

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ВЫБРОСОВ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Д.А. МЕЛЬНИЧЕНКО*, Ю.В. ЯЦКЕВИЧ, А.Ю. ЯЦКЕВИЧ, И.Г. ШУПЕЙКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

**Республиканский центр государственной экологической экспертизы и повышения квалификации
Минприроды, пер. Менделеева 1-й, д.50, корп. 4, Минск, 220037, Беларусь*

Поступила в редакцию

Аннотация. Разработана физическая модель процесса тушения кокса в тушильной башне. Создан программный комплекс для моделирования данного технологического процесса. Рассчитана динамика парогазово-душных потоков и концентрации выбросов в пространстве конкретной коксотушильной башни. Предложен комплекс инженерно-технических решений по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Ключевые слова: оценка выбросов, компьютерное моделирование, программный комплекс.

Abstract. The physical model of coke quenching in the quenching house has been worked out. The software complex for computer modeling of this technological process has been created. The gas-vapor mixture floats dynamics and emissions concentration in the quenching house has been calculated. The set of engineering solutions for air pollution reduction has been suggested.

Keywords: estimation of emissions, computer modeling, software complex.

Введение

В современных условиях развития общества решающее влияние на окружающую среду оказывает производственная деятельность, основным компонентом которой являются техногенные объекты. В то же время эти объекты являются источниками разнообразных угроз: производственных травм, профессиональных заболеваний, а также загрязнения всех основных компонентов окружающей среды (атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод, земельных ресурсов, растительного и животного мира). В связи с этим актуализируется задача уменьшения выбросов техногенных объектов.

Задача оценки выбросов является сложной по причине многообразия и сложности источников поступления загрязняющих веществ в атмосферу, а также протекающих в ней физических и химических процессов.

Снижению выбросов загрязняющих веществ в воздушный бассейн и улучшению качества атмосферного воздуха в ближайшей перспективе будут содействовать следующие меры:

внедрение энерго-, ресурсосберегающих технологий в промышленности и энергетике;

организация повсеместного контроля выбросов;

установление стандартов и удельных технических нормативов выбросов;

внедрение прогрессивных методов очистки отходящих газов и оснащение источников выбросов эффективным пылегазоочистным оборудованием и т.п. [1].

Эти инженерные решения зачастую являются дорогостоящими, требуют больших затрат времени на разработку, проектирование и внедрение, но, к сожалению, не всегда достигают нужного эффекта. Применение современных средств вычислительной техники с использованием прогрессивных алгоритмов позволит значительно сократить затраты, повысить качество выполняемых расчетов и достоверность полученных результатов.

Нами разработан программный комплекс по оценке воздействия на окружающую среду вредных веществ, образующихся в процессе коксования угля в коксотушильной башне. Данный процесс выбран как один из наиболее типичных источников загрязнения атмосферного воздуха, и в тоже время структура выбросов при этом очень сложная и включает продукты горения, пар и другие неоднородные компоненты.

Физическая модель процесса тушения кокса в тушильной башне

В трехмерном пространстве башни (рис.1, область O_0) перемещается смесь из воздуха, пара, мелких капель воды (туман) и твердых частиц (выбросы). В данной модели предполагается, что капли и частицы так малы, что практически не обладают инерционностью и перемещаются вместе с паровоздушной смесью (имеют такую же скорость). Количество каждого компонента смеси в каждой точке модельного пространства в некоторый момент времени описывается их плотностями ($\text{кг}/\text{м}^3$): ρ_a - плотность воздуха, ρ_p - плотность пара, ρ_w - концентрация мелких капель воды, ρ_{TZZ} - концентрация пыли. Скорость смеси в каждой точке модельного пространства в некоторый момент времени описывается вектором (v_x, v_y, v_z) .

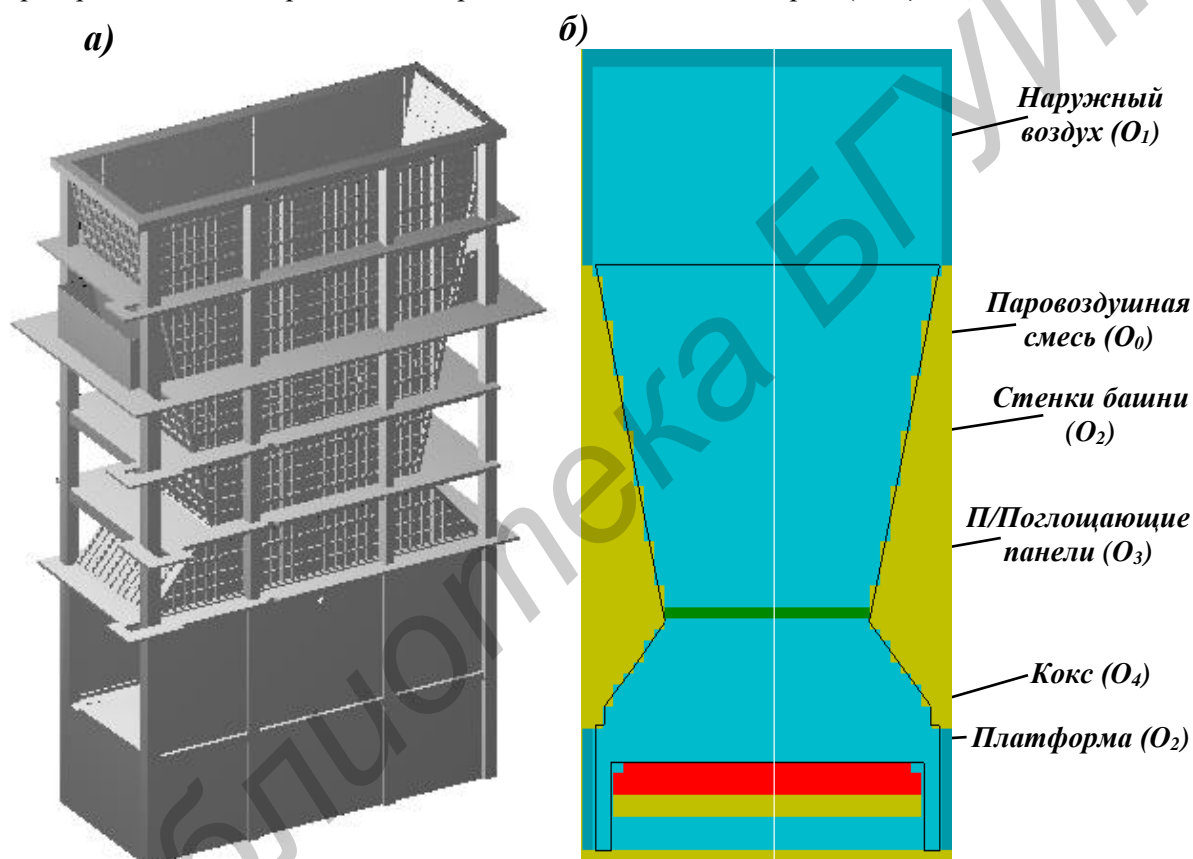


Рисунок 1 – Общий вид тушильной башни (а) и вид модельного пространства (б) в центральном сечении по типам областей (границ).

Источником пара, мелких капель воды и твердых частиц является поверхность кокса в нижней части башни (O_4). Интенсивность выброса ($\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$) для всех трех компонентов изменяется в течение всего цикла тушения и описывается тремя таблично заданными функциями ($I_p(t)$, $I_w(t)$, $I_{TZZ}(t)$). Эти функции подбирались в соответствии с режимом орошения и согласовывались с результатами натурных измерений по скоростям, температурам потоков и общему количеству выбросов. Выделяющийся пар, капли воды и пыль имеют температуру 100°C (373K). Скорость смеси на поверхности кокса принималась равной нулю: $v_{x4} = 0$, $v_{y4} = 0$, $v_{z4} = 0$.

В нижней части башни имеются ворота (O_1), через которые внутреннее пространство башни соединяется с внешней средой. То есть, через ворота наружный воздух может поступать внутрь башни, а паровоздушная смесь может выходить наружу. С точки зрения граничных условий в области O_1 переменные состояния среды имеют постоянное значение: $T_1=293\text{K}$, $\rho_{a1}=1,19 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_{p1}=0 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_{w1}=0 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_{TZZ1}=0 \text{ кг}/\text{м}^3$, а скорости равны скоростям граничных элементов

области O_0 ($v_{x1} = v_{x0}$, $v_{y1} = v_{y0}$, $v_{z1} = v_{z0}$). Такие же граничные условия установлены в верхней части модели над башней. То есть, паровоздушная смесь может выходить из башни в верхней ее части, а наружный воздух может поступать внутрь башни сверху.

В стенках башни (O_2) никаких процессов не происходит. Но скорость паровоздушной смеси на твердой поверхности равна нулю (условие прилипания: $v_{x2} = 0$, $v_{y2} = 0$, $v_{z2} = 0$). Кроме того поверхность стенок башни, имеющая постоянную температуру $T_2=20^\circ\text{C}=293\text{K}$, забирает некоторое количество тепла из области парогазовой смеси согласно формуле:

$$P_2 = \alpha(T - T_2)\Delta S, \quad (1)$$

где P_2 – мощность теплоотдачи; $\alpha=60$ Вт/(m^2K) – коэффициент теплоотдачи; T – температура паровоздушной смеси на границе с поверхностью стенки; T_2 – температура стенки, ΔS – площадь элемента поверхности.

Область пространства O_3 представляет собой пылепоглощающие панели. С точки зрения модели пространство в этой области обладает следующими свойствами:

- 1) область заполнена паровоздушной смесью и не имеет границ (граничных условий) с областью O_0 ;
- 2) скорость паровоздушной смеси внутри области в направлениях X и Z всегда равна нулю ($v_x=0$ м/с, $v_z=0$ м/с);
- 3) в вертикальном направлении Y на паровоздушную смесь действует сила сопротивления:

$$F = -K_a v_y \Delta x \Delta z, \quad (2)$$

где F – сила сопротивления набегающему потоку; K_a – коэффициент аэродинамического сопротивления одного квадратного метра площади панелей; $\Delta x \Delta z$ – площадь панелей;

- 4) концентрация пыли уменьшается по формуле:

$$\frac{\partial \rho_{TzL}}{\partial t} = -K_{TzL} \rho_{TzL}, \quad (3)$$

где $d\rho_{TzL}/dt$ – скорость уменьшения концентрации пыли; K_{TzL} – коэффициент пылепоглощения;

- 5) количество воды (мелких капель) так же уменьшается:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -K_w \rho_w, \quad (4)$$

где $d\rho_w/dt$ – скорость уменьшения концентрации воды; K_w – коэффициент поглощения воды;

- 6) панели забирают некоторое количество тепла из области паровоздушной смеси:

$$P_3 = \alpha(T - T_3)\Delta S, \quad (5)$$

где P_3 – мощность теплоотдачи; $\alpha=60$ Вт/(m^2K) – коэффициент теплоотдачи; T – температура паровоздушной смеси протекающей через панели; T_3 – температура панели, ΔS – площадь поверхности соприкосновения элементов конструкции панели.

В исходном состоянии модели (начальные условия) все пространство башни O_0 заполнено неподвижным воздухом с характеристиками окружающей среды: $T(x,y,z,0)=293\text{K}$, $\rho_a(x,y,z,0)=1,19$ кг/ m^3 , $\rho_p(x,y,z,0)=0$ кг/ m^3 , $\rho_w(x,y,z,0)=0$ кг/ m^3 , $\rho_{TzL}(x,y,z,0)=0$ кг/ m^3 , $v_x=0$ м/с, $v_y=0$ м/с, $v_z=0$ м/с.

Математическая модель физических процессов при тушении кокса в пространстве тушильной башни

Процесс перемещения паровоздушной смеси

Расчет распределения скорости $v(x,y,z,t)$ по трехмерному пространству O_0 паровоздушной смеси производился на основе уравнения Навье-Стокса [2]:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -(\bar{v}\nabla)\bar{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\eta}{\rho} \Delta \bar{v} + \bar{g}, \quad (6)$$

где t - время; \bar{v} - вектор скорости паровоздушной смеси; P - давление паровоздушной смеси; $\bar{g} = (0, -9.8, 0)$ - ускорение свободного падения (ось Y направлена вертикально); η - динамическая вязкость паровоздушной смеси; ρ - плотность паровоздушной смеси, которая является суммой плотностей ее компонентов:

$$\rho = \rho_a + \rho_p + \rho_w + \rho_{TzL}, \quad (7)$$

где ρ_a - плотность воздуха, ρ_p - плотность пара, ρ_w - концентрация мелких капель воды (кг/м^3), ρ_{TzL} - концентрация пыли (кг/м^3).

Расчет распределения плотностей воздуха и пара ($\rho_a(x, y, z, t)$, $\rho_p(x, y, z, t)$) на основании трехмерного поля скоростей $v(x, y, z, t)$ производился по уравнениям неразрывности:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla(\rho_a \bar{v}) = 0, \quad \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla(\rho_p \bar{v}) = 0. \quad (8)$$

Расчет распределения плотностей остальных составляющих смеси ($\rho_w(x, y, z, t)$, $\rho_{TzL}(x, y, z, t)$) на основании трехмерного поля скоростей $v(x, y, z, t)$ производился по аналогичным уравнениям дополненным уравнением диффузии:

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \nabla(\rho_w \bar{v}) + D_w \Delta \rho_w, \quad \frac{\partial \rho_{TzL}}{\partial t} = \nabla(\rho_{TzL} \bar{v}) + D_{TzL} \Delta \rho_{TzL}. \quad (9)$$

где D_w - коэффициент диффузии мелких капель воды (кг/м^3), ρ_{TzL} - концентрация пыли (кг/м^3). Пересчет распределения плотности $\rho(x, y, z, t)$ в поле давлений $P(x, y, z, t)$ производился по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$P = \left(\frac{\rho_a}{M_a} + \frac{\rho_p}{M_p} \right) RT, \quad (10)$$

где T - температура парогазовой смеси; ρ_a - плотность воздуха; ρ_p - плотность пара; $M_a = 0,029$ кг/моль - молярная масса воздуха; $M_p = 0,018$ кг/моль - молярная масса пара; $R = 8,3144$ $\text{Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ - универсальная газовая постоянная.

Теплообмен

Расчет изменения температуры в различных точках пространства O_0 башни производился согласно уравнению:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \Delta T, \quad (11)$$

где t - время; x, y, z - декартовы координаты (ось Y направлена вертикально); v_x, v_y, v_z - проекции скорости паровоздушной смеси на координатные оси X, Y, Z соответственно; T - температура; ρ - плотность; λ - теплопроводность; c - удельная теплоемкость паровоздушной смеси.

Конденсация пара

Разработанная модель так же учитывает конденсацию пара. Этот процесс происходит, когда температура смеси при данном давлении становится ниже температуры насыщенного пара при том же давлении (плотности). При этом выделяется теплота, которая увеличивает температуру смеси (компенсирует разность температур) согласно формуле:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \begin{cases} K_{pw}(T - F_{tp}(\rho_p)), & \text{при } T < F_{tp}(\rho_p) \\ 0, & \text{при } T \geq F_{tp}(\rho_p) \end{cases}, \quad (12)$$

где dT/dt - скорость увеличения температуры в результате конденсации; $F_{tp}()$ - известная (таблично заданная) функция температуры при данной плотности насыщенного пара; $K_{pw} = 0,4$ - коэффициент, характеризующий скорость (инерционность) процесса конденсации.

Выделившееся тепло связано с уменьшением плотности пара (ρ_p) и увеличением плотности капель воды (ρ_w) на ту же величину (или с той же скоростью) по формуле:

$$-\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = \frac{\partial \rho_p}{\partial t} = \frac{c \rho}{C_p} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (13)$$

где $d\rho_w/dt$ – скорость увеличения плотности капле воды; $d\rho_p/dt$ – скорость уменьшения плотности пара в результате конденсации; c – удельная теплоемкость паровоздушной смеси; ρ – плотность смеси; $C_p = 2260$ кДж/кг – удельная теплота парообразования воды.

В основе метода моделирования лежит конечно-разностный метод, прямоугольная сетка имеет шаг дискретизации 0,5м (возможно - 0,25м). Шаг по времени – 0,001 с.

Компьютерное моделирование

Был разработан программный комплекс для проведения расчетов на основе описанной выше математической модели. Разработанное программное обеспечение интегрируется с системами трехмерного проектирования, например SolidWorks, ProEngineer и т.п.

Проблема, которая возникла при производстве кокса в данной башне, – слишком большая концентрация выбросов. Один слой установленных пыле поглощающих панелей оказался не достаточно эффективен для обеспечения ужесточившихся нормативных требований. Возник вопрос: сколько слоев пыле поглощающих панелей будет достаточно.

Поэтому исходной целью моделирования в данной работе было прогнозирование концентрации выбросов пыли и газа при установке внутри башни двух и трех слоев пылепоглощающих панелей.

На первом этапе было проведено моделирование процесса тушения кокса с одним слоем панелей. По имеющимся данным натурных измерений были скорректированы эмпирические коэффициенты для обеспечения адекватности компьютерной модели.

Затем был смоделирован процесс тушения с двумя слоями панелей (рис.2). Концентрация пыли оказалась близка к предельно допустимой. Кроме того, результаты моделирования показали, что установка двух слоев панелей создает слишком большое сопротивление для прохода парогазовой смеси вверх по каналу внутри башни (уменьшается «тяга»). Значительное количество парогазовой смеси уходит через ворота в нижней части башни.

Поэтому было решено увеличить высоту башни на 4 метра и установить третий слой пылепоглощающих панелей. Результаты моделирования увеличенной башни с тремя слоями панелей показали (рис.3), что технологический процесс будет протекать в штатном режиме (парогазовая смесь движется вверх) и концентрация выбросов будет удовлетворять требованиям с большим запасом.

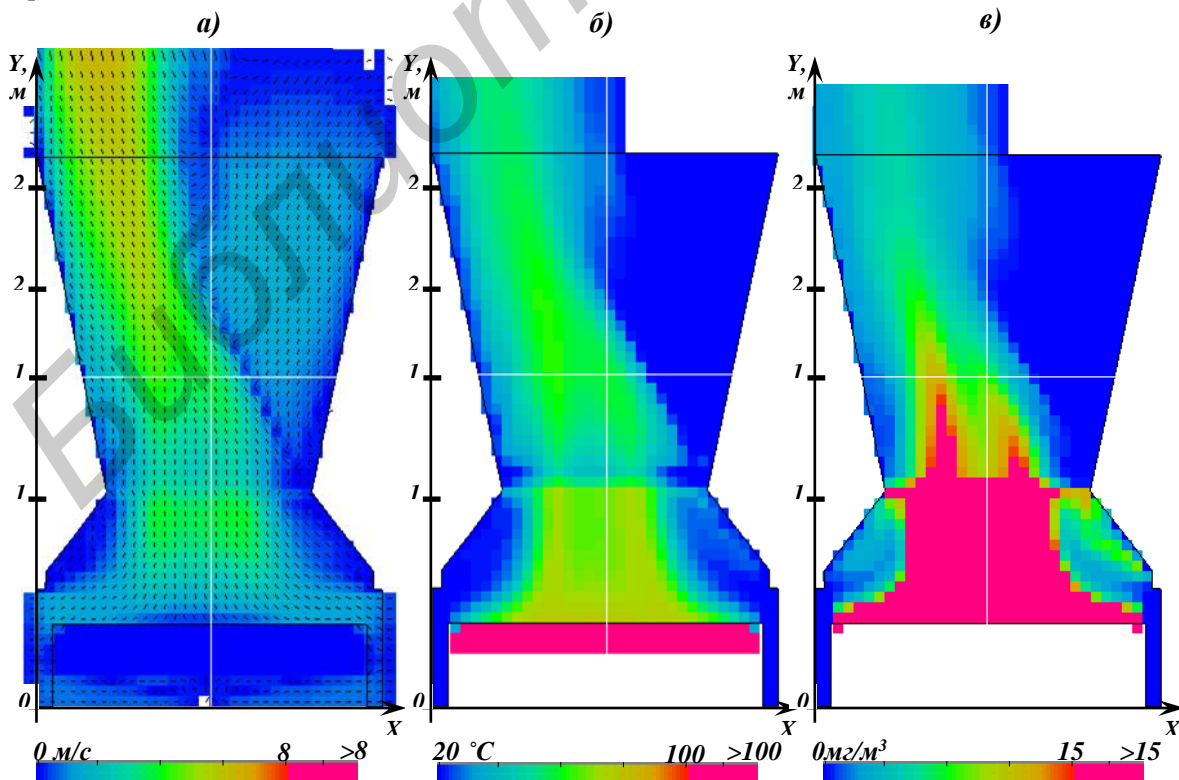


Рисунок 2 – Поля скоростей (а), температур (б) и концентраций выбросов (в) в центральном сечении тушильной башни с двумя слоями пыли поглощающих панелей в момент времени 135 секунд после начала процесса тушения кокса.

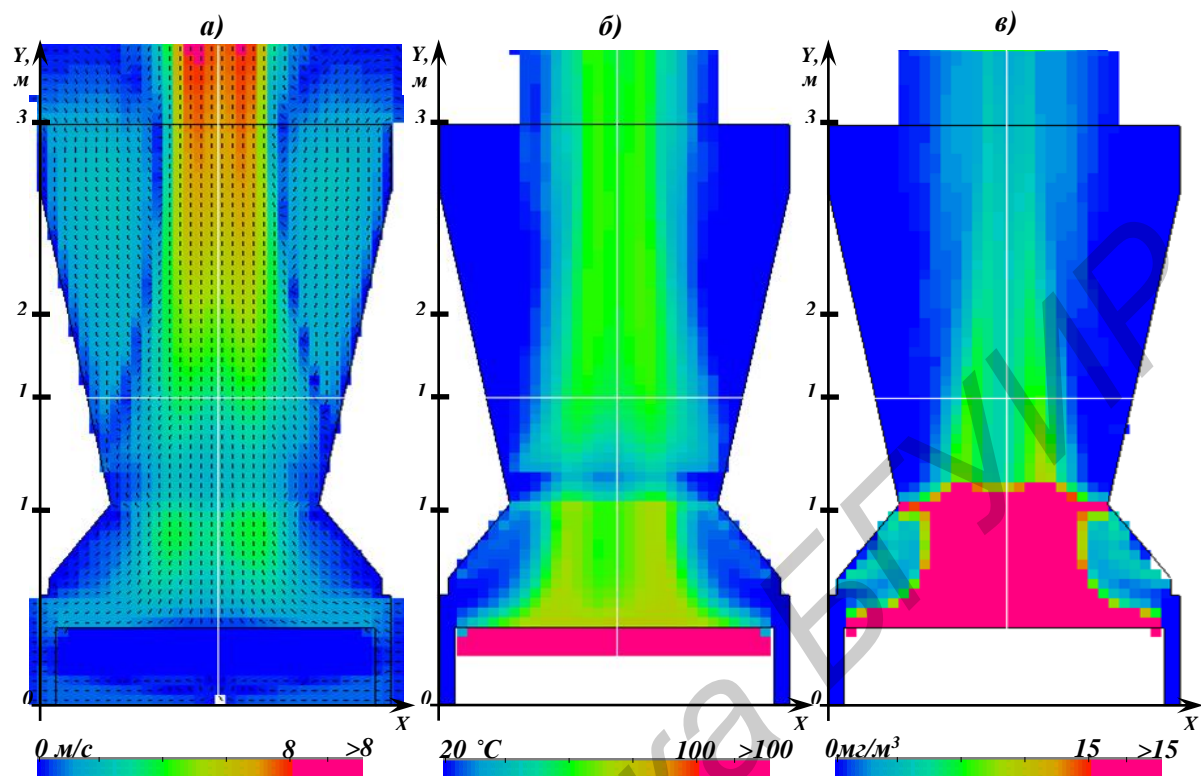


Рисунок 3 – Поля скоростей (а), температур (б) и концентраций выбросов (в) в центральном сечении тушильной башни высотой 30 метров с тремя слоями пыли поглощающих панелей в момент времени 135 секунд после начала процесса тушения кокса.

Заключение

На основе разработанной физической и математической моделей процесса тушения кокса в тушильной башне был создан программный комплекс для проведения расчетов. Смоделированы процессы тушения кокса с несколькими вариантами конструкции башни. Результаты проведенного моделирования позволили спрогнозировать концентрацию выбросов при различном количестве пылепоглощающих панелей и высоте башни. Предложено обоснованное инженерно-техническое решение по оптимизации концентрации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Показана перспективность и целесообразность применения методов компьютерного моделирования при прогнозировании и оценке состояния воздушной среды в результате выбросов от стационарных источников.

Список литературы

Состояние природной среды Беларуси: экол. бюл. 2015 г. – Минск, 2016. – 323 с.
 Самсонов В.Т. Проветривание промышленных площадок: Аэродинамические расчёты при проектировании вентиляционных выбросов: Монография. – М.: Инфра-М, 2017. – 171 с.

References

Sostojanie prirodnoy sredy Belarusi: ecol. bul. 2015 g. – Minsk, 2016. – 323 s.
 Samsonov V.T. Provetrivanie promyshlennykh ploshchadok: Aerodynamicheskie raschety pry proectirovani ventilyatsionnykh vybrosov: Monografia. – M.: Infra-M, 2017. – 171 s.

Сведения об авторах

Мельниченко Д.А., к.т.н., доцент, заместитель директора по учебной и научной работе Республиканского центра государственной экологической экспертизы и повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды РБ
Яцкевич Ю.В., к.т.н., ведущий инженер-программист НИЛ ЭМС локальных группировок РЭС Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники
Яцкевич А.Ю., старший преподаватель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.
Шупейко И.Г., к.пс.н., доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-501-59-02;
e-mail: iskatel37@mail.ru;
Яцкевич Юрий Вячеславович

Information about the authors

Melnichenka D.A., PhD, associate professor, deputy director for academic and scientific work at Republican centre for state ecological expertise and advanced training of senior officials and specialists of Ministry of natural resources and environmental protection of the Republic of Belarus

Yatskevich Y.V., PhD, software engineer at EMC R&D Laboratory of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Yatskevich A.Y., senior faculty of engineering psychology and ergonomics department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Shupeyko I.G., PhD, associate professor, associate professor of engineering psychology and ergonomics department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-501-59-02;
e-mail: iskatel37@mail.ru;
Yatskevich Yury