

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ И ОГНЕСТОЙКОСТИ БЛИЗКО РАСПОЛОЖЕННЫХ КАБЕЛЬНЫХ ТРАСС РЕАКТОРНЫХ ОТДЕЛЕНИЙ АЭС В УСЛОВИЯХ ВЫГОРАНИЯ ОДНОЙ ИЗ НИХ

На практике для решения многих проблем пожарной безопасности часто обращаются к полномасштабным огневым испытаниям. Однако такие испытания требуют больших финансовых затрат (отдельные из них стоят до 50 тыс. фунтов стерлингов, а иногда и больше [1]) и трудно поддаются анализу. Обычно они воспроизводят частный случай развития пожара и получаемые при этом результаты имеют ограниченное применение на практике.

Основным недостатком масштабного моделирования пожаров является невозможность достижения полного подобия между натурным объектом и его уменьшенной моделью, а также необходимость компромисса при использовании масштабного моделирования на практике.

Альтернативный подход к исследованию пожара, заключающийся в его математическом моделировании как сложной системы, позволяет значительно сэкономить людские, мате-

риальные и финансовые ресурсы без компромиссов. С помощью ЭВМ можно решать различные проблемы исследования пожаров, которые до настоящего времени считались неразрешимыми.

Рассмотренная в работе [2] модель выгорания кабельной трассы, расположенной в металлическом коробе, описывает динамику выгорания кабельной массы внутри короба. В результате получены температуры и расход горячих газов на выходе из короба. Для определения теплового влияния горящей кабельной трассы на негорящую нужна модель, которая бы учитывала расстояние между кабельными трассами, их геометрию, а также расположение кабельных трасс в гермозоне АЭС.

Целью работы является разработка модели по определению теплового влияния при

выгорании одной из кабельных трасс, расположенных в объеме гермозоны ядерного реактора и создание расчетной методики, позволяющей определять параметры, вид и необходимость использования огнезащитных покрытий на коробах кабельных трасс.

Физическая модель. Основой предлагаемой модели является сценарий полного выгорания кабелей в коробе, базируется на консервативном подходе.

Кратко опишем его:

1. Происходит короткое замыкание в одном из кабелей, которое приводит к значительному выделению количества теплоты. Кабель разогревается до температуры 900..1000 °С и загорается.
2. Прогреваются близлежащие кабели до температур пиролиза 280...900°С что, в свою очередь, приводит к выделению теплоты и вовлечению в процесс горения окружающих кабелей по мере их прогрева.
3. Выделяющиеся при пиролизе газы разогревают верхнюю крышку короба и она под действием термических напряжений деформируется и смещается, обеспечивая полный доступ кислорода.

Основные физические допущения и предположения, используемые в модели, приведены в работе [2].

На рис. 1 приведена область решения задачи размером 6×5,7 м. Рассматриваются две кабельные трассы со стальными коробами типа ККБ-ПО (размеры короба составляют 0,4×0,15м, толщина стенки - 2мм). Нижняя система - кабельная трасса без стальной крышки (консервативный подход), что определяет достаточный доступ кислорода и позволяет рассматривать выгорание в режиме "пожара, регулируемого горючей нагрузкой" (ПРН) [3].

Внутри короба находится 120 контрольных кабелей типа КПоБВнг 7×2,5 (заполнение 80% от общего объема короба). Заполнение верхней короба: 40 контрольных кабелей типа

КПоБВнг 7×2,5 (25% от общего объема короба).

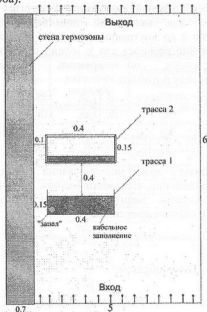


Рис. 1. Область решения задачи

В табл. 1 приведены теплофизические характеристики материалов модели. Удельная теплота сгорания 1кг горючей части кабельной массы составляет 18 Мдж/кг [4].

Математическая модель. Для исследования закономерностей тепломассообмена при пожаре кабельной трассы в объеме гермозоны используется двумерная полевая математическая модель. Условия и допущения, применяемые для описанной выше модели выгорания кабельной трассы, справедливы и в данном случае. Решаются нестационарные двумерные дифференциальные уравнения законов сохранения массы, импульса и энергии для газовой среды (система уравнений Навье-Стокса) [5].

При моделировании пожаров наибольшее распространение получила к-ε модель [6].

Таблица 1

Теплофизические характеристики материалов модели

№	Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м С	C, Дж/кг С
1	Кабельное заполнение (пористая среда)	1850	0,3	1360
2	Стенки короба (сталь)	7800	30	400
3	Горячие газы	1,2	0,024	1006

В ней решаются два уравнения переноса, аналогичные уравнениям Навье-Стокса: одно для турбулентной кинетической энергии k и второе для вязкостной диссипации этой энергии ϵ во внутреннюю энергию жидкости. Уравнение переноса для k можно вывести из осредненных по времени уравнений сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho k}) + \overline{u_i} \frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\rho k}) = - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] - \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \beta \overline{\rho g} \frac{\mu_t}{Pr} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} - \overline{\rho \epsilon} \quad (1)$$

Далее при моделировании вводится предположение, что масштаб длины, связанный с большими энергосодержащими вихрями, определяется выражением

$$l = C_D \frac{k^{2/3}}{\epsilon}$$

и, таким образом,

$$\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \rho$$

где C_D и $C_\mu = C'_\mu C_D$ - эмпирические константы.

Уравнение переноса для ϵ можно записать в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho \epsilon}) + \overline{u_i} \frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\rho \epsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_B) - C_2 \overline{\rho} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

где C_1, C_2, C_3 и σ_ϵ - эмпирические константы.

Источниковые члены, обусловленные вязкостными напряжениями и плавучестью, определяются выражениями:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j};$$

$$G_B = -\beta \overline{\rho g} \frac{\mu_t}{Pr} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i}$$

где β - коэффициент объемного расширения, $1/K$;

- μ_t - турбулентная динамическая вязкость;
- Pr - число Прандтля;
- g - ускорение свободного падения, m/c^2 .

В данном случае применялась модель со следующими эмпирическими константами:

$$C_1=1,44; C_2=1,92; C_3=0,9; \sigma_k=1,3; \sigma_\epsilon=1 [6].$$

Начальные и граничные условия. Рассматриваемая задача решается в расчетной

области (рис. 1), представляющей часть вертикального поперечного сечения гермозоны с расположенными рядом со стеной двумя кабельными трассами.

Предполагается, что в начальный момент времени воздух в области гермозоны неподвижен и имеет температуру, равную $60^\circ C$:

$$T(x, y, 0) = 60^\circ C,$$

$$v_i(x, y, 0) = 0 \text{ м/с.}$$

На твердых границах для скорости воздуха задавались условия прилипания:

$$v_i(x, y, 0) = 0.$$

На входе воздуха в расчетную область принималось условие:

$$v_i(x, y, 0) = 0,$$

$$P = 105 \text{ Па.}$$

На выходе и на правой границе расчетной области:

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \Phi_i}{\partial y} = 0,$$

где Φ_i - одна из переменных в замкнутой системе уравнений Навье-Стокса.

В уравнениях сохранения энергии и массы [5] источники тепловыделения (количество теплоты, которое выделяется при сгорании топлива) S_h и массы S_m имеют вид:

$$S_h = \begin{cases} S_{h0}, & \tau \leq \tau_{зам} \\ Q \cdot v_{выг} / V, & T \geq T^*, \int_{\tau^*}^{\tau + \tau_m} S_h d\tau < Q \cdot \rho \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$S_m = \begin{cases} M / (V \cdot \tau_m), & S_h > 0 \\ 0, & S_h = 0 \end{cases}$$

где S_{h0} - мощность тепловыделения при коротком замыкании;

$\tau_{зам}$ - продолжительность короткого замыкания;

Q - теплота сгорания;

$v_{выг}$ - скорость выгорания, $кг/сек$;

V - объем кабельной массы;

τ^* - время достижения температуры T^* начала горения кабельной массы любой из частей рассматриваемого элементарного расчетного объема этой массы (в расчетах принималось $T^*=280^\circ C$);

τ_m - время выгорания элементарного объема кабельной массы;

M - масса погонного метра кабельной трассы.

Система уравнений Навье-Стокса и замыкающие их уравнения k - ϵ модели

турбулентности решались методом контрольных объемов [7] по явной конечно-разностной схеме. Реализация модели выполнялась в среде программы STAR-CD. Сетка неравномерная с четырехугольными элементами (13 562 элемента, 14 316 узлов). Шаг по времени определялся из условия Куранта [7].

Точность расчетов контролируется выполнением локального и интегрального законов массы и энергии в расчетной области.

Апробация предложенной модели выполнялась при расчетном анализе выгорания нижней кабельной трассы и определения ее теплового влияния на верхнюю с целью определения вида, параметров, и необходимости использования огнезащитных покрытий на коробах кабельных трасс.

Для построения обобщающих графических зависимостей выполнен ряд расчетов для вариантов согласно таблице 2. Более подробно остановимся на анализе одного из наиболее часто встречающихся в гермозонах энергоблоков украинских АЭС варианта расположения коробов с 40%-м заполнением нижнего короба кабелями и расстоянием 0,5 м между коробами (рис. 2-3).

Из рис.2 видно, что максимальные скорости в потоке горячих газов наблюдаются в районе нижних углов короба не горящей кабельной трассы (до 3,7 м/с). Это обуславливает высокие значения коэффициента теплоотдачи в данных местах и, как следствие, интенсивный прогрев угловых кабелей в верхней кабельной трассе. По этому принципу были выбраны точки мониторинга температур в верхней кабельной трассе - это геометрический центр контрольных кабелей, расположенных в левом и правом углах. По значениям температур в этих точках определялось максимальное значение температуры в кабель-

ной трассе, момент достижения которой является пределом огнестойкости.

На рис.3 показаны поля температур в области решения задачи для различных моментов времени

Таблица 2

Вар. №	Заполнение кабелями нижнего короба, %	Расстояние между коробами, м
1	80	0,1
2	80	0,5
3	80	1
4	40	0,1
5	40	0,5
6	40	1
7	20	0,1
8	20	0,5
9	20	1

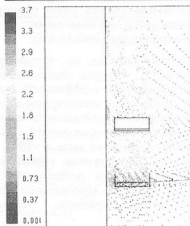


Рис.2. Векторы скоростей в воздушном пространстве гермозоны в районе 2-х коробов при выгорании кабельной массы нижнего для момента времени 60 мин.

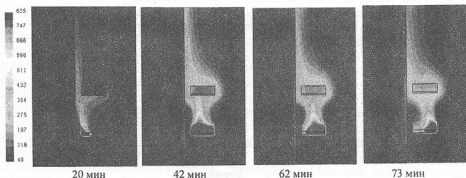


Рис.3. Поля температур в гермозоне в районе 2-х коробов при выгорании кабельной массы в нижнем для различных моментов времени (вариант: 40% заполнения кабелями, расстояние между коробами - 0,5 м)

По ним можно оценить динамику выгорания нижней кабельной трассы и прогрев верхней. Уровень максимальных значений температур горячих газов на выходе из короба составляет порядка 810...825°C, что соответствует литературным данным [4].

Для верификации предложенной модели по эмпирическим данным проводилось сравнение коэффициентов теплообмена, полученных при обтекании участка стены гермозоны потоком горячих газов, выходящих из короба. Расчёт коэффициента теплоотдачи при обтекании плоской пластины [6] производился по известной зависимости:

$$Nu_x = 0,0296 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr^{0,43},$$

где $Re_x = \frac{\bar{w} \cdot x}{\nu}$, \bar{w} - среднemasовая скорость;

- x - продольная координата, отсчитываемая от начала участка стены гермозоны, омываемого горячими газами;
- ν - кинематическая вязкость, м²/с.

Результаты расчётов по эмпирической зависимости [8], которые наиболее точно подходят для оценки коэффициента теплоотдачи от горячих газов стене гермозоны, дали удовлетворительное согласование (в пределах точности эмпирических зависимостей, обобщающих экспериментальные данные ~10%). Это позволяет сделать достаточно обоснованный вывод о применимости построенной CFD-модели для описания сопряженного теплообмена в системе "гермозона - кабельные трассы".

В результате расчетов получены (рис.4) зависимости температуры от времени в точках

T1 и T2 для верхней кабельной трассы (вариант 40%-го заполнения кабелями и расстояния 0,5 м между коробами).

Из рисунка видно, что T1 в левом углу верхнего короба нарастает быстрее и имеет более высокие значения по сравнению с температурой T2 в правом углу, что объясняется близостью расположения стены гермозоны и, как следствие, более интенсивным радиационным теплообменом. Максимальная температура достигается на 70-й минуте и равна 289°C.

Разработка номограмм для определения целесообразности использования и типа огнезащитного покрытия

В соответствии с действующим в Украине нормативным документом по пожарной безопасности кабельных трасс [9] «... при прокладке кабелей, не распространяющих горение, короба должны каждый покрываться по наружной поверхности огнезащитным составом огнестойкостью 1,5 часа». Под огнестойкостью кабельной трассы следует понимать способность сохранять функционирование любого из кабелей, размещенных в металлическом коробе, в условиях внешнего пожара. Предел огнестойкости кабельной трассы - показатель огнестойкости трассы, определяемый временем от начала огневого испытания при стандартном температурном режиме до наступления момента потери функционирования любого из кабелей, находящегося в металлическом коробе.

Время выгорания подбиралось в соответствии с требованием норм (90 минут).

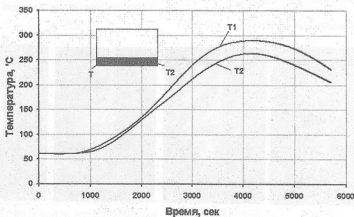


Рис. 4. Зависимости температуры от времени в точках T1 и T2 для верхней кабельной трассы (вариант 40%-го заполнения кабелями и расстояния 0,5 м между коробами, время выгорания 90 минут)

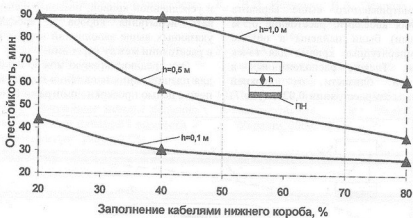


Рис. 5. Зависимость предела огнестойкости верхней кабельной трассы от расстояния между трассами и заполнения кабелями в нижней выгорающей трассе (без огнезащитного покрытия)

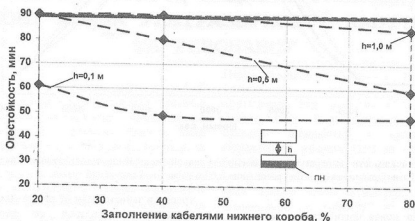


Рис. 6. Зависимость предела огнестойкости верхней кабельной трассы от расстояния между трассами и заполнения кабелями в нижней выгорающей трассе (верхняя кабельная трасса защищена вспучивающим покрытием SP-2A)

Предельная температура выхода из строя, по которой определялся предел огнестойкости, взята из эксперимента, проведенного УкрНИИ ПБ МЧС Украины [10] и равна 190 °С.

После обобщения результатов расчета вариантов согласно таблице 2 получены номограммы (см. рис.5-6), определяющие предел огнестойкости верхней кабельной трассы в зависимости от расстояния между трассами и пожарной нагрузки.

Для случая без огнезащитного покрытия (рис.5) из номограммы видно, что требование огнестойкости 90 минут удовлетворяется для случаев, когда расстояние между коробами более 1-го метра и пожарная нагрузка в нижней выгорающей трассе менее 40% заполнения кабелями от общего объема короба. В

остальных случаях кабельную трассу нужно защищать огнезащитным покрытием.

Если верхнюю кабельную трассу защищать вспучивающимся покрытием SP-2A (номограмма на рис.6), то требование огнестойкости выполняется для случаев, когда расстояние между коробами более 1-го метра и пожарная нагрузка соответствует диапазону от 0 до 40% заполнения кабелями от общего объема короба, а также для вариантов, когда расстояние между коробами более 0,5 метра и пожарная нагрузка соответствует диапазону от 0 до 20% заполнения кабелями от общего объема короба.

Использование предложенных выше номограмм на практике позволяет определять целесообразность применения и возможности защиты короба вспучивающимся покрытием SP-2A.

Для рассматриваемого выше варианта (40% заполнения кабелями, расстояние 0,5 м между коробами) были найдены в объеме гермозоны температурные кривые для точек (Тниз, Тправо, Тлево), расположенных в непосредственной близости от верхней кабельной трассы на расстоянии 0,02 м (рис.7)

и усредненной кривой, позволяющей имитировать испытания короба с кабелями для указанных выше заполнений короба кабелями и расстоянии между коробами.

Эту среднюю кривую можно использовать для планирования испытания короба в огневой печи с целью проверки номограмм (рис. 5-6).

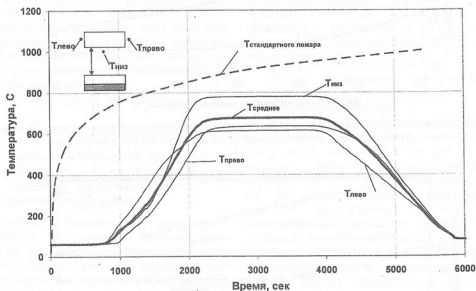


Рис. 7. Зависимости температуры от времени для кривой стандартного пожара, точек (Тниз, Тправо, Тлево), расположенных на расстоянии 0,02 м от верхней кабельной трассы

Выводы

1. Разработана новая физическая и математическая модель выгорания кабельной массы в металлическом коробе для определения теплового влияния горящей кабельной трассы на негорящую согласно предложенному сценарию пожара в гермозоне реактора АЭС. Особенностью модели является учет динамики объемного выгорания твердого топлива, что позволяет более точно моделировать развитие и скорость выгорания кабельной массы. Источником возгорания является короткое замыкание в одном из кабелей, расположенных в коробе.
2. Проведен анализ и обобщение результатов, полученных на численной модели определения теплового влияния при выгорании нижней кабельной трассы для реальных пожарных нагрузок. На основании полученных данных представлены номограммы, определяющие предел огнестойкости верхней кабельной

трассы в зависимости от расстояния между трассами и степени ее заполнения кабелями.

3. По результатам численного эксперимента получена усредненная температурная кривая реального пожара. Эту кривую можно использовать для планирования испытания короба в огневой печи с целью проверки номограмм.

Литература

1. Сох G., Kumar S. Computer Modelling Could Aid Designers at Early Stages// Fire, 1983, v.76, N=939, P. 158-159.
2. Круковский П.Г., Рассемакин А.Б., Полубинский А.С. Модель выгорания кабельной трассы в металлическом коробе.// Промышленная теплотехника, №3, том 27, 2005г., г. Киев, С.60-71.
3. Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С., Шевляков А.Н. Термогазодинамика пожаров в помещении. - М.: Стройиздат, 1988. - 448 с.

4. А.Н. Баратов. Пожаровзрывоопасность веществ и средства их тушения. М. 1990г. - 496с., том 1.
5. Cox G. Combustion Fundamentals of Fire. - London: Academic Press, 1995. - 476 p.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1987. - 840с.
7. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 152с.
8. В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. Теплопередача, М.: Энергоиздат, 1981. - 416с.
9. ПНАЭГ-9-027-91. Правила проектирования систем аварийного электроснабжения атомных станций.
10. Методика випробувань кабельних ліній на вогнестійкість. - К.: УкрНДІПБ МВС України, 2002. - 21с.