

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ДЫМОГЕНЕРАТОРЕ МЕЖДУ ГАЗОМ, НАСАДКОЙ И МАТЕРИАЛОМ В БАРАБАНЕ

Шахов С.В.<sup>1</sup>, Мальцева О.В.<sup>1</sup>, Сухарев И.Н.<sup>1</sup>, Шубкин С.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Воронеж, Россия (394036, г. Воронеж, пр. Революции, 19), e-mail: i.suxarev@yandex.ru

Дымогенерация, или получение технологического копильного дыма, заключается в неполном сжигании древесины (опилок, стружки или специально подготовленного топлива) при малом доступе воздуха и при определенной температуре. В настоящее время большинство копильных установок оборудованы централизованными источниками дымообразования - дымогенераторами, степень совершенства которых колеблется в значительной мере от автоматических до кустарных, совершенно немеханизированных. Применение механических дымогенераторов позволяет регулировать процесс получения копильного дыма и делает процесс копчения более управляемым. Получение дыма централизованным способом создает условия для его кондиционирования и получения дымовоздушной смеси с заданными параметрами: температурой, плотностью, относительной влажностью. Технологические свойства копильного дыма определяются такими факторами, как температура, влажность, химический состав, дисперсность и концентрация или оптическая плотность. Температура дыма, поступающего в копильную камеру, зависит от способа копчения, а также от типа дымогенератора, в котором он получен. Большинство дымогенераторов позволяет получать копильный дым слишком холодный для горячего копчения и слишком горячий для холодного копчения. Поэтому перед направлением в камеру в зависимости от способа копчения полученный дым подвергается разбавлению горячим или холодным воздухом соответственно. Интенсивность сорбции и диффузии компонентов копильной среды при копчении в значительной мере зависит от концентрации копильных компонентов в среде, их парциальных давлений, а также от влажности среды и скорости ее движения.

Ключевые слова: дымогенератор, дымовоздушная смесь, пиролиз опилок, коэффициент теплоотдачи, тепловой поток, уравнение теплового баланса.

## MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS OF HEAT EXCHANGE IN THE SMOKE GENERATOR BETWEEN GAS, THE NOZZLE AND MATERIAL IN THE DRUM

Shakhov S.V.<sup>1</sup>, Maltceva O.V.<sup>1</sup>, Sukharev I.N.<sup>1</sup>, Shubkin S.Y.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FSBEI HPE «Voronezh state university of engineering technologies», Voronezh, Russia (394036, Voronezh, Revolution Ave., 19), e-mail: i.suxarev@yandex.ru

Dymogeneration, or receiving a technological koptilny smoke, consists in incomplete burning of wood (sawdust, shaving or specially prepared fuel) at small access of air and at a certain temperature. Now the majority the koptilnykh of installations are equipped with the smoke generators centralized by smoking sources which degree of perfection fluctuates considerably from automatic to handicraft, absolutely nonmechanized. Application of mechanical smoke generators allows to regulate process of receiving a koptilny smoke and does smoking process more operated. Receiving a smoke creates in the centralized way conditions for its conditioning and receiving air-flue mix with set by parameters temperature, density, relative humidity. Technological properties of a koptilny smoke are defined by such factors as temperature, humidity, a chemical composition, dispersion and concentration or optical density. Temperature of the smoke coming to the koptilny camera depends on a way of smoking, and also on type of a smoke generator in which it is received. The majority of smoke generators allows to receive a koptilny smoke too cold for smoke-cured and too hot for cold smoking. Therefore before the direction in the camera depending on a way of smoking the received smoke is exposed to dilution by hot or cold air respectively. Intensity of sorption and diffusion of components of the koptilny environment when smoking considerably depends on concentration the koptilnykh of components in the environment, their partzialnykh of pressure, and also on humidity of the environment and speed of its movement.

Keywords: smoke generator, air-flue mix, pyrolysis of sawdust, thermolysis coefficient, thermal stream, equation of thermal balance.

В последние годы возрос интерес исследователей к копченым изделиям. В процессе производства копченых изделий важную роль играет получение дымовоздушной смеси при помощи дымогенератора. При помощи дымовоздушной смеси можно изменить вкус и аромат продукции, что обеспечивает увеличение сроков хранения и расширение ассортимента продукции. Для правильного понимания сущности процесса и расчёта целевых технологических величин необходимо выполнить математическое моделирование процесса теплообмена в дымогенераторе между газом, насадкой и материалом в барабане [4].

Дымогенератор является барабанным аппаратом (рис. 1), внутри которого перемещаются стальные шарики (насадки) и опилки. Стальные шарики (насадка) разогреваются магнитным полем индуктора, теплота от них передается опилкам (материалу) и обеспечивает их пиролиз.

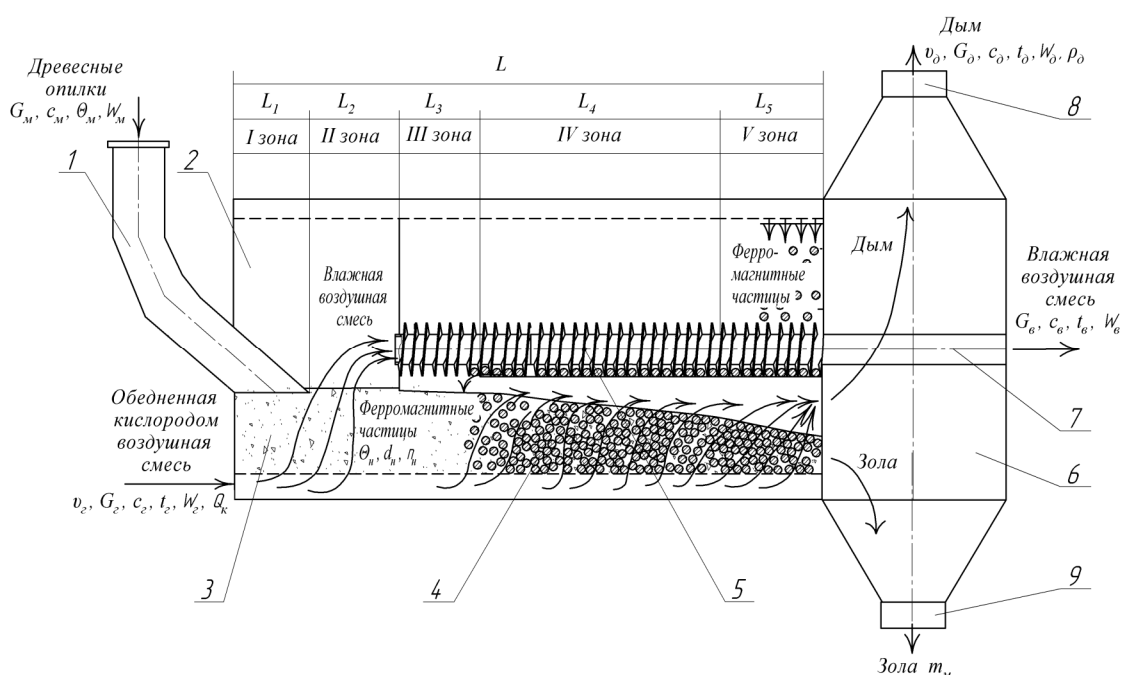


Рис. 1. Расчетная схема дымогенератора:

1 - загрузочный патрубок, 2 - барабан, 3 - древесные опилки, 4 - стальные шарики (насадки), 5 - транспортное устройство, 6 - разгрузочный бункер, 7 - патрубок отвода влажной воздушной смеси, 8 - патрубок отвода дыма, 9 - патрубок удаления золы.

Аппарат работает в непрерывном режиме, опилки в левой части непрерывно подаются через загрузочный патрубок. Твердый остаток, образующийся в результате пиролиза опилок, выводится в правой части аппарата в разгрузочный бункер, а далее через патрубок удаления золы. С помощью специального транспортного устройства, расположенного в центральной части аппарата, осуществляется рециркуляция стальных шариков насадки [1; 3].

В слой насадки и материала через распределительное устройство подается обогащенная азотом воздушная смесь, которая предварительно приготавливается методом

ультрафильтрации. Смесь имеет пониженное содержание кислорода во избежание сгорания опилок.

По длине аппарата устройство можно разделить на 5 зон.

В зоне 1 происходит нагревание опилок от начальной (комнатной) температуры до температуры кипения воды в опилках (100 °С).

В зоне 2 осуществляется удаление влаги из опилок. Температура опилок здесь изменяется незначительно и примерно равно 100÷120·°С.

В зоне 3 осуществляется подогрев обезвоженных опилок до температуры начала пиролиза.

В зоне 4 осуществляются основные процессы пиролиза опилок: образование, испарение и возгонка основного количества продуктов разложения древесины. Эти процессы протекают в интервале температур от 270 до 450÷500 °С [1; 2; 4]. В процессе пиролиза выделяется теплота в количестве 1÷1,25 МДж/кг. Масса твердого остатка в конце пиролиза составляет примерно 1/3 от начальной массы опилок.

Зона 5 служит для прокаливании твердого остатка при температуре не выше 550÷560 °С.

### Материалы и методы

Все процессы, протекающие в аппарате, кроме процесса пиролиза, требуют подвода теплоты. В процессе пиролиза теплота выделяется. Это приводит к разогреву материала и насадки. Рециркуляция насадки позволяет полезно использовать теплоту пиролиза опилок на более ранних стадиях в зонах 1-3 [2].

Зона 1 – нагревание материала до температуры кипения воды. Выделим элемент слоя  $dx \cdot h \cdot l$  и составим уравнение теплового баланса для материала (рис. 2)

$$c_m \cdot G_m \cdot d\theta_m = \alpha_{nm} \cdot (\theta_n - \theta_m) \cdot l \cdot h \cdot f_n \cdot dx - \frac{c_2 \cdot G_2}{L} \cdot (t_2'' - t_2'), \quad (1)$$

где  $c_m$ ,  $c_2$  – теплоемкости материала и газа;  $\theta_m$ ,  $\theta_n$  – температуры материала и насадки;  $\alpha_{nm}$  – коэффициент теплоотдачи от насадки к материалу.

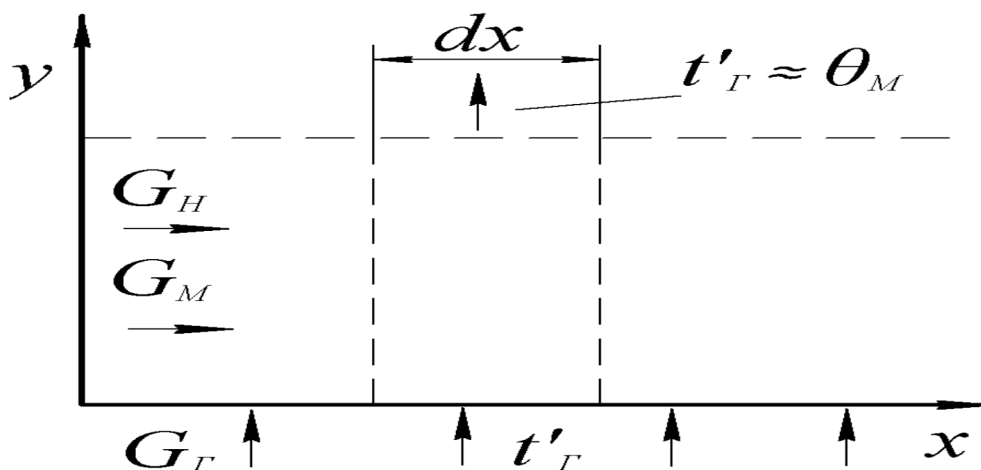


Рис. 2. Расчетная схема слоя дисперсного материала и насадки.

С учетом сделанных оценок ( $t'_a \approx \theta_i$ ) из (1) следует:

$$\frac{d\theta_M}{dx} = \frac{\alpha_{HM} \cdot l \cdot h \cdot f_H}{c_M \cdot G_M} \cdot (\theta_H - \theta_M) - \frac{c_2 \cdot G_2}{c_M \cdot G_M \cdot L} \cdot (\theta_M - t'_2) \quad (2)$$

Коэффициент теплоотдачи от продуваемого материала к поверхности частиц насадки определяется из критериального уравнения [3]

$$Nu = 0,31 \cdot Re^{0,5} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_M)^{0,5}}{\varepsilon_M}, \quad (3)$$

где  $Re = \frac{v_2 \cdot d_M}{\nu}$ ,  $Nu = \frac{\alpha_{HM} \cdot d_M}{\lambda}$

Уравнение теплового баланса для насадки:

$$c_H \cdot G_H \cdot d\theta_H = -\alpha_{HM} \cdot (\theta_H - \theta_M) \cdot l \cdot h \cdot f_H \cdot dx + q_v \cdot l \cdot h \cdot (1 - \varepsilon_H) \cdot dx, \quad (4)$$

где  $q_v$  – внутреннее тепловыделение на 1 м<sup>3</sup> материала насадки.

$$q_v = \frac{Q_{mag}}{l \cdot h \cdot L \cdot (1 - \varepsilon_H)}, \quad (5)$$

где  $Q_{mag}$  – тепловой поток, выделяемый насадкой в результате воздействия на нее магнитного поля индукционной системы.

Из (4) с учетом (5) следует:

$$\frac{d\theta_H}{dx} = \frac{\alpha_{HM} \cdot l \cdot h \cdot f_H}{c_H \cdot G_H} \cdot (\theta_H - \theta_M) + \frac{Q_{mag}}{(1 - \varepsilon) c_H \cdot G_H \cdot L} \quad (6)$$

Начальная температура материала принимается равной комнатной ( $\theta_M(0) \approx 20$  °С), начальная температура насадки должна равняться ее конечному значению на выходе из барабана. Определяется начальная температура методом последовательных приближений.

Зона 2 – обезвоживание материала.

В зоне 2 температура материала примерно равна температуре кипения воды ( $\theta_M = \theta_{MK} \approx 100$  °С).

Уравнение теплового баланса здесь получим из (6) подстановкой  $\theta_m = \theta_{mk}$

$$\frac{d\theta_m}{dx} = \frac{\alpha_{nm} \cdot l \cdot h \cdot f_n}{c_m \cdot G_m} \cdot (\theta_n - \theta_{mk}) - \frac{c_2 \cdot G_2}{c_m \cdot G_m \cdot L} \cdot (\theta_m - t'_2) \quad (7)$$

Второе уравнение запишем для влажности материала:

$$-G_m \cdot r \cdot dW = \alpha_{nm} \cdot (\theta_n - \theta_{mk}) \cdot l \cdot h \cdot f_n \cdot dx - \frac{c_2 \cdot G_2}{L} \cdot (\theta_n - t'_2) \cdot dx, \quad (8)$$

где  $r$  – теплота парообразования воды;  $W$  - абсолютная влажность материала (на 1 кг сухого материала)

$$\frac{dW}{dx} = -\frac{\alpha_{nm} \cdot (\theta_n - \theta_{mk}) \cdot l \cdot h \cdot f_n}{G_m \cdot r} + \frac{c_2 \cdot G_2}{G_m \cdot r \cdot L} \cdot (\theta_n - t'_2) \quad (9)$$

Зона 3 – нагревание материала от температуры обезвоживания материала до температуры начала пиролиза.

Процесс в данной зоне описывается уравнениями (3) и (6), т.к. он практически не отличается от процесса в зоне 1. Отличными от зоны 1 будут только начальные температуры материала и насадки [6].

Зона 4 - пиролиз материала.

При достижении температуры  $\theta_m = 270$  °С начинается активный пиролиз опилок, который сопровождается бурным выделением тепла. Теплота пиролиза материала равна 1,0...1,2 МДж/кг [2].

В данном процессе температура материала резко увеличивается вследствие выделения теплоты пиролиза и температуры материала.

Уравнение теплового баланса в данной зоне отличается от (1) наличием дополнительного слагаемого, учитывающего теплоту пиролиз материала:

$$c_m \cdot \overline{G}_m \cdot d\theta_m = \alpha_{nm} \cdot (\theta_n - \theta_m) \cdot l \cdot h \cdot f_n \cdot dx - \frac{c_2 \cdot G_2}{L} \cdot (t''_2 - t'_2) \cdot dx + \frac{\Delta G_m \cdot q_n}{L_n} \cdot dx = 0, \quad (10)$$

где  $\overline{G}_i$  - средний расход материала в зоне пиролиза;  $\Delta G_m$  - потеря массы твердого материала вследствие выделения газов при пиролизе;  $q_n$  - теплота пиролиза;  $L_n$  - длина зоны пиролиза.

Конечный расход твердой фазы в зоне пиролиза равен:

$$G_i'' = G_i \cdot m_\delta, \quad (11)$$

где  $m_\delta$  - массовая доля твердого остатка процесса пиролиза опилок.

В уравнении (2) необходимо подставлять среднее значение для массового расхода материала:

$$\overline{G}_m = \frac{G_m + G_m''}{2} \quad (12)$$

Или с учетом (11):

$$\overline{G}_m = G_m \cdot \frac{1 + m_m}{2} \quad (13)$$

$$\Delta G_M = G_M - G_M'' \quad (14)$$

С учетом (11) получим

$$\Delta G_M = G_M \cdot (1 - m_m) \quad (15)$$

Длина зоны пиролиза материала равна

$$L_{\Pi} = \tau_n \cdot v_M, \quad (16)$$

где  $\tau_n$  – время пиролиза;  $v_l$  – скорость движения материала.

$$v_M = \frac{4 \cdot G_M}{\rho_M \cdot \varepsilon_H \cdot (1 - \varepsilon_M) \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \varphi} \quad (17)$$

С учетом (13 – 17) из уравнения (10) следует

$$\frac{d\theta_M}{dx} = \frac{\alpha_{HM} \cdot l \cdot h \cdot f_H}{c_M \cdot \bar{G}_M} \cdot (\theta_H - \theta_M) - \frac{c_r \cdot G_r}{c_M \cdot \bar{G}_M \cdot L} \cdot (\theta_H - t_r) + \frac{G_M \cdot (1 - m_m) \cdot q_p \cdot \rho_M \cdot \varepsilon_M \cdot (1 - \varepsilon_H) \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \psi}{4 \cdot G_M \cdot \tau_i \cdot \tilde{n}_i \cdot \bar{G}_M} \quad (18)$$

Распределение температуры в насадке описывается уравнением (19).

Зона 5 - прокалывание твердого остатка.

Поскольку газовыделение здесь незначительно, можно считать, что расход твердой фазы материала не изменяется и равен  $G_M \cdot m_H$  [5].

С учетом этого обстоятельства уравнение теплового баланса (2) здесь приобретает вид:

$$\frac{d\theta_M}{dx} = \frac{\alpha_{HM} \cdot l \cdot h \cdot f_H}{c_H \cdot G_H \cdot m_H} \cdot (\theta_H - \theta_M) - \frac{c_r \cdot G_r}{c_M \cdot G_M \cdot m_M \cdot L} \cdot (\theta_H - t_r) \quad (19)$$

Распределение температуры насадки по длине зоны описывается уравнением (6).

### Результаты и обсуждение

Таким образом, из анализа математической модели процесса теплообмена в дымогенераторе между газом, насадкой и материалом в барабане можно сделать следующие выводы.

1. Тепловой поток от рециркулирующих насадок к газу пренебрежимо мал по сравнению с тепловым потоком от частиц к газу. Это объясняется большим отличием удельных поверхностей частиц материала.

2. Температура газа на выходе из слоя практически равна температуре материала (опилок) в данном сечении барабана, то есть теплообмен между газом и материалом полностью заканчивается внутри слоя.

3. Начальная температура материала равна комнатной.

4. Начальная температура насадки равняется ее конечному значению на выходе из барабана.

5. Расход твердой фазы материала не изменяется и равен  $G_M \cdot m_H$ .

## Список литературы

1. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической промышленности. - М. : Химия, 1981. – 812 с.
2. Гордон Л.В., Скворцов С.О., Лисов В.И. Технология и оборудование лесохимических производств. - М. : Лесная промышленность, 1988. – 360 с.
3. Коверинский И.Н. Основы технологии химической переработки древесины. - М. : Лесная промышленность, 1984. – 184 с.
4. Кольцов И.С., Ткачев О.А., Шахов С.В., Сухарев И.Н., Шубкин С.Ю. Разработка лабораторной установки для насыщения продуктов ароматом дыма в осцилирующих режимах // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5 (часть 1). – С. 163-164.
5. Моисеева И.С., Шахов С.В. Моделирование процесса вакуум-сублимационного обезвоживания дисперсных пищевых сред с использованием инертного газа // Материалы XLVI отчетной научной конференции за 2007 год. - Воронеж, 2008. - Ч. 2. - С. 8.
6. Пелеев А.И. Тепловое оборудование колбасного производства / А.И. Пелеев, А.М. Бражников, В.А. Гаврилова. – М. : Пищевая промышленность, 1970. – 384 с.

### Рецензенты:

Глотова И.А., д.т.н., профессор, заведующая кафедрой технологии переработки животноводческой продукции ФГОУ ВПО «Воронежский ГАУ», г. Воронеж;

Алексеев Г.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов пищевых производств университета ИТМО, г. Воронеж.