

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ

© 2017 А.М. Шмырин, С.Л. Подвальный, О.А. Мещерякова, В.В. Сёмина

При производстве таких строительных материалов, как цемент, недостаточно эффективной является работа систем обеспыливающей вентиляции. Запыленность воздуха в рабочих зонах на различных этапах производства может превышать предельно допустимые концентрации во много раз. В данной работе рассмотрена оптимизация системы вентиляции помещения цеха с помощью окрестностного моделирования, позволяющая очищать приточный воздух, удалять избытки тепла, влаги, пыли, вредных газов и паров, поступающих в воздух рабочих помещений при технологическом процессе, поддерживать необходимую по технологическим параметрам влажность воздуха в помещении, а также очищать загазованный и запыленный воздух перед его выбросом в атмосферу. Модель строится для цеха, в котором находятся три вращательных цементных печи, склад клинкера. Предлагаемая модель имеет иерархическую структуру, выходные величины моделей более высокого уровня используются как параметры моделей более низкого уровня. Ставится задача идентификации моделей сложной системы в условиях параметрической связи моделей, которые описывают неполноту исходных данных

Ключевые слова: математическое моделирование, окрестностные системы, системы вентиляции

Введение

В химической промышленности процессы производства зачастую сопровождаются поступлением в воздушную среду помещения тепла, влаги, паров, пыли, токсических газов. Данные выделения изменяют состав и состояние воздушной среды, образующей микроклимат в помещении, что, в свою очередь, негативно влияет на производительность труда, вызывает отклонения в состоянии здоровья рабочих.

Для устранения указанных вредных поступлений применяется герметизация технологического оборудования, но не всегда такие меры технологически и экономически целесообразны. Оптимально организованная и автоматически управляемая система вентиляции является главным способом обеспечения микроклимата производственных помещений, соответствующего санитарным нормам и правилам. Система вентиляции поддерживает допустимые параметры воздушной среды, сохраняя инженерные конструкции помещения и повышая работоспособность людей.

Рассмотрим решение указанной проблемы на примере производства строительных материалов. При производстве цемента недостаточно эффективной является работа систем обеспыливающей вентиляции, так как запыленность воздуха в рабочей зоне упаковки

продукта может превышать предельно-допустимые концентрации более чем в 50 раз.

Таким образом, актуальной задачей является совершенствование и оптимизация систем вентиляции, направленные на уменьшение выбросов вредных веществ. Создание энергоэффективной автоматической системы производственной вентиляции, связанной с технологическим процессом, позволит достичь сбережения энерго- и денежных ресурсов, обеспечить высокую производительность работы вращательных цементных печей.

Постановка задачи

Систему цементного производства по аналогии с [1, 2] можно представить в виде следующих узлов: «1-Система первичной обработки сырья», «2-Помол сырья», «3-Обжиг», «4-Помол клинкера», «5-Отгрузка цемента». Пыль выделяется при всех процессах дробления и измельчения известняка и угля, при разгрузке печи, последующем транспорте и измельчении цемента, его отгрузке. Три основных источника выбросов пыли дымовой трубы - это печь, клинкерный холодильник и цементные мельницы.

Рассмотрим цех, включающий третий узел, в нем находятся три вращательных цементных печи, склад клинкера, а также пульт управления, на котором выполняются работы операторского типа. Исследования показали, что наибольшее количество цементной пыли выделяется из зон подсушки, кальцинирования и экзотермических реакций. Также клинкерная пыль образуется в конце зоны спекания и зоны охлаждения.

Шмырин Анатолий Михайлович – ЛГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: amsh@lipetsk.ru
Подвальный Семён Леонидович – ВГТУ, д-р техн. наук, профессор, e-mail: spodvalny@yandex.ru
Мещерякова Ольга Анатольевна – ЛГТУ, канд. техн. наук, доцент, e-mail: omes-48@mail.ru
Сёмина Валерия Владимировна – ЛГТУ, ст. преподаватель, e-mail: pravilnik@mail.ru

Помимо высокого содержания цементной пыли в данном производственном помещении вредными факторами являются значительные тепlopоступления от головки вращательной цементной печи, низкая влажность воздуха, недостаточная звукоизоляция пульта управления.

Существующая система вентиляции воздуха не справляется с цементной пылью и тепlopоступлениями, постоянно выходят из строя кондиционеры, регулирующие температуру в рабочей зоне пульта управления.

Описание структурной модели

Для оптимизации работы системы вентиляции рассмотрим ее структурную схему, включающую следующие узлы: «Вход», «Нагрев», «Увлажнение», «Пульт управления», «Цех», «Фильтр», «Выброс». Для обеспечения энергосбережения предусмотрим рециркуляцию воздуха: передача части воздуха после фильтров вновь на узел нагрева. Вращательная печь представлена четырьмя зонами: 1 – зона подогрева сырья; 2 – зона декарбонизации; 3 – зона появления клинкера; 4 – зона охлаждения (см. рис. 1).

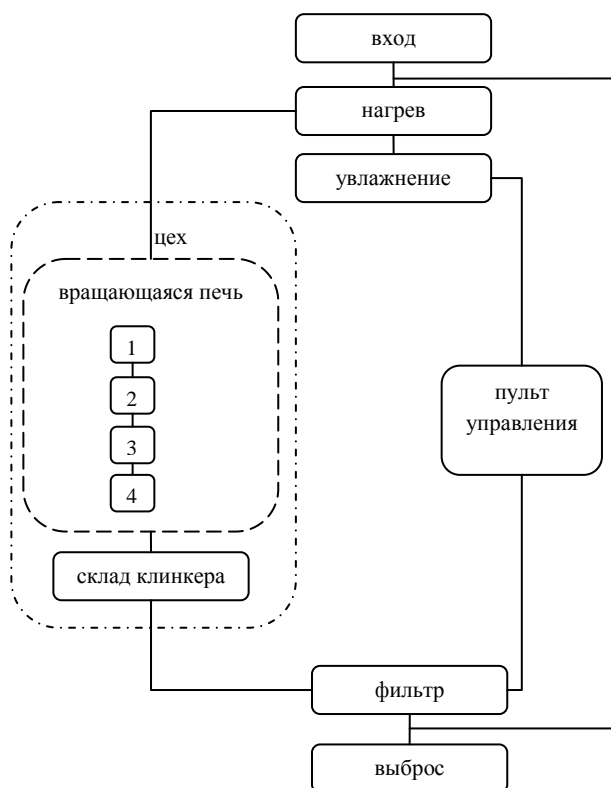


Рис. 1. Схема системы вентиляции

Свяжем работу вращательной цементной печи с системой вентиляции следующим образом. Режим работы печи влияет на количество

выделяемой пыли: работа вращающейся печи с частыми кратковременными остановками, а также замедленное вращение нарушает процесс формирования зерен клинкера, происходит образование клинкерной пыли. Помимо обеспечения микроклимата в помещении, система вентиляции должна обеспечивать соответствующие нормам выбросы твердых частиц (пыли) в атмосферу. В зависимости от количества поступлений цементной пыли производится коррекция работы вращательной печи в рамках допустимых значений ее параметров.

Предлагаемая система автоматического управления микроклиматом [2] осуществляет свою работу с помощью программируемого логического контроллера (ПЛК), связывающего работу системы вентиляции и кондиционирования, системы управления работой печи.

Параметры воздушной среды снаружи и внутри помещения, измеряются с помощью датчиков, поступают в качестве входных сигналов в математическую модель, реализованную на языке программирования ПЛК, далее производится анализ данных, реализуется оптимальный алгоритм автоматического управления [3].

Осуществить регулирование объема приточного воздуха в помещении предпочтительнее плавным изменением частоты вращения электроприводов вентиляторов с помощью частотного регулирования. Указанный способ помогает сэкономить большое количество энергии, затрачиваемой на подготовку и распределение воздуха [4,5].

Входными сигналами в модель будут такие параметры, как влагосодержание насыщенного воздуха и воздуха в зоне нахождения людей, подвижность воздуха в помещении, температура воздуха в приточной, вытяжной и рекуперационных системах вентиляции, температура и относительная влажность в рабочей зоне, температурный градиент по высоте помещения, температура воздуха в помещении по показаниям мокрого термометра, количество людей в помещении, режим работы печи, количество загрязняющих веществ, концентрация пыли в потоке загрязняющего газа. По показаниям этих параметров определяется необходимое количество приточного, вытяжного, рекуперационного воздуха [6], то есть выходом модели будут частоты вращения электропривода соответствующих вентиляторов.

Описание окрестностной модели

Систему цементного производства с помощью окрестностного моделирования [1, 2] можно представить в виде следующих узлов: «Система первичной обработки сырья», «Помол сырья», «Обжиг и система очистки воздуха», «Помол клинкера», «Отгрузка цемента», «Экология».

Каждый узел включает совокупность агрегатов и складов системы цементного производства.

Рассмотрим цех, включающий узел «Обжиг и система очистки воздуха», состоящий из подсистем 1 и 2, представленных на рис. 2. В отделении 1 находятся три вращательных цементных печи, склад клинкера, а также пульт управления вращательной печью, на котором выполняются работы операторского типа.

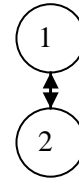


Рис. 2. Укрупненная схема узла «Обжиг и система очистки воздуха»

Представим систему вентиляции в виде окрестностной системы, включающую узлы (рис. 3): «4-Вход», «5-Фильтр1», «6-Кондиционирование1», «7- Фильтр2», «8-Кондиционирование2», «9-Помещение пульта управления», «10-Вытяжка», «11-Фильтр3», «12-Выброс». Узел 4 подает наружный воздух в помещение, далее воздух очищается от пыли в узле 5, доводится до нужной температуры и влажности в узле 6. Так как требования к параметрам воздушной среды в помещении пульта управления более жесткие, чем в помещении цеха, воздух необходимо дополнительно обработать (узел 7, 8) для достижения необходимых параметров микроклимата.

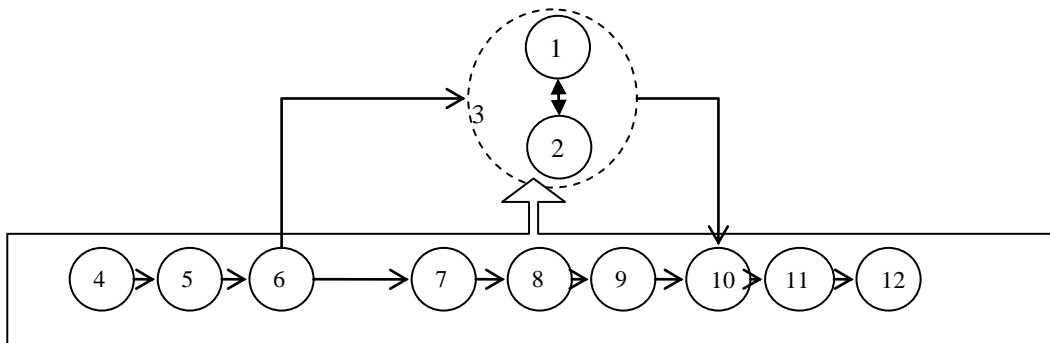


Рис. 3. Подробная схема узла «Обжиг и система очистки воздуха»

Далее подготовленный воздух поступает в помещение пульта управления (узел 9) и в цех (узел 3), из которых удаляется вытяжной вентиляцией - узлом 10, но так как удаляемый воздух должен соответствовать экологическим требованиям, он проходит фильтрацию (узел 11), и только потом утилизируется в атмосферу (узел 12). Для обеспечения энергосбережения предусмотрим рециркуляцию воздуха - передачу части воздуха после фильтров вновь на узел 5. От вращающейся печи в цех поступают пыль и тепло, которые являются вредными факторами для воздушной среды помещения.

Опишем состояния и управления в узлах:

$X_1(4)$ – температура наружного воздуха, °С;
 $X_2(4)$ – плотность приточного наружного воздуха, кг/м³; $X_3(4)$ – концентрация пыли в

наружном воздухе, мг/м³; $X(5)$ – концентрация пыли в приточном воздухе, мг/м³; $X_1(6)$ – температура приточного воздуха, °С; $X_2(6)$ – влагосодержание приточного воздуха, г/кг; $X(7)$ – концентрация пыли в приточном воздухе, мг/м³; $X_1(8)$ – температура приточного воздуха, °С; $X_2(8)$ – влагосодержание приточного воздуха, г/кг; $X_1(9)$ – количество человек, шт; $X_2(9)$ – температура в рабочей зоне, °С; $X_3(9)$ – влагосодержание воздуха в рабочей зоне, г/кг; $X_4(9)$ – температурный градиент по высоте помещения, °С /м; $X_5(9)$ – подвижность воздуха, м/с; $U_1(9)$ – текущий расход приточного воздуха, м/с²; $U_2(9)$ – текущая частота вращения электропривода вентилятора, об./мин.; $X_1(3)$ – температура воздуха в рабочей зоне, °С; $X_2(3)$ – температурный градиент по высоте помещения, °С /м; $X_3(3)$ – подвижность возду-

ха, м/с; $X_4(3)$ – влагосодержание воздуха в рабочей зоне, г/кг; $U_1(3)$ – текущий расход приточного воздуха, м/с²; $U_2(3)$ – текущая частота вращения электропривода вентилятора, об./мин.; $X_1(10)$ – концентрация пыли в удаляемом воздухе, мг/м³; $X_2(10)$ – влагосодержание удаляемого воздуха, г/кг; $X_3(10)$ – температура удаляемого воздуха, °С; $U_1(10)$ – текущий расход удаляемого воздуха, м/с²; $U_2(10)$ – текущая частота вращения электропривода вентилятора, об./мин.; $X(11)$ – концентрация пыли в удаляемом воздухе, мг/м³; $U(11)$ – текущая частота вращения электропривода вентилятора, об./мин.; $X(12)$ – концентрация пыли в утилизируемом воздухе, мг/м³; $X_1(1)$ – температура поверхности вращательной печи, °С; $X_2(1)$ – концентрация пыли от печи в воздухе рабочей зоны, мг/м³.

Основной характеристикой вентилятора является подача нагнетателя (количество воздуха) при работе на сеть без статической составляющей напора, пропорциональная частоте вращения нагнетателя. Необходимая частота вращения электропривода в зависимости от необходимого количества приточного воздуха:

$$U_2(i) = \frac{U_1(i) \cdot \omega_i}{L_i}, i = 3, 9, \quad (1)$$

где L_i – номинальный расход приточного воздуха, м/с²; ω_i – номинальная частота вращения электропривода вентилятора, об./мин. Номинальные характеристики вентилятора указываются в его паспорте.

Так как в производственном помещении одновременно происходит выделение теплоты и вредных веществ, то за количество приточного воздуха в пульт управления $U_1(9)$, в цех $U_1(3)$ необходимо принимать большее из рассчитанных для каждого вида производственных выделений:

$$U_1 = \max(U_1^1, U_1^2, U_1^3), \quad (2)$$

где U_1^1 – требуемый расход приточного воздуха для удаления теплоизбытков, U_1^2 – требуемый расход приточного воздуха для удаления пыли, U_1^3 – расход воздуха, определяемый по нормируемой кратности воздухообмена.

Полученное значение U_1 необходимо проверить на соответствие санитарно-гигиеническим нормам по подаче в помещение наружного воздуха.

Расчет требуемого расхода приточного воздуха для удаления теплоизбытков U_1^1 производится по формуле:

$$U_1^1 = \frac{\sum Q_{изб} \cdot 3,6}{X_1(4)(X_3(10) - X_2(4))c}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (3)$$

где $X_3(10)$ – температура удаляемого воздуха, °С; $X_1(4)$ – температура приточного воздуха, °С; $X_2(4)$ – плотность приточного наружного воздуха, кг/м³; c – удельная теплоемкость воздуха кДж/(м³°С).

Температуру удаляемого воздуха вычисляют по формуле:

$$X_3(10) = X_2(3) + X_4(3) \cdot (h - h_{p.z.}), \quad (4)$$

где $X_2(3)$ – температура в рабочей зоне, °С; $X_4(3)$ – температурный градиент по высоте помещения, °С/м; h – расстояние от пола до центра вытяжных проемов, м; $h_{p.z.}$ – высота рабочей зоны, м.

Избытки явного тепла рассчитываются следующим образом:

$$\sum Q_{изб} = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (5)$$

Теплопоступления от освещения:

$$Q_1 = F \cdot E \cdot q_{осв} \cdot \eta_{осв}, \quad (6)$$

где F – площадь пола помещения, м²; E – удельная освещенность, лк; $q_{осв}$ – коэффициент удельного тепловыделения Вт/(м² лк); $\eta_{осв}$ – доля тепла, поступаемая в помещение.

Теплопоступления от людей в помещении:

$$Q_2 = q_x \cdot X_1(9), \quad (7)$$

где q_x – количество тепла, выделяемое человеком, Вт; $X_1(9)$ – количество человек.

Теплопоступления от цементной печи:

$$Q_3 = \alpha \cdot F_1 (X_1(2) - X_2(3)), \quad (8)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²°С); F_1 – площадь поверхности печи в цеху, м²; $X_1(2)$ – температура поверхности печи, °С.

Воздухообмен при выделении в помещении цементной пыли рассчитывается следующим образом:

$$U_1^2 = \frac{G}{z - X(7)}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (9)$$

где G – массовый расход пыли, г/ч; z – допустимая объемная концентрация пыли в воздухе помещения, г/м³.

Расход воздуха, определяемый по нормируемой кратности воздухообмена, выражается формулой

$$U_1^3 = K \cdot V, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (10)$$

где K – коэффициент кратности воздухообмена, ч^{-1} ; V – объем помещения, м^3 .

В результате окрестного представления получаем сложную систему, состоящую из двух компонент.

Моделируя сложную систему из-за иерархической структуры моделей выходные величины моделей более высокого уровня используются как параметры моделей более низкого уровня. Выходом узла 1 является поступление клинкерной пыли и теплопоступления от вращательной печи. В таком рассмотрении системы ставится задача идентификации моделей сложной системы в условиях параметрической связи моделей, которые описывают неполноту исходных данных.

Для оценки эффективности работы модели применим критерий:

$$K = \frac{1}{K_1} + K_2 + K_3 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $K_1 = \frac{K_1^p}{K_1^f}$ – производительность печи,

$K_2 = \frac{K_2^f}{K_2^p}$ – объем потребляемой энергии системой вентиляции, $K_3 = \frac{K_3^f}{K_3^p}$ – объем выбросов цементной пыли, K^f и K^p – фактическое и плановое значение показателя.

Липецкий государственный технический университет
Воронежский государственный технический университет

MATHEMATICAL MODELING OF VENTILATION SYSTEMS FOR PRODUCTION FACILITIES

A.M. Shmyrin¹, C.L. Podval'ny², O.A. Meshcheryakova³, V.V. Syemina⁴

¹Full Doctor, Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation,
e-mail: amsh@lipetsk.ru

²Full Doctor, Professor, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation,
e-mail: spodvalny@yandex.ru

³PhD, Associate Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation,
e-mail: omes-48@mail.ru

⁴Assistant Professor, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation,
e-mail: pravilnik@mail.ru

Заключение

Таким образом, для повышения экологической безопасности производства предлагается оптимизация системы вентиляции помещения цеха обжига клинкера, позволяющая очищать приточный воздух, удалять избытки тепла, влаги, пыли, вредных газов и паров, очищать загазованный и запыленный воздух перед его выбросом в атмосферу.

Литература

1. Шмырин А.М. Параметрическая идентификация окрестностной модели процесса воздухообмена в производственном помещении / А.М. Шмырин, Е.П. Трофимов, В.В. Сёмина // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2017. – № 3 (Т. 23). – С. 460-466.
2. Шмырин А.М. Трилинейная окрестностная модель процесса формирования температуры смотки горячекатаной полосы / А.М. Шмырин, А.Г. Ярцев, В.В. Сёмина // Вестник Тамбовского государственного университета. – 2016. – № 2 (Т. 21) – С. 463-469.
3. Блюмин С.Л. Применение математического моделирования в системах вентиляции и кондиционирования воздуха в помещении плавательного бассейна / С.Л. Блюмин, В.В. Правильникова // Экология Центрально-Черноземной области Российской Федерации. – 2013. – № 4. – С. 108-111.
4. Ананьев Б.А. Системы вентиляции и кондиционирования / Б.А. Ананьев. – М.: Евроклимат, 2001. – 567 с.
5. Сотников А.Г. Проектирование и расчет систем вентиляции и кондиционирования воздуха / А.Г. Сотников. – СПб.: «Береста», 2013. – Т. 1. – 423 с.
6. Инженерные системы зданий и сооружений. Теплогазоснабжение и вентиляция: учебник для вузов / под ред. Е.М. Авдолимова. – М.: Академия, 2014. – 320 с.
7. Шмырин А.М. Окрестностные системы: идентификация и оценка состояния / А.М. Шмырин, Н.Н. Карабутов. – Липецк: ЛЭГИ, 2005. – 132 с.
8. Блюмин С.Л., Шмырин А.М. Окрестностные системы / С.Л. Блюмин, А.М. Шмырин. – Липецк, ЛЭГИ, 2005. – 132 с.

In the production of building materials such as cement, the operation of dust-free ventilation systems is not effective enough. Dustiness of air in working areas at various stages of production can exceed the maximum permissible concentrations by many times. Optimization of the room ventilation system with the help of neighborhood modeling is considered in this paper. It allows to clean the incoming air, remove excess heat, moisture, dust, harmful gases and vapors entering the air of work premises during the technological process, maintain the air humidity in the room required by technological parameters, and also to clean the polluted and dusty air before it is released into the atmosphere. The model is built for the workshop, in which there are three rotary cement kilns, a clinker warehouse. The proposed model has a hierarchical structure, the output values of higher-level models are used as parameters of lower-level models. The task is to identify the models of a complex system under conditions of parametric coupling of models that describe the incompleteness of the initial data

Key words: mathematical modeling, neighborhood systems, ventilation systems

References

1. Shmyrin A.M., Trofimov E.P., Syemina V.V. "Parametric identification of the neighborhood model of the air exchange process in the production room", *Bulletin of Tambov State University*, 2017, vol. 23, no.3, pp. 460-466.
2. Shmyrin A.M., Yartsev A.G., Syemina V.V. "Trilinear neighborhood model of the temperature formation process for hot-rolled strip grinding", *Bulletin of Tambov State University*, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 463-469.
3. Blyumin S.L., Pravil'nikova V.V. "Application of mathematical modeling in ventilation and air conditioning systems in the swimming pool area", *Ecology of the Central Black Earth Region of the Russian Federation*, 2013, vol. 4, pp. 108-111.
4. Anan'ev B.A. "Ventilation and air-conditioning systems" ("Sistemy ventilyatsii i konditsionirovaniya"), Moscow, Evroklimat, 2001, 567 p.
5. Sotnikov A.G. "Design and calculation of ventilation and air conditioning systems" ("Proyektirovanie i raschet sistem ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha"), Saint Petersburg, "Beresta", 2013, vol.1, 423 p.
6. Avdolimov E. M. "Engineering systems of buildings and structures. Heat and gas supply and ventilation: textbook for universities" ("Inzhenernyye sistemy zdaniy i sooruzheniy. Teplogazosnabzheniye i ventilyatsiya: uchebnik dlya vuzov"), Moscow, Akademiya, 2014, 320 p.
7. Shmyrin A.M., Karabutov N.N. "Neighborhood systems: identification and state assessment" ("Okrestnostnye sistemy: identifikatsiya i otsenka sostoyaniya"), Lipetsk: LEGI, 2005, 132 p.
8. Blyumin S.L., Shmyrin A.M. "Neighborhood systems" ("Okrestnostnye sistemy"), Lipetsk, LEGI, 2005, 132 p.