

УДК 666.94:666.29.053

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КОЛОСНИКОВОМ КЛИНКЕРНОМ ХОЛОДИЛЬНИКЕ

Трубаев П.А., Украинский В.А., Гришко Б.М.

ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова», Белгород, e-mail: trubaev@gmail.com

Задача интенсификации теплообмена в клинкерном холодильнике – повышение его теплового КПД при максимально возможной скорости охлаждения клинкера. На основании результатов компьютерного моделирования аэродинамических процессов и теплообмена в клинкерном колосниковом холодильнике рассматриваются способы повышения эффективности его работы при изменении диаметра гранул клинкера, соотношения высоты слоя и расхода воздуха в секциях холодильника. Установлено, что КПД холодильника находится вблизи от своего максимального значения при значении температуры клинкера после первой секции, находящемся в интервале 300...500°C. Внутри этого диапазона соотношение высоты слоя в первой и второй секциях, а также соотношение расхода воздуха в этих секциях на эффективность работы холодильника практически не влияет. Рассмотрено повышение эффективности работы холодильника при устранении избыточного воздуха путем ввода дополнительного аэродинамического сопротивления и двойной продувки воздуха.

Ключевые слова: гранулированный слой, теплообмен, цементный клинкер, колосниковый холодильник, ANSYS Fluent

THE APPLICATION OF COMPUTER SIMULATION FOR THE ENHANCEMENT OF HEAT TRANSFER TO THE GRATE CLINKER COOLER

Trubaev P.A., Ukrainskij V.A., Grishko B.M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov,
Belgorod, e-mail: trubaev@gmail.com

The problem of heat transfer in the clinker cooler is to increase its thermal efficiency at maximum cooling rate of clinker. According to the results of computer modeling of aerodynamic and heat transfer processes in the clinker grate cooler, were considered the ways, based on changing of the pellet diameter clinker, correlation of the height of the layer and air consumption in the cooler sections. It is established that efficiency of the cooler is about its maximum value when the temperature clinker after the first section being in the range of 300...500°C. Within this range, correlation of the height of the layer in the first and second sections, and the correlation of air consumption in that sections do not have impact on efficiency of the cooler in practice. We considered the raise of efficiency of the cooler performance while eliminating excess air, implemented by entry of additional aerodynamic resistance and double air blowing.

Keywords: granular layer, heat exchange, cement clinker cooler, grate cooler, heat recovery, CFD, ANSYS Fluent

Охлаждение клинкера, выходящего из цементной печи, во многом определяет эффективность процесса обжига и расход топлива. Задача интенсификации теплообмена в клинкерном холодильнике – повышение его теплового КПД при максимально возможной скорости охлаждения клинкера [2–4, 7, 10]. Решение этой задачи наиболее эффективно производить методами компьютерного моделирования [8, 9, 11, 12], но при этом крайне актуальным является задача выбора адекватной модели процесса [1, 9]. Для исследования работы колосникового холодильника использовались результаты физического моделирования теплообмена в слое клинкерных гранул при принудительной фильтрации через него воздуха [1, 5] и компьютерная модель теплообмена при фильтрации воздуха через слой гранул, разработанная в системе Ansys Fluent [6].

Одним из способов регулирования работы холодильника является изменение

высоты слоя в секциях. Обычно эта величина составляет 0,15...0,25 м. В работе [2] рекомендуется во второй секции двухсекционного холодильника поддерживать повышенную высоту слоя клинкера – до 0,45 м – с целью интенсификации теплообмена с одновременным уменьшением расхода избыточного воздуха, что приводит к повышению КПД холодильника. Но при увеличении высоты слоя повышается его сопротивление. Поэтому максимальная высота слоя ограничивается давлением, развиваемым промышленными дутьевыми вентиляторами (не более 2500...3000 кПа). При большой высоте слоя он хуже перемещается и разрыхляется проходящим через него воздухом, что приводит к неравномерному распределению клинкера в слое и снижению эффективности охлаждения клинкера по всей ширине решетки.

Для гранул маленького размера увеличение высоты слоя (при сохранении

постоянным расхода воздуха) на тепловой режим работы холодильника практически не влияет. Но при этом увеличивается сопротивление слоя и соответственно потребляемая мощность вентиляторов. Так, при расходе воздуха в холодильнике $2,3 \text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{кл.}$ (расходе избыточного воздуха $0,5 \text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{кл.}$) и высоте слоя $0,15 \text{ м}$ расчетное сопротивление слоя составило 1470 Па и потребляемая мощность дутьевыми вентиляторами – 80 кВт . При высо-

те слоя $0,3 \text{ м}$ эти значения равны 2900 Па и 155 кВт . Поэтому при небольших диаметрах гранул необходимо поддерживать минимально возможную высоту слоя. Но при увеличении диаметра гранул увеличение высоты слоя приводит к более эффективному охлаждению.

На рис. 1 представлены режимы работы двухсекционного холодильника при различном соотношении перепада давлений в первой и второй секциях.

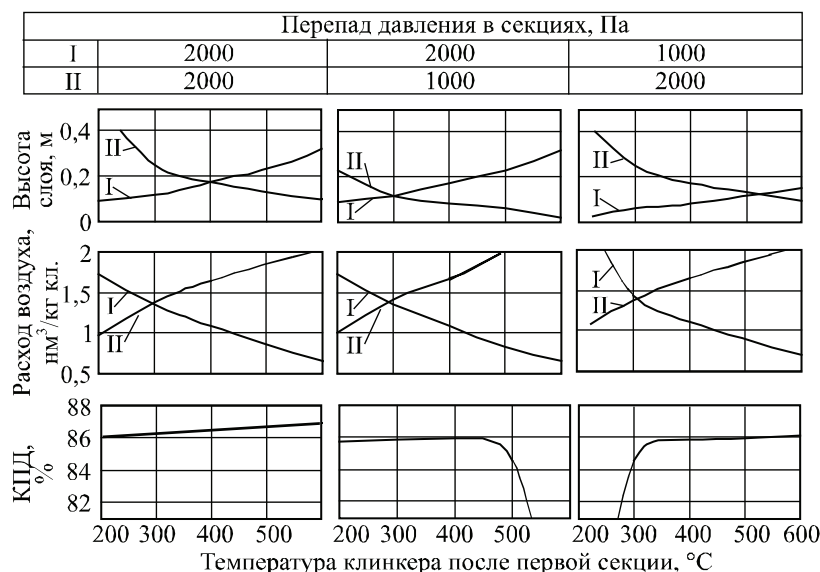


Рис. 1. Режим работы двухсекционного колосникового холодильника в зависимости от температуры клинкера после первой секции (температура клинкера после второй секции 70°C ; расход вторичного воздуха $1,8 \text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{кл.}$; диаметр гранул $0,01 \text{ м}$; производительность 50 т/ч)

Как видно из рис. 1, КПД холодильника находится вблизи от своего максимального значения при значении температуры клинкера после первой секции, находящемся в интервале $300\dots 500^\circ\text{C}$. Внутри этого диапазона соотношение высоты слоя во второй и первой секциях, а также соотношение расхода воздуха в этих секциях на эффективность работы холодильника практически не влияет. Это подтвержда-

ет и рис. 2, где приведены режимы работы холодильника при различном соотношении высоты слоя в первой и второй секциях. Но недостатком увеличения высоты слоя в первой секции является снижение скорости охлаждения клинкера в ней. Оптимальное соотношение высоты слоя в первой и второй секциях составляет $0,70\dots 0,75$ (или соотношение высоты слоя во второй и первой секциях $1,3\dots 1,4$).

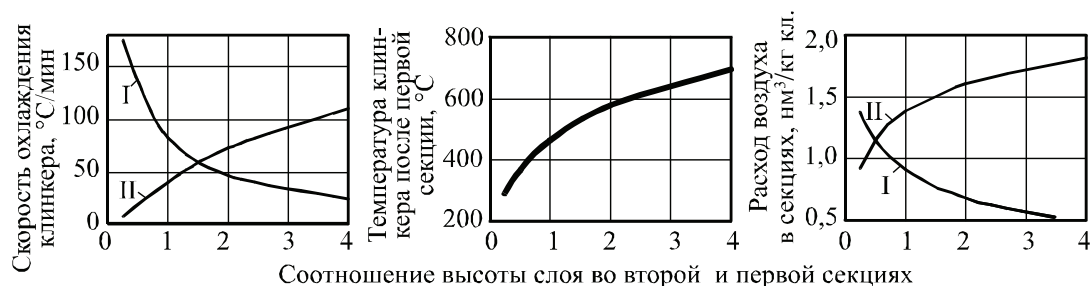


Рис. 2. Режим работы двухсекционного холодильника при различном соотношении высоты слоя в секциях (диаметр гранул $0,01 \text{ м}$; расход вторичного воздуха $1,8 \text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{кл.}$, избыточного – $0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$; КПД $87,3\%$; температура клинкера после второй секции 100°C ; перепад давлений в секциях 2000 Па ; производительность 50 т/ч)

Для повышения эффективности работы колосникового холодильника в ряде работ предлагаются мероприятия по снижению объема или устранению избыточного воздуха. Но они должны сопровождаться сохранением температуры клинкера после холодильника, иначе теплота, теряемая ранее с избыточным воздухом, будет теряться с клинкером.

Установка под колосниковой решеткой решетки Веделя [12] создает дополнитель-

ное сопротивление и уменьшает объем проходящего через слой воздуха. Это заменяет увеличение высоты слоя, когда скорость колосников до требуемого значения уменьшить невозможно. Подбором определенного сопротивления можно добиться полного устранения избыточного воздуха. Но при этом возрастает температура клинкера после холодильника, из-за чего КПД повышается менее чем на 2% и уменьшается интенсивность охлаждения в горячей секции (табл. 1).

Таблица 1

Режимы работы двухсекционного клинкерного холодильника с дополнительным сопротивлением в секциях

Дополнительное сопротивление в секции, Па		Температура клинкера после секции, °С		Расход воздуха в секции, нм ³ /кг кл.		КПД, %
I	II	I	II	I	II	
–	–	367	87	1,2	1,3	86,8
1000	–	468	175	0,7	1,1	88,4
–	1300	367	175	1,2	0,7	88,4
600	600	492	172	0,9	0,9	88,4

Примечание. Высота слоя в первой секции 0,15 м, во второй 0,25 м; перепад давлений в обеих секциях с учетом дополнительного сопротивления 2000 Па; диаметр гранул 0,01 м; производительность 50 т/ч; объем вторичного воздуха 1,8 нм³/кг-кл.

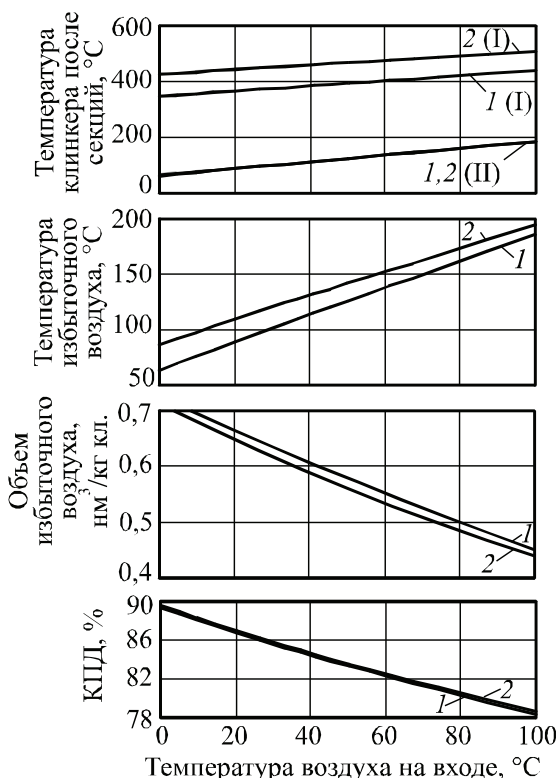


Рис. 3. Режимы работы двухсекционного клинкерного холодильника производительностью 50 т/ч в зависимости от температуры воздуха на входе (высота слоя в первой (I) и второй (II) секциях: 1 – 0,15 и 0,25 м; 2 – 0,19 и 0,19 м




Устранение избыточного воздуха достигается его многократным продуванием через холодильник. На рис. 3 представлены характеристики колосникового холодильника в зависимости от температуры воздуха на входе, при повышении которой эффективность работы холодильника ухудшается.

В табл. 2 представлены режимы работы двухсекционного холодильника с двойной продувкой воздуха. Рассматриваются два режима – смешение вторичного воздуха с воздухом, поступающим в холодильник (который затем разделяется на горячую и холодную секцию), и с воздухом, поступающим в холодную секцию.

Как видно из табл. 2, при смешении избыточного воздуха с воздухом, идущим в холодную секцию, что используется на практике, КПД холодильника повышается на 2,5%, но при этом значительно возрастает температура воздуха на входе в холодную секцию и температура клинкера после холодильника. Эти недостатки можно устранить при смешении избыточного воздуха со всем воздухом, поступающим в холодильник, например, пропорциональным разделением избыточного воздуха и направлением его в воздухопроводы горячей или холодной секций или направлением избыточного воздуха в общий воздухопровод с последующим разделением на воздух горячей и холодной секций.

Таблица 2

Режимы работы двухсекционного клинкерного холодильника с двукратным продуванием воздуха

Высота слоя в секциях, м		Избыточный воздух/воздух, возвращаемый в холодильник		Температура клинкера после секций, °С	КПД, %	Температура воздуха на входе в горячую/холодную секции, °С
I	II	температура, °С	объем, нм ³ /кг кл.			
		Без двойного продувания				
0,15	0,25	111 / –	0,66 / –	88	86,8	20 / 20
		Смешение избыточного воздуха с воздухом, подаваемым в горячую и холодную секции				
0,15	0,20	– / 140	– / 0,75	116	92,5	55 / 55
0,15	0,25	– / 143	– / 0,58	125	92,0	50 / 50
0,15	0,30	– / 146	– / 0,45	131	91,5	45 / 40
		Смешение избыточного воздуха с воздухом, подаваемым в холодную секцию				
0,15	0,20	– / 0,72	– / 178	164	89,2	20 / 114
0,15	0,25	– / 0,56	– / 173	163	89,3	20 / 101
0,15	0,30	– / 0,45	– / 172	162	89,3	20 / 90

Примечание. Диаметр гранул 0,01 м; перепад давлений в обеих секциях 2000 Па; производительность 50 т/ч; объем вторичного воздуха 1,8 нм³/кг-кл.

При таком варианте, кроме снижения температуры воздуха на входе в холодильник и температуры клинкера после него, на 5% повышается КПД холодильника (по сравнению с базовым вариантом). Дополнительно регулирование режима работы холодильника может быть произведено путем изменения высоты слоя во второй секции – при ее повышении несколько снижается КПД, но уменьшается и температура воздуха на входе в холодильник.

Выводы

Установлено, что КПД холодильника находится вблизи от своего максимального значения при значении температуры клинкера после первой секции, находящемся в интервале 300...500°С. Внутри этого диапазона соотношение высоты слоя в первой и второй секциях, а также соотношение расхода воздуха в этих секциях на эффективность работы холодильника практически не влияет.

Рассмотрено повышение эффективности работы холодильника при устранении избыточного воздуха путем ввода дополнительного аэродинамического сопротивления и двойной продувки воздуха. Показано, что двойная продувка может быть осуществлена, если избыточный воздух смешива-

ется не с воздухом, идущим в холодную секцию, а со всем воздухом, поступающим в холодильник.

Список литературы

1. Исследование теплообмена в слое клинкерных гранул при принудительной фильтрации воздуха / В.А. Украинский, П.А. Трубаев, Б.М. Гришко, П.В. Беседин // Цемент и его применение. – 2011. – № 6. – С. 95–99.
2. Классен В.К. Основные принципы и способы управления цементной вращающейся печью // Цемент и его применение. – 2004. – № 2. – С. 39–42.
3. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 308 с.
4. Некоторые направления энергосбережения в производстве цемента / П.В. Беседин, П.А. Трубаев, О.А. Панова, Б.М. Гришко // Цемент и его применение. – 2011. – № 2. – С. 130–134.
5. Трубаев П.А. Экспериментальное определение теплопроводности клинкерных гранул методом решения обратной задачи // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2009. – № 1. – С. 44–48.
6. Украинский В.А., Трубаев П.А. Компьютерное моделирование охлаждения слоя гранулированного материала. // Научное обозрение. – 2013. – № 8. – С. 59–64.
7. Bentz D.P., Bognacki C.J., Riding K.A., Villareal V.H., Hotter Cements, Cooler Concretes // Concrete International. – 2011. – № 33 (1). – P. 41–48.
8. Harder J. Latest Trends in Clinker Cooling // ZKG International. – 2011. – Vol. 3. – P. 32–42.
9. Heat Exchange Modeling of a Grate Clinker Cooler and Entropy Production Analysis // Touil D., Belabed H.F., Frances C., Belaadi S // International Journal of Heat and Technology. – 2005. – Vol. 23 (№ 1). – P. 61–68.

10. Khurana S., Banerjee R., Gaitonde U. Energy balance and cogeneration for a cement plant // *Applied Thermal Engineering*. – 2002 – Vol. 22, № 5. – P. 485–494.

11. Tsamatsoulis D. Simplified Modeling of Clinker Cooling Based on Long Term Industrial Data // *World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)*, Stevens Point, Wisconsin, USA, 2011. – P. 143–147.

12. Turnell Victor J. CFD Modelling in the Cement Industry. – 2012 [Электронный ресурс]. Доступ: [http://turnellcorp.com/Publications/WorldCement2012-CFD-Duct Optimization.pdf](http://turnellcorp.com/Publications/WorldCement2012-CFD-Duct%20Optimization.pdf).

13. Wedel K. Pendelrostkuhler mit horizontaler Anströmung des Klinkers / K. Wedel // *Zement-Kalk-Gips*. – 1992 (45). – № 4. – P. 171–176.

References

1. Ukrainskij V.A., Trubaev P.A., Grishko B.M., Besedin P.V. (2011), *Cement and its Application*, no 6, 2011, pp. 95–99.

2. Klassen V.K. (2004), *Cement and its Application*, no 2, 2004, pp. 39–42.

3. Klassen V.K. (2012), *Tehnologija i optimizacija proizvodstva cementa* [Production engineering and optimisation of manufacture of cement], Belgorod, pp. 308.

4. Besedin P.V., Trubaev P.A., Panova O.A., Grishko B.M. (2011) *Cement and its Application*, no 2, 2011, pp. 130–134.

5. Trubaev P.A. (2009), *Vestnik BGTU im. V. G. Shuhova*, no 1, 2009, pp. 44–48.

6. Ukrainskij V.A., Trubaev P.A. (2013), *Science Review*, no 8, 2013, pp. 59–64.

7. Bentz D.P., Bognacki C.J., Riding K.A., Villareal V.H. (2011), *Concrete International*, no 33 (1), 2011, pp. 41–48.

8. Harder J. (2011), *ZKG International*, Vol. 3, 2011, pp. 32–42.

9. Touil D., Belabed H.F. and Frances C. and Belaadi S. (2005), *International Journal of Heat and Technology*, vol. 23 (no. 1), 2005, pp. 61–68.

10. Khurana S. and Banerjee, R. and Gaitonde U. (2002), *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, no. 5, 2002, pp. 485–494

11. Tsamatsoulis D. (2011), *World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)*, Stevens Point, Wisconsin, USA, pp. 143–147.

12. Turnell Victor J. (2012), [http://turnellcorp.com/Publications/WorldCement2012-CFD-Duct Optimization.pdf](http://turnellcorp.com/Publications/WorldCement2012-CFD-Duct%20Optimization.pdf).

13. Wedel K. (1992), *Zement-Kalk-Gips*, no 4 (45), 1992, pp. 171–176.

Рецензенты:

Беседин П.В., д.т.н., профессор кафедры технологии стекла и керамики, ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород;

Носов О.А., д.т.н., профессор, проректор по научной работе, НОУ ВПО «Белгородский инженерно-экономический институт», г. Белгород.

Работа поступила в редакцию 14.10.2013.