

УДК: 533.6.011.72

## Математическое моделирование сушки угольных частиц в потоке газа

И. М. Васенин<sup>1</sup>, А. Ю. Крайнов<sup>1, а</sup>, А. Б. Исайченков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет,  
физико-технический факультет,

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36

<sup>2</sup> Сибирская угольная энергетическая компания,  
Россия, 109028, г. Москва, Серебряническая наб., д. 28

E-mail: <sup>а</sup>akrainov@ftf.tsu.ru

Получено 2 апреля 2012 г.

Представлена физико-математическая модель сушки угольных частиц в потоке газа и результаты расчета сушки частиц бурого угля в сушильной трубе. Показано, что для сушки угля может быть использован перегретый водяной пар. Предложена термодинамическая модель сушки частиц в сушильной трубе. Она позволяет провести предварительную оценку параметров процесса сушки.

Ключевые слова: сушка угольных частиц, сушильная труба, математическое моделирование

## Mathematical modeling of drying of coal particles in the gas stream

I. M. Vasenin<sup>1</sup>, A. Yu. Krainov<sup>1, а</sup>, A. B. Isaychenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Tomsk State University, Physical-Technical Faculty, TSU, 36, Lenin St., Tomsk, 634050, Russia

<sup>2</sup> Siberian Coal Energy Company, Serebryanicheskaya Emb., Moscow, 109028, Russia

**Abstract.** – Physical-mathematical model of drying of coal particles in the gas stream and the results of calculating the drying of the particles of brown coal in a drying tube are presented. It is shown that for the drying of coal can be used superheated water vapor. Thermodynamic model of drying of a particle in a drying tube are proposed. It allows to conduct a preliminary assessment of parameters of drying process.

Keywords: drying of coal particles, a drying tube, mathematical modeling

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 357–367 (Russian).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ №11-08-00370а.

Для улучшения энергетических характеристик бурых углей, улучшения их потребительских характеристик используется его брикетирование. В процессе брикетирования происходит его сушка и компактирование. Перспективной технологией является сухое брикетирование без специальных связующих добавок. Оно позволяет получать брикеты с большой теплотворной способностью, которые при сгорании меньше влияют на экологическую обстановку.

В патенте [Патент РФ 2332443, 2006] предложена технология брикетирования бурого угля без связующего. Согласно ей, содержащий влагу уголь, измельченный до частиц размером менее 3 мм, подают в стояк термической сушилки. В сушильной трубе проходит струя горячего газа. При подаче в сушильную трубу влажный уголь захватывается газовым потоком. При нагревании частиц угля часть влаги, содержащейся в угле, преобразуется в горячий пар. Затем угольные частицы в циклонах отделяются от газа и поступают в специальное брикетирующее устройство. Как показывает опыт отработки такой технологии, свойства брикетов сильно зависят от остаточной влажности частиц угля [Патент РФ 2332443, 2006].

Исследуем влияние на процесс сушки угля расходов частиц угля, скорости подачи угля в сушильный агрегат, расходных характеристик вентилятора и нагревателя, а также других параметров. Исследовать указанные характеристики можно с помощью математической модели процессов в сушильном тракте. Сформулируем такую модель.

## Математическая модель сушки частиц угля в потоке газа

При формулировке модели сделаем предположения: течение газа с частицами в тракте установки одномерное; между частицами и газом имеет место обмен количеством движения, теплом и массой; при нагревании сырого угля до температуры кипения воды испарением воды пренебрегается; при испарении температура влажных частиц остается постоянной; скорость испарения определяется потоком тепла от газа к частицам; при двухфазном течении в тракте сушильного агрегата термогазодинамические параметры описываются моделью взаимопроникающих сред [Нигматулин, 1987].

С учетом сформулированных предположений система уравнений взаимопроникающих сред, состоящих из газа и частиц, имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = q, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s u_s}{\partial x} = -q, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u^2 + p)}{\partial x} = -\rho_s c_R (u - u_s) + q u_s, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_s u_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s u_s^2}{\partial x} = \rho_s c_R (u - u_s) - q u_s - g \cos(\varphi), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho (e + u^2/2)}{\partial t} + \frac{\partial \rho u (e + p/\rho + u^2/2)}{\partial x} = -\rho_s u_s c_R (u - u_s) - \rho_s \alpha (T - T_s) + q c_p T_k - Q, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho_s e_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s u_s e_s}{\partial x} = \rho_s \alpha (T - T_s) - q c_p T_k, \quad (6)$$

$$e = \frac{p}{\rho(k-1)}, \quad (7)$$

$$e_s = c_v T_s. \quad (8)$$

При записи системы уравнений (1)–(8) были приняты обозначения:  $t$  – время;  $x$  – координата вдоль оси сушильного тракта;  $\rho$  – плотность сушильного газа;  $\rho_s$  – масса частиц в единице

объема двухфазной смеси;  $u$  – скорость газа;  $u_s$  – скорость частиц;  $T$  – температура газа;  $T_s$  – температура частиц;  $p$  – давление;  $e$  – внутренняя энергия газа;  $e_s$  – внутренняя энергия частиц;  $k$  – показатель адиабаты газовой фазы;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена между газом и частицами;  $c_R$  – коэффициент сопротивления частиц при их движении относительно газа;  $q$  – массовый приток пара от частиц в газовую фазу в единице объема смеси;  $Q$  – тепловой поток теплоотдачи в окружающую среду на единице длины сушильного тракта;  $m$  – масса частицы;  $c_p$  – теплоемкость водяного пара;  $T_k$  – температура кипения воды;  $d$  – диаметр частиц;  $c_y$  – теплоемкость угля;  $\rho_y$  – плотность угля;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\varphi$  – угол между вертикальным направлением и осью сушильной трубы.

В системе (1)–(8) уравнение (1) есть уравнение сохранения массы газа; (2) – уравнение сохранения массы частиц; (3) – уравнение сохранения количества движения газовой фазы; (4) – уравнение сохранения количества движения частиц; (5) – уравнение сохранения энергии газа; (6) – уравнение сохранения тепловой энергии частиц; соотношения (7) и (8) есть выражения для внутренней энергии газа и частиц соответственно.

При решении системы (1)–(8) использовалась экспериментальная зависимость для коэффициента сопротивления [Справочник по теплообменникам. Т. 1., 1987]

$$c_R = \frac{18\eta(1 + 0,15 \text{Re}^{0,682})}{d^2 \rho_y},$$

в которой  $\text{Re} = (\rho|u - u_s|d)/\eta$  – число Рейнольдса,  $\eta$  – динамическая вязкость газа, и экспериментальная формула для коэффициента теплообмена между частицами и газом [Справочник по теплообменникам. Т. 1, Т. 2., 1987]

$$\alpha = \frac{6\lambda \text{Nu}}{c_y \rho_y d^2},$$

в которой  $\text{Nu} = 2 + \sqrt{\text{Nu}_l^2 + \text{Nu}_t^2}$ ,  $\text{Nu}_l = 0,664 \text{Re}^{0,5}$ ,  $\text{Nu}_t = 0,037 \text{Re}^{0,8}$ ,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Для вычисления потока массы водяного пара от сырого угля применялось сформулированное выше предположение, которое приводит к выражению

$$q = \frac{6\rho_s \lambda \text{Nu}(T_k - T_s)}{d^2 \rho_y \Delta h},$$

где  $\Delta h$  – теплота фазового перехода воды в пар.

Область решения задачи (1)–(8) представляет собой сушильную трубу (рис. 1), в нижнюю часть которой поступает сушильный газ и подаются частицы сырого угля. Изгиб трубы в верхней части задается в уравнениях углом  $\varphi$  между направлением касательной к трубе и направлением  $-\vec{g}$ , где  $\vec{g}$  – вектор ускорения силы тяжести.

В нижней части трубы задаются скорость газа, а также его давление и температура. Для частиц задаются начальная температура, начальная скорость ввода в поток, начальная влажность. На выходе из трубы задается только давление газа. Все остальные параметры в трубе рассчитываются.

Задача решается методом установления. Для ее решения применяется классический алгоритм распада разрыва С. К. Годунова [Годунов, Забродин, Иванов и др., 1976].

Для технологии [Патент РФ 2332443, 2006] известны данные о том, что температура газового потока до его смешения с влажным углем регулируется так, чтобы конечная температура угля, когда он выходит из сушилки, составляла 105–110° С, при этом температура газа на

выходе из сушилки  $\sim 120^\circ \text{C}$ , температура газа перед смешением с углем составляет  $300\text{--}400^\circ \text{C}$ . Для рассматриваемого ниже примера выберем температуру кипения  $T_k = 105^\circ \text{C}$ .

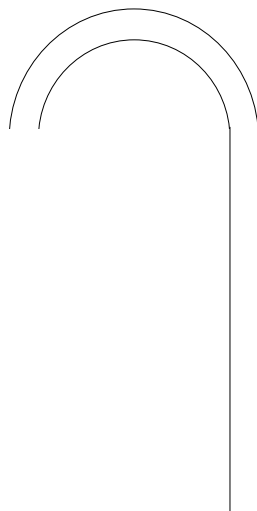


Рис. 1. Схема сушильной трубы

## Результаты расчетов

В расчетах принимались размеры частиц равными 3 мм, высота сушильной трубы – 12 м. Частицы угля подавались в трубу со скоростью 0,1 м/с, их начальная температура принималась равной  $0^\circ \text{C}$ . На рисунке 2 приведены графики скоростей и температур газа и частиц, массовой концентрации частиц и влажности частиц вдоль сушильной трубы. Видно, что на выходе из трубы температуры газа и частиц близки к температурам, указанным в патенте [Патент РФ 2332443, 2006]. На рисунке 2 г приведена влажность угля, определенная как отношение массы воды в частицах к массе частиц угля. На выходе из сушильной трубы она составляет 0,07, что совпадает с экспериментальными данными сушки в установке ВСВ. Все эти данные указывают на достоверность разработанной математической модели и возможность ее применения для анализа.

Отметим некоторые особенности полученных результатов. В области подачи сырого угля в сушилку резко увеличивается скорость сушильного газа и падает его температура (рис. 2а, б). Объяснение этого факта вытекает из закона сохранения потока частиц угля  $\rho_s u_s = G_{s0}$ , который реализуется в стационарных условиях процессов в сушильной трубе. Из него следует, что масса частиц в единице объема смеси,  $\rho_s$ , тем больше, чем меньше скорость частиц  $u_s$ . Наименьшая скорость частиц угля имеет место в районе их подачи в сушилку (рис. 2а). Поэтому масса угля в единице объема здесь очень велика. На рисунке 2в приведены результаты расчетов  $\rho_s$ , из которых следует, что на входе в сушильный тракт величина  $\rho_s$  превышает  $30 \text{ кг/м}^3$ . В результате в области подачи угля в сушильную трубу со стороны частиц угля возникает сильное сопротивление газовому потоку, которое согласно закону обращения воздействий Вулиса [Нигматулин, 1987] приводит к значительному ускорению газа. По причине большой массовой концентрации угольных частиц в начале сушильной трубы имеет место и большая теплоотдача от газа к частицам, что приводит к резкому падению температуры газа в начале сушильной трубы (рисунок 2б).

Поведение скорости частиц угля вдоль трубы объясняется взаимодействием сил тяжести и силы сопротивления со стороны газового потока. После начального подъема скорость частиц  $u_s$  уменьшается вместе со скоростью газа. Резкое увеличение скорости частиц в конце сушильной трубы связано с изменением направления их движения, которое после поворота трубы совпадает с направлением действия силы тяжести.

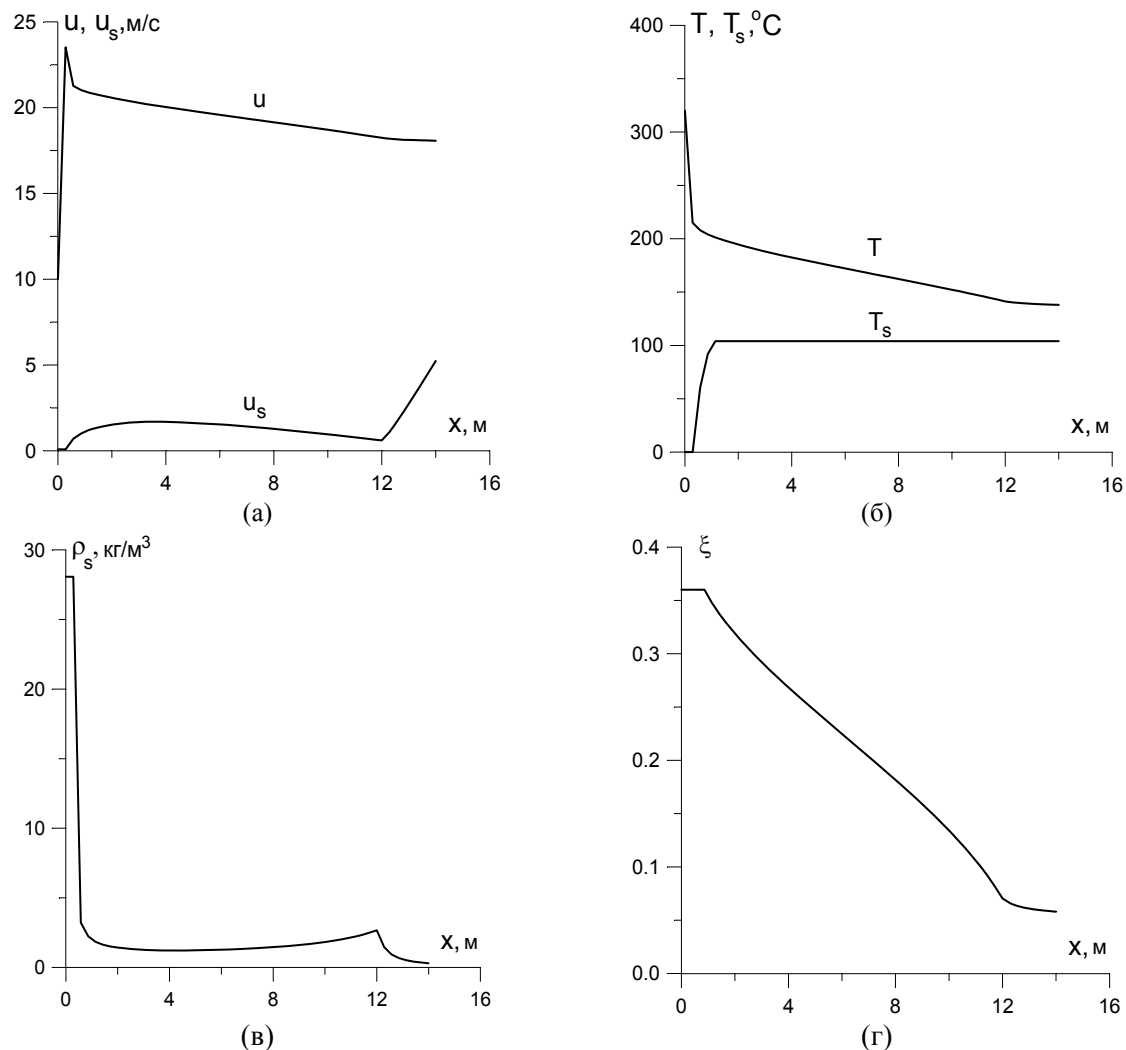


Рис. 2. Распределения скоростей (а) и температур (б) газа и частиц, массовой концентрации частиц (в) и влажности частиц (г) вдоль сушильной трубы. Диаметр частиц – 3 мм

В реальных условиях частицы угля не являются монодисперсными, так как имеет место распределение частиц по размерам. Чтобы исследовать влияние размеров частиц на процесс сушки, были проведены расчеты для частиц с размерами меньшими 3 мм. Результаты расчетов с размером частиц 2,5 мм приведены на рисунке 3. Оказалось, что в том же потоке газа частицы меньших размеров не успевают высушиться до необходимой кондиции. На рисунке 3б показано изменение влажности частиц угля диаметром 2,5 мм вдоль тракта сушилки. Видно, что в конце трубы их влажность  $\xi$  уменьшается только на 25 %.

Причина такого результата заключается в следующем. Как видно из рисунка 3а, скорости частиц диаметром 2,5 мм почти в 2 раза больше скоростей частиц диаметром 3 мм (рис. 2а). В результате время их пребывания в сушилке уменьшается в 2 раза, и влага не успевает удаляться из угля. Таким образом, при наличии в потоке частиц разных размеров степень удаления влаги для различных фракций частиц будет различной. В этой ситуации частицы крупных размеров могут пересушиться, в то время как более мелкие частицы будут оставаться излишне влажными. Поэтому необходимо тщательно подбирать параметры сушильного газа, чтобы в среднем влажность угля на выходе из сушилки достигала нужной степени, необходимой для успешного брикетирования.

В патенте на технологию ВСВ указывается на необходимость разработки такой технологии, в которой при прессовании угля должны отсутствовать неконденсируемые газы, приводя-

щие к возникновению дефектов и понижению качества брикетов. Вместе с тем в этой технологии неконденсированные газы составляют 50 % всех газов, в которых происходит сушка угля. При этом предполагается, что неконденсируемые газы перед брикетированием вытесняются паром из межчастичных объемов. Как было отмечено выше, в заключительной стадии сушки полидисперсного угля при его средней влажности 7 % вследствие сильной зависимости скорости сушки от размеров частиц будут присутствовать как недосушенные частицы с высокой влажностью, так и пересушенные, не содержащие влаги. В последних образуются капиллярные пустоты с развитой поверхностью. На поверхности и в порах таких частиц в результате диффузии могут сорбироваться значительные количества конденсированных газов, как это следует из зависимостей, представленных в [Брунауер, 1948]. Адсорбированные газы удерживаются на поверхности угля молекулярными силами и не могут вытесняться с помощью пара. Поэтому имеет смысл оценить параметры технологии сушки угля с помощью перегретого пара, не содержащего в своем составе неконденсируемых газов.

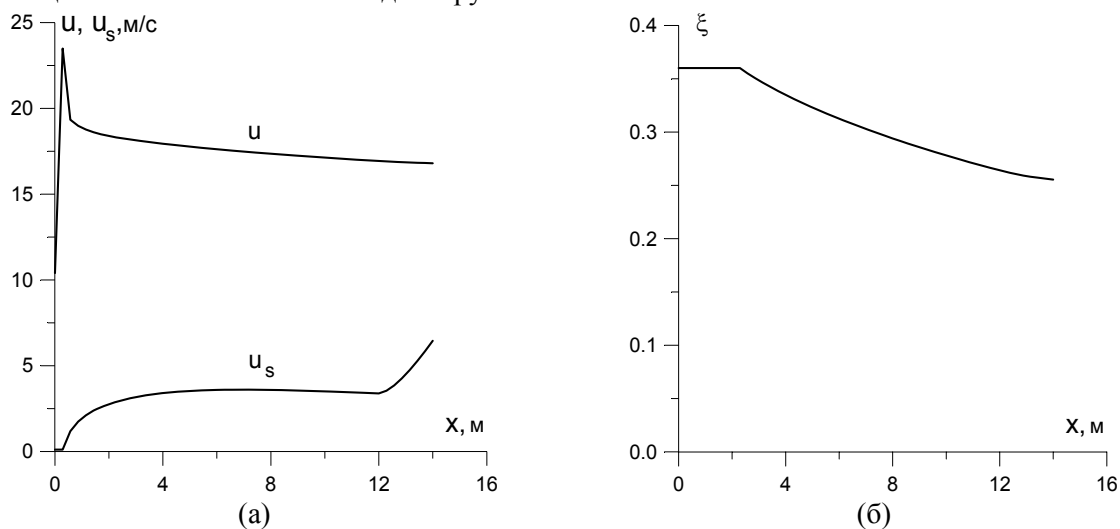


Рис. 3. Распределения скоростей (а) газа и частиц и влажности частиц (б) вдоль сушильной трубы. Диаметр частиц – 2,5 мм

На основе разработанной модели проведены расчеты сушильной установки, близкой по производительности, в которой в качестве сушильных газов используется перегретый водяной пар. Целью расчетов являлось вычисление параметров нагретого пара, обеспечивающих сушку 581 кг сырого бурого угля до влажности 7 % с конечной температурой 105–110° С, необходимой для успешного брикетирования. При этом подбирались перепад давления и температура пара. В расчетах использовались следующие физические параметры водяного пара: давление перед добавлением в поток угля  $p = 120\,000$  Па, теплоемкость  $c_p = 2\,030$  Дж / (кг · град), газовая постоянная  $R = 462$  Дж / (кг · град), а также коэффициенты теплопроводности  $\lambda = 0,050$  Вт / (м · град) и динамической вязкости  $\eta = 0,000018$  Па · с, взятые при средней температуре пара в тракте сушки. Расчеты показали, что заданные параметры влажности и температуры частиц на выходе из сушильной установки достигаются при температуре подаваемого в нее пара  $T = 320^\circ\text{C}$ . Перепад давления в сушильной установке уменьшается по сравнению с предыдущими расчетами течения неконденсированных газов на 500 Па и составил 4 500 Па. Уменьшение температуры пара по сравнению с заданной для сушильных газов  $T = 400^\circ\text{C}$  объясняется большей теплоемкостью водяного пара, который при меньшей температуре несет большее количество тепловой энергии. Уменьшение перепада давления объясняется меньшей плотностью водяного пара по сравнению с плотностью газов в сушилке ВСВ.

На рисунке 4а приведены графики изменения температуры пара и частиц вдоль сушильной трубы. Резкое падение температуры в области ввода частиц угля объясняется, также как

и в случае неконденсированных газов, большой массой частиц в этой области, достигающей  $30 \text{ кг/м}^3$ . На рисунке 4б приведена зависимость от координаты  $x$  влажности угля.

Все расчеты проводились для случая расхода пара  $1132 \text{ кг/ч}$  и сушки сырого угля  $581 \text{ кг/ч}$ . Эти цифры совпадают со значениями таких же расходов в установке ВСВ. Однако в случае пара возрос диаметр сушильной трубы. Он составил  $0,19 \text{ м}$  по сравнению с  $0,18 \text{ м}$  в случае сушильных газов.

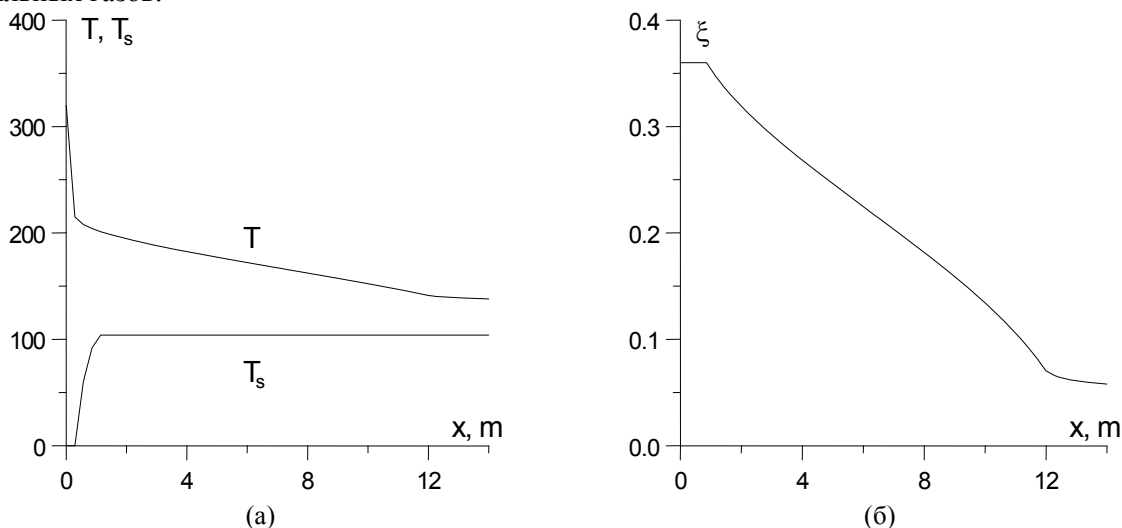


Рис. 4. Распределения температуры (а) пара и частиц и влажности частиц (б) вдоль сушильной трубы. Диаметр частиц – 3 мм

## Термодинамическая модель сушки частиц угля

Проведем термодинамический расчет сушки частиц угля в сушильной трубе.

Пренебрегая потерями массы частицы при испарении, движение частицы в потоке сушильных газов описывается уравнениями

$$m \frac{du_s}{dt} = C_R S_m \frac{\rho(u - u_s)|u - u_s|}{2} - kmg, \quad (9)$$

$$\frac{dx}{dt} = u_s \quad (10)$$

с начальными условиями

$$x(0) = 0, \quad u_s(0) = 0,$$

где  $t$  – время,  $x$  – координата вдоль сушильной трубы,  $m$  – масса частицы;  $S_m = \pi d^2/4$  – площадь миделева сечения частицы,  $d$  – диаметр частицы,  $\rho$  – плотность сушильных газов,  $g$  – ускорение свободного падения,  $u_s$  – скорость частицы,  $u$  – скорость газа,  $C_R$  – коэффициент сопротивления при движении частицы в газе,  $k$  – коэффициент, определяющий направление действия силы тяжести на траектории частицы: при движении ее вверх по сушильному трубопроводу  $k=1$ , при движении вниз  $k=-1$ .

Коэффициент сопротивления определяется по эмпирической формуле [Справочник по теплообменникам. Т. 1, Т. 2, 1987]

$$C_R = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0,15 \text{Re}^{0,682}), \quad \text{Re} = \frac{\rho|u - u_s|d}{\eta},$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости.

Скорость газа  $u$  определяется из значения величины массового расхода сушильных газов  $G_g$ :  $u = \frac{G_g}{\rho S}$ , где  $S$  – площадь сечения трубопровода для сушки частиц угля.

Пренебрегая приходом массы паров воды из частиц, принимаем  $G_g(x)$  постоянной величиной,  $G_g(x) = \text{const}$ . Принимая изобарические условия в сушильной трубе, плотность газа вычисляется из уравнения состояния идеального газа при заданном давлении  $P(x) = P_0 = \text{const}$ :

$$\rho(x) = \frac{P_0}{RT(x)},$$

где  $R$  – газовая постоянная сушильных газов,  $T(x)$  – температура сушильных газов, переменная по длине сушильной трубы.

Изменение температуры частиц угля описывается уравнением:

$$c_y m \frac{dT_s}{dt} = \alpha S_y (T - T_s) - q, \quad (11)$$

$$T_s(0) = T_{s,0},$$

где  $c_y$  – удельная теплоемкость угля,  $S_y = \pi d^2$  – площадь поверхности частицы диаметра  $d$ ,  $\alpha$  – коэффициент теплообмена,  $q$  – затраты тепла частицей на испарение влаги.

Предполагается, что при достижении частицей температуры кипения при заданном давлении  $P_0 = \text{const}$ , все тепло, падающее на частицу, тратится на испарение влаги, а до этого момента испарением влаги пренебрегаем. В соответствии с этими предположениями  $q$  определяется в виде

$$q = \begin{cases} 0, & T_k < 105^\circ \text{C}, \\ \alpha S_y (T - T_k), & T_k \geq 105^\circ \text{C}. \end{cases}$$

Коэффициент теплоотдачи определяется по эмпирической формуле [Справочник по теплообменникам. Т. 1, Т. 2, 1987]:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \lambda}{d}, \quad \text{Nu} = 2 + \sqrt{\text{Nu}_l + \text{Nu}_t}, \quad \text{Nu}_l = 0,664 \text{Re}^{0,5}, \quad \text{Nu}_t = 0,037 \text{Re}^{0,8},$$

где  $\text{Nu}$  – число Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности сушильных газов.

Изменение температуры потока сушильных газов по длине сушильной трубы определяется уравнением

$$c_p G_g \frac{dT}{dx} = -\alpha S (T - T_s(x)) \dot{n}, \quad (12)$$

$$T(0) = T_0,$$

где  $\dot{n}$  – количество частиц, подаваемых в сушильную трубу в единицу времени;  $c_p$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении.

Предполагая, что время прогрева частиц до температуры кипения влаги мало по сравнению со временем испарения влаги из частицы после достижения ее температуры кипения воды и им можно пренебречь, примем в уравнении (12)  $T_s(x) = T_k$ . Перепишем (12) в виде

$$c_p G_g \frac{dT}{dx} = -q(x) \dot{n}, \quad (13)$$



и проинтегрируем его:

$$\int_{T_0}^{T(x)} dT = -\frac{\dot{n}}{c_p G_g} \int_0^x q(x) dx. \quad (14)$$

Обозначим  $\int_0^L q(x) dx = \bar{q}L$ , где  $\bar{q}$  – среднее значение теплового потока в частицу при испарении влаги на единицу длины сушильной трубы.

Тогда из (14) имеем

$$T(L) = T_0 - \frac{\dot{n}}{c_p G_g} \bar{q}L, \quad (15)$$

$$T(x) = T_0 - \frac{\dot{n}}{c_p G_g} \bar{q}x. \quad (16)$$

Выражая из (15)  $\frac{\dot{n}}{c_p G_g} \bar{q}$  и подставляя в (16), получим

$$T(x) = T_0 - \frac{(T_0 - T(L))}{L} x$$

– линейное распределение температуры сушильных газов по длине трубы.

При заданных значениях  $T_0$  и  $T(L)$  количество тепла, затраченного на прогрев и испарение влаги из одной частицы за время ее пребывания в сушильной трубе, определяется из решения системы уравнений (9)–(11) при заданных начальных условиях путем вычисления интеграла

$$\int_0^{t_L} \alpha S_y (T - T_s(t)) dt = \bar{q}L,$$

где  $t_L$  – время достижения частицей конца сушильной трубы.

Также из решения системы уравнений (9)–(11) определяется количество влаги, испарившейся с поверхности частицы. Оно определяется выражением:

$$M_w = \frac{\int_0^{t_k} \alpha S_y (T - T_k) dt}{r},$$

где  $r$  – теплота испарения воды;  $t_k$  – момент времени достижения частицей температуры кипения влаги.

Величина массового расхода частиц, подаваемых в сушильную трубу при заданной величине массового расхода сушильных газов, определяет температуру сушильных газов на выходе из сушильной трубы,  $T(L)$ . При заданном значении величины  $T(L)$  величина массового расхода частиц определится, с учетом (15), соотношением

$$G_s = m\dot{n} = m \frac{T_0 - T(L)}{\bar{q}L} c_p G_g.$$

Однако эту зависимость для анализа удобнее записать в виде отношения секундных расходов массы частиц к массе сушильных газов:

$$\frac{G_s}{G_g} = m c_p \frac{T_0 - T(L)}{\bar{q}L}. \quad (17)$$

Были проведены расчеты изменения температуры частиц, соотношения расхода газа и частиц для двух типов сушильных газов: 1) сушильными газами являются газы, поступающие из горелки; 2) сушильным газом является перегретый водяной пар. Исходные данные для расчетов: диаметр частицы –  $d = 3$  мм, масса частицы –  $m = 0,0184$  г, удельная теплоемкость угля –  $c_p = 1600$  Дж/(кг·К), теплота испарения воды –  $r = 2,26$  МДж/кг, давление в сушильной трубе –  $P_0 = 1,2$  атм, температура частиц на входе в сушильную трубу –  $T_{s,0} = 20^\circ\text{C}$ , температура газа на входе в сушильную трубу –  $T_0 = 350^\circ\text{C}$ , температура газа на выходе из сушильной трубы –  $T(L) = 150^\circ\text{C}$ , расход сушильного газа –  $G_g = 0,23$  кг/с. Для газа из горелки принимались значения теплоемкости –  $c_p = 1035$  Дж/(кг·К), газовой постоянной –  $R = 286,6$  Дж/(кг·К), коэффициента теплопроводности –  $\lambda = 0,0321$  Дж/(м·с·К), коэффициента динамической вязкости –  $\eta = 22,8 \cdot 10^{-6}$  Па·с. Для перегретого водяного пара:  $c_p = 2030$  Дж/(кг·К),  $R = 461,7$  Дж/(кг·К),  $\lambda = 0,05$  Дж/(м·с·К),  $\eta = 18,0 \cdot 10^{-6}$  Па·с. Длина сушильной трубы принята 14 м, на высоте 12 м она претерпевает изгиб на  $180^\circ$ .

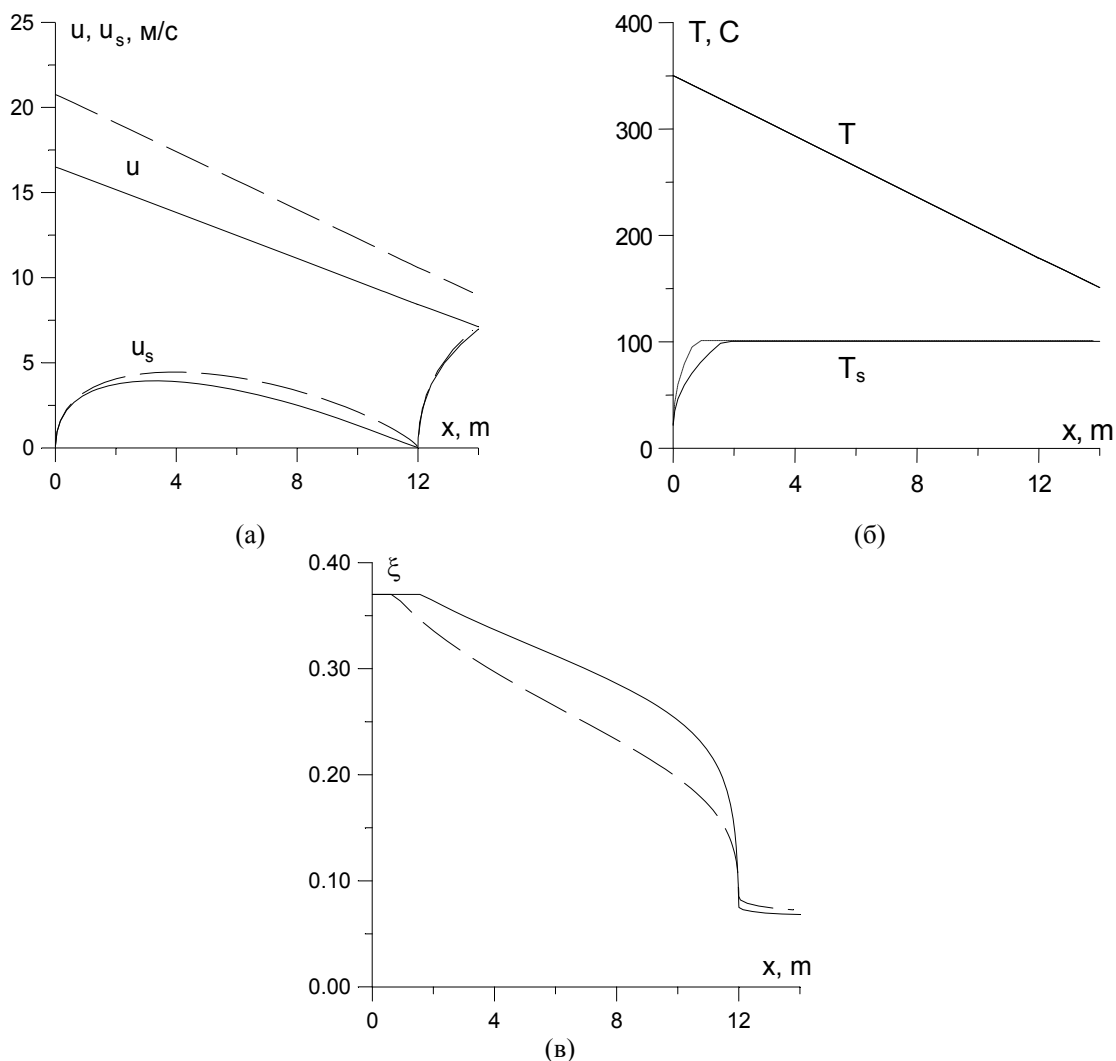


Рис. 5 Зависимости скоростей газа и частиц (а), температуры газа и частиц (б), влажности частиц (в) вдоль сушильной трубы. Сплошная линия – сушильные газы из горелки, штриховые линии – перегретый пар. Диаметр частиц – 3 мм

В расчетах при заданном расходе сушильных газов определялся диаметр сушилки, при котором частицы, взаимодействуя с потоком газа, проходили по всей длине сушилки и приобретали влажность 7 % при начальной влажности 37 %, а также определялось соотношение расходов частиц и газа по (17).

В расчетах получено, что при одинаковой доле испарившейся влаги из частиц соотношение секундных расходов массы частиц и газа в случае использования в качестве сушильного газа перегретого пара воды выше. В случае использования в качестве сушильных газов газа из горелки при заданном его расходе  $G_g = 0,23$  кг/с диаметр сушилки должен быть  $D = 0,122$  м, тогда скорость газа на входе в сушилку будет иметь значение  $u(0) = 16,5$  м/с и при соотношении расходов частиц и газа  $G_s/G_g = 0,255$  частицы на выходе из сушилки будут иметь влажность 7 %. В случае использования в качестве сушильных газов перегретого водяного пара при том же расходе диаметр сушилки должен быть  $D = 0,137$  м, тогда скорость пара на входе в сушилку будет иметь значение  $u(0) = 20,76$  м/с, и при соотношении расходов частиц и газа  $G_s/G_g = 0,505$  частицы на выходе из сушилки будут иметь влажность 7,3 %.

На рисунке 5 представлены результаты расчетов процесса сушки по термодинамической модели для двух типов сушильных газов. Результаты расчетов качественно и количественно совпадают с результатами, полученными на основе термогазодинамической модели сушки угольных частиц в сушильной трубе (см. рис. 2 и 5). Термодинамическая модель позволяет провести предварительные оценки параметров сушильного устройства, которые затем уточняются по разработанной модели (1)–(8).

В заключение отметим высокую чувствительность влажности угля на выходе из сушилки к параметрам сушильного газа. Успешная работа сушилки, связанная с настройкой этих параметров для конкретного угля, возможна только при наличии тщательного контроля как влажности высушенного угля, так и параметров сушильного газа. Предложенные термогазодинамическая и приближенная термодинамическая модели могут быть использованы для оценки параметров сушильного устройства.

## Список литературы

- Брунауер С. Н. Адсорбция газов и паров. Том 1. Государственное издательство иностранной литературы. – 1948. – 784 с.
- Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
- Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. – М.: Наука, 1987. – 464 с.
- Патент РФ 2332443. Способ брикетирования (варианты) // Кларк К. Н. (AU), Калб Д. В. (US), Комарек Р. (US), Микинз Р. Л. (AU), Пирсон А. К. (AU) / Оpubл. 10.02.2006 г.
- Справочник по теплообменникам. В двух томах. Т. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 561 с.
- Справочник по теплообменникам. В двух томах. Т. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.