

УДК 533.6.011.6

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ НИЗКОСОРТНЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ РЕЦИРКУЛИРУЕМЫМИ УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

**Бояркин М.С., Ковальногов В.Н., Карпухина Т.В., Федоров Р.В.**

*Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия*

Исследования выполнены при поддержке грантом РФФИ N 15-48-02275-p\_a

### АННОТАЦИЯ

Рассмотрен комплекс вопросов, связанных с моделированием, исследованием и разработкой энергоэффективных технологий сжигания низкосортных твердых топлив для котельных установок малой распределенной энергетики. Предложена технология обогащения низкосортных твердотопливных пеллет (получаемых путем прессования из отходов лесозаготовительных, деревоперерабатывающих, сельскохозяйственных производств) рециркулируемыми уходящими газами котельной установки. Технология предусматривает досушку и прогрев пеллет с одновременным насыщением их капиллярно-пористого пространства

синтез-газом и горючими компонентами рециркулируемого газа, что в комплексе способствует наиболее полному сгоранию пеллеты и повышению показателей топливной эффективности и экологической чистоты котельной установки.

Приведены математическая модель, разностная аппроксимация дифференциальных уравнений, определяющих кинетику тепловлажностного состояния и насыщения пеллеты, а также алгоритм расчета и некоторые результаты численного исследования параметров ее состояния в процессе обогащения рециркулируемыми уходящими газами.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из устойчивых тенденций развития энергетических систем и комплексов является переход к модели малой распределенной энергетики с активным использованием местных видов биотоплива, в том числе отходов местных производств, в особенности деревозаготовительных и перерабатывающих, сельскохозяйственных [1-3]. Эти отходы перерабатывают в топливные пеллеты (гранулы или брикеты) путем, как правило, последовательного их измельчения, термической обработки (сушки) и прессования с добавлением или без клеяще-связующей компоненты [4]. При этом операция сушки сырья, которая является наиболее энергоемкой и длительной, в значительной мере определяет качество (сортность) и себестоимость топливных пеллет, которая может отличаться в разы.

По имеющимся оценкам механический и химический недожог при сжигании низкосортных топливных агропеллет (получаемых из соломы, отходов шелушения зерна, гречихи, семечек подсолнечника) может достигать до 55 % по массе, при сжигании древесных пеллет – до 19 %. Недожог приводит к избыточному расходу пеллет и ухудшению топливной эффективности котельной

установки. Особенно критичен недожог при использовании агропеллет, поскольку содержащиеся в их составе гербициды, пестициды и другие вредные вещества, применяемые при промышленном выращивании сельскохозяйственных культур, ухудшают экологические показатели котельной установки.

Предлагаемая технология предусматривает сокращение недожога низкосортных пеллет до 3...4 % и улучшение показателей топливной эффективности и экологической чистоты пеллетной котельной установки за счет использования рециркуляции уходящих газов для обогащения подаваемого низкосортного пеллетного топлива (включающего его досушку и подогрев с одновременным насыщением капиллярно-пористого пространства синтез-газом и горючими компонентами рециркулируемого газа). По-существу, технология обогащения низкосортных топлив обеспечивает возможность исключения дорогостоящих операций термической обработки из технологического процесса получения пеллет за счет их вынесения в технологический процесс подготовки топлива непосредственно перед загрузкой в

топочную камеру. При этом обеспечиваются дополнительные преимущества, связанные с подогревом топлива и его насыщением горючими компонентами непосредственно перед сжиганием. Активные научные изыскания и конструкторские разработки в области обогащения низкосортных биотоплив в настоящее время ведутся в Германии и Италии, но достигнутые результаты практически не публикуются по причине коммерческой секретности.

В статье рассмотрен также комплекс вопросов, связанных с математическим моделированием кинетики тепловлажностного состояния и насыщения капиллярно-пористого пространства pellets рециркулируемым газом, представлена

разработанная математическая модель, методика расчета и некоторые результаты численного исследования параметров состояния топливной pellets в процессе обогащения рециркулируемыми газами.

Математическое моделирование и численное исследование проводили в целях получения априорной информации для разработки технологии обогащения pellets рециркулируемыми уходящими газами в части назначения ее режимов. В соответствии с подходом, изложенным в работе [5], моделирование проводили на основе сопряженного решения задач нестационарной теплопроводности и влагопереноса.

### ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБОГАЩЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ ПЕЛЛЕТ РЕЦИРКУЛИРУЕМЫМИ УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 1. показан общий вид pelletной котельной установки, оснащенной модулем обогащения топливных pellets рециркулируемыми уходящими газами.

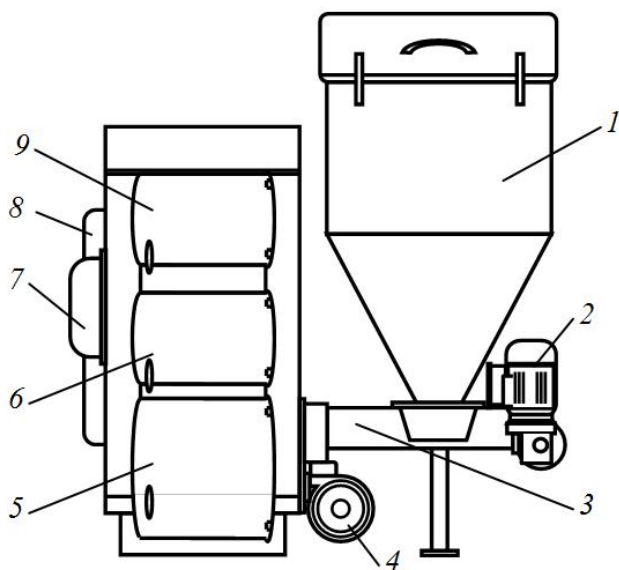


Рис. 1. Общий вид pelletной котельной установки с модулем обогащения pellets рециркулируемыми уходящими газами: 1 – загрузочный бункер; 2 – привод подачи pelletного топлива; 3 – транспортер; 4 – привод подачи pelletов; 5 – рабочая камера модуля обогащения; 6 – топка; 7 – блок управляющей автоматики системы рециркуляции уходящих газов; 8 – обвязка системы рециркуляции уходящих газов; 9 – котел

Pelletное топливо из загрузочного бункера 1 по транспортеру 3 поступает в рабочую камеру 5 модуля обогащения pellets. В эту же камеру через обвязку 8 системы рециркуляции подаются уходящие газы, отбираемые из топки 6. В рабочей камере 5 за счет теплоты уходящих газов происходит нагрев pelletного топлива и осуществляется его сушка с одновременным насыщением капиллярно-пористого пространства уходящими газами и образующимся синтез-газом. Периодически из рабочей камеры 5 с помощью транспортера (не показан на рисунке) и электропривода 4 обогащенное pelletное топливо подается в топку 6. Управление электроприводами 2 и 4 транспортеров и заслонками обвязки системы рециркуляции уходящих газов осуществляется блоком управляющей автоматики 7, обрабатывающей сигналы от датчиков давления и температуры, установленных в рабочей камере 5 и топке 6, и датчиков уровня топлива, установленных в них же и в бункере 1. Для практической реализации этого управления необходимо достоверно оценивать кинетику тепловлажностного состояния pellets и насыщения ее капиллярно-пористого пространства газами в процессе обогащения.

Задача формулируется для выбранного из поступивших в рабочую камеру модуля обогащения одного «репрезентативного» экземпляра pellets (рис. 2).

Требуется рассчитать изменение во времени влагосодержания,  $W_{i,j,k}$ ; температуры  $T_{i,j,k}$ ; относительной объемной усадки  $\mathcal{G}_{i,j,k}$ ; скорости объемной усадки  $\Omega_{i,j,k}$ ; градиента влагосодержания  $\text{grad } W_{i,j,k}$ ; градиента температуры  $\text{grad } T_{i,j,k}$  во всех расчетных точках  $i, j, k$ , (количество расчетных точек определяется потребной точностью вычислений и может составлять от  $10^3$  до  $10^6$ ), а также потребное время насыщения  $\tau_c$  (до достижения заданного влагосодержания  $W_c$  во всех точках); общий расход влаги с поверхности pellets  $G$ ; массу испарившейся

влаги в процессе сушки  $M$ ; тепловой поток, расходуемый на испарение влаги  $Q_1$ ; количество теплоты, израсходованной на испарение влаги  $Q_{\tau 1}$ ; тепловой поток, расходуемый на нагрев пеллеты  $Q_2$ ; количество теплоты, израсходованной на нагрев пеллеты  $Q_{\tau 2}$ ; общий тепловой поток к поверхности пеллеты  $Q$ ; общее количество теплоты, израсходованной на обогащение пеллеты  $Q_{\tau}$ ; максимальные значения параметров  $\text{grad } W_{i,j,k}$  и  $\text{grad } T_{i,j,k}$ ; местоположение точек с максимальными значениями указанных параметров и моменты времени, отсчитываемые от начала процесса обогащения пеллеты, в которые достигаются эти максимальные значения.

Размер ребра пеллеты  $AB$  (см. рис. 2) обозначим далее через  $L_y$ , ребра  $AE - L_z$ ,  $AD - L_x$ . Скорость  $u$  обдува пеллеты газом направлена вдоль оси  $z$ . Каждая расчетная точка имеет тройной индекс  $i, j, k$ , где  $i$  изменяется в диапазоне от 1 до  $n_x$ ,  $j$  - от 1 до  $n_y$ ,  $k$  - от 1 до  $n_z$ . Здесь  $n_x, n_y, n_z$  - количество расчетных точек вдоль оси  $x, y$  и  $z$  соответственно. Введем также для компактности дальнейших формул обозначения поверхностей пеллеты:  $ABCD - 1$ ;  $EFGH - 2$ ;  $AEHD - 3$ ;  $BFGC - 4$ ;  $ABFE - 5$ ;  $DCGH - 6$ .

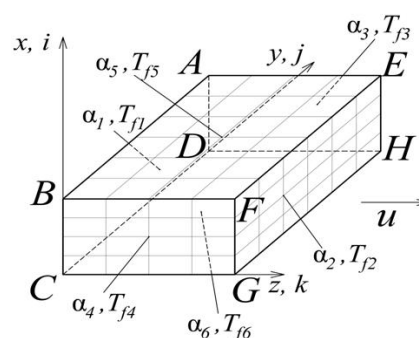


Рис. 2. Расчетная схема к моделированию кинетики тепловлажностного состояния пеллеты и насыщения ее капиллярно-пористого пространства газом

Технологические параметры (режимы) обогащения пеллеты и индивидуальные особенности выбранного репрезентативного экземпляра моделируются при расчетах заданием индивидуальных параметров рабочего тела (и их изменения во времени), а также других граничных условий отдельно на каждой поверхности пеллеты.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КИНЕТИКИ СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ ПЕЛЛЕТЫ В ПРОЦЕССЕ ОБОГАЩЕНИЯ РЕЦИРКУЛИРУЕМЫМИ УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ

Математическая формулировка задачи включает сопряженное решение задач теплопроводности, влагопереноса и насыщения капиллярно-пористого пространства.

Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид (см., например, [6]):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $x, y, z$  - координаты декартовой системы (см. рис. 2), м;  $\tau$  - время, с;  $T$  - температура пеллеты, К;  $\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  - удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\lambda$  - теплопроводность, Вт/(м·К).

Теплофизические свойства пеллеты  $\rho, c$  и  $\lambda$  берутся с учетом определяемой в процессе расчета его влажности (в каждой расчетной точке в каждый расчетный момент времени) и с учетом их зависимости от температуры.

Начальное условие для дифференциального уравнения теплопроводности (1) формулируются в виде:

$$\tau = 0: T = T_0, \quad (2)$$

где  $T_0$  - начальная температура, К.

Граничные условия (при  $\tau > 0$ ) имеют вид:

при  $z = 0$ ;  $0 \leq x \leq L_x$ ;  $0 \leq y \leq L_y$  (на поверхности 1):

$$\alpha_1(T_{f1} - T) - g_w r_w = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}; \quad (3)$$

при  $z = L_z$ ;  $0 \leq x \leq L_x$ ;  $0 \leq y \leq L_y$  (на поверхности 2):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_2(T_{f2} - T) - g_w r_w; \quad (4)$$

при  $y = L_y$ ;  $0 \leq x \leq L_x$ ;  $0 \leq z \leq L_z$  (на поверхности 3):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_3(T_{f3} - T) - g_w r_w; \quad (5)$$

при  $y = 0$ ;  $0 \leq x \leq L_x$ ;  $0 \leq z \leq L_z$  (на поверхности 4):

$$\alpha_4(T_{f4} - T) - g_w r_w = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}; \quad (6)$$

при  $x = L_x$ ;  $0 \leq y \leq L_y$ ;  $0 \leq z \leq L_z$  (на поверхности 5):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_5(T_{f5} - T) - g_w r_w; \quad (7)$$

при  $x = 0$ ;  $0 \leq y \leq L_y$ ;  $0 \leq z \leq L_z$  (на поверхности 6):

$$\alpha_6(T_{f6} - T) - g_w r_w = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (8)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи газа в рабочей камере модуля обогащения к поверхности пеллеты, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{fl}$  – температура рециркулирующего газа около  $l$ -й поверхности пеллеты, К;  $g_w$  – плотность массового потока пара с поверхности пеллеты в анализируемой точке, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $r_w$  – скрытая теплота испарения влаги (средняя в диапазоне температур от начальной  $T_0$  до температуры в рабочей камере), Дж/кг.

Дифференциальное уравнение влагопереноса, воспользовавшись аналогией между процессами теплопроводности и движения вязкой жидкости в капиллярах, представим в виде:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial W}{\partial z} \right). \quad (9)$$

Здесь  $W$  – влагосодержание, кг/м<sup>3</sup>;  $D$  – коэффициент диффузии жидкости в материале пеллеты, м<sup>2</sup>/с.

Начальное условие для уравнения влагопереноса (9) имеет вид:

$$\tau = 0: W = W_0, \quad (10)$$

где  $W_0$  – исходная влажность топливной пеллеты.

Граничные условия (при  $\tau > 0$ ) имеют вид:

при  $z = 0$ ;  $0 \leq x \leq L_x$ ;  $0 \leq y \leq L_y$  (на поверхности 1):

$$\beta_1(C_{f1} - C_w) = -D \frac{\partial W}{\partial z}; \quad (11)$$

при  $z = L_z$ ;  $0 \leq x \leq L_x$ ;  $0 \leq y \leq L_y$  (на поверхности 2):

$$-D \frac{\partial W}{\partial z} = \beta_2(C_w - C_{f2}); \quad (12)$$

при  $y = L_y$ ;  $0 \leq x \leq L_x$ ;  $0 \leq z \leq L_z$  (на поверхности 3):

$$-D \frac{\partial W}{\partial y} = \beta_3(C_w - C_{f3}); \quad (13)$$

при  $y = 0$ ;  $0 \leq x \leq L_x$ ;  $0 \leq z \leq L_z$  (на поверхности 4):

$$\beta_4(C_{f4} - C_w) = -D \frac{\partial W}{\partial y}; \quad (14)$$

при  $x = L_x$ ;  $0 \leq y \leq L_y$ ;  $0 \leq z \leq L_z$  (на поверхности 5):

$$-D \frac{\partial W}{\partial x} = \beta_5(C_w - C_{f5}); \quad (15)$$

при  $x = 0$ ;  $0 \leq y \leq L_y$ ;  $0 \leq z \leq L_z$  (на поверхности 6):

$$\beta_6(C_{f6} - C_w) = -D \frac{\partial W}{\partial x}. \quad (16)$$

Здесь  $\beta$  – коэффициент массоотдачи влаги от поверхности пеллеты к рабочему телу, м/с;  $C_f$  – концентрация водяного пара в потоке рабочего тела, кг/м<sup>3</sup>;  $C_w$  – концентрация водяного пара на поверхности пеллеты, кг/м<sup>3</sup>. Нижний цифровой индекс  $y$  параметров  $\beta$  и  $C_f$  обозначает их принадлежность к одной из шести поверхностей пеллеты.

## РАЗНОСТНЫЕ УРАВНЕНИЯ, УСТОЙЧИВЫЙ ШАГ ИНТЕГРИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

С использованием явной разностной схемы второго порядка аппроксимации по пространственным переменным и первого порядка – по времени (см. [7]) получены разностные уравнения теплопроводности и влагопереноса для типовых (внутренних) и всех особых (расположенных на поверхностях, на ребрах, в углах) расчетных точек пеллеты, а также выражения для устойчивого шага интегрирования применительно ко всем расчетным точкам. В качестве примера приводим разностное уравнение влагопереноса, записанное для внутренних точек топливной пеллеты:

$$W'_{i,j,k} = W_{i,j,k} \left[ 1 - \Delta \tau \left( \frac{D_{i-\frac{1}{2},j,k} + D_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta x^2} + \frac{D_{i,j,k-\frac{1}{2}} + D_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} + \frac{D_{i,j,k-\frac{1}{2}} + D_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right) \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + \Delta\tau \left( W_{i-1,j,k} \frac{D_{i-\frac{1}{2},j,k}}{\Delta x^2} + \right. \\
& \left. + W_{i+1,j,k} \frac{D_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta x^2} + W_{i,j-1,k} \frac{D_{i,j-\frac{1}{2},k}}{\Delta y^2} + \right. \\
& \left. + \Delta\tau \left( W_{i,j+1,k} \frac{D_{i,j+\frac{1}{2},k}}{\Delta y^2} + W_{i,j,k-1} \frac{D_{i,j,k-\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} + \right. \right. \\
& \left. \left. + W_{i,j,k+1} \frac{D_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right) \right) \quad (17)
\end{aligned}$$

При составлении разностного уравнения влагопереноса использованы следующие обозначения:  $W, W'$  – значения влагосодержания в анализируемой точке в моменты времени  $\tau$  и  $\tau + \Delta\tau$  соответственно,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\Delta x, \Delta y$  и  $\Delta z$  – шаги равномерной разностной сетки вдоль координатных осей  $x, y$  и  $z$  соответственно, м. Нижние (тройные) целочисленные индексы параметров разностного уравнения характеризуют принадлежность этих параметров к соответствующей расчетной точке. Параметры, снабженные «полуцелыми» индексами, определяются как среднее значение от параметров в соответствующих расчетных точках.

Предельное значение устойчивого шага интегрирования уравнения влагопереноса по времени для внутренних точек определяется выражением:

$$\begin{aligned}
\Delta\tau = & \left( \frac{D_{i-\frac{1}{2},j,k} + D_{i+\frac{1}{2},j,k}}{\Delta x^2} + \right. \\
& \left. + \frac{D_{i,j-\frac{1}{2},k} + D_{i,j+\frac{1}{2},k}}{\Delta y^2} + \frac{D_{i,j,k-\frac{1}{2}} + D_{i,j,k+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right)^{-1} \quad (18)
\end{aligned}$$

Интегрирование системы уравнений выполняется с минимальным значением шага, выбранным по результатам расчета для всех точек и применительно к обоим дифференциальным уравнениям (теплопроводности и влагопереноса) модели.

Расчет граничных условий осуществляется для момента времени  $\tau + \Delta\tau$  последовательно для каждой расчетной точки, расположенной на всех шести поверхностях пеллеты  $l$  ( $l = 1 \dots 6$ ). Расчет

выполняется непосредственно перед определением температуры  $T'_{i,j,k}$  и влагосодержания  $W'_{i,j,k}$ . Для определения коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи используются известные эмпирические уравнения подобия, обобщающие опытные данные по тепло- и массоотдаче (см., например, [6]). Остальные необходимые параметры определяются по приведенным далее выражениям (19)-(23).

Давление насыщенного пара в рециркулирующем газе около  $l$ -й поверхности пеллеты, Па:

$$\begin{aligned}
p_{sfl} = & 0.1657 \cdot (T_{fl} - 273.15)^3 - \\
& - 10.1411 \cdot (T_{fl} - 273.15)^2 + \\
& + 377.3011 \cdot (T_{fl} - 273.15) - \\
& - 2156.2862, \quad (19)
\end{aligned}$$

где  $T_{fl}$  – температура рециркулирующего газа около  $l$ -й поверхности пеллеты для момента времени  $\tau + \Delta\tau$ . Зависимость температуры греющего агента для каждой поверхности пеллеты от времени определяется технологическим режимом обогащения и параметрами рабочей камеры и задается в виде таблицы или функции.

Парциальное давление пара в газе рабочей камеры для  $l$ -й поверхности пеллеты, Па:

$$p_{nfl} = p_{sfl} \phi_l / 100. \quad (20)$$

где  $\phi_l$  – относительная влажность рециркулирующего газа около  $l$ -й поверхности пеллеты для момента времени  $\tau + \Delta\tau$  определяется из исходных данных.

Парциальное давление пара на поверхности пеллеты, Па:

$$\begin{aligned}
p_{i,j,k} = & 0.1657 \cdot (T_{i,j,k} - 273.15)^3 - \\
& - 10.1411 \cdot (T_{i,j,k} - 273.15)^2 + \\
& + 377.3011 \cdot (T_{i,j,k} - 273.15) - \\
& - 2156.2862. \quad (21)
\end{aligned}$$

Концентрация пара в рециркулирующем газе рабочей камеры около  $l$ -й поверхности пеллеты,  $\text{кг/м}^3$ :

$$C_{fl} = \frac{p_{nfl}}{461.9 T_{fl}}. \quad (22)$$

Концентрация пара на поверхности пеллеты,  $\text{кг/м}^3$ :

$$C_{i,j,k} = \frac{p_{i,j,k}}{461.9 T_{i,j,k}}. \quad (23)$$

## РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ ПЕЛЛЕТЫ И КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА

Расчет искомых параметров состояния топливной пеллеты осуществляется по приведенным далее выражениям (24)-(34).

Пористость пеллеты:

$$\varepsilon = W_{\max} / \rho_w, \quad (24)$$

где  $W_{\max}$  – предельное влагосодержание (максимально возможная масса влаги в единице объема пеллеты), кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_w$  – плотность воды (средняя в диапазоне температур от начальной  $T_0$  до температуры обогащенной пеллеты), кг/м<sup>3</sup>.

Доля объема пеллеты, занятая влагой в начальный момент времени:

$$\varepsilon_0 = W_0 / \rho_w, \quad (25)$$

где  $W_0$  – исходное (до подачи в модуль обогащения) влагосодержание пеллеты, кг/м<sup>3</sup>.

Доля объема пеллеты, занятая влагой, в каждом расчетном элементе в каждый расчетный момент времени:

$$\varepsilon_{i,j,k} = W_{i,j,k} / \rho_w. \quad (26)$$

Доля объема пеллеты, занятая газом:

$$\varepsilon_{g_{i,j,k}} = \varepsilon - \varepsilon_{i,j,k}. \quad (27)$$

Относительная объемная усадка пеллеты в каждом расчетном элементе в каждый расчетный момент времени  $\vartheta_{i,j,k}$ :

$$\vartheta_{i,j,k} = 1 - (\varepsilon_0 - \varepsilon_{i,j,k}). \quad (28)$$

Плотность обогащенной пеллеты в каждом расчетном элементе в каждый расчетный момент времени, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{i,j,k} = \frac{p}{RT_{i,j,k}} \varepsilon_{g_{i,j,k}} + \rho_w \varepsilon_{i,j,k} + \rho_0 (1 - \varepsilon_{g_{i,j,k}} - \varepsilon_{i,j,k}), \quad (29)$$

где  $p$  – давление газа в рабочей камере, Па;  $R$  – газовая постоянная газа в рабочей камере, Дж/(кг·К);  $\rho_0$  – плотность сухого материала пеллеты, кг/м<sup>3</sup>.

Удельная теплоемкость обогащенной пеллеты в каждом расчетном элементе в каждый расчетный момент времени, Дж/(кг·К):

$$c_{i,j,k} = \frac{1}{\rho_{i,j,k}} \left[ \frac{p \varepsilon_{g_{i,j,k}}}{RT_{i,j,k}} c_{ps} \left( \frac{T_{i,j,k}}{T_s} \right)^{n_c} + \rho_w \varepsilon_{i,j,k} (a_0 + a_1 T_{i,j,k}) + \rho_0 (1 - \varepsilon_{g_{i,j,k}} - \varepsilon_{i,j,k}) (b_0 + b_1 T_{i,j,k}) \right], \quad (30)$$

где  $n_c$  [-] и  $c_{ps}$  [Дж/(кг·К)] – константы степенной зависимости удельной изобарной теплоемкости  $c_p$  рециркулирующего газа от температуры ( $c_p = c_{ps} (T/T_s)^{n_c}$ );  $T_s$  – базовая температура, К;  $a_0$  [Дж/(кг·К)] и  $a_1$  [Дж/(кг·К<sup>2</sup>)] – константы линейной зависимости удельной теплоемкости  $c_w$  воды от температуры ( $c_w = a_0 + a_1 T$ );  $b_0$  [Дж/(кг·К)] и  $b_1$  [Дж/(кг·К<sup>2</sup>)] – константы линейной зависимости удельной теплоемкости  $c_0$  сухого материала пеллеты от температуры ( $c_0 = b_0 + b_1 T$ ).

Коэффициент теплопроводности пеллеты в каждой расчетной точке в каждый расчетный момент времени, Вт/(м·К):

$$\lambda_{i,j,k} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)}{2}, \quad (31)$$

$$\lambda_1 = \varepsilon_{g_{i,j,k}} \lambda_{gs} (T_{i,j,k} / T_s)^{n_\lambda} + \varepsilon_{i,j,k} (c_0 + c_1 T_{i,j,k}) + (1 - \varepsilon_{g_{i,j,k}} - \varepsilon_{i,j,k}) (d_0 + d_1 T_{i,j,k}), \quad (32)$$

$$\lambda_2 = \left[ \frac{\varepsilon_{g_{i,j,k}}}{\lambda_{gs} (T_{i,j,k} / T_s)^{n_\lambda}} + \frac{\varepsilon_{i,j,k}}{c_0 + c_1 T_{i,j,k}} + \frac{1 - \varepsilon_{g_{i,j,k}} - \varepsilon_{i,j,k}}{d_0 + d_1 T_{i,j,k}} \right]^{-1}, \quad (33)$$

где  $n_\lambda$  [-] и  $\lambda_{gs}$  [Вт/(м·К)] – константы степенной зависимости теплопроводности  $\lambda_g$  рециркулирующего газа от температуры ( $\lambda_g = \lambda_{gs} (T/T_s)^{n_\lambda}$ );  $c_0$  [Вт/(м·К)] и  $c_1$  [Вт/(м·К<sup>2</sup>)] – константы линейной зависимости коэффициента теплопроводности воды  $\lambda_w$  от температуры ( $\lambda_w = c_0 + c_1 T$ );  $d_0$  [Вт/(м·К)] и  $d_1$  [Вт/(м·К<sup>2</sup>)] – константы линейной зависимости коэффициента теплопроводности  $\lambda_0$  сухого материала пеллеты от температуры ( $\lambda_0 = d_0 + d_1 T$ ).

Коэффициент диффузии (фильтрации) жидкости в каждом расчетном элементе в каждый расчетный момент времени,  $m^2/c$ :

$$D_{i,j,k} = e_0 + e_1 T_{i,j,k}, \quad (34)$$

где  $e_0 [m^2/c]$  и  $e_1 [m^2/(c \cdot K)]$  – константы линейной зависимости коэффициента диффузии жидкости в пористой среде  $D$  от температуры ( $D = e_0 + e_1 T$ ).

Методика определения коэффициента диффузии жидкости изложена в [8].

Расчет коэффициентов переноса теплоты и влаги осуществляется для каждой точки непосредственно перед определением температуры  $T'_{i,j,k}$  и влагосодержания  $W'_{i,j,k}$ .

### АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕТИКИ СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ ПЕЛЛЕТЫ В ПРОЦЕССЕ ОБОГАЩЕНИЯ РЕЦИРКУЛИРУЕМЫМИ УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ

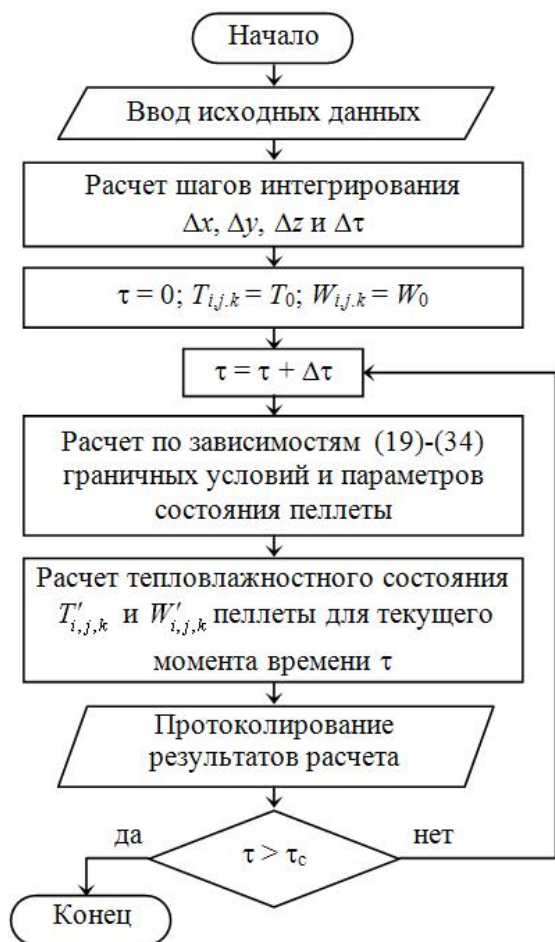


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета кинетики тепловлажностного состояния пеллеты и насыщения ее капиллярно-пористого пространства газом. Представленная математическая модель (1)-(16) и методика численного расчета реализованы в оригинальном программном комплексе для моделирования кинетики состояния топливной пеллеты в процессе обогащения рециркулируемыми уходящими газами котельной установки.

Программный комплекс обеспечивает возможность ввода и редактирования исходных данных, сопряженного численного решения системы дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности и влагопереноса в топливной пеллете, табулирования и визуализации результатов расчета. Программный комплекс укомплектован базами данных по теплофизическим свойствам материалов пеллет, газов и воды с учетом температурной зависимости. Алгоритм работы вычислительного ядра программного комплекса иллюстрирует блок-схема на рис. 3.

Тестирование программного комплекса и проверку адекватности результатов моделирования тепловлажностного состояния пеллеты проводили в два этапа, некоторые результаты которых приведены на рис. 4 и 5 соответственно.

На первом этапе оптимизировали расчетную сетку и анализировали точность получения численного решения задач в зависимости от количества расчетных точек. С этой целью моделировали процесс одномерной нестационарной теплопроводности в пеллете как сплошном теле с постоянными теплофизическими свойствами. Для этих условий имеется точное аналитическое решение задачи – [9]. В этих расчетах поверхности 1...4 пеллеты (см. рис. 2) полагали теплоизолированными, на двух оставшихся поверхностях задавали коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_5 = \alpha_6 = 300 \text{ Вт}/(m^2 \cdot K)$  и температуру рециркулирующего газа (воздуха)  $T_{f5} = T_{f6} = 373 \text{ К}$ .

Данные на рис. 4 получены на расчетной сетке из  $10^4$  расчетных точек. Из сопоставления результатов численного и аналитического расчетов (см. рис. 4) следует, что в рассматриваемых условиях относительная погрешность численного расчета температуры не превышает 0.07 %.

На втором этапе расчеты проводили для пеллеты как капиллярно-пористого тела, находящегося в среде воздуха, в условиях, для которых имеются психрометрические таблицы, предназначенные для определения влажности среды по показаниям «сухого» и «мокрого» термометров (см. рис. 5).

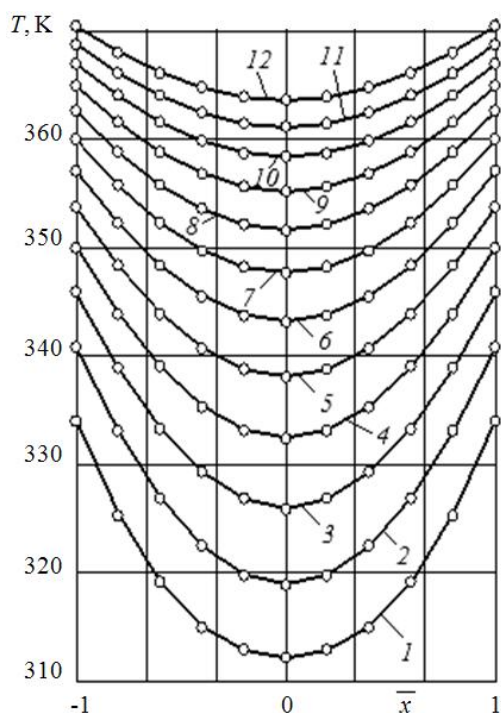


Рис. 4. Распределение температуры по толщине pellets: линия – аналитический расчет по зависимости [9];  $\circ$  – численный расчет; 1 –  $\tau = 300$  с; 2 – 600; 3 – 900; 4 – 1200; 5 – 1500; 6 – 1800; 7 – 2100; 8 – 2400; 9 – 2700; 10 – 3000; 11 – 3300; 12 – 3600

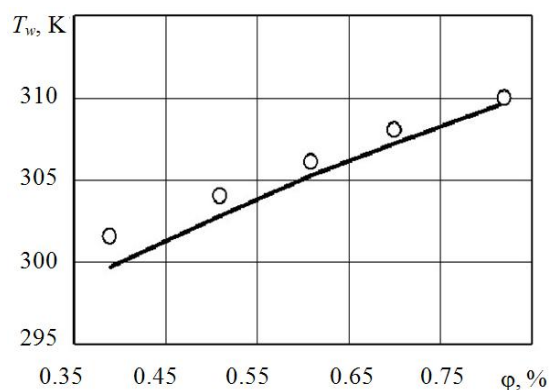


Рис. 5. Сопоставление температуры поверхности pellets  $T_w$  с табличной температурой «мокрого» термометра: линия – расчет по предлагаемой модели (температура газа (воздуха)  $T_f = 313$  К, давление  $p = 0.1$  МПа, относительная влажность  $\phi = 0.82$  %);  $\circ$  – данные психрометрической таблицы [10]

До тех пор, пока происходит испарение влаги со всей поверхности pellets (отсутствуют осушенные участки), температура этой поверхности должна совпадать с температурой «мокрого» термометра. Температуру «мокрого» термометра определяли с помощью психрометрических таблиц по значениям параметров рециркулирующего газа (температуры  $T_f$  и относительной влажности  $\phi$ ), задаваемым в исходных данных к расчету.

Расхождение результатов сопоставления расчетов температуры поверхности pellets по предлагаемой модели с табличной температурой «мокрого» термометра не превышало 0.6 % (см. рис. 5).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕТИКИ СОСТОЯНИЯ ТОПЛИВНОЙ ПЕЛЛЕТЫ В ПРОЦЕССЕ ОБОГАЩЕНИЯ РЕЦИРКУЛИРУЕМЫМИ УХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ

С использованием разработанного программного комплекса выполнена серия вычислительных экспериментов, моделирующих процесс обогащения топливной pellets рециркулируемыми газами, результаты которой позволили выявить ряд закономерностей и характерных особенностей процессов сушки и прогрева pellets в зависимости от параметров рециркулируемого газа.

Некоторые результаты этих вычислительных экспериментов показаны на рис. 6-12 (на графиках рис. 6-9 по оси абсцисс отложена относительная координата  $\bar{x} = 2(x - 0.5L_x)/L_x$ ).

Анализ полученных результатов показывает, что поля температуры и влагосодержания в pellets являются существенно трехмерными, при этом на стадии прогрева pellets характер распределения

температуры по толщине в центральной ее части качественно отличается от распределения на периферии.

В центральной части профили температуры (см. рис. 6) и влагосодержания (см. рис. 7) являются выпуклыми, а на периферии – профиль температуры становится вогнутым (см. рис. 8). Профиль влагосодержания при этом по-прежнему остается выпуклым (см. рис. 9). Выпуклый профиль температуры на первый взгляд (с позиций одно- и даже двумерной модели тепломассопереноса) кажется парадоксальным, поскольку отвод теплоты с поверхности сопровождается одновременным увеличением температуры pellets.

Однако анализ данных, соответствующих периферийным участкам pellets (см. рис. 8 и 9) показывает, что подвод теплоты в pellets на этой



стадии происходит по периферийным участкам, которые осушаются в первую очередь, а далее посредством теплопроводности в теле пеллеты теплота отводится в центральную область.

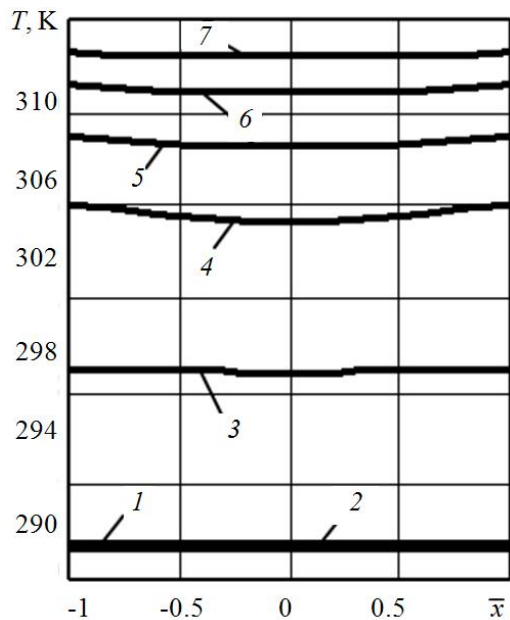


Рис. 6. Распределение температуры по толщине пеллеты в ее центре в разные моменты времени от начала процесса: 1 –  $\tau = 0$ ; 2 – 0.5; 3 – 1; 4 – 1.5; 5 – 2; 6 – 3; 7 – 4 часа

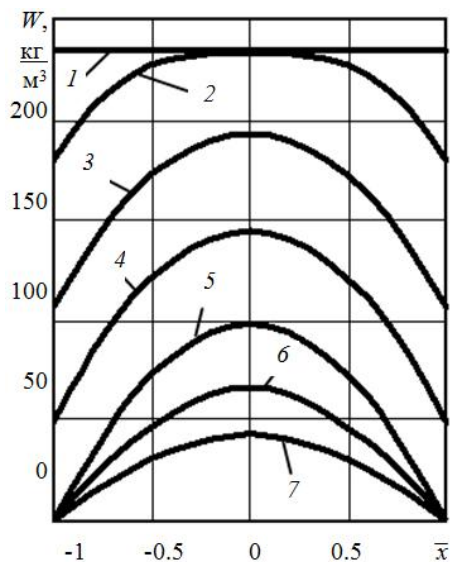


Рис. 7. Распределение влагосодержания по толщине пеллеты в ее центре. Обозначения см. в подписи к рис. 6

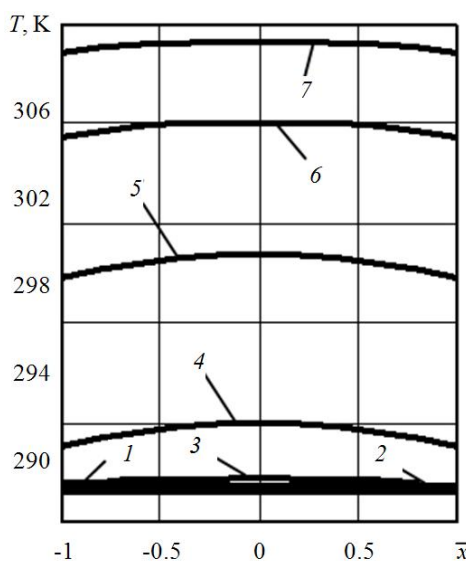


Рис. 8. Распределение температуры по толщине пеллеты на ее периферии. Обозначения см. в подписи к рис. 6

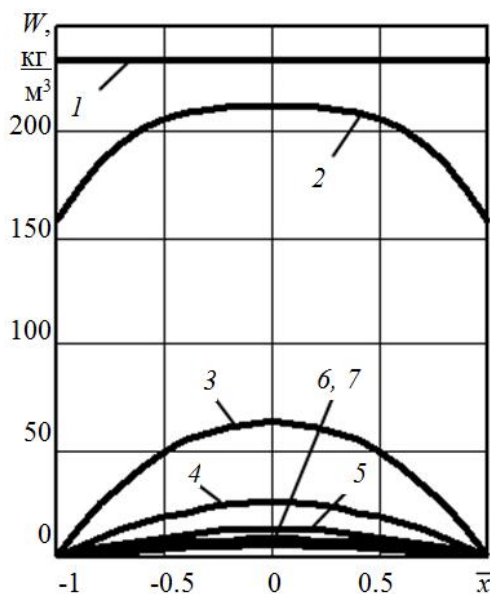


Рис. 9. Распределение влагосодержания по толщине пеллеты на ее периферии. Обозначения см. в подписи к рис. 6

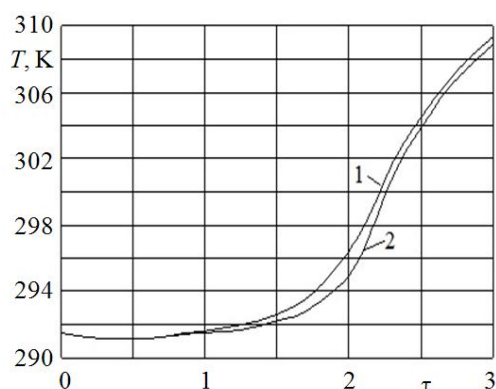


Рис. 10. Характер изменения во времени температуры в репрезентативных сечениях топливной пеллеты: 1 –  $\bar{x} = 0$ ; 2 –  $\bar{x} = 1$

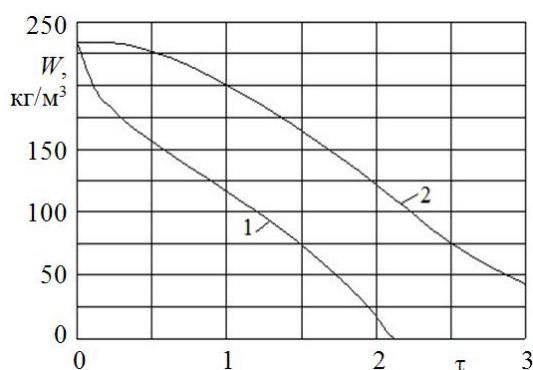


Рис. 11. Характер изменения во времени влагосодержания в репрезентативных сечениях топливной пеллеты: 1 –  $\bar{x} = 0$ ; 2 –  $\bar{x} = 1$

В течение достаточно длительного промежутка времени (в рассматриваемых условиях около 3 часов) температурное поле в центральной части пеллеты остается однородным и практически не изменяется с течением времени (температура поддерживается близкой к температуре «мокрого» термометра). И только после начала осушения периферийной части поверхности пеллеты температура в центре начинает

## ВЫВОДЫ

- Предложена технология обогащения низкосортных твердотопливных пеллет рециркулируемыми уходящими газами котельной установки. По существу, технология обогащения низкосортных топлив обеспечивает возможность исключения дорогостоящих операций термической обработки из технологического процесса получения пеллет за счет их вынесения в технологический процесс подготовки топлива непосредственно перед загрузкой в топочную камеру. При этом

повышаться. Наибольшая скорость осушения имеет место в окрестности угловых точек пеллеты.

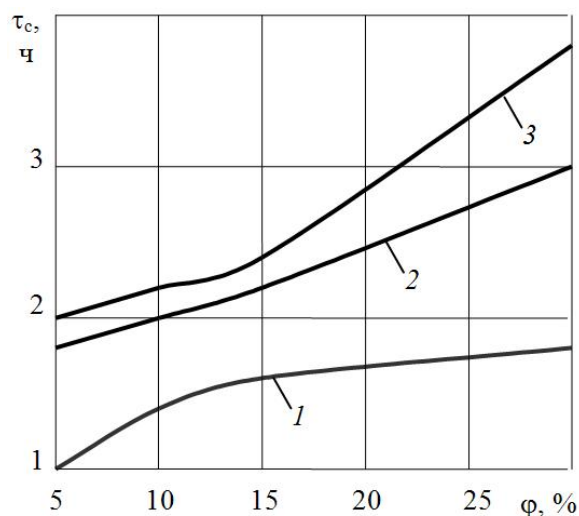


Рис. 12. Влияние температуры  $T_f$  и влажности  $\phi$  рециркулируемого газа на длительность  $\tau_c$  до полного высыхания топливной пеллеты: 1, 2, 3 –  $T_f = 573$ ; 373; 333 К

Как видно из графиков, приведенных на рис. 10 и 11 изменение температуры вне зависимости от относительной координаты происходит по схожей траектории, в отличие от изменения влагосодержания пеллеты. Осушение в середине пеллеты происходит медленнее по сравнению с периферией.

Вычислительный эксперимент при варьировании параметрами рециркулируемого газа показал, что существенное влияние на длительность процесса сушки пеллеты оказывают температура и влажность газа (см. рис. 12).

Результаты исследований будут использованы при разработке новых и совершенствовании действующих технологических процессов подготовки низкосортного твердого топлива для котельных установок.

- обеспечиваются дополнительные преимущества, связанные с подогревом топлива и его насыщением горючими компонентами.
- Сформулирована математическая модель кинетики тепловлажного состояния топливной пеллеты в процессе обогащения рециркулируемыми газами и разработана методика численного анализа, которые составляют в комплексе теоретическую основу для исследования процесса обогащения

пеллет и разработки энергоэффективных технических и технологических решений.

- Разработан проблемно-ориентированный программный комплекс для моделирования кинетики тепловлажностного состояния топливной пеллеты, обеспечивающий возможность на основе

вычислительного эксперимента вырабатывать решения по организации технологического процесса обогащения пеллет и выбору оптимальных режимов эксплуатации оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

- Макаров А. А. Долгосрочный прогноз развития энергетики мира и России / А. А. Макаров, Т. А. Митрова, В. А. Кулагин // Экономический журнал Высшей школы экономики, 2012. – № 2. – С. 172-204.  
Makarov, A.A., Mitrova, T.A. and Kulagin, V.A., (2012) *Dolgosrochnyi prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii* [Longterm prognosis for development of the world energy, as well as in Russia], *Ekonomicheskii zhurnal Vysshei shkoly ekonomiki*, No. 2, pp. 172-204.
- Ресурсы и потенциал возобновляемых источников энергии // Возобновляемая энергия в России (природный потенциал). Ч. I. Гл. 1. URL: <http://lib.rosenergосervis.ru/2011-07-20-04-56-55.html?start=2> (дата обращения: 07.04.2014).  
Duraeva, E.A., (2004) *Vozobnovliaemaia energiya v Rossii (prirodnyi potentsial)* [Renewable energy in Russia], Part. I. Ch. 1., Moscow: International Energy Agency, 120 p. Available at: <http://lib.rosenergосervis.ru/2011-07-20-04-56-55.html?start=2>
- Ковальногов В.Н. Научно-технические проблемы малой распределенной теплоэнергетики и некоторые их решения // Сборник тезисов участников международного научного форума «Наука будущего – наука молодых», Севастополь, 2015. – Т. 1. С. 94–95.  
Kovalnogov, V.N., (2015) *Nauchno-tehnicheskiye problemy maloy raspredelennoy teploenergetiki i nekotoryye ikh resheniya* [Scientific and technical problems of small distributed power system and some of their solutions], *Abstracts of the Intl. Sci. Forum "Science of the future - the young science"*, Sevastopol, vol. 1, pp. 94-95.
- Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M., Hiegl, W., Hansen M.T., Faaij, A. 2011. The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. Volume 5, Issue 3: 250-278.
- Kovalnogov V.N., Karpukhina T.V., Korotkov E.A. Mathematic modeling of the kinetics of heat-and-humidity state of capillary-porous bodies under convection drying // *AIP Conference Proceedings*, 1738, 480005 (2016); doi: 10.1063/1.4952241.
- Термодинамика и теплопередача / А.В. Болгарский, Г.А. Мухачев, В.К. Щукин. – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с.  
Bolgarsky, A.V., Mukhachev, G.A. and Shchukin V.K., (1975) *Termodinamika i teploperedacha* [Thermodynamics and Heat Transfer], Moscow: Vysshaya Shkola, 495 p.
- Теория и техника теплофизического эксперимента / Ю. Ф. Гортышов, Ф. Н. Дресвянников, Н. Н. Ковальногов и др.; под ред. В. К. Щукина. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 448 с.  
Gortyshev, Y.F., Dresvyannikov, F.N. and Kovalnogov N.N., (1993) *Teoriya i tekhnika teplofizicheskogo eksperimenta* [Theory and technique of a thermophysical experiment], Moscow: Energoatomizdat, 448 p.
- Патент РФ № 2469292. Способ определения коэффициента диффузии жидкости в капиллярно-пористом теле / Ковальногов В.Н., Ковальногов Н.Н., Павловичева Т.В. № 2011114023/28. Заявл.08.04.2011. Опубл. 10.12.2012. Бюл. № 34.  
Kovalnogov V.N., Kovalnogov N.N., Pavlovicheva T.V., (2011) RU Patent No. 2469292 (8 April 2011).
- Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.  
Lykov, A.V., (1968) *Teoriya sushki* [Drying theory], Moscow: Energiya, 472 p.
- Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.  
Lykov, A.V., (1978) *Teplomassoobmen: spravochnik* [Heat and Mass Transfer: Handbook], Moscow: Energiya, 480 p.