УДК 662.9

© А. Л. Шкаровский, д-р техн. наук, профессор
© В. Б. Бируля, старший преподаватель
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: szkarowski@mail.ru, viktor-inf@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-206-212

© A. L. Szkarowski, Dr. Sci. Tech., Professor
© V. B. Birulia, senior teacher
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: szkarowski@mail.ru, viktor-inf@yandex.ru

МОДЕРНИЗАЦИЯ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОЙКЕРАМИКИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

MODERNIZATION OF TUNNEL FURNACES FOR CONSTRUCTION CERAMICS PRODUCTION TO REDUCE HEAT CARRIER CONSUMPTION

Рассматривается влияние модернизации туннельной печи на удельный расход энергоносителей. Результаты исследования позволяют определить эффективность внедрения разработанной технологии модернизации конвейерных линий по производству керамической плитки отечественной промышленности, построенных по типовому проекту. Предложенная в работе методика позволяет более точно оценить снижение удельного потребления ресурсов, в отличие от применяемой в настоящее время на основе прямого сопоставления удельных значений.

Ключевые слова: туннельная печь, энергоэффективность, удельный расход энергоносителей.

The paper considers the influence of modernization of the tunnel furnace on the specific consumption of energy carriers. The results of the study make it possible to determine the effectiveness of introducing the developed technology of conveyor lines modernization for the production of ceramic tiles of domestic industry, built according to the standard design. The proposed method allows more accurately estimating the decrease in the specific consumption of resources on the basis of direct comparison with the specific values currently available.

Keywords: tunnel furnace, energy efficiency, specific energy consumption.

В настоящее время остро стоит задача экономии энергоресурсов на предприятиях, производящих строительную керамику. Именно высокая доля энергетических затрат в себестоимости продукции приводит к низкой конкурентоспособности продукции. Модернизация существующих агрегатов сушки и обжига керамических изделий позволяет без увеличения энергозатрат повысить качество изделий и производительность агрегатов, увеличить экологическую безопасность производства путем снижения выбросов загрязнителей в атмосферу, уменьшить количество брака, сократить численность обслуживающего персонала и улучшить условия труда.

Наиболее энергоемкими являются процессы, связанные с обжигом. До 70 % расхода топлива при производстве стройизделий приходится на тепловую обработку сырьевых материалов [5].

Авторами была поставлена и решена задача разработки и внедрения инновационной технологии эффективного использования природного газа в производстве стройкерамики. Сущность технологии заключается в комплексной модернизации и утилизации энергии отходящих газов на конвейерной линии по производству напольной керамической плитки.

Исследования выполнялись на заводе по производству керамической плитки, расположенном в п. Никольское (Ленинградская область) — предприятии, построенном по типовому проекту СМК-122 (ПКБ «НИИСтройкерамика»).

После внедрения разработанных конструктивно-технологических решений были проведены экспериментальные исследования и получены данные по состоянию и эффективности модернизированного энергоиспользующего оборудования.

Основные направления модернизации конвейерной линии для производства керамической плитки включают:

- реконструкцию системы газоснабжения сушилки и печи, включая комплексную систему автоматизации процессов сушки и обжига керамической плитки;
- разработку системы внутренней рециркуляции продуктов сгорания;
- разработку типовой секции печи обжига, которая позволяет производить ремонт и замену отдельных секций;
- разработку термоограждений секций на базе использования современных теплозащитных материалов [1];
- утилизацию теплоты отходящих газов.

На исследуемой автоматизированной конвейерно-поточной линии (КЛ) производится керамическая плитка по ГОСТ 6787–01 размером $300 \times 300 \times 8$ мм и весом 1,56 кг, с производительностью 690 шт./ч ($65,5 \text{ м}^2/\text{ч}$). Температура сушки составляет $250\text{--}280^\circ\text{C}$. Высушенные до нулевой влажности плитки переходят в роликовую печь, где обжигаются при температуре $1080\text{--}1150^\circ\text{C}$.

Плитки перемещаются в печи роликовым транспортером. Ролики для соответствующих зон печи выполнены из жаропрочных сплавов ОХ23Н18, Х77ОЮ, Х18Н10Т, их диаметр — 28 мм. Во избежание зажима роликов, который может произойти из-за осадки или расширения кладки, печь разбита на секции, каждая из которых имеет свой каркас, не связанный со стойками и рамой роликового транспортера.

Горелки расположены под рольгангом по всей длине зоны нагрева.

На линии устанавливаются:

- в секциях сушки № 1–11 — газогорелочные устройства МФ-15;
- в секциях печей № 6–29 — газогорелочные устройства В-32.

Разработанное автоматизированное кольцо регулирования (система газоснабжения нескольких секций печи с автоматическим регулированием расхода газового топлива) с двумя секциями показано на рис. 1. Последовательное расположение секций и колец регулирования печи обеспечивает не только экономию газового топлива, но и равномерный прогрев изделий [2, 6, 7].

Система газоснабжения КЛ № 8 состоит из разводящего газопровода D_y 50 мм, подводки к газогорелочным устройствам D_y 32 мм и продувочных трубопроводов D_y 25 мм. На печи находятся 11 регулируемых автоматически колец регулирования и три кольца на сушилках. На каждом кольце установлены клапан регулирующий КР-160 с исполнительным электрическим однооборотным механизмом МЭО, манометры и отключающие краны.

Эффективность ограждающих конструкций определяется по потерям теплоты в окружающую среду, которые на существующих немодернизированных линиях достигали 14,5 % [1]. Для снижения теплотерь до допустимых пределов при используемом материале (шамотный кирпич, коэффициент теплопроводности $\lambda = 1,1\text{--}1,4 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$) необходимая толщина стенки должна превышать 1 м, что является недопустимым по экономическим и технологическим соображениям. Кроме того, существенным недостатком являются значительные присосы воздуха в камеру печи, вызванные ее низкой газоплотностью, а также сложность ремонта пришедших в негодность участков ограждения.

Указанные недостатки привели к необходимости анализа характеристик современных эффективных теплоизоляционных материалов. Проведенный анализ выявил материалы, обладающие требуемой эффективностью ($\lambda < 0,25 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$), достаточной прочностью и технологичностью для строительства печей при устройстве подвесных элементов и невысокой стоимостью.

С целью более глубокого снижения температуры уходящих газов (возможно снижение на $100\text{--}120^\circ\text{C}$ [15]) в производственном цехе завода на конвейерной линии был разработан и установлен водяной утилизатор теплоты уходящих газов от печи кожухотрубного типа [9]. Расчетная тепловая мощность утилизатора тепловой энергии уходящих газов типа УТЭУ-1,12 составила 0,96 Гкал/ч. Установка утилизатора тепловой энергии позволила предприятию отказаться от эксплуатации собственной котельной. А полученная энергия обеспечивает не только технологические и собственные нужды предприятия, но и потребности теплоснабжения соседних производств.

Рис. 1. Разрез печи конвейерной линии:

1 — термопара ТХА-0192-Т; 2 — горелка В-32; 3 — ось транспортирующего ролика; 4 — подающий газопровод $\Gamma_{\text{п}}$ D_y 50; 5 — газопровод кольца регулирования $\Gamma_{\text{р}}$ D_y 32; 6 — продувочный газопровод $\Gamma_{\text{пр}}$ D_y 25; 7 — привод конвейера; 8 — регулировочный клапан КР-160 с МЭО; 9 — люк для очистки пода; 10 — секция печи; 11 — кран ГШК 32; 12 — боковая стенка секции; 13 — смотровое отверстие

Сложность планирования промышленного эксперимента заключалась в необходимости решать задачу оптимизации наряду с выпуском готовой продукции, без каких-либо нарушений принятого технологического режима.

Исследования проводились в соответствии с типовой методикой режимно-наладочных испытаний печей и сушил, упрощенной методикой Равича [3] и рекомендациями [4]. Методика разработана с целью оптимизации работы и определения теплового баланса конвейерных линий (КЛ) с процессами сушки, обжига и охлаждения керамических плиток.

Одним из способов определения эффективности энергопотребления на предприятии является оценка динамики удельного расхода энергоносителей (УРЭ) на единицу продукции. При неизменной производительности логика очевидна — чем меньше величина УРЭ, тем рацио-

нальное использование энергоносителей [11, 12]. Однако производительность постоянно меняется для разных периодов цикла работы предприятия.

Наиболее точно определить значения УРЭ позволяет зависимость этого показателя от производительности для различных периодов времени — $W_j = f(P_j)$, где W_j — удельный расход энергоносителей за рассматриваемый интервал времени (например, кВт $\times$ ч/м², м³/м² — отношение расхода природного газа к выпуску керамической плитки); P_j — производительность в единицу времени рассматриваемого периода, м²/мес. Графическое отображение результатов этой оценки дается на рис. 2.

Представленный график не только отражает результаты анализа зависимости удельного энергопотребления от объема выработки, но и может служить в текущем году основой для контроля

Рис. 2. Удельное потребление природного газа на выпуск продукции, м³/м²

уровня эффективности использования энергоносителей. Кроме того, он подтверждает, что модернизация технологического оборудования способствует снижению энергетических затрат на выпуск продукции. Также следует отметить, что при более высоких значениях выпуска продукции величина удельного энергопотребления приближается к расчетному минимуму.

Кроме того, графическое представление на рис. 3 значения ежемесячного потребления газового топлива и выпуска керамической плитки позволяет не только фиксировать объемы реального энергопотребления, но и, что особо важно, выявлять причины возникновения неэффективного потребления теплоэнергоресурсов (ТЭР) [14]. Физический смысл этого сравнения — сопоставить изменения удельного расхода энергоносителей на единицу продукции и текущий уровень производительности при прочих равных воздействующих условиях (например, сезон года, состояние исходного сырья, сухость воздуха и т. п.).

В настоящее время, несмотря на достаточно развитые системы автоматизированного учета энергоносителей, предприятия, в большинстве своем, осуществляют только фиксацию информации и контроль соблюдения договорных по-

казателей. Этого оказывается недостаточно, и необходим систематический и грамотный инженерный анализ показателей потребления энергоносителей [13].

Сопоставление абсолютных (рис. 3) и относительных показателей потребления энергоносителей (рис. 4) и выработки продукции отражает следующее:

- значительное (более чем на 60 %) снижение потребления электроэнергии и природного газа в начале 2014 г. обусловленное запуском модернизированной КЛ № 8;
- наличие тенденции монотонного роста месячного производства продукции в период с января по декабрь 2012 г., затем незначительное снижение, и начиная с марта 2013 г. по декабрь 2013 г. уверенный рост на 71 % по отношению к январю 2012 г.;
- достаточно близкую корреляцию между изменением объемов выработки продукции и потребления электрической энергии;
- незначительное превышение относительно расхода газа над выпуском продукции в период ноября 2012 г. по февраль 2013 г., характеризующийся снижением производства плитки;
- существенное (более чем на 80 %) увеличение потребления воды в июле 2012 г. и в июле

Рис. 3. Выпуск продукции и потребление природного газа за 2012–2015 гг.

Рис. 4. Выпуск продукции и потребление энергоносителей за 2012–2015 гг. в % к январю 2012 г.

2013 г., без соответствующего увеличения производства плитки, что объясняется увеличением расхода воды на хозяйственно-бытовые нужды.

Кроме того, среднегодовой удельный расход природного газа в 2013 г. снизился на 6 % по отношению к 2012 г. (с 5,44 до 5,14 м³/м²), при этом минимальное значение соответствовало декабрю 2013 г. и составило 4,56 м³/м², максимальное

значение соответствовало февралю 2013 г. и составило 6,31 м³/м².

Проанализируем снижение потребления ТЭР, обусловленное запуском модернизированной КЛ № 8. Сравнительные энергетические показатели работы модернизированной КЛ № 8 и устаревших КЛ № 1–7, 9–11 приведены в таблице. Устаревшие КЛ обладают значительно более низкими удельными энергетическими показателями.

**Энергетические показатели работы конвейерных линий по производству
керамической плитки**

Номер КЛ	Производительность		Расход газа, м³/ч	КПД, %		Удельный расход условного топлива на готовую продукцию	
	шт./ч	м²/ч		η_s	η_r	кг/м²	кг/кг
КЛ1	460	45	136	28,4	15,8	4,01	0,235
КЛ3	420	37,8	117,5	22,3	22,3	2,69	0,158
КЛ5	550	49,5	124,1	31,0	24,6	2,64	0,139
КЛ6	800	32	132,3	14,7	14,7	5,62	0,33
КЛ7	310	27,9	118,2	16,6	16,6	3,43	0,19
КЛ8	817	73,5	171,0	40,0	30,6	2,01	0,11
КЛ9	360	14,4	98	15,5	15,5	5,6	0,46
КЛ10	320	27,9	142,6	22,6	22,6	3,75	0,19
КЛ11	710	28,4	148	20,9	13,0	4,13	0,25

Примечание. η_s — энергетический КПД; η_r — технологический КПД.

Удельные расходы условного топлива на выпуск готовой продукции в два с лишним раза ниже нормативных значений, а технологический КПД (η_r) не превосходит 24 %, в большинстве случаев находится в пределах 15–16 %.

Подробные результаты исследований работы модернизированной печи приведены в [2] и согласуются с данными [8, 10].

Анализ значений УРЭ выявил положительную тенденцию снижения среднегодовых удельных расходов газа, что объясняется увеличением объема производимой плитки. Увеличение удельного потребления электроэнергии и воды свидетельствует о наличии скрытых резервов экономии энергоресурсов.

Выводы

В заключение необходимо отметить, что существующий подход прямого сопоставления удельных значений для разных отрезков времени не всегда корректен, так как:

- изменяются условия работы и вид выпускаемой продукции;
- корректируется физико-химический состав компонентов продукции;
- увеличивается объем выпуска продукции, но есть неритмичность загрузки технологического процесса.

1. Исследования подтвердили эффективность использования зависимости удельного расхода энергоресурсов от производительности для различных периодов времени, что позволяет рацию-

нальное оценивать использование энергоносителей.

2. В результате запуска модернизированной КЛ № 8 произошло значительное (более чем на 60 % относительно максимума) снижение потребления электроэнергии и природного газа на предприятии.

3. Модернизация КЛ № 8 с применением инновационных технологий и схем использования газового топлива, оптимизацией режимов обжига, утилизацией теплоты отходящих газов печей для теплофикационных и других нужд и применением эффективных теплоизоляционных материалов позволила достичь удельного расхода условного топлива КЛ, равного 2,01 кг/м² плиток (снижение по сравнению с базовым показателем на 24 %; за базовые приняты показатели КЛ № 5, соответствующие работе КЛ № 8 до модернизации). Экономия природного газа составила 393 тыс. м³/год.

Библиографический список

1. Бируля В. Б., Воликов А. Н. Энергоэффективность модульной конструкции роликовой печи для производства керамической плитки // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 5 (34). С. 155–158.
2. Бируля В. Б. Комплексная автоматизация системы газоснабжения туннельных печей по производству стройкерамики // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 137–142.
3. Равич М. Б. Эффективность использования топлива. М.: Наука, 1977. 344 с.

4. Штаудте В. Рациональное использование энергии при обжиге керамики. М.: Легпромбытиздат, 1987. 88 с.

5. Abdelaziz E. A., Saidur R., Mekhilef S. A review on energy saving strategies in industrial sector // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol 15. Pp. 150–168.

6. Liu Y. J., Li J. D., Misra R. D. K., Wang Z. D., Wang G. D. A numerical analysis of slab heating characteristics in a rolling type reheating furnace with pulse combustion // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 107. Pp. 1304–1312.

7. Dugwell D. R., Oakley D. E. A model of heat transfer in tunnel kilns used for firing refractories // *Heat Mass Transfer*. 1988. Vol. 31. Pp. 2381–2390.

8. Mezquita Ana, Boix Juan, Monfort Eliseo, Mallol Gustavo. Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 65. Pp. 102–110.

9. Hasanuzzaman M., Rahim N. A., Hosenuzzaman M., Saidur R., Mahbulul I. M., Rashid M. M. Energy savings in the combustion based process heating in industrial sector // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. Pp. 4527–4536.

10. Massimo Milani, Luca Montorsi, Matteo Stefani, Roberto Saponelli, Maurizio Lizzano. Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement // *Journal of Environmental Management*. 2017. Vol. 1. Pp. 1–12.

11. Губинский В. И., Лу Чжун-У. Теория пламенных печей. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.

12. Исламов М. Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей. Л.: Химия, 1986. 280 с.

13. Нехорошев А. В., Цителаури Г. И., Хлеббонек Е., Жадамбаа Ц. Ресурсосберегающие технологии керамики, силикатов и бетонов. Структурообразование и тепловая обработка. М.: Стройиздат, 1991. 488 с.

14. Лисиенко В. Г., Волков В. В., Маликов Ю. К. Улучшение топливоиспользования и управление теплообменом в металлургических печах. М.: Металлургия, 1988. 231 с.

15. Szkarowski A., Jurmanov B. Heat Exchange in Fluidised Bed Pyrolysis Oven // *Euro Heat&Power*. English Edition. Vol. 13. II/2016. Pp. 24–27.

References

1. Birulya V. B., Volikov A. N. *Ehnergoehffektivnost' modul'noy konstruktсии rolikovoy pechi dlya proizvodstva keramicheskoy plitki* [Ecological aspects of dry sorption purification of flue gases resulting from aluminum production]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2012, no. 5 (34), pp. 155–158.

2. Birulya V. B. *Kompleksnaya avtomatizatsiya sistemy gazosnabzheniya tunnel'nykh pechey po proizvodstvu*

stroykeramiki [Integrated automation of gas supply system of tunnel kilns for production of building ceramics]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 2 (55), pp. 137–142.

3. Ravich M. B. *Ehffektivnost' ispol'zovaniya topliva* [Efficiency of fuel usage]. Moscow, Nauka Publ., 1977, 344 p.

4. Shtaudte V. *Ratsional'noe ispol'zovanie ehnergii pri obzhige keramiki* [Rational usage of energy at ceramics baking]. Moscow, Legprombytizdat Publ., 1987, 88 p.

5. Abdelaziz E. A., Saidur R., Mekhilef S. A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol 15, pp. 150–168.

6. Liu Y. J., Li J. D., Misra R. D. K., Wang Z. D., Wang G. D. A numerical analysis of slab heating characteristics in a rolling type reheating furnace with pulse combustion. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 107, pp. 1304–1312.

7. Dugwell D. R., Oakley D. E. A model of heat transfer in tunnel kilns used for firing refractories. *Heat Mass Transfer*, 1988, vol. 31, pp. 2381–2390.

8. Mezquita Ana, Boix Juan, Monfort Eliseo, Mallol Gustavo. Energy saving in ceramic tile kilns: Cooling gas heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 65, pp. 102–110.

9. Hasanuzzaman M., et al. Energy savings in the combustion based process heating in industrial sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, pp. 4527–4536.

10. Massimo Milani, et al. Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement. *Journal of Environmental Management*, 2017, vol. 1, pp. 1–12.

11. Gubinskiy V. I., Lu Chzhun-U. *Teoriya plamennykh pechey* [The theory of flame furnaces]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995, 256 p.

12. Islamov M. Sh. *Proektirovanie i ehkspluatatsiya promyshlennykh pechey* [Design and operation of industrial furnaces]. Leningrad, Khimiya Publ., 1986, 280 p.

13. Nekhoroshev A. V., Tsitelauri G. I., Khlebionek E., Zhadambaa Ts. *Resursosberegayushchie tekhnologii keramiki, silikatov i betonov. Strukturoobrazovanie i teplovaya obrabotka* [Resource-saving technologies of ceramics, silicates and concrete. Structure formation and thermal treatment]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1991, 488 p.

14. Lisienko V. G., Volkov V. V., Malikov Yu. K. *Uluchshenie toplivoispol'zovaniya i upravlenie teploobmenom v metallurgicheskikh pechakh* [Improvement of fuel usage and management of heat exchange in metallurgical furnaces]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988, 231p.

15. Szkarowski A., Jurmanov B. Heat exchange in fluidised bed pyrolysis oven. *Euro Heat&Power*, English Edition, vol. 13, no. II, 2016, pp. 24–27.