

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОГРЕВА ПРИ ПОЖАРЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА С ОГНЕЗАЩИТОЙ В ВИДЕ УКРЫТИЯ

АННОТАЦИЯ

Предложен метод математического моделирования процесса нестационарного прогрева при пожаре элементов технологического оборудования нефтегазового комплекса, защищенных укрытием, реализующим комбинированный способ огнезащиты. Практические возможности метода показаны на примере спроектированной на его основе огнезащиты запорной и фонтанной арматуры нефтяных скважин. Приведены расчетная схема данной системы и математическое описание теплопереноса в ней при пожаре. Достоверность предложенного метода проверена путем сопоставления результатов расчетов с экспериментальными данными, полученными при огневых испытаниях натурного огнезащитного укрытия.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для защиты элементов пожароопасного технологического оборудования нефтегазового комплекса от огневого воздействия при пожаре авторами предложен новый способ ослабления падающего на объект потока энергии в виде света, тепла и конвективных газовых потоков [1]. Предложенный способ основан на ограждении защищаемого объекта вместе с примыкающим к нему участком грунта огнезащитным экраном из волокнистых термостойких (капиллярно-пористых) материалов. При работе экрана в условиях пожара реализуется достаточно «сильный» физический эффект испарительного охлаждения за счет создания в структуре его стенки парокапельной среды из охлаждающей жидкости.

Устройство, реализующее предложенный способ огнезащиты — огнезащитное укрытие, представляет собой огнестойкий теплоизолирующий экран, расположенный на несущем каркасе из стальных труб. В рабочем положении огнезащитное укрытие имеет форму равнобокой треугольной призмы. Для реализации эффекта испарительного охлаждения предусмотрено периодическое или непрерывное орошение поверхности экрана водой.

Возможны следующие режимы работы огнезащитного укрытия:

- без орошения экрана (эффект испарительного охлаждения отсутствует);
- при непрерывном орошении поверхности экрана водой с минимальным расходом, достаточным для обеспечения непрерывности эффекта испарительного охлаждения;
- при периодическом орошении поверхности экрана водой до состояния близкого к насыщению.

Многообразие массогабаритных параметров потенциально опасных объектов, подлежащих огне-

защите, а также условий высокотемпературного воздействия на них диктует необходимость разработки математической модели, описывающей нестационарный прогрев системы «огнезащитный экран – защищаемый объект – грунт».

Математическая модель нестационарного прогрева стенки насыщенного водой экрана на этапе сушки представлена в работе [2].

В данной работе рассмотрено математическое описание нестационарного прогрева данной системы в сухом состоянии.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОГРЕВА СИСТЕМЫ «ОГНЕЗАЩИТНЫЙ ЭКРАН – ЗАЩИЩАЕМЫЙ ОБЪЕКТ – ГРУНТ» ПРИ ОТСУТСТВИИ ВОДЫ В СТЕНКЕ ЭКРАНА

В качестве характерного примера защищаемого объекта рассматривается запорная и фонтанная арматура нефтяной скважины, показанная на рис.1.



Рис. 1. Запорная и фонтанная арматура нефтяной скважины

Расчетная схема системы «огнезащитный экран – защищаемый объект – грунт» приведена на рис.2. Контуры экрана и защищаемого объекта, показанные на схеме, соответствуют ее поперечному сечению.

При постановке задачи нестационарного прогрева рассматриваемой системы для двумерной расчетной области реальный защищаемый высокотеплопроводный объект приводится к форме неограниченного стержня из условия равенства его объемной теплоемкости натурному значению. Пространство, ограниченное внутренней поверхностью экрана,

наружной поверхностью защищаемого объекта и поверхностью грунта, считается заполненным прозрачным для теплового излучения воздухом.

Теплопередача от внутренней поверхности экрана к поверхности защищаемого объекта и грунта осуществляется излучением, теплопроводностью и естественной конвекцией. Причем влияние естественной конвекции на теплопроводность учитывается введением соответствующей поправки к коэффициенту молекулярной теплопроводности [3]. Кроме того, в натуральных условиях имеет место сток теплоты по стальной оболочке и вертикальному столбу жидкости в массив грунта.

На наружную поверхность огнезащитного экрана и поверхность грунта, расположенную вне укрытия, воздействует факел пламени, отклоняемый в сторону укрытия ветром, характеризующимся скоростью v . В данной работе рассматривается наиболее «жесткий» случай, когда факел пламени соприкасается с обогреваемой поверхностью экрана.

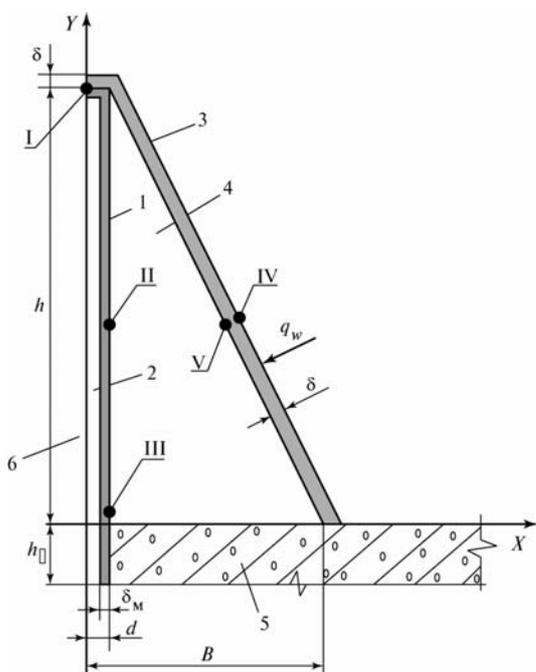


Рис. 2. Расчетная схема нестационарного прогрева системы «огнезащитный экран – защищаемый объект – грунт»: 1 – стальная стенка защищаемого объекта; 2 – среда, заполняющая его внутреннюю полость; 3 – огнезащитный экран; 4 – воздушная полость; 5 – грунт; 6 – плоскость симметрии

Плотности полного теплового потока, поглощаемого обогреваемой поверхностью экрана, рассчитываются по формуле:

$$q_w = (1 - r_w) E_f - \varepsilon_w \sigma T_w^4 + \alpha_f (T_f - T_w). \quad (1)$$

Нестационарное двумерное поле температуры в рассматриваемой системе определяется из решения дифференциального уравнения теплопроводности, записанного в системе координат OXY в форме:

а) для зон расчетной области, расположенных вне полости, заполненной воздухом:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\perp} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\parallel} \frac{\partial T}{\partial y} \right); \quad (2)$$

б) для зон расчетной области, соответствующих поперечному сечению полости, заполненной воздухом:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\perp} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\parallel} \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения (2) и (3) решаются при следующих краевых условиях:

- начальное условие:

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad (4)$$

- условия на обогреваемых поверхностях:

$$q_w = -\lambda_{\Sigma} \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\substack{x=x_w \\ y=y_w}}, \quad (5)$$

- условия на границах между материалами с различными теплофизическими характеристиками:

$$T|_{\substack{x=x_{гр}-0 \\ y=y_{гр}-0}} = T|_{\substack{x=x_{гр}+0 \\ y=y_{гр}+0}}; \quad (6)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\substack{x=x_{гр}-0 \\ y=y_{гр}-0}} = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\substack{x=x_{гр}+0 \\ y=y_{гр}+0}}; \quad (7)$$

- условия на поверхностях, ограждающих полость:

$$T|_{\substack{x=x_{гр}-0 \\ y=y_{гр}-0}} = T|_{\substack{x=x_{гр}+0 \\ y=y_{гр}+0}}; \quad (8)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\substack{x=x_{гр}-0 \\ y=y_{гр}-0}} = -\lambda_{\Sigma} \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\substack{x=x_{гр}+0 \\ y=y_{гр}+0}} + q_i. \quad (9)$$

- условия на плоскостях симметрии расчетной области:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=b+l_f+D/2} = 0; \quad (10)$$

- условие в грунте на достаточном удалении от его обогреваемой поверхности:

$$T|_{y=-h_r} = T_0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=-h_r} = 0. \quad (11)$$

Эффективная теплопроводность материала огнезащитного экрана в перпендикулярном и параллельном направлениях к обогреваемой поверхности, входящие в уравнение (2) рассчитываются по формулам [4]:

$$\lambda_{\perp} = \lambda_{\Sigma} = \lambda' (1 - \varphi_d)^{1,5} M_k + \lambda'' \varphi_d^{0,25} + \Theta T^3; \quad (12)$$

$$\lambda_{II} = \lambda'(1 - \varphi_d) + \lambda''\varphi_d + \Theta T^3. \quad (13)$$

Эквивалентная теплопроводность, учитывающая сложный перенос теплоты через полость молекулярной теплопроводностью газа и естественной конвекцией, определяется по формуле [3]:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda Nu. \quad (14)$$

Входящее в выражение (14) число Нуссельта рассчитывается по эмпирическим формулам для горизонтальной трубы прямоугольного сечения с характерным размером, равным высоте полости.

Для определения входящих в граничные условия (9) результирующих тепловых потоков на i -х изотермических площадках на каждом шаге по времени решается задача лучистого теплообмена в полости ограниченной поверхностями экрана, грунта и защищаемого объекта при следующих допущениях:

- излучающие поверхности серые;
- их эффективное излучение является диффузным;
- плотность неизменна на изотермических участках поверхностей;
- зеркальное отражение отсутствует.

С учетом этих допущений выражение для результирующих тепловых потоков имеет вид [5]:

$$q_i = \varepsilon_i \sigma \sum_{j=1}^J \varepsilon_j \Phi_{ij} (T_i^4 - T_j^4), \quad i = 1, 2, 3, \dots, I. \quad (15)$$

Входящие в формулу (15) разрешающие угловые коэффициенты излучения определяются из системы линейных алгебраических уравнений следующего вида [5]:

$$\Phi_{ik} - \sum_{j=1}^n r_j \Phi_{ij} \varphi_{jk} = \varphi_{ik}, \quad i, k = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

Входящие в формулы (1) – (16) теплофизические характеристики материалов определяются по рекомендациям работ [4, 6].

Для численного решения дифференциальных уравнений (2), (3) с краевыми условиями (4) – (11) использован метод конечных разностей в варианте метода дробных шагов. Разностные аналоги дифференциальных уравнений с соответствующими краевыми условиями решаются методом прогонки, позволяющим производить уточнение нелинейных параметров, с использованием неявной четырехточечной схемы «зонт». На каждом шаге по времени реализован итерационный процесс.

3. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Оценку точности расчетов, выполняемых в рамках разработанной математической модели, осуществляли путем сопоставления результатов численных расчетов с результатами аналитического решения для простых случаев.

Достоверность модели проверяли путем сопоставления расчетных данных с экспериментальными, полученными при натурных огневых испытаниях

огнезащитного укрытия, установленного на имитаторе устья нефтяной скважины с запорной и фонтанной арматурой, массогабаритные характеристики которого соответствуют натуре.

Общий вид огнезащитного укрытия до огневого воздействия показан на рис.3. Данное укрытие имело следующие габаритные размеры: ширина основания 2 м, длина 2,5 м и высота 3 м.



Рис. 3. Общий вид огнезащитного укрытия, установленного на имитаторе устья нефтяной скважины с запорной и фонтанной арматурой

Толщина стенки огнезащитного экрана, изготовленного из волокнистых материалов на основе базальтовых и кремнеземных волокон, составляла 17..19 мм.

Огневое воздействие создавали горением дизельного топлива налитого в емкости, расставленные по периметру основания огнезащитного укрытия. В процессе испытаний был обеспечен непосредственный контакт пламени с обогреваемой поверхностью огнезащитного экрана.

На протяжении всего времени огневого воздействия осуществляли непрерывную регистрацию температуры в контрольных точках обозначенных римскими цифрами на рис.1.

Графики изменения температур в контрольных точках полученные расчетным и экспериментальным путем приведены на рис. 4.

Удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных свидетельствует о правомерности принятых при разработке математической модели допущений и о возможности использования модели на практике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель пригодна для применения на практике в качестве инструмента для проектирования средств огнезащиты пожароопасных элементов технологического оборудования нефтегазового комплекса.

Использование разработанного метода при проектировании огнезащитных укрытий запорной и фонтанной арматуры нефтяных скважин, расположенных на кустовых площадках ОАО «Юганскнефтегаз», показало его достаточно высокую эффективность.

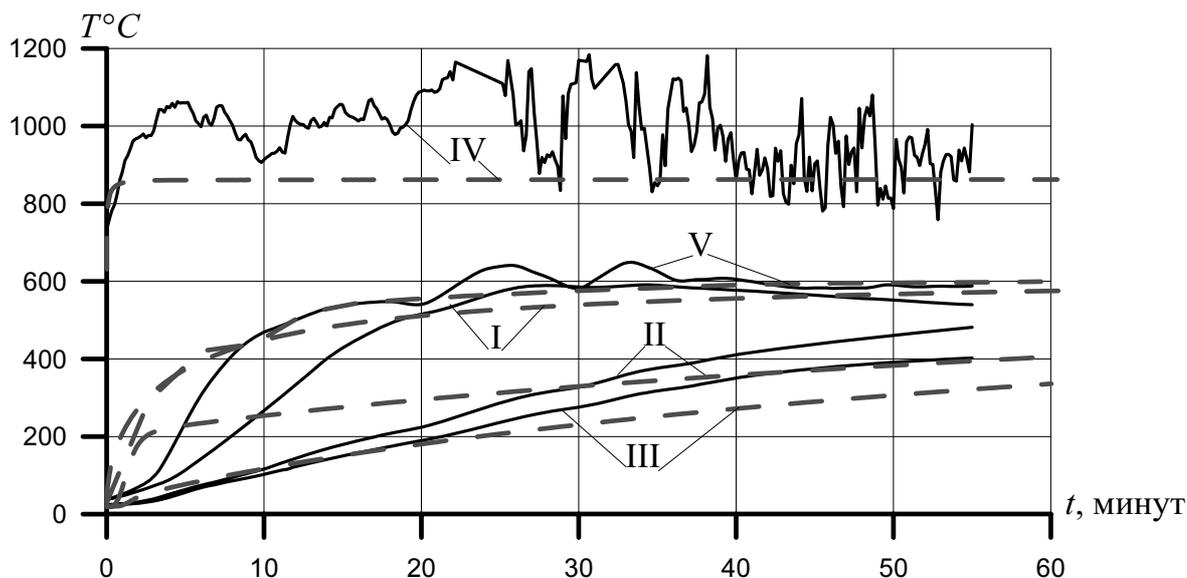


Рис. 4. Зависимости от времени температуры в контрольных точках рассматриваемой системы: расчет – пунктирные линии; эксперимент – сплошные линии

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

T — температура, К;
 t — время, с;
 r — отражательная способность;
 c, c_p — теплоемкость, Дж/(кг·К);
 $\lambda_{\Sigma}, \lambda_{\perp}, \lambda_{\parallel}$ — эффективные теплопроводности в зоне сухого материала, Вт/(м·К);
 λ_{Σ} — эквивалентная теплопроводность воздуха, учитывающая естественную конвекцию, Вт/(м·К);
 ϵ — степень черноты поверхности;
 σ — постоянная Стефана-Больцмана, $5.67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴);
 α_f — коэффициент конвективной теплоотдачи факела горячих газов, Вт/(м²·К);
 q_w — плотность лучистого теплового потока от факела пламени и поглощенная обогреваемой поверхностью экрана, Вт/м²;
 E_f — плотность теплового потока, излучаемого факелом пламени, Вт/м²;
 M_k — параметр контактного сопротивления между волокнами материала экрана;
 Θ — параметр лучистого теплопереноса, Вт/(м·К⁴);
 φ_d — пористость;
 λ', λ'' — теплопроводность волокон и газа заполняющего поры материала экрана, Вт/(м·К);
 Φ — разрешающий угловой коэффициент излучения;
 φ — угловой коэффициент излучения.

Индексы:

f — пламени;
 w — обогреваемой поверхности экрана;
 0 — в начальный момент времени;
 \perp, \parallel — направление по отношению к обогреваемой поверхности;
 Σ — суммарная величина;
 i, j, k — порядковые номера изотермических площадок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент RU 2229910 Способ ослабления потоков энергии в виде света, тепла и конвективных газовых потоков, огнестойкий экран и огнезащитное укрытие на его основе.
2. Страхов В.Л., Заикин С.В. Математическое моделирование нестационарного прогрева насыщенного водой огнезащитного экрана на этапе сушки // Пожаровзрывобезопасность. М.: «Пожнаука». 2005. № 6. С. 26—32.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1969. 440 с.
4. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин Н.Ф. Огнезащита строительных конструкций / Под ред. Ю.А. Кошмарова. М.: ТИМР, 2000. 433 с.
5. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
6. Физические величины: Справочник / А.П. Бабишев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.