

# **МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТЫ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ ОТКРЫТОГО ПОЖАРА**

**А.В. Федоров, доктор технических наук.**

**Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики.**

**А.А. Кузьмин, кандидат педагогических наук, доцент;**

**Н.Н. Романов, кандидат технических наук, доцент;**

**Д.А. Минкин, кандидат технических наук, доцент.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Описывается структура интегрированной диалоговой системы, включающей в себя электронную таблицу Microsoft Office Excel, семейство макросов на Visual Basic for Applications и программный комплекс ELCUT 6.3, которая позволяет на основе разветвленного алгоритма расчета теплового режима открытого пожара при разгерметизации резервуара с перегретой горючей жидкостью, а также газом под давлением или сжиженным газом на объекте нефтегазового комплекса, прогнозировать последствия воздействия интенсивного теплового излучения на стальные конструкции в зависимости от характеристик их огнезащиты.

*Ключевые слова:* нефтегазовый комплекс, стальные конструкции, огнезащита, тепловой режим, тепловое излучение, пожарная нагрузка, огненный шар, горючая жидкость, горючий газ, вспученный вермикулит

## **METHOD FOR ESTIMATION OF THE EFFICIENCY OF FIRE PROTECTION OF STEEL STRUCTURES ON OBJECTS OF OIL AND GAS COMPLEX IN CONDITIONS OF OPEN FIRE**

**A. V. Fedorov.**

**Saint-Petersburg state university of information technologies, mechanics and optics.**

**A. A. Kuzmin; N. N. Romanov; D. A. Minkin.**

**Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia**

The article describes the structure of the integrated dialog system, including the Microsoft Office Excel spreadsheet, the Visual Basic for Applications macros family, and the ELCUT 6.3 software package, which allows, based on a branched algorithm for calculating the open fire's thermal mode for depressurizing a tank with an overheated combustible liquid, and As well as gas under pressure or liquefied gas at the oil and gas complex to predict the effects of intense heat radiation on steel structures, depending on From the characteristics of their fire protection.

*Keywords:* oil and gas complex, steel structures, fire protection, thermal regime, thermal radiation, fire load, fire ball, flammable liquid, combustible gas, expanded vermiculite

Развитие нефтегазового комплекса России в современных условиях сопровождается ростом числа аварийных ситуаций, сопровождающихся разрушением резервуаров и аппаратов, приводящих к возгоранию и даже взрыву горючих жидкостей (ГЖ), газов под давлением или сжиженных природных газов (СПГ) [1]. Повышение

пожаровзрывобезопасности объектов нефтегазового комплекса становится важнейшей составной частью обеспечения защищенности государства от угроз техногенного и экологического характера.

Пожары на объектах нефтегазового комплекса, как правило, сопровождаются резким повышением температуры до 1100 °С и более [2]. Для незащищенных строительных конструкций такое температурное воздействие может привести к утрате их несущей, ограждающей и теплоизолирующей способности.

Некоторые сооружения на объектах нефтегазового комплекса представляют собой легковозводимые сооружения, несущие конструкции которых изготавливаются, как правило, из углеродистой стали различных марок, которая отличается высокой теплопроводностью. Это приводит к тому, что в условиях пожара незащищенные стальные конструкции быстро прогреваются до температур, превышающих 400÷500 °С. Под воздействием этих температур и нормативной нагрузки интенсивно развиваются температурные деформации, что ведет к быстрому разрушению всего сооружения (в пределах всего 0,12÷0,25 ч). Повышение предела огнестойкости конструкций, то есть времени от начала воздействия пожара до наступления предельного состояния (для легковозводимых сооружений потери несущей способности стальных несущих конструкций) до требуемого уровня, достигается применением огнезащиты.

Применяемые для огнезащиты обычные (невспучивающиеся) материалы, как правило, занимают дополнительный объем и увеличивают за счет собственной массы нагрузку на защищаемую стальную конструкцию [3]. Кроме того, средства огнезащиты должны не только обеспечивать защиту стальной конструкции от внешнего огневого воздействия, но и обладать адгезией к подложке материала конструкции, долговечностью в нормальных условиях эксплуатации, технологичностью при изготовлении и нанесении на защищаемую стальную конструкцию. Этим требованиям соответствуют вспучивающиеся огнезащитные составы, огнезащитный эффект которых основан на образовании при тепловом воздействии пористой массы с низкой теплопроводностью, которая препятствует притоку тепла к защищаемой поверхности. Вспучивающиеся материалы являются одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в области разработки составов для огнезащиты стальных конструкций [4, 5].

Общие требования к огнезащитным материалам, предназначенным для несущих стальных строительных конструкций, изложены в ГОСТ Р 53295–2009 «Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности», однако данный документ не предлагает расчетных методов для предварительной оценки эффективности применяемых конструктивных решений.

При этом высокая эффективность, возможность использования промышленных методов нанесения огнезащитных составов на поверхность конструкций обуславливает необходимость разработки расчетных методов, которые бы позволили оценивать эффективность огнезащиты стальных конструкций в условиях теплового излучения открытого пожара, а так же обосновывать рекомендации по выбору вида огнезащитного состава и его толщины в зависимости от характеристик пожара [6] на объектах нефтегазового комплекса.

Целью настоящей работы является разработка доступной и надежной методики проведения инженерных расчетов температурных полей для оценки эффективности огнезащиты стальных конструкций легковозводимых сооружений объектов нефтегазового комплекса в условиях пожара, возникающего при разгерметизации резервуара с перегретой ГЖ или газом под давлением, а также со сжиженными газами.

Для достижения поставленной цели необходимо:

– разработать тепловую модель для расчета температурных полей при прогреве незащищенных и защищенных стальных конструкций тепловым излучением с позиций надежности полученных решений и доступности их использования для оценки

эффективности огнезащиты в зависимости от теплофизических свойств применяемого огнезащитного материала, его толщины, условий развития пожара;

– провести программную реализацию алгоритма расчета теплового режима открытого пожара на объектах нефтегазового комплекса, который бы учитывал возможности как развития пожара при диффузионном режиме выгорания пожарной нагрузки, так и быстрого полного разрушения резервуара с последующим возникновением «огненного шара», оценкой продолжительности существования и характеристикой его теплового излучения.

Расчет металлических конструкций на огнестойкость в условиях интенсивного теплового излучения открытых пожаров на объектах нефтегазового комплекса сводится к решению трех совместных теплофизических задач:

– расчет теплового режима открытого пожара на объектах нефтегазового комплекса при диффузионном режиме выгорания пожарной нагрузки;

– расчет теплового режима открытого пожара на объектах нефтегазового комплекса при полном разрушении резервуара с последующим возникновением «огненного шара», оценкой продолжительности существования и характеристикой его теплового излучения;

– расчет распределения температуры по толщине защищенной металлической конструкции в зависимости от времени воздействия теплового излучения пожара.

Интенсивность теплового излучения  $q$  для пожара при проливе ГЖ или при горении твердых материалов вычисляется по формуле:

$$q = E_f \psi_q \cdot \varphi,$$

где  $E_f$  – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени;  $\psi_q$  – угловой коэффициент облученности;  $\varphi$  – коэффициент пропускания атмосферы.

Значение  $E_f$  принимается на основе имеющихся экспериментальных данных, а при отсутствии таковых современные нормативы [6] допускают принимать величину  $E_f$  равной: 100 кВт/м<sup>2</sup> для сжиженных углеводородных газов и 40 кВт/м<sup>2</sup> для нефтепродуктов.

Эффективный диаметр пролива  $d$  можно рассчитывать приведением формы пролива к кругу, при этом высота пламени  $H$ , м, вычисляется по формуле:

$$H = 42 \cdot d \cdot \left( \frac{M}{\rho_v \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,61},$$

где  $M$  – удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\rho_v$  – плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Угловой коэффициент облученности  $\psi_q$  определяется по формулам (1–3):

$$\Psi_q = \sqrt{\Psi_v^2 + \Psi_h^2}, \quad (1)$$

где  $\psi_v$ ,  $\psi_h$  – факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок соответственно, определяемые с помощью уравнений (2) и (3):

$$\Psi_v = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{S} \cdot \arctg \left( \frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h}{S} \cdot \left\{ \arctg \left( \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} \right) - \frac{A}{\sqrt{A^2 - 1}} \cdot \operatorname{arccr} \left( \sqrt{\frac{(A+1) \cdot (S-1)}{(A-1) \cdot (S+1)}} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

$$\Psi_n = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{(B-1/S)}{\sqrt{B^2-1}} \cdot \arctg \left( \sqrt{\frac{(B+1) \cdot (S-1)}{(B-1) \cdot (S+1)}} \right) - \frac{(A-1/S)}{\sqrt{A^2-1}} \cdot \arctg \left( \sqrt{\frac{(A+1) \cdot (S-1)}{(A-1) \cdot (S+1)}} \right) \right] \quad (3)$$

где  $A=(h^2+S^2+1)/(2 \cdot S)$ ;  $B=(1+S^2)/(2 \cdot S)$ ;  $S=2r/d$ ;  $h=2H/d$ ;  $r$  – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемой конструкции.

Для случая теплового излучения пламени при горении разлившегося жидкого углеводородного топлива коэффициент пропускания атмосферы определяется по формуле:

$$\varphi = \exp[-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot (r-0,5d)].$$

Интенсивность теплового излучения «огненного шара», который может сформироваться при быстром полном разрушении резервуара с горючей жидкостью, определяется на основе имеющихся экспериментальных данных, а при отсутствии таковых принимается значение  $E_f$  равное  $450 \text{ кВт/м}^2$  [6].

Значение углового коэффициента облученности  $\psi_q$  вычисляется по формуле:

$$\Psi_q = \frac{H/D_s + 0,5}{4 \cdot \left[ (H/D_s + 0,5)^2 + (r/D_s)^2 \right]^{1,5}},$$

где  $H$  – высота центра «огненного шара»;  $D_s$  – эффективный диаметр «огненного шара»;  $r$  – расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром «огненного шара».

Эффективный диаметр «огненного шара»  $D_s$ , определяют по эмпирической формуле:

$$D_s = 5,33m^{0,327},$$

где  $m$  – масса горючего вещества, кг, участвующего в образовании «огненного шара».

Величину высоты центра «огненного шара» принимаем равной половине его эффективного диаметра, а продолжительность (время его существования  $\tau_s$ , с), определяется по эмпирической формуле:

$$\tau_s = 0,92m^{0,303}.$$

Коэффициент пропускания атмосферы  $\varphi_{ат}$  для случая «огненного шара» рассчитывается по формуле:

$$\varphi_{ат} = \exp\left[-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot (\sqrt{r^2 + H^2} - D_s/2)\right].$$

Задача нахождения распределения температуры по толщине ( $x=0 \div \delta$ ) защищенной металлической конструкции в зависимости от времени воздействия теплового потока при пожаре решается с помощью дифференциального уравнения теплопроводности с соответствующими граничными условиями второго или третьего рода.

Для пола, перекрытий, двутавровых балок и колонн при отсутствии в них внутренних источников теплоты может быть записано общее одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности следующего вида:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\Phi}{x} \frac{\partial t}{\partial x} \right), \quad (4)$$

где  $x$  – координата тела, которой может быть и радиус цилиндра;  $\Phi$  – постоянное число: для пластины  $\Phi=0$ , для цилиндра (колонна)  $\Phi=1$ .

В таком случае для пластины уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2},$$

граничные условия для обогреваемой ( $x=0$ ) и необогреваемой ( $x=\delta$ ) поверхностей пластины:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_f [t_f - t(0, \tau)] \\ -\lambda_c \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_0 [t(\delta, \tau) - t_0] \end{cases}$$

где  $t_f$ ,  $t_0$  – температура продуктов горения и температура воздуха со стороны необогреваемой поверхности соответственно;  $a$  – коэффициент температуропроводности, зависящий от температуры материала ограждающей конструкции;  $\lambda$ ,  $\lambda_c$  – коэффициенты теплопроводности огнезащитного слоя и материала ограждающей конструкции;  $\alpha_f$  и  $\alpha_0$  – коэффициенты теплоотдачи на обогреваемой и необогреваемой поверхностях пластины соответственно.

Для цилиндра (колонны) уравнение теплопроводности (4) принимает вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right),$$

а граничное условие имеет вид:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=\delta} = \alpha_f [t_f - t(\delta, \tau)].$$

Коэффициент теплоотдачи от продуктов горения к обогреваемой поверхности пластины вычисляется по формуле:

$$\alpha_f = 11,63 e^{0,0023 t_f}.$$

Коэффициент теплоотдачи с необогреваемой поверхности к окружающему воздуху находится следующим образом:

– в случае если температура поверхности  $>60$  °С, коэффициент теплоотдачи  $\alpha_0$  вычисляют по формуле:

$$\alpha_0 = 11,63 e^{0,0023 t_i(\delta, \tau)};$$

– в случае если температура охлаждаемой поверхности стенки воздухом  $<60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то коэффициент теплоотдачи  $\alpha_0$  вычисляют по формуле:

$$\alpha_0 = 4.07 \cdot \sqrt[3]{t_i(\delta \cdot \tau) - t_0}$$

Теплофизические свойства материалов огнезащиты существенно отличаются от свойств конструкционной стали. Значения коэффициента теплопроводности различных огнезащитных покрытий в зависимости от температуры представлены на рис. 1 [7].

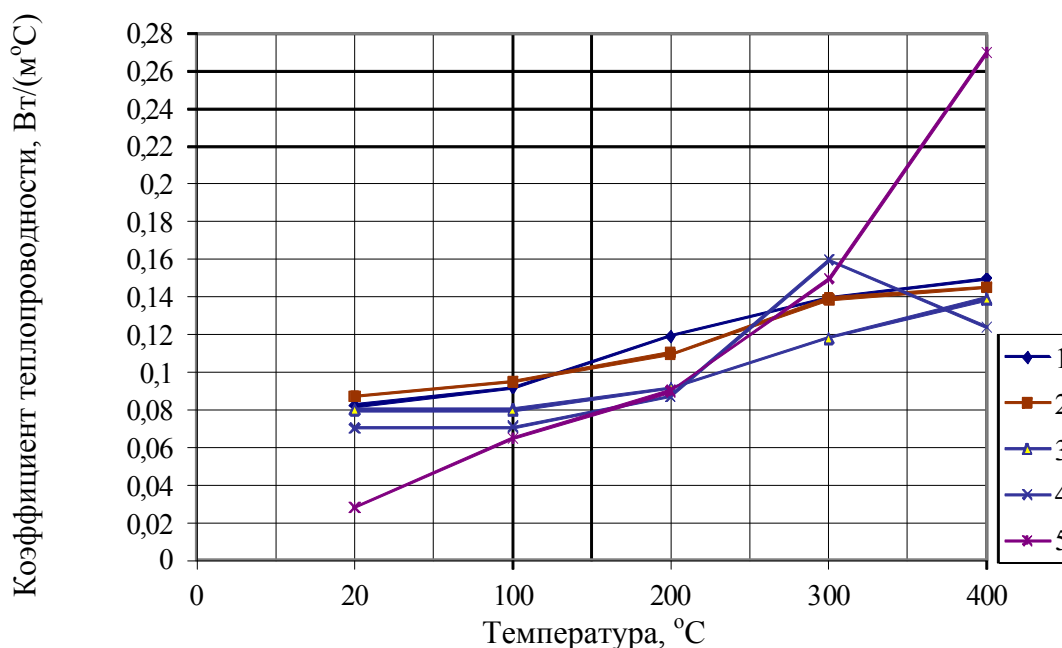


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности огнезащитной изоляции от температуры: 1 – каолиноперлитовая изоляция; 2 – асбестовермикулитовая изоляция; 3 – асбестоперлитовая изоляция; 4 – каолиновермикулитовая изоляция; 5 – пеноасбест

На рис. 2 представлен алгоритм расчета параметров теплового излучения открытого пожара при разгерметизации резервуара с перегретой ГЖ, а так же СПГ или горючим газом под давлением.

На основании представленного алгоритма была создана интегрированная диалоговая система, включающая в себя электронную таблицу Microsoft Office Excel, семейство макросов на Visual Basic for Applications и программный комплекс ELCUT 6.3.

Результаты расчета температурного поля защищенной металлической конструкции программный комплекс ELCUT 6.3 позволяет документировать в виде файла формата \*.svg и может отображать в цветографической форме любым браузером (рис. 3).

Для подтверждения надежности результатов работы созданной специальной интегрированной диалоговой системы с ее помощью были выполнены расчеты по оценке огнестойкости стальных пластин с огнезащитным покрытием и проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными исследованиями [7].

Для исследования выбраны стальные пластины толщиной 3 мм, защищенные огнезащитным вермикулитовым составом, разработанным Ю.М. Тихоновым и регламентированным ВТУ-89 «Огнезащитное вермикулитовое покрытие ОВП-1 для стальных строительных конструкций»: вермикулит вспученный марки 150; фракций 0,6÷5 мм – 80 %; вата каолиновая – 20 %; жидкое стекло плотностью 1,3 г/см<sup>3</sup> – Т:Ж=1:2,5;

отвердитель (кремнефторид натрия) – 10 % от массы жидкого стекла; наполнитель – перлит вспученный – 15 % от массы жидкого стекла, фракций 0,16÷0,3 мм.

Натурные испытания таких пластин проводились в отделе легких конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко по температурно-временному режиму, рекомендованному ВНИИПО и регламентированному стандартом [8].

Для обеспечения аутентичности условий прогрева расчетная плотность теплового потока, падающего на обогреваемую поверхность, вызвала изменение температуры на ней, близкую к стандартной температурной кривой (рис. 4).

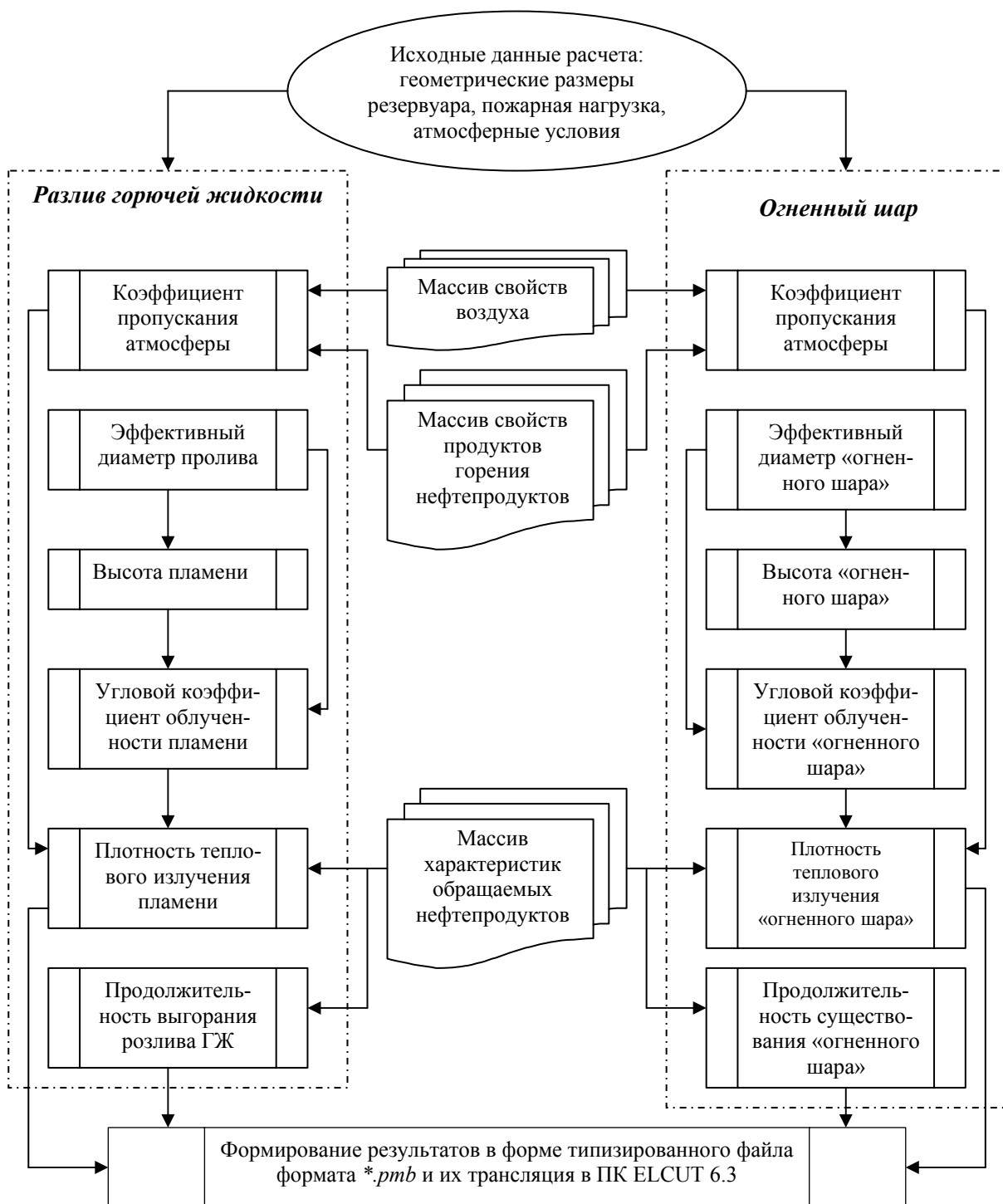


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров теплового излучения открытого пожара на объекте нефтегазового комплекса

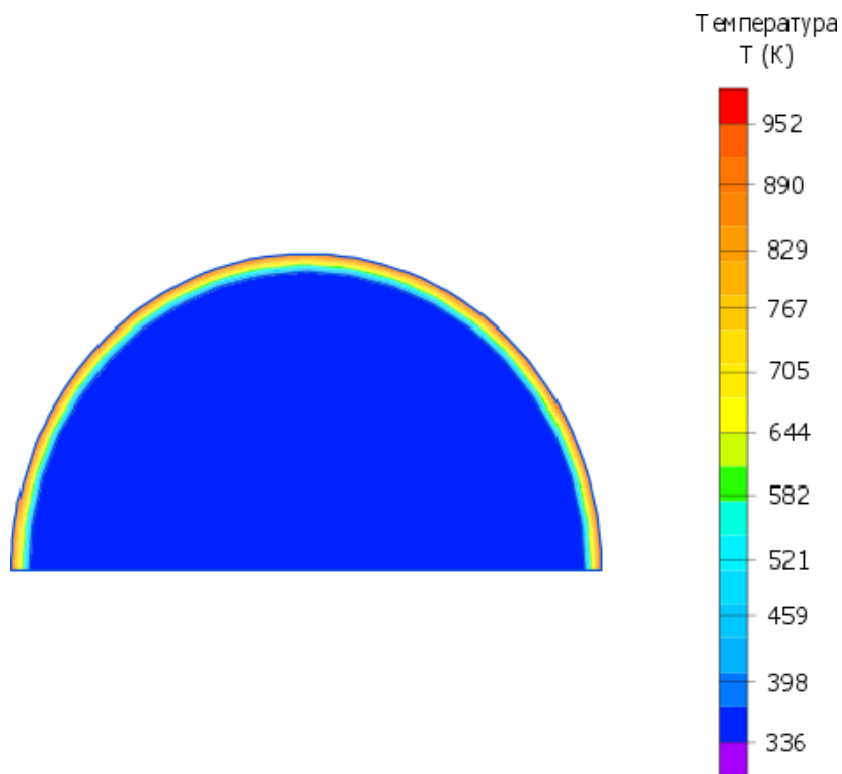


Рис. 3. Температурное поле стальной колонны R=160 мм через 20 мин с огнезащитным слоем (вермикулит) толщиной 10 мм

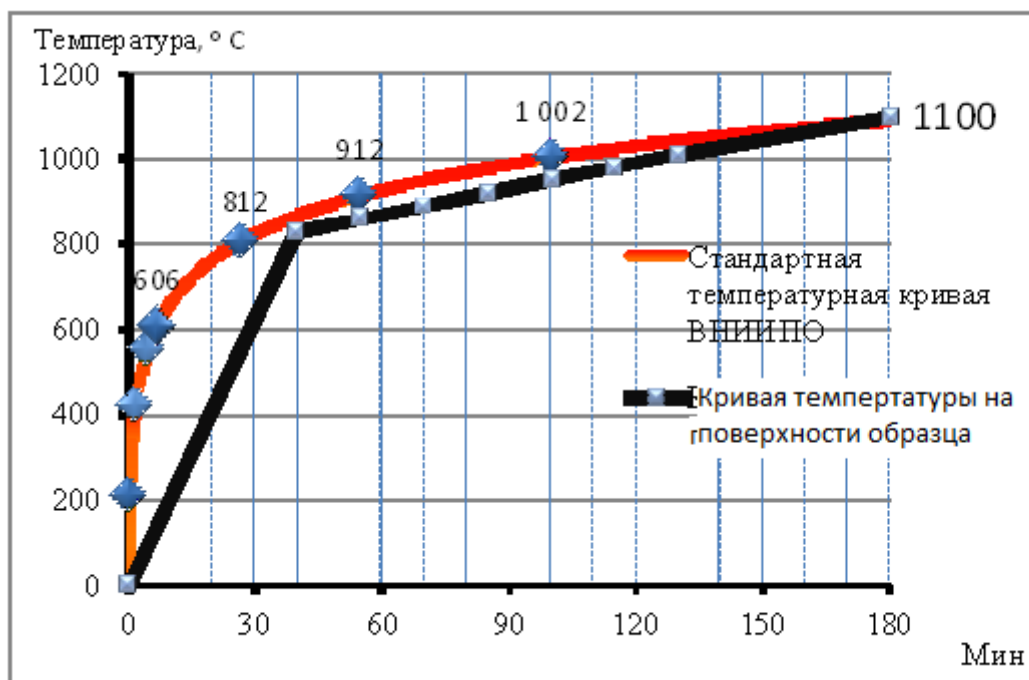


Рис. 4. Температура на поверхности огнезащищенной стальной пластины

Сравниваемые результаты расчета предела огнестойкости и результаты натуральных испытаний стальных пластин, огнезащищенных вермикулитовым покрытием ОВП-1 [7], представлены в таблице.



**Таблица. Результаты натуральных испытаний на огнестойкость и расчета предела огнестойкости стальных пластин**

Толщина, мм		Средняя плотность покрытия до теплового воздействия, кг/м <sup>3</sup>	Предел огнестойкости, мин	
			натурные испытания	результаты расчета
металла	покрытия			
3	12	480	43	47
3	15	400	48	51
3	25	505	93	87
3	30	483	86	78

Полученные расхождения в результатах расчета и натуральных испытаний предела огнестойкости стальных пластин, защищенных вермикулитовым покрытием, не превышают 10 %.

Таким образом, в ходе проведенной работы были получены следующие результаты:

- предложена методика расчета теплового режима открытого пожара на объектах нефтегазового комплекса, которая учитывает возможности как развития пожара при диффузионном режиме выгорания пожарной нагрузки, так и быстрого полного разрушения резервуара с последующим возникновением «огненного шара», оценивает продолжительность существования и определяет характеристики его теплового излучения; разработан алгоритм расчета тепловых полей незащищенных и защищенных стальных конструкций, учитывающий зависимость температурного поля от изменения теплофизических свойств материала конструкций и применяемого огнезащитного материала по мере развития открытого пожара;

- сформирована интегрированная диалоговая система Microsoft Office Excel – макрос Visual Basic for Applications – программный комплекс ELCUT 6.3, реализующая этот алгоритм с интерфейсом, дружественным широкому кругу пользователей;

- исследована надежность работы сформированной интегрированной диалоговой системы путем сравнения результатов расчета предела огнестойкости и результатов натуральных испытаний стальных пластин, огнезащищенных вермикулитовым покрытием ОВП-1.

Сравнительный анализ полученных результатов расчета и экспериментальных исследований подтвердил возможность использования программного продукта для предварительной оценки эффективности огнезащиты стальных конструкций на объектах нефтегазового комплекса.

### **Литература**

1. Информация об авариях, произошедших на предприятиях, подконтрольных территориальным органам Федеральной службы по экологическому, технологическому, атомному надзору. URL: <http://www.rostehnadzor.ru/chronicle.html>. (дата обращения: 11.04.2017).
2. Novozhilov V. Non-Linear Dynamical Model of Compartment Fire Flashover // Journal of Engineering Mathematics. 2010. Vol. 67. No 4. P. 387–400.
3. Архитектурное материаловедение / Ю.М. Тихонов [и др.]: учеб. СПб.: Изд-во Академия, 2013. 288 с.
4. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций / под ред. Ю.А. Кошмарова. М.: Информ.-изд. центр «ТИМР», 2000. 433 с.
5. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров / под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова; пер. с англ. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.
6. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности (утв. Приказом МЧС РФ от 18 июля 2003 г. № 314). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант».

7. Исследование поведения огне-теплозащитных материалов в условиях пожара / Ю.М. Тихонов [и др.]. Ч. I: Исследования поведения огнезащитных материалов на основе вермикулита, перлита и стекловолокна в условиях пожара: монография / под общ. ред. В.С. Артамонова. СПб.: Астерион, 2015. 235 с.

8. ГОСТ 30247.1–94. Межгосударственный стандарт. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. М.: Изд-во стандартов, 1995.

### References

1. Informaciya ob avariayah, proizoshedshih na predpriyatiyah, podkontrol'nyh territorial'nym organam Federal'noj sluzhby po ehkologicheskomu, tekhnologicheskomu, atomnomu nadzoru. URL: <http://www.rostehnadzor.ru/chronicle.html>. (data obrashcheniya: 11.04.2017).

2. Novozhilov V. Non-Linear Dynamical Model of Compartment Fire Flashover // Journal of Engineering Mathematics. 2010. Vol. 67. No 4. P. 387–400.

3. Arhitekturnoe materialovedenie / Yu.M. Tihonov [i dr.]: ucheb. SPb.: Izd-vo Akademiya, 2013. 288 s.

4. Strahov V.L., Krutov A.M., Davydkin N.F. Ognезashchita stroitel'nyh konstrukcij / pod red. Yu.A. Koshmarova. M.: Inform.-izd. centr «TIMR», 2000. 433 s.

5. Drajzdel D. Vvedenie v dinamiku pozharov / pod red. Yu.A. Koshmarova, V.E. Makarova; per. s angl. M.: Strojizdat, 1990. 424 s.

6. NPB 105-03. Opredelenie kategorij pomeshchenij, zdaniy i naruzhnyh ustanovok po vzryvopozharnoj i pozharnoj opasnosti (utv. Prikazom MCHS RF ot 18 iyulya 2003 g. № 314). Dostup iz sprav.-pravovoj sistemy «Garant».

7. Issledovanie povedeniya ogne-teplozashchitnyh materialov v usloviyah pozhara / Yu.M. Tihonov [i dr.]. CH. I: Issledovaniya povedeniya ognезashchitnyh materialov na osnove vermikulita, perlita i steklofibry v usloviyah pozhara: monografiya / pod obshch. red. V.S. Artamonova. SPb.: Asterion, 2015. 235 s.

8. GOST 30247.1–94. Mezhhgosudarstvennyj standart. Konstrukcii stroitel'nye. Metody ispytaniy na ognestojkost'. Nesushchie i ograzhdayushchie konstrukcii. M.: Izd-vo standartov, 1995.