

УДК 519.711.3:574

МОДЕЛЬ ВЫБРОСОВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИКИ С ВЫГОРАЮЩЕЙ ДОБАВКОЙ ЛУЗГИ РИСА¹*Усатиков С. В.², Шаззо А. Ю.³***MODELING OF POLLUTANT EMISSIONS DURING CERAMIC PRODUCTION WITH COMBUSTIBLE ADDITIVE OF RICE HUSK***Usatikov S. V., Shazzo A. Yu.*

Proposed the mathematical model for determining the volume of pollutant emissions to air and justification of technology solutions for the qualitative and quantitative characteristics of pollutant emissions into the air, using rice husk as a burnable organic additives in ceramic production.

Keywords: simulator, heat-mass exchange, thermochemistry of rice husk, tunnel kiln, pollutant emissions.

Как известно, при обжиге керамических изделий может применяться введение в шихту молотого топлива (до 70–80% от общего количества, требуемого для обжига). Органические примеси и добавки, выгорающие при обжиге керамики, имеют существенное технологическое и теплотехническое значение [1–3]. Во-первых, этим достигается интенсификация процесса горения, поскольку накалинные керамические массы являются сильными катализаторами реакции горения в очень широком диапазоне температур. Во-вторых, возрастает пористость керамических изделий, улучшая их теплоизоляционные свойства без существенного снижения прочностных показателей. Кроме того, использование в качестве органического выгорающего наполнителя рисовой лузги, вносит вклад, как технология утилизации, в решение комплекса экологических и социально-экономических задач на Кубани.

Но именно последнее связано с рядом проблем, прежде всего экологических. При сушке и обжиге изделий в атмосферный воздух выбрасываются дымовые газы, содержащие ароматические вещества, при определенных климатических условиях создают-

ся тумано-подобные облака и клубы паровоздушной массы со специфическим запахом.

Целью данной работы является построение математической модели для определения объёмов выбрасываемых в атмосферный воздух вредных веществ и обоснования технологических решений по качественным и количественным характеристикам выбросов при использовании рисовой лузги в качестве выгорающей органической добавки в керамическом производстве.

1. Основные процессы при выгорании рисовой лузги в садке кирпича тоннельной печи

Садка тоннельной газовой печи состоит из стоящих на поду вагонетки пустотелых кирпичей (рис. 1). Обжигаемые изделия рассматриваем как сплошную однородную среду с эффективными теплофизическими свойствами, перемещающуюся в печи с постоянной скоростью u порядка 10^{-3} м/с. Для описания температурного поля в садках кирпича введём декартову систему координат, в

¹ Данная работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований и администрации Краснодарского края, грант №11-08-96519-р_юг_ц.

² Усатиков Сергей Васильевич, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры общей математики Кубанского государственного технологического университета; e-mail: sv@usatikov.com.

³ Шаззо Аслан Юсуфович, д-р техн. наук, заведующий кафедрой пищевой инженерии и высоких технологий Кубанского государственного технологического университета; e-mail: aslanshazzo@yandex.ru.

которой оси x , y соответственно направлены по ширине и высоте сечения тоннеля, z — по длине, L — длина тоннельной печи порядка 10^2 м. Далее температурный режим в тоннельной печи предполагается установившимся.

Температуру θ дымовых газов в печи будем считать заданной распределением $\theta(z)$, осреднённым по сечению печи (от начала зоны подготовки до начала зоны охлаждения, рис. 1):

$$\theta(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + a_4 z^4, \quad (1.1)$$

где параметры регрессии: $a_0 = 107,6$ К; $a_1 = 26,3$ К/м; $a_2 = -0,475$ К/м²; $a_3 = 0,00875$ К/м³; $a_4 = -6,98 \cdot 10^{-5}$ К/м⁴.

Поскольку скорости химических реакций при выгорании рисовой лузги в садке кирпича велики по сравнению со скоростями диффузии и конвекции (при равновесном процессе гомогенные реакции протекают очень быстро, а скорости массообмена малы), состав смеси является функцией только температуры и давления. Влияние химических реакций проявляется только через физические свойства смеси, представленные в уравнениях энергии, неразрывности и тепломассобмена при химических превращениях. Уравнения тепломассобмена должны быть дополнены уравнениями химической кинетики.

Выгоранию рисовой лузги способствует каталитическое воздействие пористой керамической среды. В этой активированной среде, с одной стороны, затруднён доступ кислорода извне, с другой — имеет место ускорение реакции горения (начиная с 300–400°C) по сравнению с обычными условиями свободного горения (выше 1000°C). Механизм выгорания рисовой лузги, сопровождающийся выходом из керамической массы к её поверхности горючих газов и протекании химической реакции на её поверхности (точнее, в некоторой поверхностной зоне), позволяет относить этот вид горения к диффузионному горению. Происходит встречная диффузия кислорода и горючих газов. При низких температурах поступление кислорода к поверхности керамической массы опережает выход к поверхности реагирующих газов. При повышенных температурах скорость реакции увеличивается быстрее, чем скорость подвода кислорода, и с определённого момента горение лимитируется поступлением реагирующих газов. Летучие составляющие рисовой лузги, не успевшие сгореть до выхода

их керамики, догорают в окружающей печной среде.

Влияние состава печных газов и скорости их движения на процесс проявляется в том, что этими факторами определяется разность концентраций кислорода и горючих газов на поверхности керамики и внутри неё, следовательно, и скорость встречных диффузий. Чем больше избыток воздуха в печной газовой среде и чем больше её скорость, тем быстрее выгорает лузга. Кроме того, скорость выгорания возрастает с увеличением концентрации лузги, т.к. по мере выгорания возрастает пористость керамики, что снижает диффузионное сопротивление и компенсирует возрастание потребности в кислороде, который должен диффундировать внутрь керамики.

В глубине пористой структуры керамики происходит пиролиз без кислорода, с термолитолизом на смоляной газ (неконденсирующийся газ, нефть), пары воды и твёрдый остаток (уголь и зола). Смоляной газ содержит ароматические вещества и смолы. Затем газообразные продукты пиролиза выходят из керамической массы к её поверхности и в некоторой поверхностной зоне протекает диффузионное горение. Наконец, продукты пиролиза при вынужденной конвекции с дымовыми газами по мере охлаждения конденсируются, отделяя фракции неконденсирующегося газа и жидкой нефти. Процесс конденсации наиболее интенсивен в дымовой трубе и по длине печи от дымовой трубы до конца зоны дегидратации, где температура окружающей печной среды ещё не превышает 500°C.

Следует отметить, что интенсификация процесса горения рисовой шелухи может быть достигнута также путём активации самого топлива с применением углекислых щелочей, а также карбонатов натрия и кальция [1, 5].

2. Выход смол и ароматических веществ при термоконверсии лузги риса

Наиболее близкими по термохимии к исследуемым процессам являются технологии прямого сжигания, газификации и пиролиза. Данные [5–8] по пиролизу рисовой лузги можно использовать как оценку сверху для глубины пористой структуры керамики, а данные [9, 10] по газификации рисовой луз-

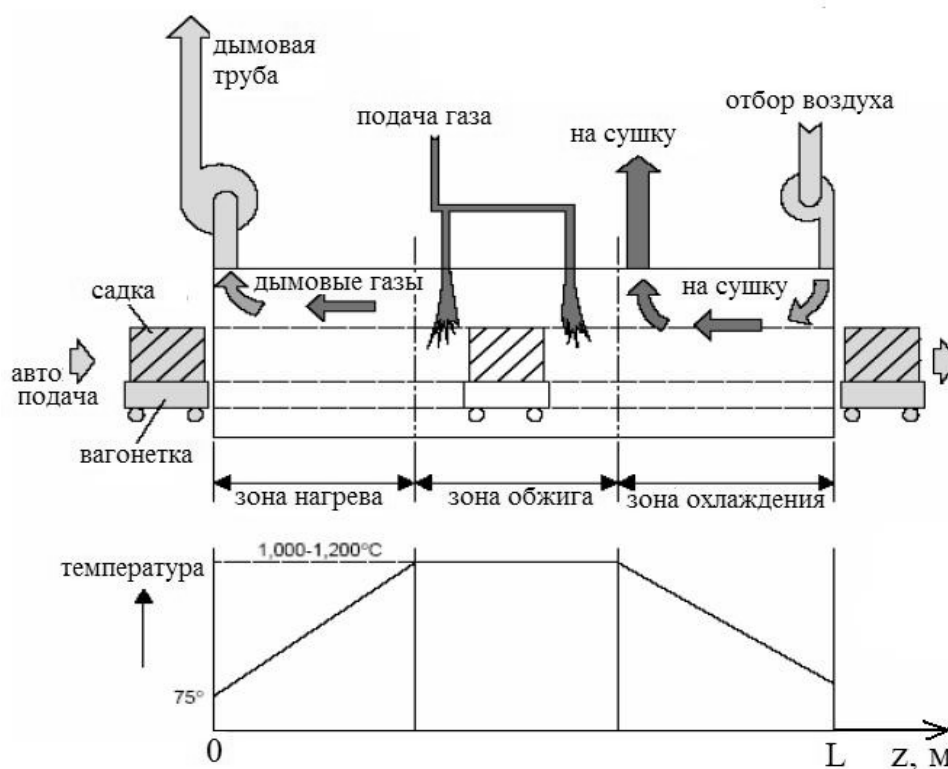


Рис. 1. Схематическое изображение туннельной печи [4]

ги — как оценку сверху для термического крекинга в печных газах.

В процессах пиролиза и газификации образуются неконденсирующиеся газы и жидкость, которую часто называют «масла», «пиротопливо», «биотопливо» или «смолы».

Смолы — высоковязкая жидкость темно-коричневого (почти чёрного) цвета с резким неприятным кисловатым запахом, напоминающая по виду нефть. Состав полученных смол установлен с помощью газовой хроматографии и хроматомасс-спектрометрии [5–8]: в смолах пиролиза присутствуют 50 % фенолов и его производных, 15 % кислот и 35 % карбонил- и гидроксилсодержащих веществ, а также некоторое количество нелетучих веществ. Этот продукт — водный раствор карбоновых кислот (22 %), фенолов (14 %), кетонов (12 %), циклических алифатических углеводородов (4,5 %), гетероциклических соединений (4 %), спиртов и эфиров (4,5 %). Он содержит ~6 % диоксибензолов (62 % которых составляет пирокатехин с производными).

Обозначим через $\mu(T)$ долю веса смол в зависимости от температуры. Данные [9] по процентному выходу смол при газификации биомассы можно аппроксимировать регрес-

сионной зависимостью

$$100\%\mu(T) = \frac{b_0}{1 + e^{-b_2(T-b_1)}} \left[1 + \frac{b_3}{1 + e^{-b_5(T-b_4)}} \right], \quad (2.1)$$

где параметры регрессии для максимума: $b_0 = 3,2$, $b_1 = 294$ K, $b_2 = 0,5$ 1/K, $b_3 = 5,6$, $b_4 = 719,6$ K, $b_5 = 0,018$ 1/K; для минимума: $b_0 = 1,3$, $b_1 = 271$ K, $b_2 = 3$ 1/K, $b_3 = 68,7$, $b_4 = 66,5$ K, $b_5 = 0,0057$ 1/K.

Данные [10] по долям основных компонент смол в зависимости от температуры можно аппроксимировать регрессионной зависимостью:

$$\mu_i(T) = \frac{c_0}{1 + e^{-c_2(T-c_1)}} \frac{1}{1 + e^{-c_4(T-c_3)}}, \quad (2.2)$$

$$i = \overline{1,4}.$$

Для $i = 1$ — первичных (левоглюкозан, оксиальдегид, фурфураль, метоксифенолы) параметры регрессии: $c_0 = 0,989$; $c_1 = 260$ K; $c_2 = 12,2$ 1/K; $c_3 = 663$ K; $c_4 = 0,02$ 1/K; для $i = 2$ — вторичных (фенолы, олефины) параметры регрессии: $c_0 = 1,3$; $c_1 = 670$ K; $c_2 = 0,013$ 1/K; $c_3 = 850$ K; $c_4 = 0,015$ 1/K;

для $i = 3$ — третичных, алкил (ароматические метиловые производные) параметры регрессии: $c_0 = 0,3$; $c_1 = 770$ К; $c_2 = 0,02$ 1/К; $c_3 = 970$ К; $c_4 = 0,015$ 1/К; для $i = 4$ — третичных, полиамида (конденсируемых — бензол, нафталин, аценафталин, антрацен, пирен) параметры регрессии: $c_0 = 1$; $c_1 = 900$ К; $c_2 = 0,02$ 1/К; $c_3 = 1200$ К; $c_4 = 0,01$ 1/К.

3. Кинетика термического разложения рисовой шелухи при различных давлениях и концентрации кислорода

Обозначим глубину термической конверсии рисовой шелухи

$$X = 1 - M = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_f}.$$

Массовая доля

$$M = \frac{m - m_f}{m_0 - m_f},$$

где m , m_0 и m_f — текущая масса, начальная масса рисовой шелухи в высушенном кирпиче и окончательная остаточная масса; соответственно m_0 составляет долю, равную $k_1 \approx 0,047$ от веса кирпича. Скорость химической реакции в кинетическом уравнении, если предполагать установившийся режим в тоннельной печи, равна

$$\frac{dX}{DT} = u \frac{dX}{dz}.$$

Объёмное тепловыделение (теплопоглощение) в садке кирпича с выгорающим наполнителем из рисовой шелухи определяется скоростью химической реакции dX/dt по кинетическому уравнению

$$\frac{dX}{dt} = u \frac{dX}{dz} = A e^{-\frac{E}{RT}} (1 - X)^n, \quad (3.1)$$

и изменением массы рисовой шелухи в кирпиче:

$$m = m_0 - X(m_0 - m_f),$$

где n — порядок реакции, E — энергия активации реакции терморазложения по закону Аррениуса, кДж / моль; $R = 8,314$ Дж/моль·К — универсальная газовая постоянная, A — предэкспоненциальный или частотный множитель (1/сек).

Кинетика пиролиза рисовой шелухи при разных концентрациях кислорода изучена в [5–7]. Для E , A и n в (3.1) возможны несколько кинетических моделей. В частности, в [6] приведена модель, требующая кусочно-постоянных, (на 2-х или 3-х участках), зависимостей $E(T)$, $A(T)$ и $n(T)$. Более удобна и точна модель, предполагающая двухступенчатость процесса пиролиза вплоть до твёрдых остатков рисовой шелухи, т.е. выделение летучих веществ сначала из самой шелухи (до 600°K), а затем из промежуточных продуктов термораспада (от 600°K до 1500°K). Для каждой реакции E_1 , A_1 , n_1 и E_2 , A_2 , n_2 можно принять постоянными. Такая модель предложена в работе [7]. Влияние содержания кислорода на пиролиз рисовой шелухи было исследовано с помощью термогравиметрического анализа (TGA). Пиролиз был проведён в N_2 , 10%-ном O_2 и воздухе, при скоростях нагрева 2; 5 и 10 К/мин., соответственно. Кислород усиливал пиролиз промежуточных продуктов, выделившихся на первом этапе реакций рисовой шелухи. TGA показал две основные реакции при изменении массы, поэтому предложены простые двухступенчатые кинетические модели для пиролиза рисовой шелухи при различных концентрациях кислорода. Определены соответствующие энергии активации, множитель перед экспонентой и порядок реакции. Теплота сгорания сухой рисовой шелухи — 4260 ккал/кг, влажной — 3493 ккал/кг.

Обозначим как $M = 1 - M_1 - M_2$ или $X = M_1 + M_2$, $M_1 = f_1 X_1$, $M_2 = f_2 X_2$ — массовые доли и глубину конверсии летучих фракций, f_1 , f_2 — веса. Тогда (3.1) примет вид ($j = 1; 2$)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{M_j}{f_j} &= \frac{u}{f_j} \frac{dM_j}{dz} = \\ &= A_j e^{-\frac{E_j}{RT}} \left(1 - \frac{M_j}{f_j}\right)^{n_j}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Заметим, что на воздухе окончательная остаточная масса рисовой шелухи равна $m_f = 34,5\%$, в азоте — $m_f = 32\%$. Здесь для случая свободного доступа воздуха (и соответственно кислорода): $E_1 = 142$ кДж/моль, $A_1 = 3,6 \cdot 10^{10}$ 1/сек, $n_1 = 1,35$, $f_1 = 0,54$ и $E_2 = 176$, $A_2 = 16 \cdot 10^{10}$, $n_2 = 1,89$, $f_2 = 0,46$. Однако в условиях пиролиза рисовой шелухи в смеси с глиной, доступ воздуха затруднён. В предельном случае отсутствия кислорода

(в атмосфере азота): $E_1 = 140$ кДж/моль, $A_1 = 3,2 \cdot 10^{10}$ 1/сек, $n_1 = 1,2$, $f_1 = 0,5$ и $E_2 = 54$, $A_2 = 2$, $n_2 = 1,89$, $f_2 = 0,5$.

На остаточную массу рисовой шелухи после окончания второй реакции и окончательную остаточную массу m_f влияют: степень доступа кислорода, скорость нагрева и конечная температура пиролиза. В воздухе влияние скорости нагрева слабое, но в атмосфере азота резко усиливается (остаток растёт с ростом скорости нагрева). Остаток растёт с уменьшением содержания кислорода, а также со снижением конечной температуры пиролиза.

4. Расчёт распределений плотности веса и веса накопленных за сутки ароматических и смолистых веществ по длине тоннельной печи

Поскольку скорости химических реакций при выгорании рисовой лузги в садке кирпича велики по сравнению со скоростями диффузии и конвекции (при равновесном процессе гомогенные реакции очень быстры, а скорости массообмена малы), состав смеси является функцией только температуры и давления. Влияние химических реакций проявляется только через физические свойства смеси, представленные в уравнениях энергии, неразрывности и движения теплообмена при химических превращениях. Уравнения теплообмена должны быть дополнены уравнениями химической кинетики.

Выпишем уравнение энергии в потоке для садки кирпича. Механизм выгорания рисовой лузги, заключающийся в выходе из керамической массы к её поверхности горючих газов и протекании химической реакции на её поверхности (точнее, в некоторой поверхностной зоне), позволяет относить этот вид горения к диффузионному горению. В глубине пористой структуры керамики происходит пиролиз без кислорода с терморазложением на смоляной газ (неконденсирующийся газ, нефть), пары воды и твёрдый остаток (уголь и зола). Смоляной газ содержит ароматические вещества и смолы. Затем газообразные продукты пиролиза выходят из керамической массы к её поверхности и в некоторой поверхностной зоне протекает диффузионное горение. Летучие составляющие рисовой лузги, не успевшие сгореть до выхода их керамики, горят в окружающей печной среде. Наконец, продукты пиролиза при вы-

нужденной конвекции с дымовыми газами по мере охлаждения конденсируются, выделяя фракции неконденсирующегося газа и жидкой нефти.

Приближённо такой механизм выгорания рисовой лузги можно описать, если кроме температуры T глубины пористой структуры керамики, осреднённой по сечению Oxy печи до распределения $T = T(z)$, ввести осреднённую по сечению печи температуру $\Delta T(z)$ некоторой поверхностной зоны керамики, с коэффициентом K порядка 10^2 , в которой протекает диффузионное горение.

Если осреднить температуру $T = T(z)$ по сечению садки кирпича, то уравнение сохранения энергии примет упрощённый вид

$$c_{эф}\rho_{эф}u\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{p}{s}\lambda_{эф}\frac{Kp}{s}[\Delta T - T] + \alpha\frac{p}{s}[\theta - T] - q_{v-}, \quad (4.1)$$

$$c_{эф}\rho_{эф}u\frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -\frac{Kp}{s}\lambda_{эф}\frac{Kp}{s}[\Delta T - T] + \alpha\frac{Kp}{s}[\theta - \Delta T] + q_{v+}, \quad (4.2)$$

с начальным условием

$$T|_{z=0} = T_0, \quad \Delta T|_{z=0} = T_0. \quad (4.3)$$

Здесь $c_{эф} = 500$ Дж/(кг·К) — по данным [3] эффективная теплоёмкость (пустотность 48%); $\lambda_{эф} = 0,3$ Вт/(м°С) — эффективный коэффициент теплопроводности; $\rho_{эф} = 900$ кг/м³ — плотность; s, p — площадь сечения садки кирпича и периметр (в этом сечении) соприкосновения с дымовыми газами, их отношение $p/s = 2k/H$ при коэффициенте пустот в садке k порядка 10 (средний диаметр пустот 2 см); $\alpha = 3,5$ Вт/м²К — коэффициент теплоотдачи от движущихся со скоростью порядка 1 м/с дымовых газов к садке кирпича; q_{v+}, q_{v-} — объёмная плотность выделения (поглощения) тепла при протекании экзотермических (эндотермических) реакций пиролиза рисовой лузги в садке кирпича.

В (4.1)–(4.2) объёмное тепловыделение имеет вид

$$\begin{aligned} q_{v-} &= Q - \rho_{эф}k_1k_2\frac{dX}{dt} = Q - \rho_{эф}k_1k_2u\frac{dX}{dz}, \\ q_{v+} &= k_3Q + \rho_{эф}k_1k_2\frac{dX}{dt} = \\ &= k_3Q + \rho_{эф}k_1k_2u\frac{dX}{dz}. \end{aligned} \quad (4.4)$$

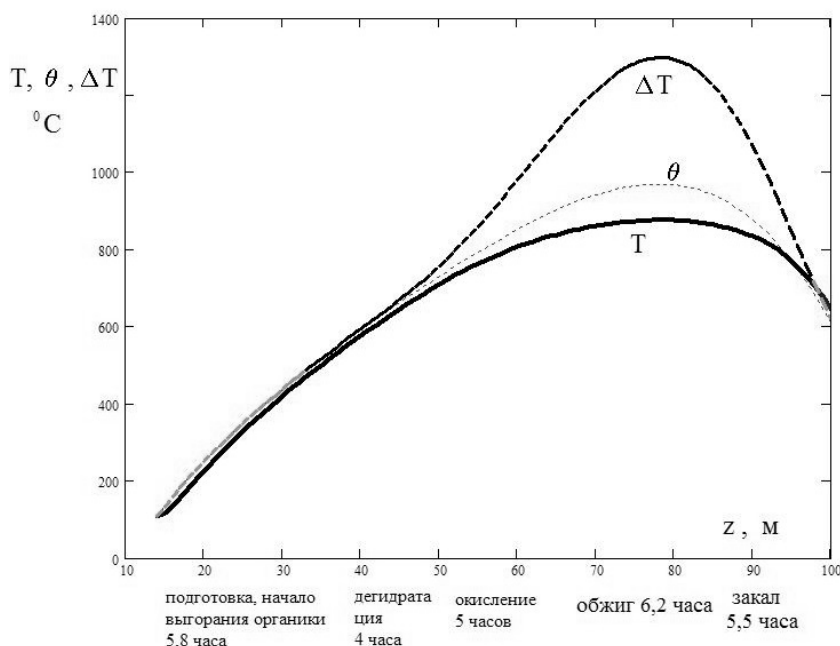


Рис. 2. Средняя по сечению температура вдоль тоннельной печи (до начала зоны охлаждения): дымовых газов θ , глубины пористой структуры керамики T , поверхностной зоны керамики ΔT

Здесь: Q_- — теплота эндотермических реакций при пиролизе рисовой шелухи; $Q_+ = 15 \cdot 10^6$ Дж/кг — теплота экзотермических реакций при пиролизе рисовой шелухи, (теплота сгорания газа 5,83 мДж/нм³, нефти 23 МДж/кг; энергетическое содержание лузги 14 мДж/кг); $k_1 \approx 0,047$ — доля рисовой шелухи в высушенном кирпиче, $k_2 = 1 - m_f/m_0 \approx 0,6 \dots 0,7$ — максимально возможная доля термоконверсированной рисовой шелухи (летучие вещества — до 60 %, кроме них в шелухе: уголь — 20,1 %, зола — 16,2 %, влага — 3,5 %); k_3 — доля сгоревших газообразных продуктов пиролиза.

В (4.4) объёмное тепловыделение (теплопоглощение) определяется скоростью химической реакции dX/dt по кинетическим уравнением (3.2).

Модель (3.2)–(4.4), (1.1) является задачей Коши для нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений и не представляет сложности при численном решении методом Рунге–Кутты в любом из математических пакетов (MathCAD, Maple, MatLab и др.). Результаты расчёта показаны на рис. 2.

По вычисленной температуре $T(z)$, глубине термической конверсии рисовой шелухи $X(z)$ и зависимости процентного выхода смоляного газа, паров воды и твёрдого остатка

(угля и золы) от температуры при пиролизе производится расчёт содержания ароматических веществ и смол в выбросах дымовых газов. Данные по газификации рисовой лузги можно использовать как оценку сверху. Кривая $1 - X(z)$ показывает границу конденсации смол, величина $\mu(T(z))dX(z)$ равна доле ароматических и смолистых веществ от массы лузги, выделяющихся вблизи точки z тоннельной печи.

Обозначим через $M_{\text{ш}}$ массу суточного потребления рисовой лузги, кг/сут; z_0 — координату начала выгорания органики в печи; $z(t) = z_0 + ut$ — координата вдоль печи. Тогда с течением времени вес накопленных за сутки ароматических и смолистых веществ $M_{\text{сут}}(t)$ определяется соотношением

$$M_{\text{сут}}(t) = M_{\text{ш}} \int_0^t \mu(T(z)) u \frac{dX(z)}{dz} dt. \quad (4.5)$$

Для компонент ароматических и смолистых веществ веса накопленных за сутки по длине тоннельной печи определяются соотношениями ($i = \overline{1, 4}$):

$$\begin{aligned} M_i(t) &= \\ &= M_{\text{ш}} \int_0^t \mu(T(z)) \mu_i(T(z)) u \frac{dX(z)}{dz} dt. \end{aligned} \quad (4.6)$$

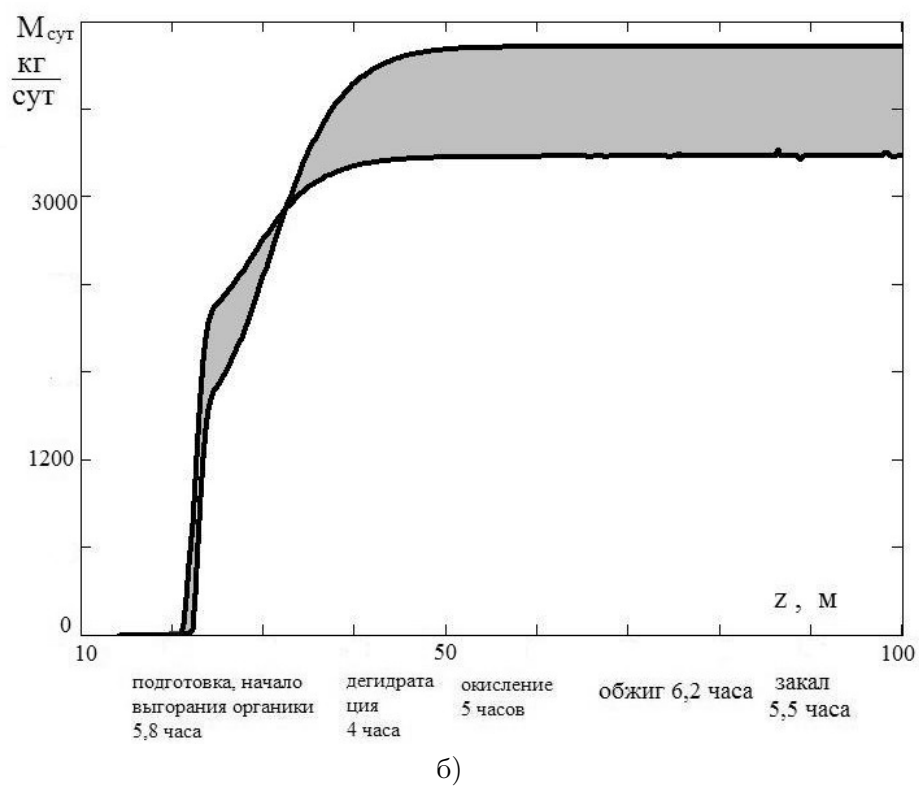
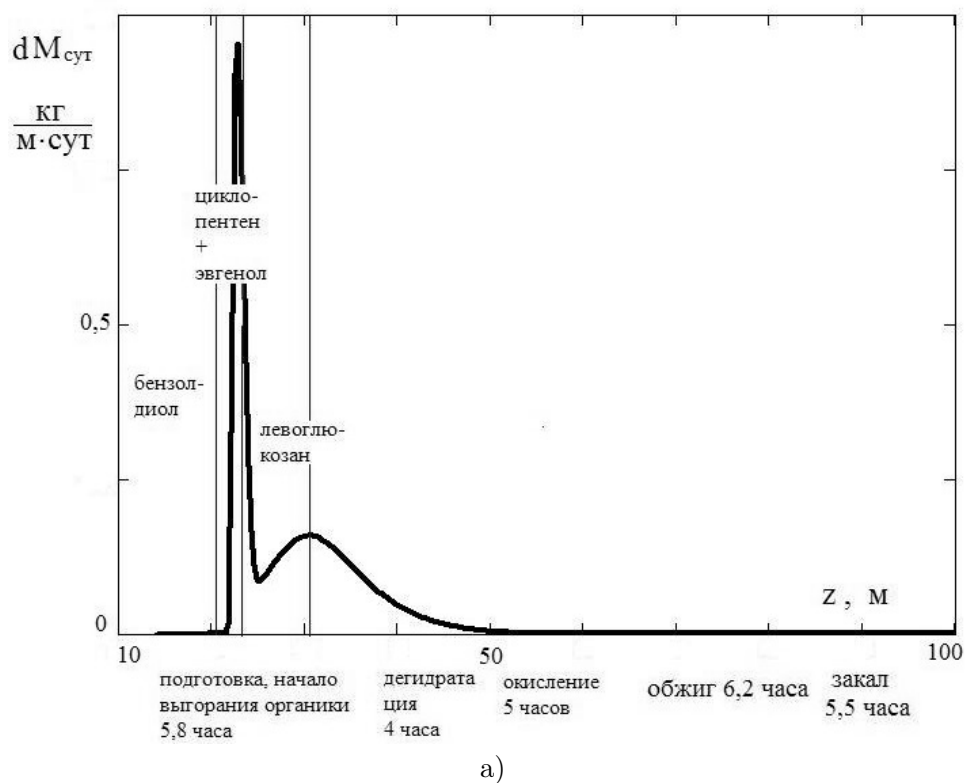
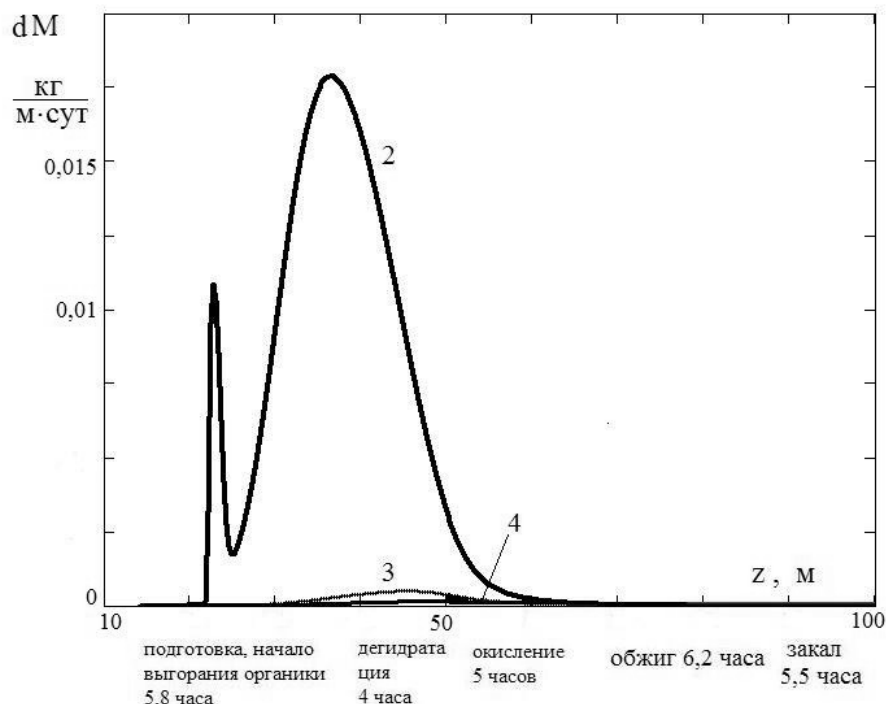
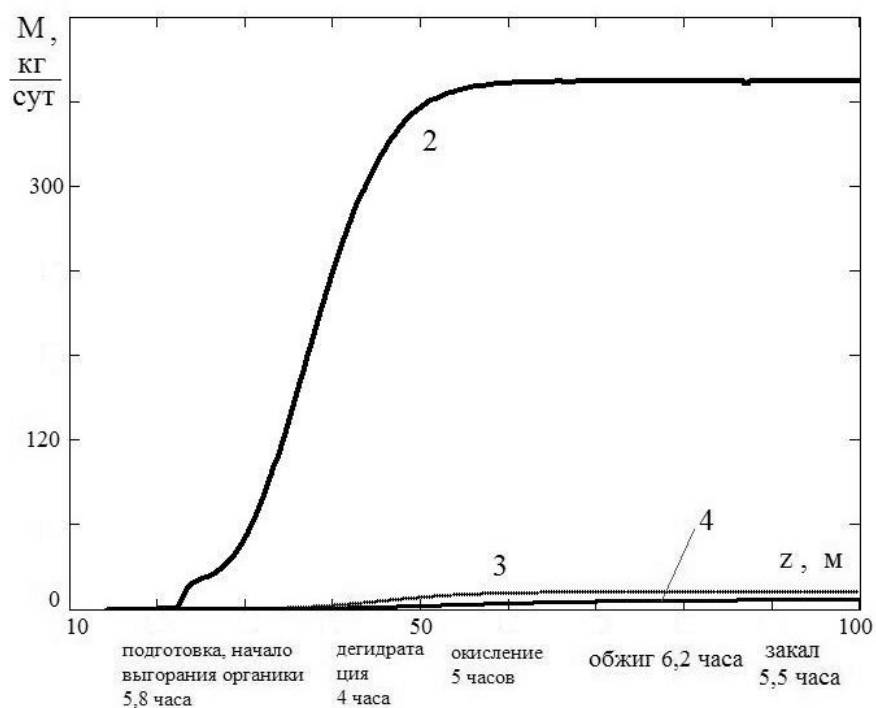


Рис. 3. а — Распределение плотности веса накопленных за сутки ароматических и смолистых веществ по длине тоннельной печи (на ед. длины); б — распределение веса (максимальное и минимальное) накопленных за сутки ароматических и смолистых веществ по длине тоннельной печи (при $M_{\text{ш}} = 43\,000$ кг/сут)



а)



б)

Рис. 4. Компоненты ароматических и смолистых веществ (при $M_{\text{ш}} = 43\,000$ кг/сут): а — распределение плотности веса на ед. длины; б — веса накопленных за сутки, по длине тоннельной печи; 2 — вторичные (фенолы, олефины); 3 — третичные, алкил (ароматические метиловые производные); 4 — третичные, полиамид (конденсируемые — бензол, нафталин, аценафталин, антрацен, пирен)

Соответствующие плотности весов на единицу длины печи находятся дифференцированием (4.5) и (4.6). Результаты расчётов по (4.5), (2.1)–(2.2) показаны на рис. 3; по (4.6), (2.1)–(2.2) — на рис. 4.

Заметим (рис. 3а), что в керамике и на стенках тоннельной печи, в зоне подготовки и начала выгорания органики, могут конденсироваться компоненты с температурой кипения выше 196°C: левоглюкозан (до 5,5 % от веса накопленных ароматических и смолистых веществ), циклопентен, эвгенол (до 3,5 %), бензолдиол (до 5 %) и др. На стенках дымовой трубы — с температурой кипения от 172 до 196°C: фенол (до 3,6 %), фурадегид (до 3,2 %) и др. Наконец, в окружающей атмосфере конденсируются компоненты с температурой кипения ниже 172°C: пропанон (до 11,1 %), уксусная кислота (до 13,5 %), уксусный альдегид (до 3,6 %) и др.

Таким образом, математическая модель (3.2)–(4.4), (1.1)–(2.2), (4.5)–(4.6) позволяет произвести расчёт и оценку сверху содержания ароматических веществ и смол в дымовых газах по длине тоннельной печи. Первоначально по (3.2)–(4.4), (1.1) вычисляются температура $T(z)$ и глубина термической конверсии рисовой шелухи $X(z)$. Затем по зависимости (4.5), (2.1)–(2.2) процентного выхода смоляного газа, паров воды и твёрдого остатка (угля и золы) от температуры при газификации вычисляется содержание ароматических веществ и смол в дымовых газах по длине тоннельной печи, а по (4.6), (2.1)–(2.2) — компонент ароматических и смолистых веществ.

Литература

1. Нохратян К. А. Сушка и обжиг в промышленности строительной керамики. М.: Гос. изд. лит. по строит., архит. и стройматер., 1962. 603 с.
2. Сергиенко В. И., Земнухова Л. А., Егоров А. Г., Шкорина Е. Д., Васильюк Н. С. Возобновляемые источники химического сырья: комплексная переработка отходов производства риса и гречихи // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). 2004. Т. XLVIII. № 3. С. 116–124.
3. Al-Marableh G. Production of Light Weight Ceramics Teils from Local Materials // American Journal of Applied Sciences. 2005. Vol. 2. No. 3. P. 778–783.
4. V. de Paulo Nicolau, Dadam A. P. Numerical and Experimental Thermal Analysis of a Tunnel Kiln used in Ceramic Production // J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. 2009. Vol. 31. No. 4. P. 297–304.
5. Williams P. T., Nugranad N. Comparison of products from the pyrolysis and catalytic pyrolysis of rice husks // Energy. 2000. Vol. 25. P. 493–513.
6. Markovska I. G., Lyubchev L. A. A study on the thermal destruction of rice husk in air and nitrogen atmosphere // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2007. Vol. 89. No. 3. P. 809–814.
7. Chiang W.-F., Fang H.-Y., Wu C.-H., Chang C.-Y.; Chang Y.-M., Shie J.-L. Pyrolysis Kinetics of Rice Husk in Different Oxygen Concentrations // Journal of Environmental Engineering. 2008. Vol. 134. No. 4. P. 316–325.
8. Xiujuan G., Shurong W., Qi W., Zuogang G., Zhongyang L. Properties of Bio-oil from Fast Pyrolysis of Rice Husk // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2011. Vol. 19. No. 1. P. 116–121.
9. Baker E. G., Brown M. D., Elliott D. C., Mudge L. K. Characterization and Treatment of Tars from Biomass Gasifiers // Denver, CO: AIChE 1988 Summer National Meeting, P. 1–11.
10. Evans R. J., Milne T. A. Chemistry of Tar Formation and Maturation in the Thermochemical Conversion of Biomass // in Developments in Thermochemical Biomass Conversion. Vol. 2. Edited by A.V. Bridgwater and D.G.B. Boocock. London: Blackie Academic & Professional. 1997. P. 803–816.

Ключевые слова: математическая модель, тепломассобмен, термохимия рисовой лузги, тоннельная печь, выбросы вредных веществ.

Статья поступила 20 июля 2011 г.

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

© Усатиов С. В., Шаззо А. Ю., 2011