

DOI: 10.12737/article_58e613384b6612.68398784

Шаптала В.Г., д-р техн. наук, проф.,
Шатала В.В., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧИСТКИ ГАЗОВ В ПЫЛЕОСАДИТЕЛЬНЫХ КАМЕРАХ ЦЕМЕНТНЫХ ПЕЧЕЙ

Shaptala_Vadim@yandex.ru

Рассмотрены математические модели гравитационного осаждения пыли с учетом турбулентной диффузии частиц. Эти модели могут быть использованы для уточненного расчета эффективности пылеосадительных камер и другого газоочистного оборудования.

Ключевые слова: пылеосадительная камера, турбулентная диффузия частиц.

Введение. Наиболее интенсивным источником выделения пыли в цементном производстве являются вращающиеся клинкерообжигательные печи. Так, при мокром способе производства цемента из печи размерами 5×185 м производительностью 1730 т клинкера в сутки выделяется от 78 до $114 \text{ м}^3/\text{с}$ отходящих газов с температурой $180\text{--}250 \text{ }^\circ\text{C}$ и концентрацией пыли $20\text{--}55 \text{ г}/\text{м}^3$ [1, 2]. Таким образом, за сутки из печи выносятся в среднем около 200 т пыли, состоящей из частиц полубоженной шихты. Для

улавливания этой пыли применяются двухступенчатые системы газоочистки включающие в себя пылеосадительную камеру и электрофильтр [3](рис. 1).

Степень очистки газов в обычных пылеосадительных камерах не превышает 15%, поэтому для интенсификации процесса осаждения частиц внутри камер устанавливают горизонтальные перегородки (осадительные полки) с шагом $0,3\text{--}1$ м. Такая модификация камер позволяет повысить их эффективность до 30–40%.

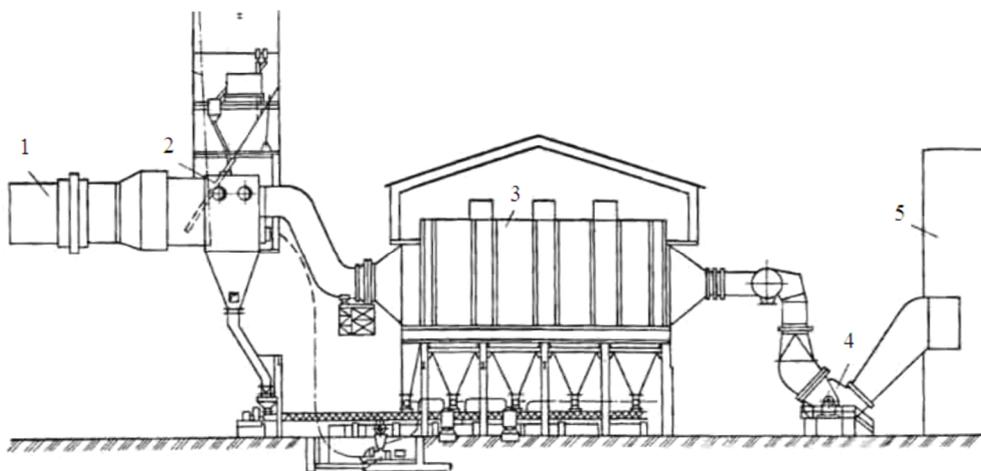


Рис. 1. Схема обеспыливания газов, отходящих из вращающейся цементной печи (1 – печь; 2 – пылеосадительная камера; 3 – электрофильтр; 4 – дымосос; 5 – дымовая труба).

Несмотря на невысокую эффективность при существующих в настоящее время технологиях производства цемента пылеосадительные камеры являются неотъемлемой частью систем очистки отходящих газов. В связи с этим возникает необходимость в разработке уточненной методики расчета пылеосадительных камер, более полно учитывающей физические особенности гравитационного осаждения пыли из турбулентных потоков воздуха.

Основная часть. Основными факторами, определяющими эффективность горизонтальной пылеосадительной камеры, являются:

- физико-механические свойства осаждаемой пыли (дисперсный состав, плотность, форма частиц);
- свойства несущего воздушного потока (скорость, температура, влажность, степень турбулизации)
- геометрические размеры камеры (высота, длина).

Фракционная степень осаждения частиц пыли размера d определяется через отношение их потоков на входе в камеру P_1 и выходе из нее P_2 :

$$\eta(d) = 1 - \frac{\Pi_2(d)}{\Pi_1(d)}, \quad (1)$$

$$\eta = \sum_{i=1}^n \eta(d_i) \Delta D_i, \quad (3)$$

где

$$\Pi_{1,2}(d) = \iint_{S_{1,2}} C_{1,2}(d) u dS. \quad (2)$$

Здесь $C_{1,2}(d)$ – концентрация частиц во входном S_1 и выходном S_2 сечениях камеры, u – скорость потока запыленного газа.

Полная степень осаждения пыли равна взвешенной сумме фракционных коэффициентов осаждения:

где ΔD_i – относительные массовые доли отдельных фракций пыли.

Пренебрегая влиянием боковых стенок камеры, рассмотрим в качестве простейшей модели ее работы процесс гравитационного осаждения частиц из плоского ламинарного потока запыленного воздуха, занимающего область $0 \leq x < \infty$, $0 \leq y \leq H$, $-\infty < z < \infty$ (рис. 2).

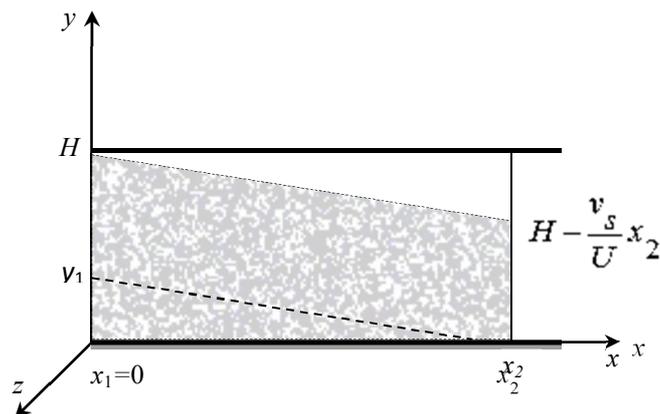


Рис. 2. Схема осаждения частиц из плоского ламинарного потока запыленного воздуха

Пусть скорость потока воздуха равна $u(u;0;0)$, а скорость осаждения частиц $v_s(0;-v_s;0)$. Тогда все частицы равномерно распределенные во входном сечении потока $x_1 = 0$ с концентрацией C_1 будут перемещаться по параллельным наклонным траекториям, уравнения которых имеют вид:

$$y = y_1 - \frac{v_s}{u} x, \quad (4)$$

где y_1 – ордината начального положения частиц во входном сечении потока.

Будем считать, что частицы, достигшие дна камеры, обратно в нее не возвращаются (приближение прозрачных стенок). Тогда траектории частиц, проходящие через верхний край входного сечения $y_1 = H$ разделяют занимаемую потоком область на две зоны: верхнюю чистую и нижнюю, заполненную частицами, с концентрацией, равной входной концентрации C_1 . Поэтому поток (проскок) частиц через выходное сечение $x = x_2$ равен:

$$\Pi_2 = C_1 u B \left(H - \frac{v_s}{u} x_2 \right), \quad (5)$$

где B – ширина осадительной камеры.

Фракционная эффективность улавливания частиц в пылесадительной камере имеет вид:

$$\eta(d, x_2) = 1 - \frac{C_1 u B \left(H - \frac{v_s}{u} L \right)}{C_1 u B H} = \frac{v_s(d) L}{u H}, \quad (6)$$

где L – длина камеры.

В реальных условиях поток воздуха в пылесадительных камерах всегда турбулентен, поэтому мелкие частицы пыли из-за их турбулентной диффузии заполняют все внутреннее пространство камеры и их полное осаждение практически невозможно. Так что соотношение (6) можно использовать лишь для приближенной оценки предельного значения эффективности пылесадительных камер.

Распределение концентрации частиц пыли в турбулентном потоке воздуха описывается уравнением конвективной диффузии, которое в приближении изотропной однородной турбулентности принимает вид [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \text{div}(vC - D_{tp} \nabla C) = 0, \quad (7)$$

где $v(u; v_s)$ – вектор скорости твердой фазы (продольную составляющую скорости твердой фазы считаем равной скорости несущего потока воздуха), D_{tp} – коэффициент турбулентной диффузии частиц.

В рассмотренном выше потоке запыленного газа, движущемся между двумя параллельными плоскостями $y = 0$ и $y = H$ в направлении оси Ox , возможно стационарное распределение частиц, которое устанавливается в результате баланса поступления через входное сечение канала и гравитационного и диффузионного осаждения частиц на ограничивающие плоскости. Если скорость движения запыленного потока мала, то турбулентная диффузия частиц будет незначительной ($D_{tp} \ll uH$), поэтому ее влиянием в продольном направлении можно пренебречь.

В этом случае с учетом стационарности процесса и однородности распределения частиц вдоль оси Oz уравнение (7) принимает вид:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} - v_s \frac{\partial C}{\partial y} - D_{tp} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} = 0 \quad (8)$$

Рассмотрим распределение концентрации частиц, удовлетворяющее следующим граничным условиям:

$$C|_{x=0} = C_1; \quad \frac{\partial C}{\partial x}|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial C}{\partial y}|_{y=0} = 0; \quad q_y|_{y=H} = 0, \quad (9)$$

где $q = vC - D_{tp} \nabla C$ - плотность потока частиц.

Решение уравнения (8), удовлетворяющее граничным условиям (9), может быть представлено в виде [6]:

$$C(x, y) = C_1 \left(\Phi \left(\frac{H - y - \frac{v_s}{u} x}{\sqrt{\frac{2D_{tp} x}{u}}} \right) + \Phi \left(\frac{y + \frac{v_s}{u} x}{\sqrt{\frac{2D_{tp} x}{u}}} \right) - 1 \right) \quad (10)$$

где $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-t^2/2} dt$ - интеграл вероятностей.

В результате подстановок $x = L$, $y = H-h$, где h - расстояние от потолка камеры, соотношение (10) переходит в формулу, положенную в основу методики, применяемой в настоящее время для расчета эффективности пылеосадительных камер [7].

Отметим, что в справочнике [7, стр. 51] и во всех последующих пособиях по газоочистке в первой из формул (2.4) допущена ошибка: в числителе формулы следует убрать слагаемое H . Лишь при этом условии формула (2.3) справочника [7] верно описывает предельный переход от тубулентного режима течения запыленного потока к ламинарному при $D_{tp} \rightarrow 0$. В этом случае второе слагаемое соотношения (2.3) всегда стремится к 1, а первое слагаемое в зависимости от знака его числителя стремится к 0 для точек, лежащих выше граничной траектории

(чистая зона) и к 1 для точек, лежащих ниже ее ($C(x, y) = C_1$).

С учетом выражения (10) соотношение (1) для фракционной степени улавливания пыли в камере принимает вид:

$$\eta(d) = 1 + \frac{1}{b} \left(\int_{a-b}^a \Phi(t) dt - \int_a^{a+b} \Phi(t) dt \right) \quad (11)$$

где

$$a = \sqrt{\frac{v_s^2 L}{2D_{tp} u}}, \quad b = \sqrt{\frac{uH^2}{2D_{tp} L}} \quad (12)$$

Из формул (11, 12) следует, что на эффективность осаждения частиц в пылеосадительной камере определяющее влияние оказывает скорость осаждения частиц v_s и коэффициент их турбулентной диффузии. Скорость гравитационного осаждения мелких частиц может быть найдена по формуле Стокса:

$$v_s(d) = \frac{\rho_p g d^2}{18\mu_z \Phi}, \quad (13)$$

а для крупных частиц может быть выражена через число Рейнольдса:

$$v_s(d) = \frac{Re \mu_z}{\rho_z d}, \quad (14)$$

которое в свою очередь определяется из уравнения [8]:

$$\Phi(24 Re + 3,6 Re^{1,687}) = \frac{4}{3} Ar, \quad (15)$$

где $Ar = (d^3 \rho_p g) / \mu_z^2$ - число Архимеда.

Уравнение (14) вытекает из условия равенства модулей действующих на частицу силы тяжести и силы аэродинамического сопротивления, найденной с учетом уточненной формулы Л.С. Клячко:

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3,6}{Re^{0,313}} \quad (16)$$

В формулах (13, 14) $\rho = 3534/(273+t)$ $\rho_p = 2600 - 3300$ кг/м³ - плотности отходящих газов и частиц,

$$\mu_z = 1,75 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{397}{397+t} \left(1 + \frac{t}{273} \right)^{\frac{3}{2}}, \text{ Па}\cdot\text{с} \quad (17)$$

- коэффициент динамической вязкости газов, $g = 9,81$ м/с² - ускорение силы тяжести, $\Phi = 1,2$ - усредненный коэффициент формы, частиц. Расчеты показывают (рис. 3), что при определении скорости осаждения частиц,

выносимых из цементной печи, формула Стокса может применяться к частицам размером до 70 мкм.

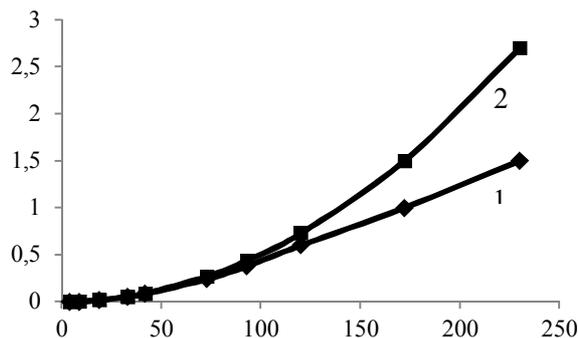


Рис. 3. Зависимости скорости осаждения частиц от их размера (1 – по уравнениям 14, 15; 2 – по формуле Стокса)

Коэффициент турбулентной диффузии частиц D_{tp} может быть найден по формуле [5, 9]:

$$D_{tp} = \frac{v_t}{1 + 0,286Stk}, \quad (18)$$

где

$$Stk = \frac{d^2 u \rho_p}{18 \mu H} \quad (19)$$

– число Стокса, v_t – коэффициент турбулентной вязкости воздуха, который может быть найден по формуле Шервуда-Верца [10]:

$$v_t = 0,0124 u D_c \sqrt{\lambda}. \quad (20)$$

Здесь $D_r = 2BH/(B + H)$ – гидравлический (эквивалентный) диаметр осадительной камеры, $\lambda \approx 0,03$ – коэффициент трения потока о стенки камеры.

В результате турбулентной диффузии распределение достаточно мелких частиц по высоте пылесадительной камеры можно считать однородным, что позволяет оценить эффективность их осаждения на основе подхода Дейча [11]:

$$\eta(d) = 1 - \exp\left(-\frac{v_s(d)L}{UH}\right). \quad (21)$$

$$\left(\frac{\partial N}{\partial x} - \mu N\right)\Big|_{x=0} = -2\mu C_0 e^{-vy} = f_0(y), \quad (26)$$

$$\left(\frac{\partial N}{\partial x} + \mu N\right)\Big|_{x=\infty} = 0, \left(\frac{\partial N}{\partial y} - \nu N\right)\Big|_{y=0} = 0, \left(\frac{\partial N}{\partial y} - \nu N\right)\Big|_{y=H} = 0,$$

где $\chi^2 = \mu^2 + \nu^2$.

Решение уравнения (25) можно найти методом разделения переменных:

$$N(x, y) = X(x)Y(y) \quad (27)$$

Исследование распределения концентрации пыли в рассмотренном выше потоке, учитывающее диффузию частиц как в поперечном так и в продольном направлениях приводит к постановке следующей краевой задачи:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} - v_s \frac{\partial C}{\partial y} - D_{tp} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (22)$$

$$q_x|_{x=0} = C_0 u, \quad \frac{\partial C}{\partial x}\Big|_{x=\infty} = 0, \quad (23)$$

$$q_y|_{y=H} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0.$$

С помощью замены

$$C(x, y) = N(x, y) \exp(\mu x + \nu y), \quad (24)$$

$$\mu = \frac{u}{2D_{tp}}, \nu = -\frac{v_s}{2D_{tp}},$$

уравнение (18) и граничные условия (19) приводятся к виду:

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} - \chi^2 N = 0 \quad (25)$$

Подставив (27) в уравнение (25) и граничные условия (26), получим следующую краевую задачу для $Y(y)$:

$$Y'' + \lambda^2 Y = 0, \quad (28)$$

$$Y'(0) + \nu Y(0) = 0, \quad (29)$$

$$Y'(H) + \nu Y(H) = 0. \quad (30)$$

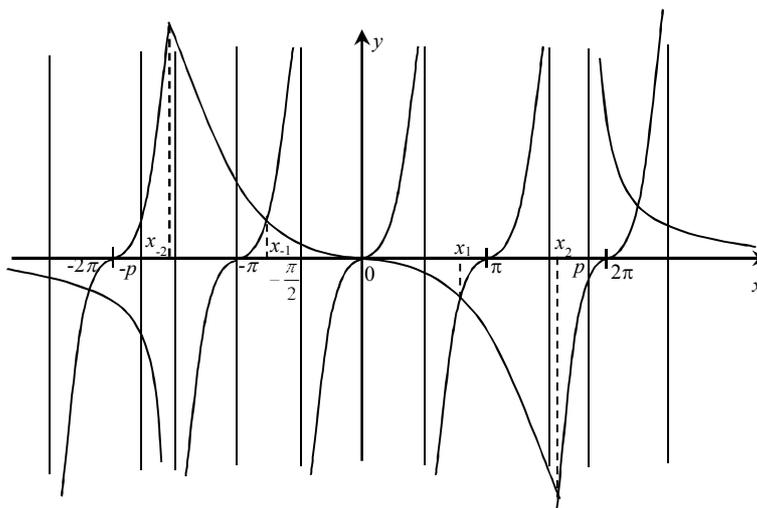


Рис. 4. К определению собственных чисел краевой задачи

Решением задачи (24-26) является система собственных функций

$$Y_k(y) = -v \sin \lambda_k y + \lambda_k \cos \lambda_k y, \quad (31)$$

где λ_k – собственные числа, которые являются корнями уравнения

$$\operatorname{tg} x_k = \frac{2px_k}{x_k^2 - p^2} \quad (32)$$

где $x_k = \lambda_k H$, $p = v_s H / 2D_{tp}$ (рис 4).

Система функций (31) является полной и ортогональной на отрезке $[0, H]$, причем:

$$\int_0^H Y_k^2 dy = \frac{H(v^2 + \lambda_k^2)}{v^2 - \lambda_k^2} \cdot \frac{\sin 2\lambda_k H}{2\lambda_k H} \quad (33)$$

Уравнение для функции $X(x)$ имеет вид:

$$X'' - q^2 X = 0, \quad (34)$$

где $q = \sqrt{x^2 + \lambda^2}$

Решение уравнения (34), удовлетворяющее условию $N(\infty, y) = 0$, может быть записано так:

$$X(x) = Ae^{-qx} \quad (35)$$

где A – постоянная.

Представим теперь решение уравнения (25) в виде разложения по собственным функциям задачи (28-30):

$$N(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-q_k x} Y_k(y) \quad (36)$$

Определив постоянные A_k из граничного условия (26)

$$A_k = \frac{2\mu \int_0^H f_0(y) Y_k(y) dy}{(\mu + q_k) \int_0^H Y_k^2(y) dy}, \quad (37)$$

найдем искомое распределение концентрации частиц:

$$C(x, y) = \frac{4C_1\mu}{H} \sum_k \frac{\sin \lambda_k H \cdot Y_k(y) \exp((\mu - q_k)x - v(H - y))}{(\mu + q_k)(v^2 + \lambda_k^2) \left(1 + \frac{\lambda_k^2 + v^2}{\lambda_k^2 - v^2} \cdot \frac{\sin 2\lambda_k H}{2\lambda_k H} \right)} \quad (38)$$

Степень осаждения частиц в осадительной камере в приближении однородных полей скоростей дисперсной фазы имеет вид:

$$\eta(d) = 1 - \frac{\int_0^H C(L, y) dy}{C_1 H} = 1 + \frac{8\mu v}{H^2} \sum_k \frac{\lambda_k \sin \lambda_k H \exp((\mu - q_k)L - vH)}{(\mu + q_k)(v^2 + \lambda_k^2)^2 \left(1 + \frac{\lambda_k^2 + v^2}{\lambda_k^2 - v^2} \cdot \frac{\sin 2\lambda_k H}{2\lambda_k H} \right)} \quad (39)$$

Приведенный выше анализ свидетельствует о том, что аналитические выражения для распределения концентрации частиц могут быть найдены лишь в случае газодисперсных потоков с однородным полем скоростей. В общем случае поле концентраций частиц может быть рассчитано численно на основе системы уравнений Навье-Стокса, неразрывности и теплопереноса [9].

Заключение. Полученные модели могут применяться для расчета не только пылеосадительных камер, но и других агрегатов и процессов, в которых происходит гравитационное пылеосаждение (пелеунос из цементных печей и мельниц, аспирационные шахты, электрофильтры, рассеивание запыленных выбросов и другие). Для повышения достоверности результатов исследования гравитационного осаждения частиц математические модели должны учитывать неизотермичность газодисперсных потоков, коагуляцию частиц, а также влияние ограничивающих потоки поверхностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Классен В.К. Технология и оптимизация производства цемента. Белгород: Изд. БГТУ, 2012. 307с.
2. Физико-химические и механические свойства аэрозолей и пыли, выделяемых основным оборудованием цементных заводов (справочные материалы). Новороссийск: Изд. НИПИОТСТРОМ, 1976. 112 с.
3. Проектирование цементных заводов/ под ред. Зозули П.В. и Никифорова Ю.В. [Электронный ресурс] режим доступа: WWW.procement.com (дата обращения 8.02.2017).
4. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Яламов Ю.И. Теоретические основы охраны атмосферного воздуха от загрязнений промышленными аэрозолями. СПб.: Изд. НИИОГАЗ-ФИЛЬТР, 1993. 236 с.
5. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 176 с.
6. Шаптала В.Г. Математическое моделирование в прикладных задачах механики двухфазных потоков. Белгород: Изд. БелГТАСМ, 1996. 102 с.
7. Справочник по пыле- и газоулавливанию/ под общ. ред. А.А. Русанова. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
8. Белоусов В.В. Теоретические основы процессов газоочистки. М.: Металлургия, 1988. 256 с.
9. Шаптала В.Г. Математическое моделирование систем обеспыливания промышленных объектов с учетом явлений переноса в гетерогенных средах: дис...д-ра техн. наук. Воронеж. 2004. 358 с.
10. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория. М.: Физматгиз, 1983. 680 с.
11. Левитов В.И. Решидов И.К. Ткаченко В.М. Дымовые электрофильтры. М.: Энергия, 1980. 448 с.

Shaptala V.G., Shaptala V.V.

SIMULATION OF GAS CLEANING THE DUST SETTLING CHAMBER CEMENT KILNS

The mathematical model of gravitational settling of dust, taking into account the turbulent diffusion of particles. These models can be used to refine the calculation of efficiency of dust collecting chambers and other gas-cleaning equipment.

Key words: dust settling chamber; turbulent diffusion particles.

Шаптала Владимир Григорьевич, доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.
E-mail: zchs@intbel.ru

Шаптала Вадим Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Адрес: Россия, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.
E-mail: zchs@intbel.ru