

# ПОЖАРЫ И ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ: ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ, ЛИКВИДАЦИЯ

ЯНВАРЬ-МАРТ

1'19

## ПРОТИВОПОЖАРНОЕ НОРМИРОВАНИЕ

Огнестойкость  
строительных материалов **С. 62**

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Пожар пролива **С. 36, 47**



**НАУЧНАЯ ШКОЛА  
ДОЦЕНТА М. В. АЛЕКСЕЕВА**

УДК 614.839

Численное моделирование пожара

DOI 10.25257/FE.2019.1.47-55

**ВОРОБЬЁВ Владимир Викторович**

Кандидат технических наук, доцент  
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия  
E-mail: pbtpagps@yandex.ru

**ИБАТУЛИН Равшан Камалович**

Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия  
E-mail: irk.agps@mail.ru

**ПЕТРОВ Анатолий Павлович**

Доктор технических наук, профессор  
Академия ГПС МЧС России, Москва, Россия  
E-mail: setyn@mail.ru

**ВЕСЕЛОВ Евгений Дмитриевич**

ГК «Пожнефтехим», Москва, Россия  
E-mail: mail@pnx-spb.ru

**ПАНОВ Сергей Александрович**

ГК «Пожнефтехим», Москва, Россия  
E-mail: s.panov@pnx-spb.ru

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА ПРОЛИВА БЕНЗИНА НА СЛИВОНАЛИВНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ЭСТАКАДЕ ПРИ ВЕТРОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Представлены результаты численного моделирования пожара пролива бензина при разгерметизации котла железнодорожной цистерны на сливноналивной эстакаде при ветровом воздействии. Определена плотность падающего лучистого теплового потока на водопленочный защитный экран, которым рекомендуется оборудовать пожарные вышки железнодорожных сливноналивных эстакад для защиты ствольщика от теплового излучения пожара.

**Ключевые слова:** численное моделирование, пожар пролива, плотность лучистого теплового потока, железнодорожная сливноналивная эстакада, железнодорожная цистерна, водопленочный защитный экран.

В соответствии с СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности» стационарные лафетные стволы следует устанавливать на расстоянии не менее 15 м от железнодорожных путей сливноналивных эстакад (СНЭ) и рекомендуется оборудовать водопленочными защитными экранами (ВПЭ), обеспечивающими снижение плотности падающего лучистого теплового потока (далее плотность лучистого потока), воздействующего на ствольщика в специальной защитной одежде пожарного, до допустимых значений (не более 5 кВт/м<sup>2</sup>). Однако требований к конструктивному исполнению этих экранов и их гидравлическим параметрам в нормативных документах не приводится. Таким образом, для обоснования параметров ВПЭ необходимо определить плотность лучистого потока на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ при пожаре пролива нефтепродукта.

Проведение натурных экспериментов для достижения поставленной цели связано с большими трудностями и высокой опасностью для жизни и здоровья их участников. Способы, применяемые в существующих на сегодняшний день методиках по определению параметров процессов горения нефтепродуктов, не позволяют получить достоверные результаты, так как реализованы на основе эмпирических и полумпирических методов и не учитывают влияния геометрических характеристик железно-

рожной цистерны, находящейся над очагом пожара пролива, на структуру пламени.

Необходимо отметить, что процессы горения, образования сажи, теплового излучения пламени и его рассеяния в атмосфере отличаются сложным взаимным влиянием, которые учесть в рамках упрощенных аналитических соотношений практически невозможно. Всё это определяет необходимость использования для решения подобного рода задач методов численного моделирования на основе пакетов вычислительной гидродинамики (CFD-пакеты). При таком моделировании сложная взаимосвязь тепло- и массообменных процессов, сопровождающих развитие пожара, учитывается посредством совместного решения дифференциальных уравнений переноса массы, импульса, энергии и турбулентных характеристик [1].

Для моделирования пожара пролива и прогнозирования плотности лучистого потока на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ было принято решение использовать один из наиболее современных пакетов вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent, который содержит широкий набор верифицированных моделей, обеспечивающих получение точных результатов для широкого круга задач [2–4].

Для решения данной задачи были использованы: модель турбулентности DES (Detached Eddy Simulation); модель горения Eddy Dissipation, модель излучения Discrete Ordinates и модель образования сажи Moss-Brookes [2, 3] с моделью окисления Lee [5],



поскольку данная модель показала хорошую сходимость с результатами проведенных ранее экспериментов [6].

Необходимо отметить, что авторами данной статьи была проведена успешная валидация выбранных моделей путём сравнения результатов экспериментального исследования и численного моделирования горения бензина в противне диаметром 1 м [7].

Ниже приводится краткое описание использованных моделей.

УРАВНЕНИЯ  
ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФFUЗИОННОГО  
ГОРЕНИЯ

В основе моделирования турбулентного диффузионного горения лежит система уравнений Навье – Стокса для многокомпонентной реагирующей среды. Указанная система содержит уравнения неразрывности, переноса компонентов, импульса и энергии [8]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0;$$

$$\frac{\partial \rho Y_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j Y_\alpha}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Sc_\alpha} \frac{\partial Y_\alpha}{\partial x_j} \right) + R_{\alpha,r};$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \mu \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right) + \rho g_i;$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j h}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_j} - \frac{\partial F_j^r}{\partial x_j} \right);$$

где  $\rho$  – плотность;  $t$  – время;  $u_j$  – проекция вектора скорости на ось  $x_j$ ;  $x_j$  – координата;  $Y_\alpha$  – массовая доля  $i$ -го компонента смеси;  $Sc_\alpha$  – число Шмидта;  $R_{\alpha,r}$  – источниковый член химической реакции для  $\alpha$ -го компонента;  $p$  – давление;  $\mu$  – коэффициент молекулярной динамической вязкости;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $g_i$  – проекции вектора ускорения свободного падения на координатные оси;  $h$  – массовая энтальпия;  $Pr$  – число Прандтля;  $F_j^r$  – радиационный тепловой поток в направлении оси  $x_j$ .

МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Турбулентные флуктуации учитывались с использованием модели DES (Detached Eddy Simulation) [2, 3]. Указанная модель является альтернативой моделям турбулентности RANS (Reynolds

Averaged Navier – Stokes) и модели LES (Large Eddy Simulation) и применяется для расчёта пристеночных течений с обширными отрывными зонами, для которых модели RANS не способны обеспечить приемлемую точность, а модель LES требует чрезмерно больших вычислительных затрат. Сущность модели турбулентности DES заключается в использовании моделей RANS в пограничном слое и модели LES вдали от стенок [9].

Уравнения, используемые в модели турбулентности LES, получают путём фильтрации характеристик реального турбулентного течения по времени от коротковолновых неоднородностей. Указанный процесс позволяет отфильтровать вихри, масштабы которых меньше размера фильтра или локального размера расчётной сетки [2].

Отфильтрованная переменная определяется по формуле

$$\bar{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x; x') dx',$$

где  $\phi$  – актуальная переменная;  $D$  – объём расчётной области;  $G$  – функция фильтра;  $x, x'$  – координаты рассматриваемых точек потока.

Дискретизация расчётной области на конечные объёмы неявно обеспечивает операцию фильтрации:

$$\bar{\phi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \phi(x') dx'; \quad x' \in V,$$

где  $V$  – конечный объём.

Функция фильтра  $G(x; x')$  имеет вид:

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/V, & x' \in V; \\ 0, & x' \text{ otherwise.} \end{cases}$$

МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ

Процессы горения учитывались с использованием модели EDM (Eddy Dissipation Model) [2, 3]. Рассматриваемая модель была разработана Магнусеном и Хьертагером для моделирования процессов горения, в которых скорость химической реакции определяется временем смешения реагентов на молекулярном уровне (числа Дамкёлера  $Da \gg 1$ ). В этой модели закономерности химической кинетики используются только для описания образования радикалов и поллютантов. В турбулентных потоках время смешения реагентов определяется вихревыми свойствами течения. Таким образом, скорость химической реакции пропорциональна времени смешения крупных вихрей, которое зависит от кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации  $\epsilon$ .

Скорость образования  $\alpha$ -го компонента в  $r$ -й реакции определялась из соотношений:

$$R_{\alpha,r} = \min(R_{\alpha,r(react)}, R_{\alpha,r(prod)});$$

$$R_{\alpha,r(react)} = \nu'_{\alpha,r} M_{w,\alpha} A \rho \frac{\epsilon}{k} \min_{\mathfrak{R}} \left( \frac{Y_{\mathfrak{R}}}{\nu'_{\mathfrak{R},r} M_{w,\mathfrak{R}}} \right); \quad (1)$$

$$R_{\alpha,r(prod)} = \nu''_{\alpha,r} M_{w,\alpha} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j \nu''_{j,r} M_{w,j}}; \quad (2)$$

где  $\nu'$  и  $\nu''$  – стехиометрические коэффициенты для реагентов и продуктов горения;  $A$  и  $B$  – эмпирические константы, соответственно равные 4,0 и 0,5;  $M_w$  – молярная масса;  $\mathfrak{R}$  и  $P$  – индексы, характеризующие реагенты и продукты горения.

В модели турбулентности LES турбулентная скорость смешения  $\epsilon/k$  в выражениях (1) и (2) заменяется подсеточной скоростью смешения, определяемой по формуле

$$\tau_{sgs}^{-1} = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}},$$

где  $S_{ij}$  – тензор скоростей деформации:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

Необходимо отметить, что в рассматриваемой модели горения не требуется источник зажигания для иницирования горения, а скорость химической реакции не является функцией температуры.

МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ

Для прогнозирования излучения применялась модель DO (Discrete Ordinates), которая охватывает весь диапазон оптических толщин и позволяет моделировать тепловое излучение пламени [2, 3].

Интегродифференциальное уравнение лучистого переноса (RTE) для поглощающей, излучающей и рассеивающей среды в положении  $\vec{r}$  и направлении  $\vec{s}$  имеет вид:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega',$$

где  $I$  – интенсивность излучения;  $\vec{r}$  – вектор положения;  $\vec{s}$  – вектор направления;  $\vec{s}'$  – вектор направления рассеивания;  $s$  – длина пути;  $a$  – коэффициент поглощения;  $n$  – показатель преломления;  $\sigma_s$  – коэффициент рассеивания;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $T$  – температура;  $\Phi$  – фазовая функция;  $\Omega'$  – телесный угол.

МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ САЖИ

Образование сажи учитывалось с использованием модели Moss–Brookes [2, 3],

которая решает уравнения переноса для приведённой концентрации радикалов зародышей сажи  $b_{nuc}^*$  и её массовой доли  $Y_{soot}$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{soot}) + \nabla(\rho \bar{u} Y_{soot}) = \nabla \left( \frac{\mu_t}{\sigma_{soot}} \nabla Y_{soot} \right) + \frac{dM}{dt};$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho b_{nuc}^*) + \nabla(\rho \bar{u} b_{nuc}^*) = \nabla \left( \frac{\mu_t}{\sigma_{nuc}} \nabla b_{nuc}^* \right) + \frac{1}{N_{norm}} \frac{dN}{dt},$$

где  $Y_{soot}$  – массовая доля сажи;  $M$  – массовая концентрация сажи;  $N$  – число частиц сажи в единице объёма;  $N_{norm}$  – число частиц, равное  $10^{15}$ ;  $b_{nuc}^*$  – приведённая концентрация радикалов зародышей:  $b_{nuc}^* = N / (\rho N_{norm})$ .

Мгновенная скорость образования частиц сажи, подверженных зародышеобразованию из газовой фазы и коагуляции в свободномолекулярном режиме, определяется выражением

$$\frac{dN}{dt} = C_\alpha N_A \underbrace{\left( \frac{X_{prec} P}{RT} \right)^l \exp \left\{ -\frac{T_\alpha}{T} \right\}}_{\text{Нуклеация}} - C_\beta \underbrace{\left( \frac{24RT}{\rho_{soot} N_A} \right)^{\frac{1}{2}} d_p^{\frac{1}{2}} N^2}_{\text{Коагуляция}},$$

где  $C_\alpha, C_\beta$  и  $l$  – модельные константы;  $N_A$  – число Авогадро;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $X_{prec}$  – молярная доля прекурсора сажи (установлено, что для жидких углеводородов прекурсорами являются ацетилен и бензол);  $d_p$  – средний диаметр частицы сажи;  $\rho_{soot}$  – плотность сажи.

Скорость образования зародышей пропорциональна локальной концентрации прекурсоров. Температура активации  $T_\alpha$  для реакции нуклеации была установлена Линдстедтом [10].

Выражение для источникового члена массовой концентрации сажи имеет вид:

$$\frac{dM}{dt} = M_p C_\alpha \underbrace{\left( \frac{X_{prec} P}{RT} \right)^l \exp \left\{ -\frac{T_\alpha}{T} \right\}}_{\text{Нуклеация}} + C_\gamma \underbrace{\left( \frac{X_{sgs} P}{RT} \right)^m \exp \left\{ -\frac{T_\alpha}{T} \right\} \left[ (\pi N)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{6M}{\rho_{soot}} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^n}_{\text{Поверхностный рост}} - C_{oxid} C_{\omega} n_{coll} \underbrace{\left( \frac{X_{OH} P}{RT} \right) \sqrt{T} (\pi N)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{6M}{\rho_{soot}} \right)^{\frac{2}{3}}}_{\text{Окисление}},$$



где  $C_p$ ,  $C_{oxid}$ ,  $C_w$ ,  $m$  и  $n$  – модельные константы;  $M_p$  – молярная масса зародыша, который состоит из 12 атомов углерода;  $X_{sgs}$  – мольные доли компонентов, участвующих в поверхностном росте;  $X_{OH}$  – мольная доля окислителя.

Скорость окисления сажи определяется согласно модели, предложенной Фенимором и Джонсом [11]. Вероятность эффективных столкновений  $\eta_{coll}$  принимается равной 0,04. При этом учитывается, что гидроксильный радикал является преобладающим окислителем сажи в процессе диффузионного горения углеводородного топлива в воздухе.

Порядок определения показателей степени  $l$ ,  $m$  и  $n$  подробно описан Моссом и Бруксом в работе [12]. Константы  $C_\alpha$  и  $C_\beta$  определяются в результате численного моделирования с использованием экспериментальных данных.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

На рисунке 1 приведена геометрическая модель расчётной области, которая представляет собой параллелепипед с основанием  $32 \times 25$  м и высотой  $h$ , равной 20 м.

Для дискретизации расчётной области была построена гексаэдрическая сетка, состоящая из 1 077 894 элементов с максимальным размером 230 мм. Площадь очага горения составила  $75 \text{ м}^2$  ( $5 \times 15$  м).

Задача решалась в нестационарной постановке с временным шагом  $10^{-2}$  с. Время моделирования горения при каждой скорости ветра составило 10 с. Для моделирования очага пожара на входе в расчётную область задавался гомогенный поток паров бензина с осредненной температурой кипения и удельным расходом, равным удельной массовой скорости выгорания бензина, принятой в соответствии с Методикой определения расчётных величин пожарного риска на

производственных объектах, утверждённой приказом МЧС России № 404 от 10.07.2009 г. Теплообмен между пламенем и котлом железнодорожной цистерны не учитывался. В целях уменьшения вычислительных затрат была создана плоскость симметрии. Измерение плотности лучистого потока производилось в 40 точках, размещённых равномерно по высоте расчётной области на расстоянии 15 м от очага пожара (рис. 2).

Контуры мгновенных разрешённых температур в плоскости симметрии при различных скоростях ветра представлены на рисунке 3.

Контуры светящейся зоны пламени, изображённые на рисунке 4, идентифицированы по изоповерхности с температурной 850 К [13]. На рисунках 4 и 5 представлено распределение плотности лучистого потока на уровне земли.

Номограмма для определения средних значений плотности лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону ВПЭ, расположенного на пожарной вышке на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ, в зависимости от высоты при различных скоростях ветра, изображена на рисунке 6.

Анализ результатов моделирования позволил установить, что при скоростях ветра 4 м/с и более возможно образование отрывных вихрей пламени, способных достигнуть пожарной вышки, расположенной на расстоянии 15 м от железнодорожных путей СНЭ, а плотность лучистого потока в месте размещения стволика на пожарной вышке при этом может превышать  $60 \text{ кВт/м}^2$ . Таким образом, использование пожарной вышки, расположенной с наветренной стороны напротив очага пожара при указанных скоростях ветра, не представляется возможным.

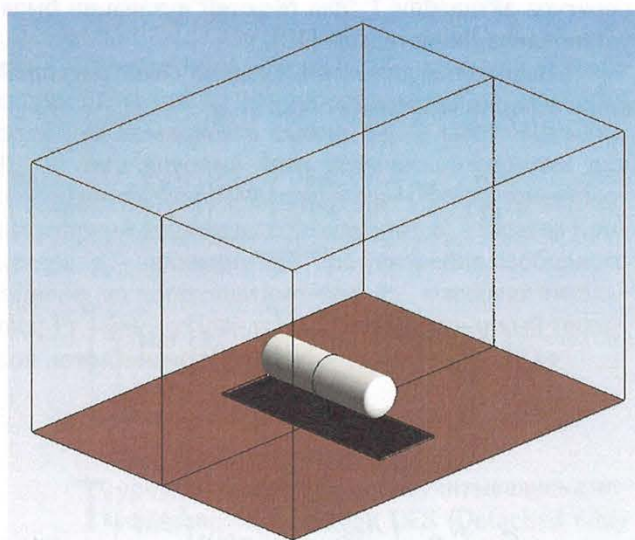


Рисунок 1. Геометрическая модель расчётной области

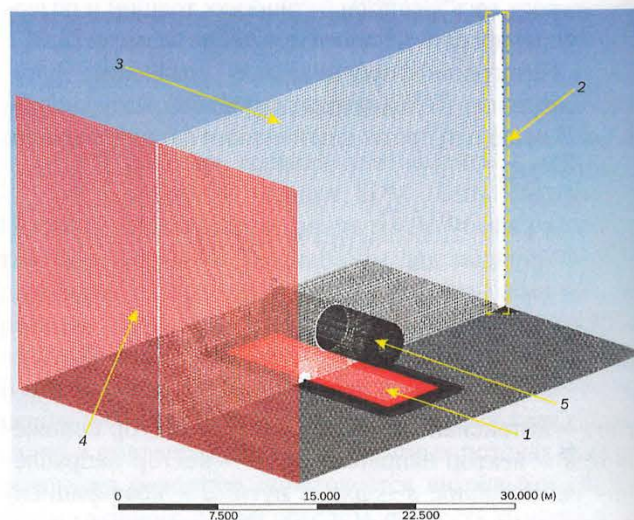


Рисунок 2. Элементы сеточной модели и граничные условия:  
 1 – очаг пожара;  
 2 – точки, в которых производилось измерение плотности лучистого потока;  
 3 – плоскость симметрии;  
 4 – граница расчётной области, предназначенная для создания ветрового воздействия;  
 5 – котёл железнодорожной цистерны

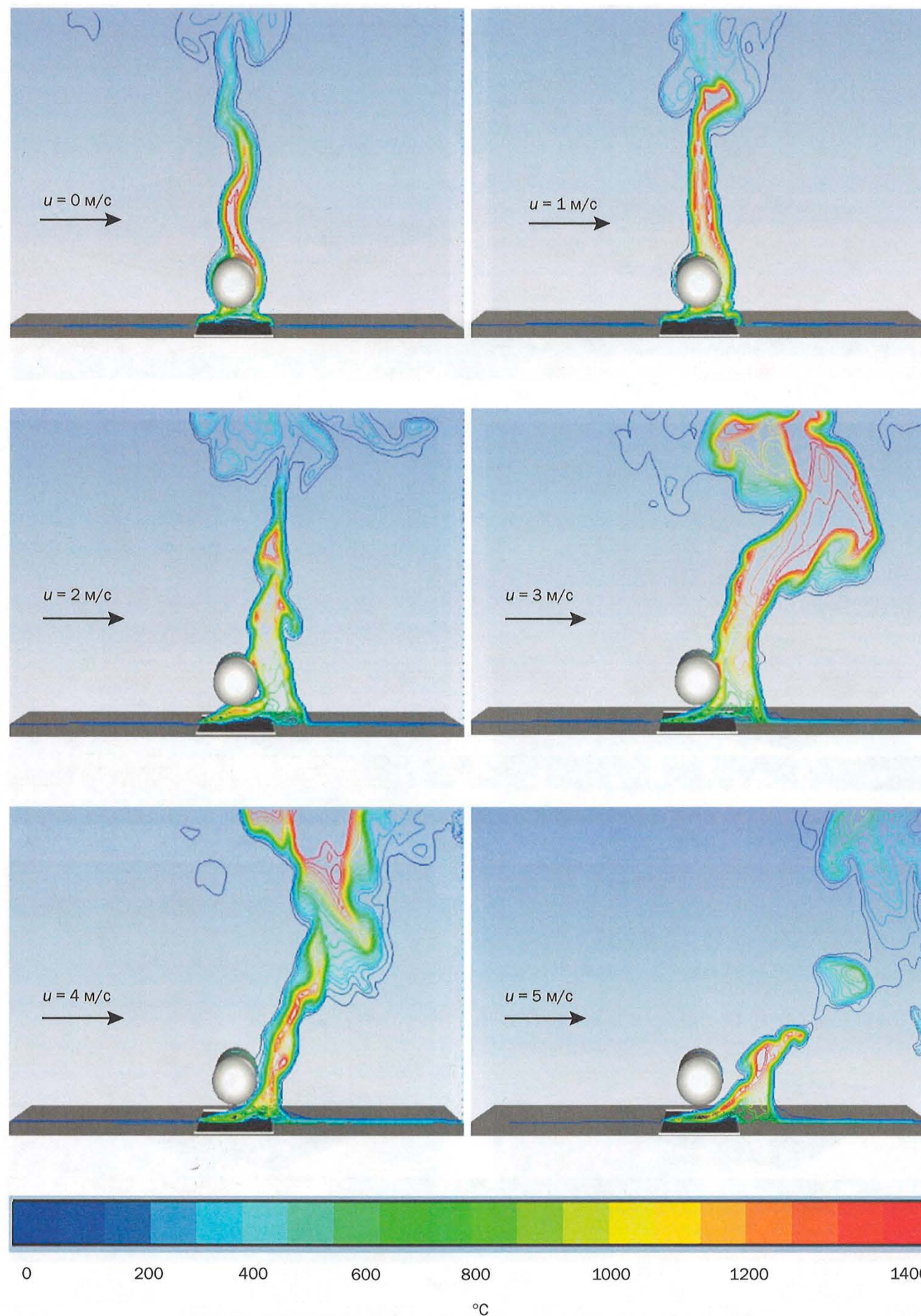


Рисунок 3. Контуры мгновенных разрешённых температур в плоскости симметрии при различных скоростях ветра



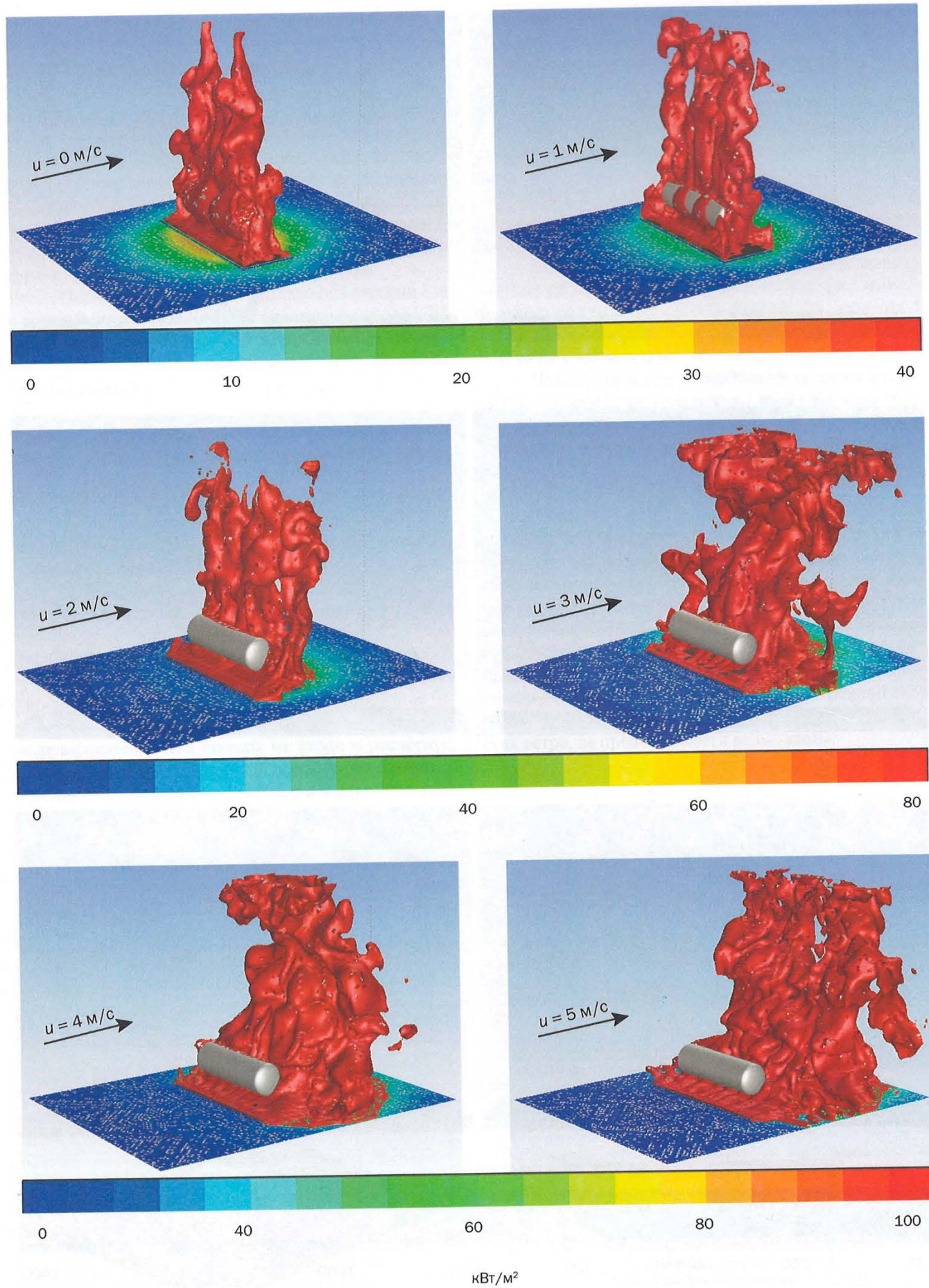


Рисунок 4. Изоповерхности температуры и распределение плотности лучистого потока на уровне земли при различных скоростях ветра

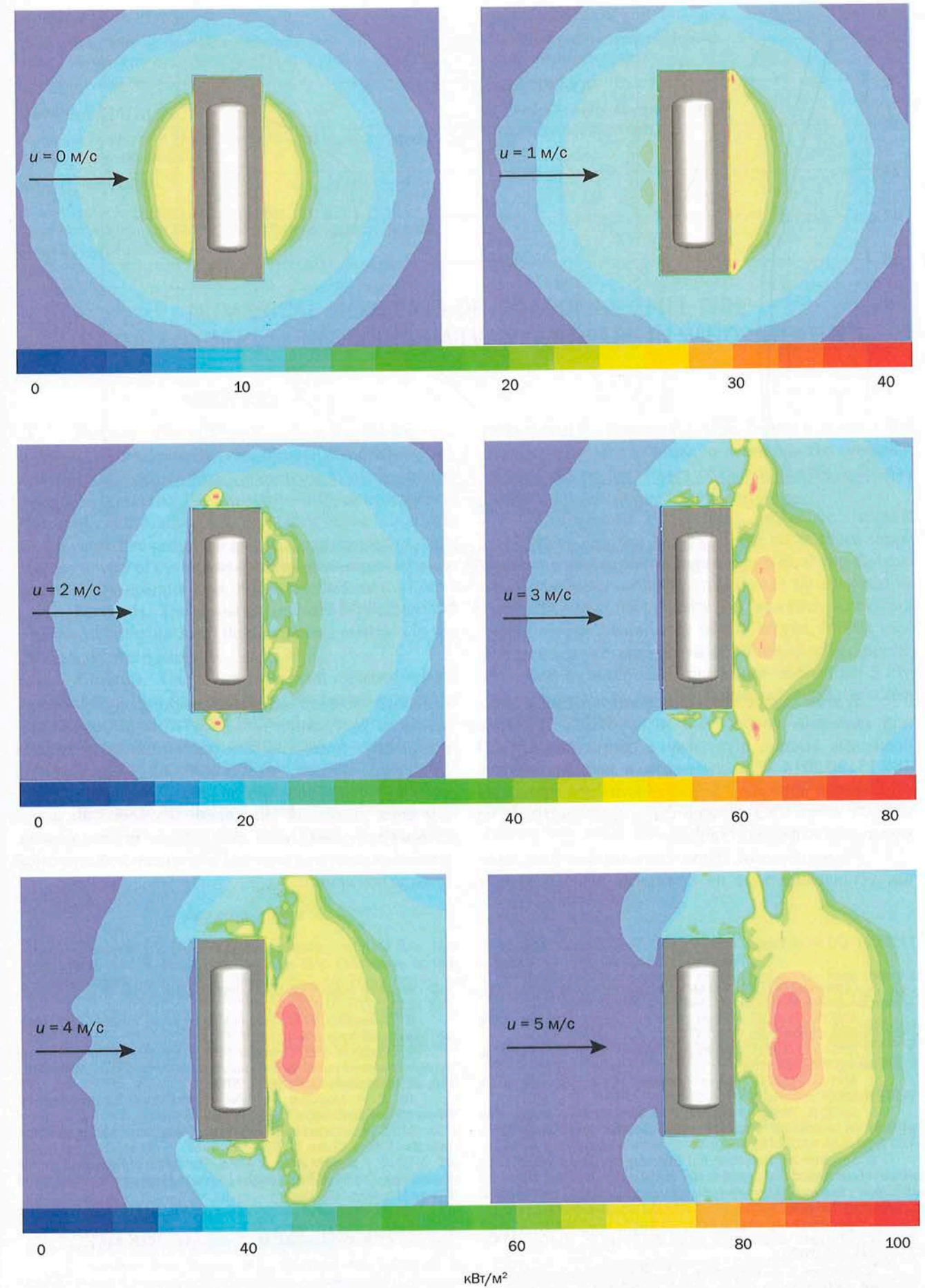


Рисунок 5. Распределение плотности лучистого потока на уровне земли при различных скоростях ветра



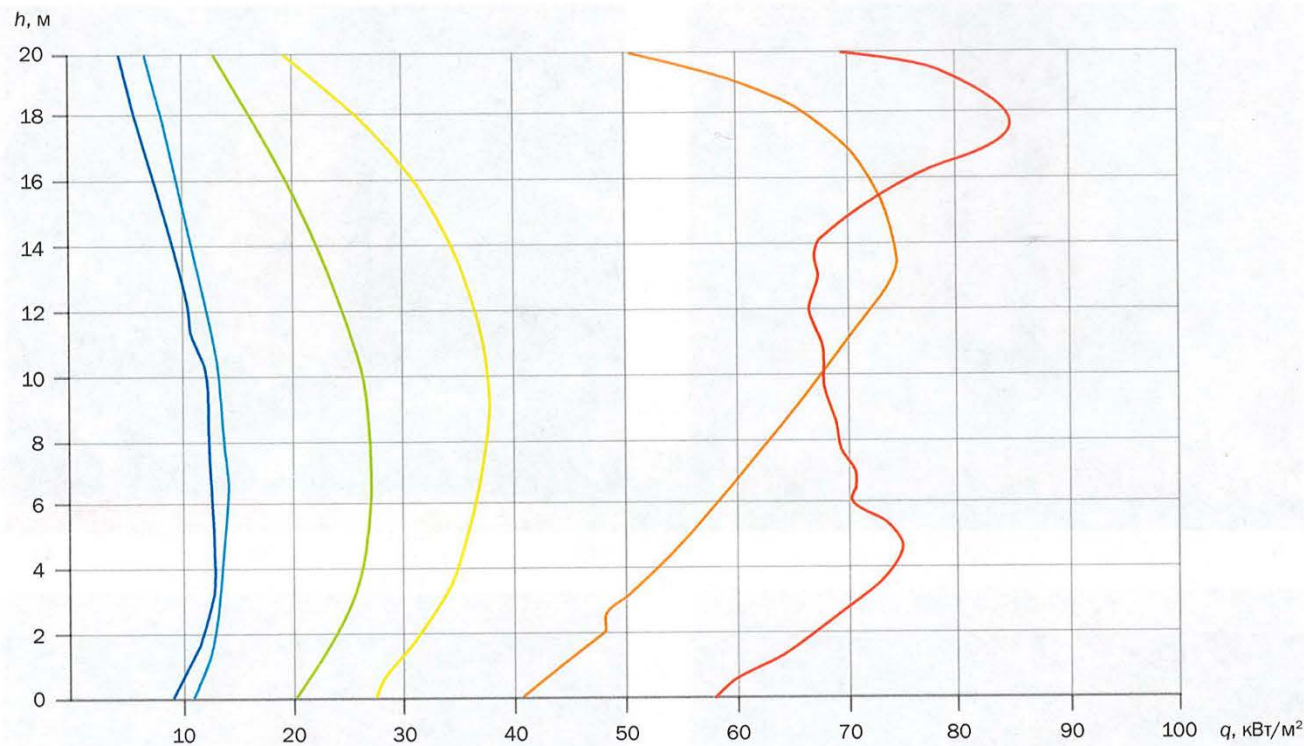


Рисунок 6. Номограмма для определения средних значений плотности лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону ВПЭ, от высоты при различных скоростях ветра:

—  $u = 0$  м/с; —  $u = 1$  м/с; —  $u = 2$  м/с;  
—  $u = 3$  м/с; —  $u = 4$  м/с; —  $u = 5$  м/с

В этом случае для охлаждения железнодорожной цистерны необходимо использовать соседние пожарные вышки, поскольку в соответствии с СП 155.13130.2014 «Склады нефти и нефтепродуктов. Требования пожарной безопасности» для орошения каждой точки СНЭ должно быть предусмотрено не менее двух лафетных стволов.

Таким образом, водоупорные защитные экраны, устанавливаемые на пожарных вышках сливо-

наливных эстакад объектов нефтепродуктообеспечения на расстоянии не менее 15 м от железнодорожных путей, должны быть рассчитаны на плотность лучистого потока, падающего на обогреваемую сторону экрана, не менее 60 кВт/м<sup>2</sup> при условии обеспечения снижения указанной плотности до допустимых значений – не более 5 кВт/м<sup>2</sup> на ствольщика, расположенного за экраном, в специальной защитной одежде пожарного.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Патанкар С. В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
2. ANSYS FLUENT Solver Theory Guide. Release 14.0. Pennsylvania, Canonsburg, 2011. 418 p.
3. ANSYS FLUENT Tutorials. Release 14.0. Pennsylvania, Canonsburg, 2011. 696 p.
4. ANSYS FLUENT Solver Modeling Guide. Release 14.0. Pennsylvania, Canonsburg, 2011. 594 p.
5. Lee K. B., Thring M. W., Beér J. M. On the Rate of Combustion of Soot in a Laminar Soot Flame. *Combustion and Flame*. 1962. Vol. 6, no. 8, P. 437–443.
6. Snegirev A., Kokovina E., Tsoy A., Harris J., Wu. T. The effect of soot modeling on thermal radiation in buoyant turbulent diffusion flames [Электронный ресурс]. *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 745, Technical sessions. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/745/3/032028/pdf> (дата обращения 15.03.2019). DOI: 10.1088/1742-6596/745/3/032028
7. Воробьев В. В., Ибатулин Р. К., Игнатцев А. С. Валидация моделей программного пакета ANSYS Fluent для определения параметров пожара пролива нефтепродуктов. *Пожары и чрезвычай-*

8. Снегирев А. Ю. Основы теории горения. Учебник. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2014. 352 с.
9. Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчётах сложных течений. Учебное пособие. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 88 с.
10. R. P. Lindstedt. In Proc. IUTAM Conf. on Aerothermo-Chemistry in Combustion. Taipei, Taiwan. 1991.
11. C. P. Fenimore and G. W. Jones. «Oxidation of soot by hydroxyl radicals». *J. Phys. Chem.* 71. 593–597. 1967.
12. S. J. Brookes and J. B. Moss. «Prediction of Soot and Thermal Radiation in Confined Turbulent Jet Diffusion Flames». *Combustion and Flame*. 116. 486–503. 1999.
13. Астапенко В. М., Кошмаров Ю. А., Молчадский И. С., Шевляков А. Н. Термогазодинамика пожаров в помещениях / под ред. Ю. А. Кошмарова. М.: Стройиздат, 1988. 448 с.

Материал поступил в редакцию 11 марта 2019 года.

В 2019 году Академия ГПС МЧС России отмечает 105-летие со дня рождения основателя кафедры пожарной безопасности технологических процессов доцента Алексева Михаила Васильевича и 55-летие созданной им кафедры.

Михаил Васильевич разработал универсальную методику анализа пожарной опасности технологических процессов, заложил научные основы обеспечения пожарной безопасности производств, которые актуальны и в настоящее время. В рамках данного номера представлены статьи последователей научной школы М. В. Алексева: показаны методы и способы снижения пожаровзрывоопасности нефтяных резервуаров (С. 12, 19, 42), представлены результаты различных огневых испытаний (С. 25, 47), подтверждающие численное моделирование изучаемого процесса.

В данном номере журнала впервые предлагается ввести новое понятие – «огнестойкость строительных материалов» (С. 62), анализируются различные правовые акты и документы, которые, по мнению авторов статей, следует доработать и изменить (С. 75, 93), а также представлены результаты статистических исследований динамики возникновения чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации (С. 56).

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- |   |    |  |
|---|----|--|
| НАУЧНАЯ ШКОЛА М. В. АЛЕКСЕЕВА<br>Швырков С. А., Петров А. П.<br>Основатель кафедры и научной школы<br>пожарной безопасности<br>технологических процессов  | 5  | SCIENTIFIC SCHOOL OF M. V. ALEKSEEV<br>Shvyrkov S., Petrov A.<br>The founder of the scientific school –<br>Fire Safety in<br>Technological Processes   |
| ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ<br>Швырков С. А., Пузач С. В.,<br>Горячев С. А., Швырков А. С.<br>Исследование параметров волны прорыва<br>при разрушении резервуаров объёмом до 30 000 м <sup>3</sup><br>в лабораторных условиях                | 12 | LABORATORY MODELING<br>Shvyrkov S., Puzach S.,<br>Goryachev S., Shvyrkov A.<br>Research of breakout wave parameters<br>at destruction of tanks with a capacity up to 30 000 m <sup>3</sup><br>in experimental conditions |
| ПОЖАРНАЯ ПРОФИЛАКТИКА<br>Назаров В. П.<br>Методы и способы снижения пожаровзрывоопасности<br>процессов дегазации нефтяных резервуаров   | 19 | FIRE PREVENTION<br>Nazarov V.<br>Methods and ways of reducing fire and explosion hazard at oil<br>tanks degassing  |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРООПАСНОЙ СИТУАЦИИ<br>Рубцов Д. Н., Егоров А. Н., Рубцов В. В.,<br>Огневые испытания защитной стенки резервуара<br>типа «стакан в стакане» при воздействии<br>на неё тепловых нагрузок от пожара<br>в основном резервуаре | 25 | SIMULATING FIRE HAZARDOUS SITUATION<br>Rubtsov D., Yegorov A., Rubtsov V.<br>Fire tests of the protective wall<br>of the «glass in glass» tank type when exposed<br>to heat from the fire in the main tank               |
| АНАЛИЗ НАУЧНЫХ РАБОТ<br>Батманов С. В., Самохин М. Р., Сухарский С. П.,<br>Тищенко В. А., Тищенко Т. А.<br>Обзор экспериментальных исследований<br>по аварийным проливам нефтепродуктов   | 32 | SCIENTIFIC WORKS ANALYSIS<br>Batmanov S., Samokhin M., Sukharsky S.,<br>Tishchenko V., Tishchenko T.<br>Review of experimental research on emergency<br>oil products spills  |
| РАСЧЁТ ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОН<br>Шебеко А. Ю.<br>Численное моделирование распространения паров<br>сжиженного природного газа при проливе<br>на твёрдую поверхность   | 36 | EXPLOSION-HAZARD ZONE CALCULATION<br>Shebeko A.<br>Numerical modeling<br>of liquefied natural gas vapor spread<br>when spilled on a hard surface   |
| РЕЗЕРВУАРНЫЕ ПАРКИ<br>Клубань В. С., Ле Вьет Хай,<br>Панасевич Л. Т., Бондарев А. А.<br>Особенности безопасной откачки нефти<br>из горящих вертикальных стальных резервуаров<br>с плавающей крышей  | 42 | OIL TANK FARM<br>Kluban V., Le Viet Hai,<br>Panasevich L., Bondarev A.<br>Specifics of safe oil pumping<br>from burning vertical steel tanks with<br>a floating roof   |
| ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЖАРА<br>Воробьев В. В., Ибатулин Р. К., Петров А. П.,<br>Веселов Е. Д., Панов С. А.<br>Численное моделирование пожара пролива бензина<br>на сливноналивной железнодорожной эстакаде<br>при ветровом воздействии   | 47 | NUMERICAL MODELING OF FIRE<br>Vorobeyev V., Ibatulin R., Petrov A.,<br>Veselov E., Panov S.<br>Numerical modeling of a gasoline spill fire<br>on the loading / unloading railway overpass<br>in windy weather            |
| АНАЛИЗ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ<br>Енин Д. В.<br>Чрезвычайные ситуации и их динамика<br>в Российской Федерации   | 56 | EMERGENCIES ANALYSIS<br>Enin D.<br>Emergency situations and their<br>dynamics in the Russian Federation  |
| ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ<br>Ройтман В. М.<br>Огнестойкость строительных материалов как базовая<br>характеристика кинетической теории огнестойкости   | 62 | FIRE RESISTANCE OF BUILDING MATERIALS<br>Roytman V.<br>Fire resistance of building materials as a basic<br>characteristic of fire resistance kinetic theory  |