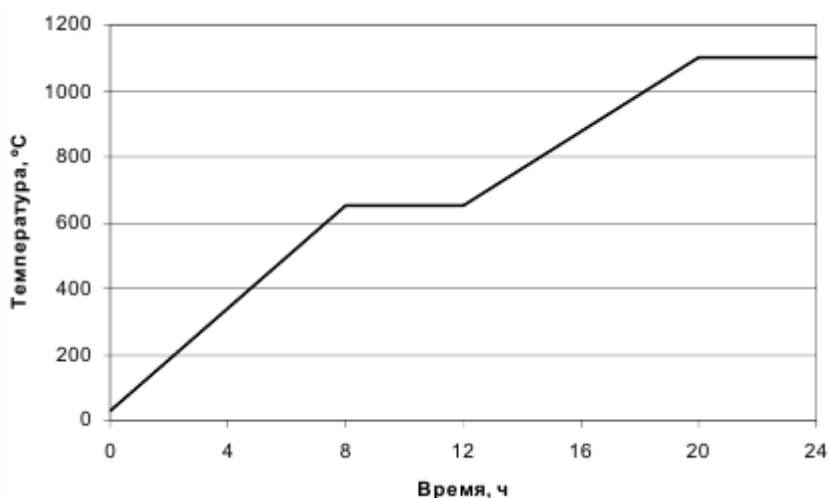


Рисунок 1 – График температуры внутренней поверхности футеровки ковша

Процесс сушки огнеупоров происходит посредством испарения влаги, находящейся в порах огнеупорного материала, которые не являются идеальными капиллярами. Капилляры по длине могут иметь как разные сечения, так и многочисленные изгибы, выступы и впадины. Всё это способствует тому, что при ведении процесса сушки обязательно в капиллярах будет скапливаться «защемлённый» воздух. Этот воздух будет препятствовать прохождению влаги изнутри огнеупорного материала наружу, к поверхности, с которой происходит испарение влаги в окружающую среду. Это, в свою очередь, при подводе теплоты в процессе сушки может привести к парообразованию из влаги, находящейся за «защемлённым» воздухом. Давление образовавшегося пара позволит протолкнуть пузырёк воздуха и выйти образовавшемуся пару наружу.

Между тем при образовании большого количества пара, вследствие подвода теплоты в процессе сушки, возможно образование микротрещин в огнеупорном материале. При ведении процесса сушки возникают дополнительные нагрузки за счёт давления пара, значения которого могут достигать 2 МПа, что достаточно для разрушения монолитной футеровки из бетона [4]. Если учесть, что в процессе ведения сушки, как части процесса разогрева, возможно появление температурных напряжений, превышающих допустимый предел, то это ещё более актуализирует снижение скорости разогрева при проведении сушки.

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что подъём температуры во время процесса сушки огнеупорных материалов является нежелательным и при составлении графиков разогрева необходимо предусматривать выдержку («полочку») при температуре около 110 оС.

При этом существуют сложности в оценке рациональности ведения процесса сушки, то есть в увеличении стойкости футеровки при внедрении сушки для конкретного агрегата. В этом случае, до проведения промышленных испытаний, оценка возможна лишь на основе литературных данных.

В [5] приводится пример вывода в ремонт реакторной печи, отработавшей три года. Во время анализа кладки, перед ремонтом, было обнаружено провисание и откол кирпича в фурме горелки. После очередного ремонта произошел прожог футеровки. Проведенное расследование установило, что сушка огнеупоров была главной причиной прожога: график сушки, принятый на предприятии, не соответствовал первоначальным рекомендациям.

Методы исследования. Для определения средней скорости сушки примем ряд допущений. Будем считать, что в период сушки температура материала футеровки неизменна и

вся теплота, передаваемая футеровке, идёт на испарение влаги. Исходя из этого, можно записать следующее равенство:

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

где $q_{\text{прих}}$ – плотность теплового потока прихода теплоты, кВт/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, доля;

$d\tau$ – период времени сушки, с.

Таким образом, формулу (1) можно записать в виде [6]:

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

где ρ – плотность сухого материала футеровки, кг/м³.

R – отношение объёма к поверхности, м.

Откуда можно выразить величину скорости сушки, N :

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

Зная величину скорости сушки, можно рассчитать время, необходимое для сушки, выразив её из формулы (2).

Для корректного применения указанных формул на практике была проверена адекватность методики расчёта времени сушки экспериментальным способом.

Для исследований был взят шамот, с плотностью 2000 кг/м³, скрытую теплоту испарения примем равной 2258 кДж/кг. Оценку скорости сушки проведём по формуле (4) для вышеприведённых условий и на лабораторной установке при следующих условиях нагрева:

- нагрев посредством сжигания пропан-бутановой смеси (50 % пропана и 50 % бутана);

- нагрев в муфельной электропечи в условиях естественной конвекции.

В первом случае моделировалась работа установок по разогреву сталеразливочных ковшей в промышленных условиях на большинстве агрегатов. В этом случае процесс сушки идёт со значительной составляющей вынужденной конвекции за счёт работы топливной горелки и движения продуктов сгорания вдоль поверхности футеровки. Такая промышленная сушка высокотемпературных агрегатов осуществляется при высоких значениях плотности теплового потока.

На стенде с использованием газовой горелки были проведены замеры скорости сушки в период постоянной скорости, среднее значение которой составило 0,00375 %/час. Сравнение экспериментально полученной скорости сушки шамота со скоростью сушки, определенной по формуле (4), показывает, что разность между этими значениями составляет не более 17,5 %.

Во втором случае получаем среднюю скорость сушки при указанных условиях 0,0031 %/час.

Таким образом, разница в результатах при практических замерах меньше значения,

полученного расчётным путём, не более чем на 20 %.

Таким образом, скорость сушки при использовании газовой горелки оказалась в полтора раза выше скорости сушки при электронагреве.

Произведём расчёт скорости и времени сушки для сталеразливочного ковша ёмкостью 25 тонн. При сжигании пропан-бутановой смеси в качестве топлива плотность теплового потока через футеровку составит 18 кВт/м². С учётом толщины слоя периклазоуглерода (135 мм) и плотности материала (3000 кг/м³) получаем скорость сушки, равную 0,07 %/час. При данной скорости сушки для удаления влаги в количестве 0,38 % необходимо 5,43 часа. Полученное значение можно использовать при разработке графика разогрева высокотемпературных агрегатов после капитального ремонта для удаления влаги при температуре 100 оС.

Для удаления влаги, содержащейся в рабочем слое футеровки 25-тонного сталеразливочного ковша, необходимо предусмотреть временную выдержку при температуре 110 оС. С учётом скорости сушки и первоначального содержания влаги рассчитанное время сушки составляет 5 ч 10 минут.

Процесс дальнейшего разогрева (повышения температуры выше 110 оС) будет регламентироваться прочностными свойствами используемых огнеупорных материалов. Расчёт скорости повышения температуры футеровки при разогреве 25-тонных сталеразливочных ковшей описан в [7].

Результаты

Рассмотрим разработанные графики разогрева 25-тонного сталеразливочного ковша (Рисунок 2). Кривая 1 отражает реальный график разогрева после капитального ремонта, используемый на предприятии. Разработанный график разогрева ковшей после капитального ремонта с учётом сушки при 110 оС и зависимости предела прочности от температуры представлен кривой 2. На нём скорость разогрева до сушки составляет 60 оС/ч.

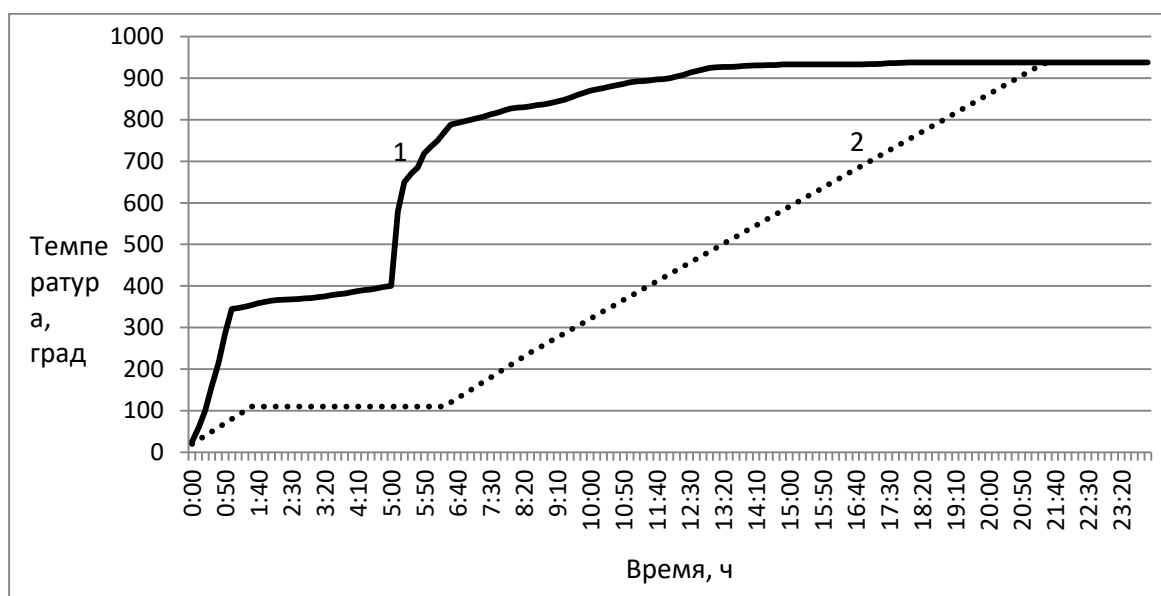


Рисунок 2 – Графики разогрева 25-тонного сталеразливочного ковша

Сокращение общего времени разогрева агрегата до температуры 938 оС составляет 2 ч 30 минут.

Как видно из анализа кривой 2, введение процесса сушки в разогрев высокотемпературного агрегата значительно увеличивает время разогрева. Задача эксплуатационного персонала - оценить выгоды от увеличения стойкости футеровки и затраты на увеличение времени разогрева.

Вывод. В процессе исследования была произведена оценка скорости сушки огнеупорных материалов. Проведённые исследования показывают, что определение скорости сушки огнеупорных материалов возможно по приведённой методике с погрешностью не более 17,5 % при сжигании пропан-бутановой смеси. Использование полученных данных позволило произвести расчёт времени сушки футеровки 25-тонного сталеразливочного ковша, которое составило 5 ч 10 минут.

Список литературы

1. Романько Я.В., Решетняк С.И. Исследование сушки наливной футеровки промежуточного ковша // *Металлургическая теплотехника. Сб. научных трудов НМетАУ.* -2008. - №1 (15). -С. 246-254.
2. Хорошавин Л.Б. Магнезиальные бетоны. – М.: Металлургия, 1990. - 167с.
3. Бейцун С.В., Михайловский Н.В., Мурдий В.Ю. Исследование на компьютерной модели разогрева сталеразливочных ковшей // *Вісник Приазовського державного технічного університету.* Серія: Технічні науки. -2015. -Т. 1. -№30. -С. 105-111.
4. R. Salomao, The particle size distribution effect on the drying efficiency of polymeric fibers containing castables // *Ceramics International.* – 2008. -№ 34. –Р. 173 – 180.
5. Important Considerations for Refractory Dryouts, Startups & Shutdowns 2011 Sulfur Recovery Symposium in Vail, CO. - Brimstone STS Limited. – 2011. –Р.3-15.
6. Лыков А.В. Теория сушки. -М.: Энергия, 1968. - 372 с.
7. Никифоров А.С., Приходько Е.В., Кинжибекова А.К., Карманов А.Е. Разработка программы расчёта температурных напряжений в футеровках высокотемпературных агрегатов // *Вестник ПГУ, серия «Энергетическая».* -2018. -№2. -С. 253-260.

**А.С. Никифоров¹, Е.В. Приходько¹, А.К. Кинжибекова¹, М.Г.Жумагулов²,
А.Е. Карманов¹, Ш.М. Нуркина¹**

¹*Торайгыров университеті, Павлодар, Қазақстан*

²*Д.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,
Нұр-Сұлтан, Қазақстан*

Отқа төзімді материалдарды кептіру жылдамдығы мен уақытын есептеу

Аңдатпа. Мақалада жоғары температуралы агрегаттарда қолданылатын отқа төзімді материалдарды кептіру жылдамдығымен уақытын есептеу нәтижелері берілген.

Кептірудің регламенттелген режимдерін қолдану футеровканың біркелкі емес қызуына және нақты жоғары температуралы агрегаттың пайдалану ерекшеліктерін есепке алудың жоқтығына байланысты қиындықтар туғызады.

Осыған байланысты агрегаттың өзін пайдалану ерекшелігін ескере отырып, кептірудің орташа жылдамдығын анықтау қажеттілігі туындады.

Мақалада кептіру уақытын (кептіру жылдамдығын) есептеу әдістемесі келтірілген. Кептіру жылдамдығының шамасы кептіру үшін қажетті уақытты есептеуге мүмкіндік берді. Тәжірибелік тәсілмен кептіру уақытын есептеу әдістемесінің адекваттылығы тексерілді.

Шамотты кептірудің эксперименталды алынған жылдамдығын формула бойынша анықталған кептіру жылдамдығымен салыстыру осы мәндердің арасындағы айырмашылық 17,5%-дан аспайтынын көрсетті. Осылайша, жүргізілген зерттеулер отқа төзімді материалдарды

кептіру жылдамдығын анықтау келтірілген әдістеме бойынша мүмкін екендігін дәлелдейді. Алынған мәліметтерді пайдалану 25 тонна болат таратқыш шөмішінің футеровкасын кептіру уақытын есептеуге мүмкіндік берді.

Түйін сөздер: отқа төзімді материалдар, кептіру, жылыту жылдамдығы, футеровка, жоғары температуралы агрегат, жылыту графигі.

**A.S. Mikiforov¹, E.V. Prihodko¹, A.K. Kingibekova¹, M.G.Gumagulov²,
A.E.Karmanov¹, Sh.M.Nurkina¹**

¹Toraigyrov University, Pavlodar c., Kazakhstan

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan

(e-mail: akmaral70@mail.ru)

Calculation of drying temp and time of refractory materials.

Abstract. The article contains the results of calculations of the temp and time of drying of refractory materials which are used in high-temperature units. The use of regulated drying modes causes difficulties due to the uneven heating of the lining and the lack of consideration of the operating characteristics of the high-temperature unit. In this regard, there have been arisen a need to determine the average drying speed, considering the specifics of the operation of the unit itself.

The study considers a methodology for calculating the drying time (drying speed). The drying speed allows us to calculate the time required for drying. The adequacy of the method for calculating of the drying time has been verified experimentally.

The difference between the experimental drying rate and the calculated drying speed has shown a difference of no more than 17.5%. Thus, the conducted studies prove that the determination of the drying speed of refractory materials is possible according to the described method. Using obtained data, it is possible to calculate the drying time of the lining of a 25-ton steel pouring ladle.

Keywords: Refractory materials, drying, heating rate, lining, high-temperature unit, heating schedule

References

1. Romanko Ya.V., Reshetnyak S.I. (2008) Issledovanie sushki nalivnoi futerovki promezhutochnogo kovsha [Investigation of the drying of the bulk lining of the tundish], Metallurgicheskaya teplotekhnika. Sb. nauchnyh trudov NMetAU [Metallurgical heating engineering. Collection of scientific papers]. №1 (15). P.246-254 [in Russian].
2. Horoshavin L.B. (1990) Magnezialniye betony [Magnesia concrete] (Metallurgy, Moscow, 167 p.) [in Russian].
3. Beicun L.V. Mihailovsky N.V. Murdiy B.Yu. (2015) Issledovaniye na kompyuterno modeli razogreva stalerazlivochnykh [Research on a computer model of heating steel-pouring ladles], Vestnik PGTU. Seriya; Tehnicheskiye nauki [Bulletin of PSTU. Series: Engineering Sciences.] Vol. 1. №30. P.105-111 [in Russian].
4. Salomao R. (2008) The particle size distribution effect on the drying efficiency of polymeric fibers containing castables, *Ceramics International*. №34. P.173–180.
5. Important Considerations for Refractory Dryouts, Startups & Shutdowns 2011 Sulfur

Recovery Symposium in Vail, CO. - Brimstone STS Limited -September 13-16, 2011, Page 3 of 15.

6. Lykov A.V. (1968) Teoriya sushki [Drying theory] (Energy, Moscow, 372 p) [in Russian].

7. Nikiforov A.S., Prikhodko Y.V. Kinzhibekova A.K. Karmanov A.E. (2018) Razrabotka programmy rascheta temperaturnykh napryazheniy v futerovke vysokotemperaturnykh agregatov [Development of a program for calculating temperature stresses in the lining of high-temperature units]. Vestnik PGU, seriya "Energeticheskaya" [PSU Bulletin, "Energy" series]. №2. P. 253-260.

Сведения об авторах

Никифоров А.С. – автор для корреспонденции, доктор технических наук, зав.кафедрой теплоэнергетики, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан.

Приходько Е.В. – кандидат технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан.

Кинжибекова А.К. – кандидат технических наук, профессор кафедры теплоэнергетики, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан.

Жумагулов М.Г. - кандидат технических наук, асс.профессор кафедры теплоэнергетики, Евразийский национальный университет им.Н.Гумилева, Нур-Султан, Казахстан.

Карманов А.Е. – Ph.D., кандидат технических наук, асс.профессор кафедры теплоэнергетики, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан.

Нуркина Ш.М. – старший преподаватель кафедры теплоэнергетики, Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан.

Nikiforov A.S. – corresponding author, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan.

Prikhodko E.V. - Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan.

Kinzhibekova A.K. - Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan.

Zhumagulov M.G. - Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Heat Power Engineering, Gumilyov Eurasian National University, Nur-Sultan, Kazakhstan.

Karmanov A.E. - PhD, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan.

Nurkina Sh.M. - Senior Lecturer of the Department of Heat Power Engineering, Toraigyrov University, Pavlodar, Kazakhstan.