

УДК 614.89:669

**А. С. БЕЛИКОВ, С. Ю. РАГИМОВ, В. А. ШАЛОМОВ**

ГБУЗ "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры"

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассматривается усовершенствование методики исследования термодинамической напряженности на рабочих местах с использованием физического моделирования и энергетической освещенности с учетом параметров источников теплового излучения.

термодинамическая напряженность, моделирование, теплоизлучение, оптическая освещенность, энергетическая освещенность

Источниками инфракрасного излучения являются значительная часть производственных процессов, поверхности оборудования и т.д.

Анализ исследований показал, что не менее 60% всей потерянной теплоты от энергетических установок распространяется путем инфракрасного излучения. Потoki теплового излучения рабочего пространства характеризуются энергетической освещенностью, которая зависит от расстояния до теплового источника.

Для решения задачи по энергетической освещенности (облученности) используют формулу:

$$E_0 = L \int_{\Omega} \cos \alpha d\Omega, \quad (1)$$

где  $E_0$  — энергетическая освещенность; Вт/м<sup>2</sup>;

$L$  — яркость, излучения источника; Вт/(ср • м<sup>2</sup>);

$\alpha$  — угол, под которым облучается объект относительно нормали; °;

$\Omega$  — телесный угол, под которым виден источник излучения;

Интегрируя выражение (1), при условии, что  $E_0 = \max$  и  $\cos \alpha = 1$ , а облученность практически не изменяется для формы поверхности источника излучения близкой к квадрату, получим:

$$E_0 = \frac{4L_0}{\sqrt{4l^2 + a^2}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{4l^2 + a^2}}, \quad (2)$$

где  $a$  — сторона площадки источника излучения; м;

$l$  — расстояние от центра излучающей поверхности до облучаемой точки; м;

Определение значения  $E_0$ ,  $a$  и  $l$  на практике часто связано со значительными трудностями, особенно на расстоянии  $\leq 1$  м, ввиду специфики работы тепловых агрегатов, что отмечалось ранее.

Характер изменения интенсивности теплового излучения источников от расстояния до рабочего места подчиняется квадратичной зависимости и совпадает с кривыми, полученными нами при физическом световом моделировании. Рассмотрим эти зависимости в плане математического моделирования, что по нашему мнению позволит расширить энергетические диапазоны исследований.

и получить результаты с большим квантованием по расстоянию и по пределам интенсивности теплового излучения. Рассмотрим процесс излучения энергии от объекта к поглощаемой площадке облучаемого объекта. Телесный угол измеряется площадью, определяемой телесным углом по сфере единичного радиуса с центром и вершиной (рис. 1).

При этом с увеличением угла зрения, определяемого отношением сторон с линейными размерами  $a, b, h, R$ , телесный угол сохраняется даже при бесконечном уменьшении элементарных площадок излучаемой поверхности.

$$R = \sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4}} \quad (3)$$

Если  $R=1$ , то линейные размеры изменяются при том же телесном угле, тогда получим:

$$b = \frac{\frac{a}{2}}{\sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4}}} = \frac{a}{\sqrt{4h^2 + a^2}} \quad (4)$$

Если примем  $\frac{a}{2}/b = \frac{R}{1}$ ;  $b = \frac{a}{R}$ .

То все размеры элементарной единичной сферы вписываются в уравнение единичной сферы.

$$S = \iint \sqrt{1 + \left(\frac{df}{dx}\right)^2 + \left(\frac{df}{dy}\right)^2} dx dy, \quad (5)$$

где  $f = z = \sqrt{1 + x^2 - y^2}$  — уравнение единой части сферы.

Размещение осей (рис. 2) на элементарной площадке и координат представляет полярную область, в которую проектируется кусок сферы.

Переходя к полярным координатам элементарной площадки после ее интегрирования и проведя соответствующее преобразование, мы получим следующее выражение

$$s = 8 \int_0^{\frac{\pi}{4}} d\phi \int_0^{b/\cos\phi} \frac{\rho d\rho}{\sqrt{1-\rho^2}} = -8 \int_0^{\pi/4} \sqrt{1-\rho^2} d\phi = -8 \int_0^{\pi/4} \sqrt{\cos^2\phi - b^2} \frac{d\rho}{\cos\phi} + 2\pi. \quad (6)$$

После преобразования мы уже можем записать формулы определения  $E_0$  в следующем виде:

$$E_0 = 4ha * (4h^2 + a^2)^{-1} * \arctg(a * (4h^2 + a^2)^{\frac{1}{2}}), \quad (7)$$

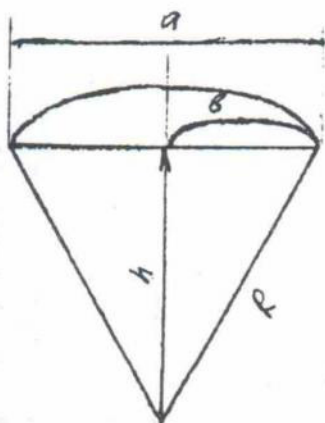


Рисунок 1 — Схема расчета энергетической освещенности элементарной площадки.

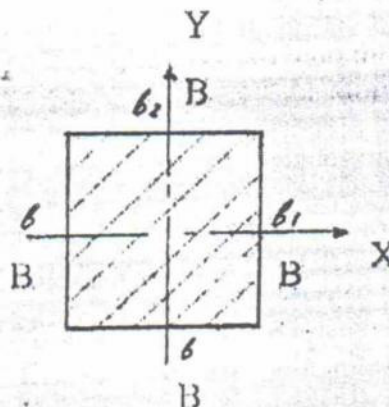


Рисунок 2 — Полярные коэффициенты элементарной площадки.

где  $a$  – сторона квадрата, м;

$h$  – расстояние от центра излучающей поверхности до освещаемой (облучаемой точки), м.

Согласно предварительным условиям постановки задачи, мы знаем расстояние до источника излучения  $h$ : энергетическая освещенность (облученность)  $E_0$  и размер источника. Исходя из положения взаимосвязи тепловых величин, яркость источника  $L$  может быть определена из данного выражения, а значение  $4L$  представим как какую-то безразмерную величину  $A$  и зададим ее характеристику источника в широких границах заданного предела существования.

В отличие от работ Стрежекурова Э. Е., Бабаева А. Ф. и др., нами учитывались различные формы источников, а также суммарное воздействие теплового излучения от нескольких источников.

Источники могут быть прямоугольными, вытяженными с соотношением сторон 1:4 и более. Также часто отверстия (окна) печей могут быть круглыми, овальными и квадратными. Исходные формулы в таких случаях отличаются.

Рассмотрим основополагающие формулы излучающего тела. Также рассмотрим пример суммарного облучения от нескольких источников принимаем 2, хотя возможно и большее количество источников.

Если же источник будет прямоугольником, то формулы несколько изменятся. Освещенность точки находящейся на расстоянии  $h$  от одной из вершин светящегося прямоугольника:

$$E = \frac{L}{2} \left( \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{h^2 + a^2}} + \frac{b}{\sqrt{h^2 + a^2}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \right), \quad (9)$$

где  $a, b$  – размеры прямоугольника.

Если имеем квадрат, то получим следующую зависимость:

$$E = 4L \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}}. \quad (10)$$

Если круглый диск, то

$$E = \frac{\pi L a^2}{h^2 + a^2} \quad (10)$$

Освещенность от круглого диска радиуса  $a$  на диске радиуса  $a'$ , находящегося на расстоянии  $h$ :

$$\Phi_{1-2} = \frac{\pi^2 L}{2} \left[ (h^2 + a^2 + a'^2) - \sqrt{(h^2 + a^2 + a'^2)^2 - 4a^2 a'^2} \right] \quad (11)$$

Эта формула следует из общей формулы

$$\Phi_{1-2} = \iint_{AA'} \frac{L \cos \theta' \cos \theta}{l^2} dA dA' \quad (12)$$

Данная общая зависимость – это левая часть интегрального уравнения, полученного при рассмотрении обратной задачи радиационного излучения, состоящей в отыскании температурного распределения на поверхности по известному полю полусферической плотности падающего излучения на них. Из закона сохранения энергии получено интегральное уравнение первого рода.

Рассмотрим общее положение системы источника излучения и облучаемого объекта.

Пусть имеется некоторая произвольная замкнутая система серых диффузно излучающих тел, разделенных прозрачной средой (рис. 3-4). Одна из постановок обратной задачи в этом случае заключается в отыскании температурного распределения на поверхностях тел  $T(M)$  по известному полю полусферической плотности падающего излучения  $E_{II}(M)$  на них. На основании закона сохранения энергии эта задача в стационарном случае сводится к решению интегрального уравнения первого рода

$$\int_F E_{*h}(N) \frac{\cos \theta_M \cos \theta_N}{\pi_{MN}^2} dF'_N = E_{II}(M), \quad (13)$$

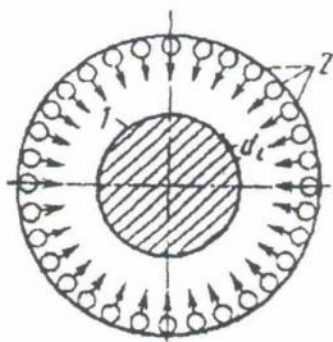


Рисунок 3 — Инфракрасный имитатор:  
1 — испытываемый образец; 2 — излучатели.

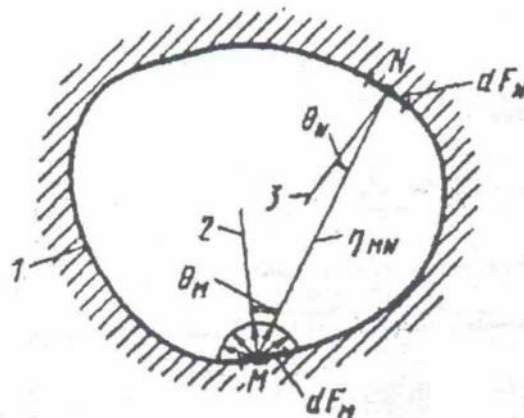


Рисунок 4 — Замкнутая система тел: 1 — диффузно излучающая поверхность F; 2, 3 — нормали к поверхностям в точках M и N соответственно.

относительно полусферической плотности эффективного излучения  $E_{эф}$  с последующим расчетом поля температуры  $T(M)$  по формуле

$$T(M) = \left\{ \frac{1}{\varepsilon\sigma} [E_{эф} - (1-A)E_{II}] \right\}^{1/4} \quad (14)$$

Здесь под падающим излучением  $E_{II}$  понимается сумма поглощенного и отраженного поверхностью излучений. Эффективное излучение, исходящее с поверхности серого тела, представляет собой сумму собственного и отраженного излучений.

Задачи подобного типа возникают при определении режимов работы радиационных нагревательных устройств в экспериментальных стендах и различных технологических процессах.

Сформулированные обратные задачи радиационного теплообмена — это стационарные и линейные задачи, в которых лучеобменивающиеся тела считаются непрозрачными.

После преобразований зависимости (13), получим зависимость:

$$E_{эф}(M) = \iint_F E_{эф}(N) \frac{\cos \theta_M \cos \theta_N}{\pi r_{MN}^2} dF_N \quad (15)$$

Рассмотрим систему дискретно излучающих источников (для примера два источника) с одинаковой интенсивностью излучения. Допустим также есть два облучаемых объекта. Тогда на основе зонального метода составления уравнения теплового баланса, характеризующего равенство тепловых потоков, воспринимаемых каждым элементом в условиях облученности и заданных тепловых потоков  $q_1, q_2$  (рис. 5).

Приходим к системе линейных уравнений

$$\begin{cases} J_1 A_{11} \cos \theta_{11} + J_2 A_{12} \cos \theta_{12} = \frac{1}{\pi} q_1 \\ J_1 A_{21} \cos \theta_{21} + J_2 A_{22} \cos \theta_{22} = \frac{1}{\pi} q_2 \end{cases} \quad (16)$$

$A_{ij}$  — поглощательная способность  $i$ -того элемента по отношению к  $j$ -тому излучателю;

$\theta_{ij}$  — угол направления от  $j$ -того излучателя на  $i$ -тый облучаемый элемент;

$J_i$  — искомая интенсивность  $K$  излучателя.

Эта задача решается достаточно просто, так как является линейной системой уравнений.

Так в случае двух источников излучения и двух объектов облучения имеем

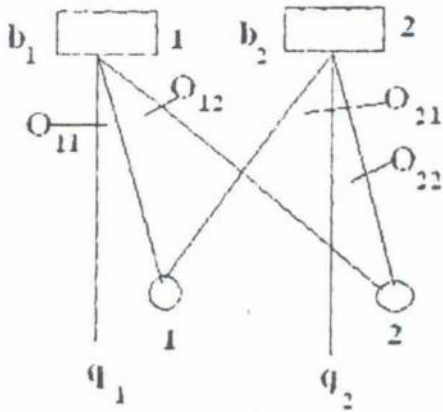


Рисунок 5 — Система дискретно излучающих источников.

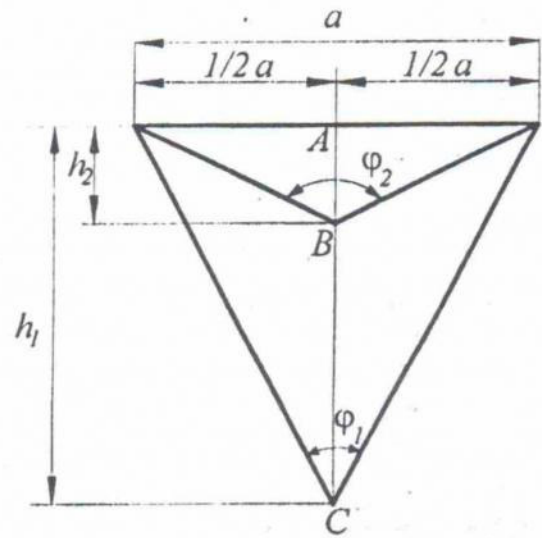


Рисунок 6 — Схема измерения и определения теплового излучения.

$$J_1 = \frac{1}{\pi} \frac{q_2 A_{11} \cos \theta_{11} - q_1 A_{21} \cos \theta_{21}}{A_{11} A_{22} \cos \theta_{11} \cos \theta_{22} - A_{12} A_{21} \cos \theta_{12} \cos \theta_{21}}, \quad (17)$$

$$J_2 = \frac{1}{\pi} \frac{q_1 A_{22} \cos \theta_{22} - q_2 A_{12} \cos \theta_{12}}{A_{11} A_{22} \cos \theta_{11} \cos \theta_{22} - A_{12} A_{21} \cos \theta_{12} \cos \theta_{21}}. \quad (18)$$

Общая система уравнений для  $n$  облучаемых элементов и  $m$  облучателей примет вид:

$$\pi \sum_{j=1}^m J_j A_{ij} \cos \theta_{ij} = q_i, \quad i = 1, n. \quad (19)$$

Для наглядности изобразим схему проведения измерения энергии излучения от источника теплового излучения по нормали (рис. 6). Где  $a$  — сторона источника излучения; точка  $A$  — центр источника; точка  $B$  — место, где производится замер энергии; точка  $C$  — расчетное значение величины энергии измерения;  $h_2$  — расстояние, с которого проводились экспериментальные замеры;  $h_1$  — расстояние до расчетной точки; углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , под которыми виден источник с точки  $C$  и  $B$ .

Более безопасно и удобно измерение угла  $\varphi$  под которым виден источник излучения с некоторого расстояния  $h_1$  (рис. 6) при условии, что измерение проводится по нормали к нему.

Яркость излучения источника  $I$  содержит в себе значения энергетической силы, температуры, степени черноты. Все эти величины в отдельности уже несут в себе погрешности измерения, но входят в величину энергетической освещенности  $E$ .

Величину  $E$  с достаточной точностью мы можем определить приборными средствами.

Для этого преобразуем уравнение следующим образом: разделим числитель и знаменатель обеих дробей на  $a$ , получим

$$E = \frac{A}{\sqrt{4ctg^2 \frac{\varphi}{2} + 1}} \arctg \frac{1}{\sqrt{4ctg^2 \frac{\varphi}{2} + 1}}. \quad (20)$$

Для определения величины  $A$  применим метод наименьших квадратов. Будем изменять и измерять интенсивность теплового облучения  $E_0$  на разных расстояниях от источника. Получим ряд  $E_i$ , обозначим эти значения через  $y_i$ .

Рассмотрим функцию

$$S(\varphi, A) = \sum_{i=1}^k [x_i - \phi(\varphi_i)]^2, \quad (21)$$

$$\text{где } f(\varphi_i, A) = A * \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi}{\sin \phi} \right)^2 + 1 \right]^{-\frac{1}{2}} * \text{arctg} \left[ \frac{4 + 4 \cos \phi}{\sin \phi} + 1 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Продифференцируем функцию  $S(\varphi_i, A)$  по  $A$  и приравняем к нулю, т.к. производная функции в точке минимума равна нулю. Из полученного уравнения определим

$$\frac{dS}{dA} = 2 \sum_{i=1}^k [x_i - \phi(\varphi_i)] * \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^{-\frac{1}{2}} * \text{arctg} \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} = 0. \quad (22)$$

После преобразования формулы (21), мы сможем получить реальное выражение  $A$  через угловые коэффициенты

$$A = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} * \text{arctg} \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}}}{\sum_{i=1}^k x_i \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^{-1} * \text{arctg} \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^2}. \quad (23)$$

Преобразовав и упростив формулу (22), мы получим зависимость для аналитического расчета искомой интенсивности теплового облучения на рабочем месте:

$$E_b = A * \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^{-\frac{1}{2}} * \text{arctg} \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (24)$$

где  $B$  -- точка в рабочем пространстве источника или в рабочей зоне обслуживания, в которой определяется облученность, рис. 6.

Определив любым радиометром, тепломером значение  $E_c$  на базовом расстоянии  $h$ , под углом видения  $\phi$ , вычисляем значение  $A$  (рис. 6):

$$A = E_c \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} * \left[ \text{arctg} \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_i}{\sin \phi_i} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{-1}. \quad (25)$$

Полученное значение  $A$  подставив в формулу (23), получим зависимость:

$$E_b = E_c \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_1}{\sin \phi_1} \right)^2 + 1 \right]^{-\frac{1}{2}} * \left[ \operatorname{arctg} \left[ \left( 2 \frac{h_2}{h_1} \frac{1 + \cos \phi_1}{\sin \phi_1} \right)^2 + 1 \right]^{-\frac{1}{2}} \right]^{-1} * \left[ \operatorname{arctg} \left[ \left( \frac{4 + 4 \cos \phi_1}{\sin \phi_1} \right)^2 + 1 \right]^{-\frac{1}{2}} * \left( 2 \frac{h_2}{h_1} \left( \frac{1 + \cos \phi_2}{\sin \phi_2} \right)^2 + 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{-1} \quad (26)$$

Полученная зависимости позволяет определить интенсивность теплового облучения на рабочем месте с учетом значения  $\phi_1$  и базового расстояния.

Расчет интенсивности теплового облучения на рабочем месте по формуле (25) трудоемок и поэтому на практике удобнее пользоваться номограммой, которую, на основании светового моделирования, необходимо разработать и построить.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. — К.: МОЗ, — 1999.
2. Геращенко О. А. Царенко Н. В., Сажина С. А., Грабовский В. В. Измерения лучистой составляющей в диапазоне спектра 1-8 мкм. Вестник Киевского политехнического института. Серийного приборостроения, 1977. — Вып. 7. — С.40-42.
3. Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. ГОСТ 30494-96. Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999.
4. International standard. Moderate thermal environments — Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. ISO 7730. Second edition. 1994-12-15.
5. ASHRAE Handbook of Fundamentals, 1993.

А. С. БЕЛІКОВ, С. Ю. РАГІМОВ, В. А. ШАЛОМОВ  
 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ  
 ОСВІТЛЕНОСТІ РОБОЧОГО ВИРОБНИЦТВА  
 ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва і архітектури"

Розглядається удосконалення методики дослідження термодинамічної напруженості на робочих місцях з використанням фізичного моделювання і енергетичної освітленості з врахуванням параметрів джерел теплового випромінювання  
 термодинамічна напруженість, моделювання, тепловипромінювання, оптична освітленість, енергетична освітленість

A. S. BELIKOV, S. YU. RAGIMOV, V. A. SHALOMOV  
 THEORETICAL RESEARCHES OF INTENSITY OF POWER LUMINOSITY OF  
 WORKING PRODUCTION  
 SHEE "Prydniprov'sk State Academy of Civil Engineering and Architecture"

The improvement of research method of thermodynamic tension is considered on workplaces using physical modelling and power illumination taking into account the parameters of sources of thermal radiation.  
 thermodynamic tension, modelling, thermal radiation, optical illumination, power illumination

**Беліков Анатолій Серафимович** — д.т.н., професор кафедри "Безпеки життєдіяльності" Придніпровської державної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: охорона праці і екологія.

**Рагимов Сергій Юсубович** — підполковник служби цивільного захисту Науково-дослідного інституту пожежної безпеки Міністерства по надзвичайних ситуаціях України. Наукові інтереси: пожежна безпека і охорона праці.

**Шаломов Володимир Анатольєвич** — к.т.н., доцент кафедри "Безпеки життєдіяльності" Придніпровської державної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: охорона праці і екологія.

**Беликов Анатолий Серафимович** — д.т.н., профессор кафедры "Безопасности жизнедеятельности" Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: охрана труда и экология.

**Рагимов Сергей Юсубович** — подполковник службы гражданской защиты Научно-исследовательского института пожарной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Украины. Научные интересы: пожарная безопасность и охрана труда.

**Шаломов Владимир Анатольевич** — к.т.н., доцент кафедры "Безопасности жизнедеятельности" Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: охрана труда и экология.

**Belikov Anatoliy Serafimovych** — Dr. Sc.(Eng.), professor, the Head of the "Safety of vital to live" Chair of Prydniprov'sk State Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: labour protection and ecology.

**Ragimov Sergiy Yusubovych** — a lieutenant colonel of Service of Civil Defence of the Research Institute of Fire Safety of Ministry on the Extraordinary Situations in Ukraine. Scientific interests: fire safety and labour protection.

**Shalomov Volodymyr Anatol'evych** — candidate of Engineering Sciences, the assistant professor of the "Safety of vital to live" of Prydniprov'sk State Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: labour protection and ecology.