

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 613.6:621.43

Б.Ч. МЕСХИ, А.Н. СОЛОВЬЁВ, Ю.И. БУЛЫГИН, Л.Н. АЛЕКСЕЕНКО, Е.И. МАСЛОВ

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ И ИЗБЫТКОВ ЯВНОЙ ТЕПЛОТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Предложена нестационарная трехмерная математическая модель, описывающая процессы конвективно-диффузионного теплопереноса вредных веществ и избытков теплоты в производственном помещении с активной вентиляцией. Модель учитывает как стационарные, так и передвижные источники загрязнения и позволяет прогнозировать качество воздуха рабочей зоны в помещениях сложной конфигурации.

Ключевые слова: загазованность, рабочая зона, прогнозирование, распространение вредных веществ, моделирование, параметры микроклимата, производственная среда.

Введение. Повышенная загазованность рабочих зон производственных помещений машиностроительных и ремонтно-обслуживающих предприятий сочетается, как правило, с неблагоприятными параметрами микроклимата (повышенная температура и высокая подвижность воздуха). Так, концентрация вредных веществ в рабочих зонах вблизи действующих источников загрязнения может превышать максимально-разовые ПДК_{р.з} в десятки и сотни раз. А параметры микроклимата в различные периоды года также не соответствуют нормативам. Поэтому не вызывает сомнения, что задача снижения загазованности и сохранения здоровья работников таких цехов при вредном воздействии токсичных выбросов является актуальной.

Для решения данной задачи разработана математическая модель, описывающая процессы теплопереноса вредных веществ в объеме производственного помещения, которая позволяет определить опасные зоны загазованности и области с неудовлетворительными параметрами микроклимата, оказывающие негативное воздействие на работников.

Математическая модель теплопереноса вредных веществ и избытков явной теплоты. Система уравнений в общем виде. Распространение примесей, движение воздуха (в потенциальном приближении) и изменение температуры в рассматриваемом объеме описывается следующей системой уравнений [1, 2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial(uC_i)}{\partial x} + \frac{\partial(vC_i)}{\partial y} + \frac{\partial((w-w_s)C_i)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left((A_{nx} + D_x) \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((A_{ny} + D_y) \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left((A_{nz} + D_z) \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + \sum Q_i^j(t) \delta(r - r_j), \quad (1) \\ u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}, \\ \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (2) \\ \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda + \lambda_t + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\lambda + \lambda_t + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left((\lambda + \lambda_t + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \sum Q_{Vi}^j(t) \delta(r - r_j), \quad (3) \end{array} \right.$$

где $\lambda_t = \frac{C_p \rho Pr_d A_{\Pi}}{Pr_t}$ – коэффициент турбулентной теплопроводности, отображающий связь между коэффициентами турбулентной диффузии помещения; C_i – концентрация i -го вредного вещества в помещении; u, v, w – компоненты вектора скорости воздушной среды; w_s – скорость оседания/подъема примеси/газов; $A_{\Pi} = (A_x, A_y, A_z)$ – коэффициенты турбулентного обмена помещения; $D_{x,y,z}$ – коэффициенты диффузии; $Q_i^j(t)$ – интенсивность выброса i -го вредного вещества от j -го источника в помещении; $\delta(r - r_j)$ – дельта-функция Дирака; P – потенциал скоростей движения воздуха; ρ – плотность воздуха; T – температура; $r_j = (x_j, y_j, z_j)$ – координаты источника выброса; u, v, w – компоненты скорости; C_p – удельная изобарная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; λ_p – коэффициент радиационной теплопроводности; $Q_{\Gamma_i}^j$ – интенсивность внутренних источников тепла; Pr_d – диффузионное число Прандтля; Pr_t – турбулентное число Прандтля.

Граничные условия для уравнения (1):

– на боковых стенках

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0.$$

В этом равенстве указано, что стенки помещения, в котором проводятся исследования, являются непроницаемыми для концентрации загрязняющего вещества;

– на входной и выходной границе

$$\frac{\partial C}{\partial n} = -\frac{q}{A_{\Pi}} C,$$

где $q = \begin{cases} v_n, v_n \geq 0, \\ 0, v_n < 0 \end{cases}$ означает, что поток примеси зависит от ее концентрации, скорости v_n и на-

правления воздушного потока, индуцированного работой вентиляции.

Граничные условия для уравнения (2):

– на твердых стенках

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0,$$

где n – единичный вектор внешней нормали.

Это означает, что стенки исследуемого помещения являются непроницаемыми для воздушных потоков;

– на выходной границе

$$\frac{\partial P}{\partial n} = v_n,$$

где v_n – известное значение скорости;

– на входной границе (границе втекания воздушного потока в помещение)

$$P = \text{const} \text{ (условие Дирихле).}$$

Граничные условия для уравнения (3) [3].

Начальные условия заключаются в задании распределения поля значений температуры в начальный момент времени ($t=0$), т.е. предшествующий расчетному. Они должны быть заданы в виде функции $T_{t=0} = f(x, y, z)$ – для пространственной задачи. Граничные условия – тепловые условия у поверхности тела, которые задаются в более сложном виде. При решении задач тепло-

проводности принято различать четыре часто встречающихся способа задания граничных условий, так называемые граничные условия первого, второго, третьего, четвертого и пятого рода. Граничные условия третьего рода заключаются в задании температуры поверхности тела и окружающей его среды и задании теплообмена (коэффициента теплопередачи) между поверхностью этого тела и окружающей средой по закону Ньютона. Таким образом, количество теплоты, отдаваемое (или получаемое) единицей поверхности температурой T_n за единицу времени в окружающую среду температурой T_c , прямо пропорционально разности температуры поверхности и окружающей среды: $q_n = a(T_n - T_c)$ [4]. Количество теплоты, отдаваемое (или получаемое) поверхностью в окружающую среду, должно быть равно количеству теплоты, подводимому к этой поверхности за счет теплопроводности, которое определяется по закону Фурье. Приравняв эти потоки, получим новое выражение для задания граничных условий третьего рода:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = -\frac{a}{\lambda_t}(T_n - T_c). \quad (4)$$

В условии (4) должны быть заданы коэффициент теплоотдачи a и температура окружающей тело среды T_c . В ходе экспериментальных работ граничные условия могут быть уточнены.

При турбулентном течении потока и турбулентном переносе коэффициенты A_n пропорциональны диссипируемой энергии и определяющему размеру рассматриваемого источника. Для вентилируемых помещений, зная величину энергии, поступающей в помещение, и определяющий размер источника, можно определить коэффициент турбулентного обмена в плоскости (x, y) [5]:

$$A_x = A_y = 0,25\varepsilon^{1/3}l_n^{4/3},$$

где ε – кинетическая энергия воздушных потоков в помещении; l_n – определяющий размер помещения, равный для прямоугольных отверстий и сечений неправильной формы $l_n = \sqrt{F}$, здесь F – площадь сечения помещения, перпендикулярная направлению движения воздушных потоков.

Коэффициент турбулентного обмена по высоте помещения находится из зависимости, предложенной М.Е. Берляндом для наибольших классов устойчивости воздушной среды $A_{nz} = A_{z=1}(z/z_1)$, что допустимо для исследуемого помещения. Здесь $A_{z=1}$ – коэффициент турбулентного обмена на высоте 1 м, $z_1=1$ м, z – текущая высота помещения.

Кинетическая энергия воздушных потоков в помещении определяется из формулы: $\varepsilon = \varepsilon_{п.с} + \varepsilon_{т.с} + \varepsilon_{д.п} - \varepsilon_{в.с}$, куда входят соответственно энергии приточных струй $\varepsilon_{п.с}$, тепловых струй $\varepsilon_{т.с}$, движущихся предметов $\varepsilon_{д.п}$ и вытяжных струй $\varepsilon_{в.с}$. Величины $\varepsilon_{п.с}$, $\varepsilon_{т.с}$, $\varepsilon_{д.п}$ учитываются в модели рассеивания вредных веществ и находятся из формул:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{п.с} &= \frac{L}{V_n} \frac{\xi v^2}{2}, \\ \varepsilon_{т.с} &= \frac{g\bar{Q}z}{C_p T_0 \rho_B} \frac{1+n}{4}, \\ \varepsilon_{д.п} &= \frac{\xi F_n \cdot v_n^3 \rho}{2G_n} \frac{\tau}{3600}, \end{aligned}$$

где L/V_n – кратность воздухообмена в помещении свободным объемом V_n ; v – средняя скорость выхода воздуха из приточных отверстий; ξ – коэффициент местного сопротивления на выходе из воздухораспределителей; \bar{Q} – теплонапряженность объема; g – ускорение свободного падения; z – расстояние от полюса до рассматриваемой точки; $n=0,8$ – экспериментальная константа; C_p – теплоемкость воздуха на удалении от источника; T_0 – температура воздуха в помещении на удалении от источника; ρ_B – плотность воздуха на удалении от ис-

точника; ξ – коэффициент аэродинамического сопротивления движущегося предмета; F_{Π} – площадь поперечного сечения движущегося предмета; V_{Π} – скорость движущегося предмета; τ – средняя продолжительность движения предмета с данной скоростью в течение 1 ч; G_{Π} – масса воздуха в объеме помещения.

Так как $G_{\Pi} = V\rho$, где V – объем помещения, то

$$\varepsilon_{д.п} = \frac{\xi F_{\Pi} v_{\Pi}^3 \tau}{2V \cdot 3600}.$$

Явное теплоступление в помещении учитывается для источников, оборудованных местными отсосами, как

$$Q_{я} = C_{\rho OG}^{\max} Q_{OG}^{\max} (T_{OG}^{\max} - T_0)(1 - \varphi_{OG}) A_d,$$

а для источников ими не оборудованных

$$Q_{я} = C_{\rho OG}^{\max} Q_{OG}^{\max} (T_{OG}^{\max} - T_0) A_d,$$

где $C_{\rho OG}^{\max}$, $C_{\rho OG}^x$ – изобарные теплоемкости отработавших газов (ОГ) на режимах максимальной нагрузки и холостого хода; T_{OG}^{\max} , T_{OG}^x – температура ОГ на различных режимах нагрузки; A_d – количество стенов.

Для реализации предложенной математической модели разработано программное обеспечение, реализующее интерфейс, который обеспечивает взаимодействие пользователя с пакетом FlexPDE и базой данных, в которой содержатся все необходимые данные для проведения модельных расчетов. Интерфейс системы создан так, что любой пользователь, имеющий элементарные навыки работы с Windows-приложениями, может без труда работать с программным продуктом.

Результаты модельных расчетов. В предложенной математической модели возможно проведение расчетов для различных схем организации движения газозагрязненных потоков в помещениях, а также для штатных и аварийных ситуаций (например, неработающая принудительная вентиляция, разрывы отсосов и т.д.). Численные результаты получены на основе конечно-элементного моделирования системы уравнений (1)-(3). На рис.1, 2 представлены рассчитанные по модели поля относительных концентраций оксидов азота на высоте $z=4$ м за один час работы обкаточного участка ω поля подвижности воздуха в помещении в зависимости от расчетных периодов года.

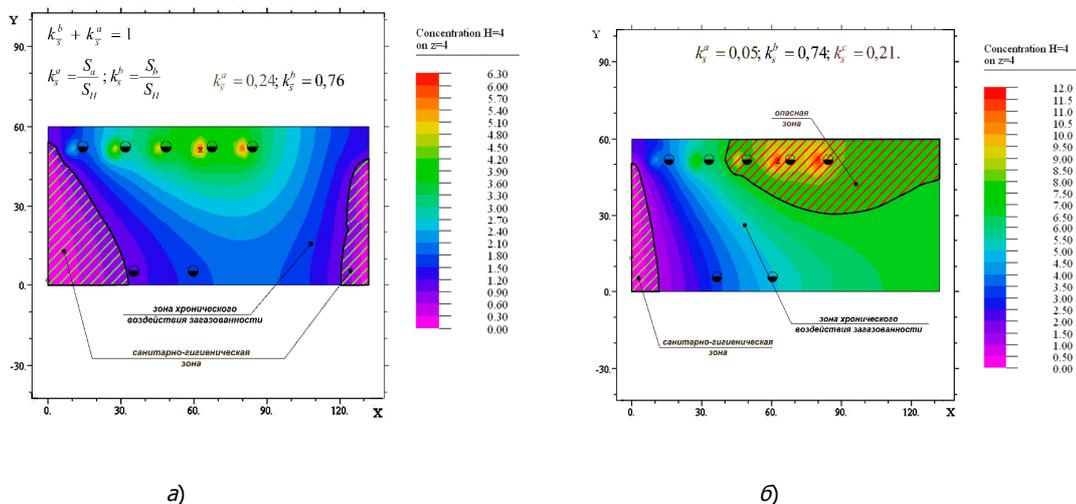


Рис.1. Поля относительных значений концентрации NO_x в воздухе участка обкатки на высоте $z=4$ м в штатном режиме: а – «теплый» период года; б – «холодный» период года

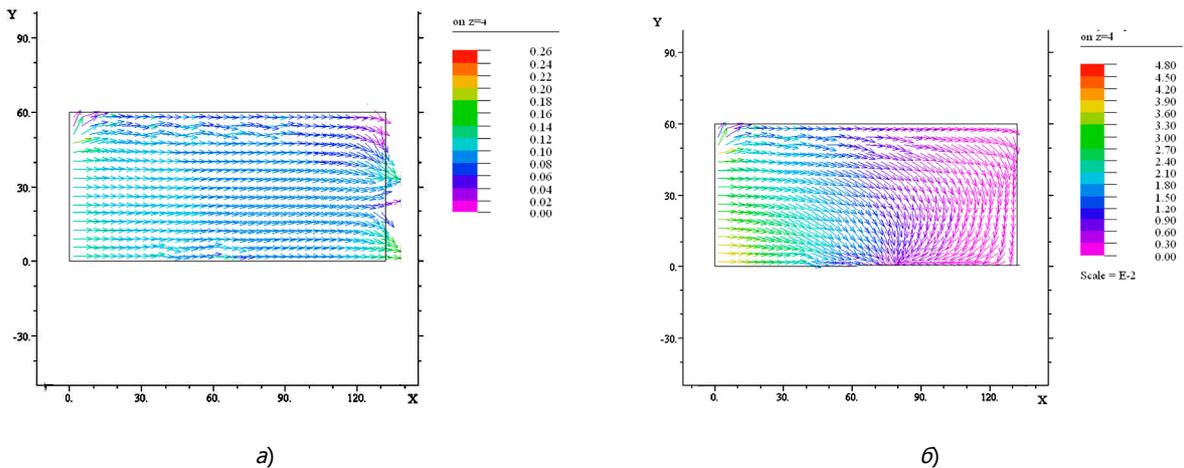


Рис. 2. Поля подвижности воздуха в помещении участка обкатки на высоте $z=4$ м в штатном режиме:
 а – «теплый» период года; б – «холодный» период года

На рис.3 показана динамика изменения относительных значений максимально-разовых концентраций оксидов азота в воздухе помещения на высоте «среза» 4 м в течение одного рабочего часа.

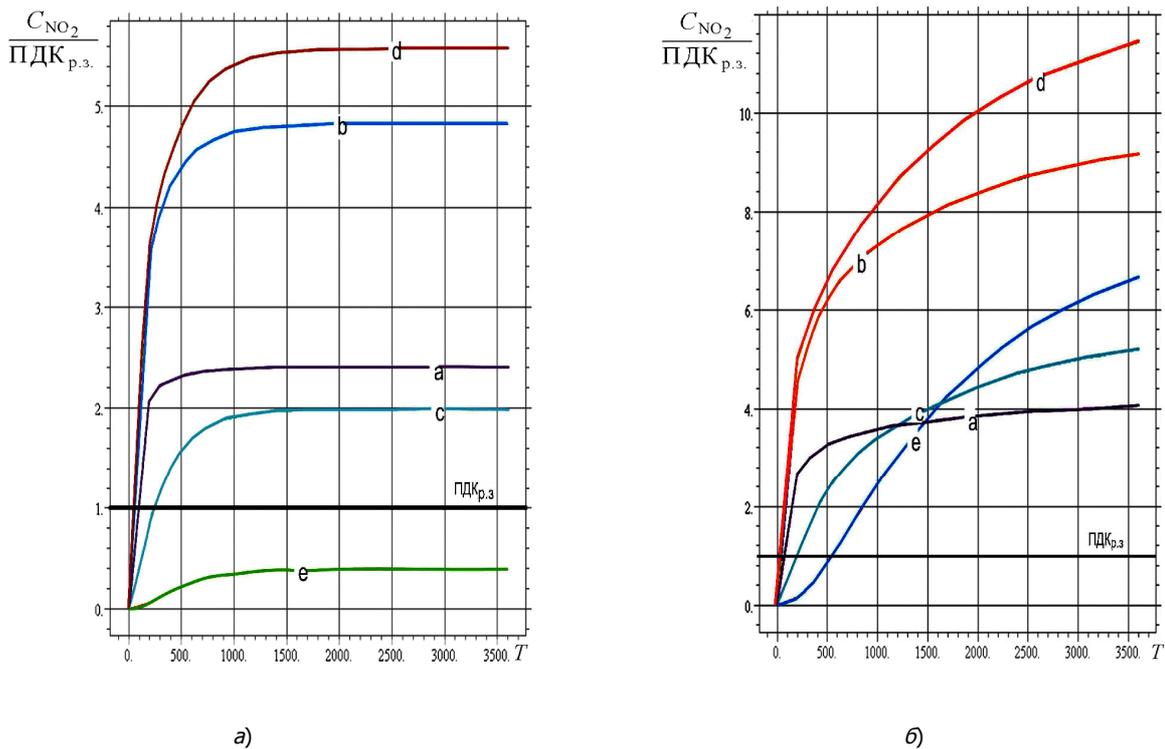


Рис.3. Динамика изменения относительных концентраций оксидов азота в воздухе помещения участка обкатки в течение одного рабочего часа:
 а – «теплый» период года; б – «холодный» период года; а-е – выбранные точки помещения

Выводы. Показана возможность применения разработанной модели для уточненного прогнозирования качества воздуха в рабочей зоне производственных участков; созданное программное обеспечение позволяет оперативно определять опасные зоны загазованности, поля подвижности воздуха и температур для различных производственных участков; результаты моделирования могут быть использованы для определения рациональных мест расположения возду-

хораспределителей в системах приточно-вытяжной вентиляции помещений и для выбора мест размещения датчиков газового контроля.

Библиографический список

1. Моделирование процессов переноса и ассимиляции вредных веществ в загазованном помещении участка обкатки / Л.Н. Алексеенко [и др.] // Вестн. Донск. гос. техн. ун-та. – 2009. – Спец. вып. Техн. науки. – Ч.І. – С.56-69.
2. Конечно-элементное моделирование активной вентиляции загрязненных помещений / Л.Н. Алексеенко [и др.] // V всерос. shk.-seminar «Математическое моделирование и биомеханика в современном университете». – Дивноморск, 1-5 июня, 2009. – С.9.
3. Рекомендации по оптимизации действий систем пожаротушения, дымоудаления и вентиляции при пожарах / Правительство Москвы. – М.: Москомархитектура, 2005. – 88 с.
4. Беховых Л.А. Основы гидрофизики: учеб. пособие / Л.А. Беховых. – Барнаул, 2008. – 172 с.
5. Тищенко Н.Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: справ. изд. / Н.Ф. Тищенко. – М.: Химия, 1991. – 368 с.

Материал поступил в редакцию 08.11.10.

References

1. Modelirovanie processov perenosa i assimilyacii vrednyh veschestv v zagazovannom pomeschenii uchastka obkatki / L.N. Alekseenko [i dr.] // Vestn. Donsk. gos. tehn. un-ta. – 2009. – Spec. vyp. Tehn. nauki. – Ch.I. – S.56-69. – In Russian.
2. Konechno-elementnoe modelirovanie aktivnoi ventilyacii zagryaznennyh pomeschenii / L.N. Alekseenko [i dr.] // V vseros. shk.-seminar «Matematicheskoe modelirovanie i biomehanika v sovreennom universitete». – Divnomorsk, 1-5 iyunya, 2009. – S.9. – In Russian.
3. Rekomendacii po optimizacii deistvii sistem pojarotusheniya, dymoudaleniya i ventilyacii pri pojarah / Pravitel'stvo Moskvyy. – M.: Moskomarhitektura, 2005. – 88 s. – In Russian.
4. Behovyh L.A. Osnovy gidrofiziki: ucheb. posobie / L.A. Behovyh. – Barnaul, 2008. – 172 s. – In Russian.
5. Tischenko N.F. Ohrana atmosfernogo vozduha. Raschet sodержaniya vrednyh veschestv i ih raspredelenie v vozduhe: sprav. izd. / N.F. Tischenko. – M.: Himiya, 1991. – 368 s. – In Russian.

B.CH. MESKHI, A.N. SOLOVYEV, Y.I. BULYGIN, L.N. ALEKSEYENKO, E.I. MASLOV

PROPAGATION MODEL OF HARMFUL SUBSTANCES AND SENSIBLE HEAT EXCESS IN INDUSTRIAL PREMISES

An unsteady three-dimensional mathematical model describing processes of convection-diffusion mass transfer of harmful substances and excess heat in the industrial premises with active ventilation is offered. The model takes into account both stationary and mobile sources of pollution and allows to predict air quality of the working area in the premises of the complicated configuration.

Key words: *gas content, working area, forecasting, dissemination of harmful substances, modeling, microclimate parameters, working environment.*

МЕСХИ Бесарион Чохоевич (р. 1959), ректор Донского государственного технического университета, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды», доктор технических наук (2004), профессор (2006). Окончил Ростовский-на-Дону институт сельскохозяйственного машиностроения (1982).

Область научных интересов: обеспечение безопасных условий труда; изучение условий труда, причин производственного травматизма и профессиональных заболеваний в производственных процессах крупных предприятий города и в строительстве; разработка инженерно-эргономических требований в области человеко-машинных взаимодействий и их оперативной реализации; изучение методов проектирования технических систем безопасности жизнедеятельности с учетом человеческого фактора.

Автор более 100 научных публикаций, в том числе 4 монографий.

reception@donstu.ru

СОЛОВЬЁВ Аркадий Николаевич (р. 1954), заведующий кафедрой «Сопротивление материалов» Донского государственного технического университета, доктор физико-математических наук (2006), профессор (2007). Окончил Ростовский государственный университет (1976).

Область научных интересов: механика твердого деформируемого тела, обратные задачи, метод конечных элементов, генетические алгоритмы.

Автор более 200 научных публикаций, в том числе 3 монографий. Имеет 1 патент.

БУЛЫГИН Юрий Игоревич (р. 1966), профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета, доктор технических наук (2007), профессор (2010). Окончил Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта (1988).

Область научных интересов: улучшение условий труда работников транспортных и машиностроительных предприятий.

Автор более 100 научных публикаций.

bulyur_rostov@mail.ru

АЛЕКСЕЕНКО Людмила Николаевна, старший преподаватель кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета, кандидат технических наук (2010). Окончила Донской государственный технический университет (2001).

Область научных интересов: улучшение условий труда работников транспортных и машиностроительных предприятий.

Автор более 30 научных публикаций.

lalekseenko@donstu.ru

МАСЛОВ Евгений Игоревич (р. 1985), аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета. Окончил Донской государственный технический университет (2007).

Область научных интересов: охрана труда, информационные системы и технологии.

Автор 5 научных публикаций.

MaJonik@yandex.ru

Besarion Ch. MESKHI (1959), Rector of Don State Technical University, Head of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University. PhD in Science (2004), Professor (2006). He graduated from Rostov-on-Don Institute of Agricultural Engineering (1982).

Research interests: ecology, environment protection.

Author of over 100 publications, including 4 monographs.

Arkady N. SOLOVYEV (1954), Head of the Strength of Materials Department, Don State Technical University. PhD in Physics and Maths (2006), Professor (2007). He graduated from Rostov State University (1976).

Research interests: mechanics of solid deformable body, inverse problems, finite element method, genetic algorithms.

Author of over 200 publications, including 3 monographs and 1 patent.

Yury I. BULYGIN (1966), Professor of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University. PhD in Science (2007), Professor (2010). He graduated from Rostov Institute of Rail Transport Engineering (1988).

Research interests: improvement of working conditions of transport and engineering workers.

Author of over 100 publications.

Ludmila N. ALEKSEYENKO, Senior Lecturer of the Life and Environment Protection Sciences Department, Don State Technical University. Candidate of Science in Engineering (2010). She graduated from Don State Technical University (2001).

Research interests: improvement of working conditions of transport and engineering workers.

Author of over 30 publications.

Evgeny I. MASLOV (1985), Postgraduate student of the Life and Environment Protection Department, Don State Technical University. He graduated from Don State Technical University (2007).

Research interests: labour protection, information systems and technologies.

Author of 5 publications.