УДК 533.6,536.3

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОГРЕВА КОМПОЗИТНОЙ СТЕНКИ КАНАЛА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫМ ДВУХФАЗНЫМ ПОТОКОМ

© 2022 г. А. М. Руденко^{1, *}, В. В. Миронов¹, А. В. Колпаков¹

¹Государственный научный центр Российской Федерации — федеральное государственное унитарное предприятие "Исследовательский центр им. М.В. Келдыша", Москва, Россия *e-mail: arudenko61@mail.ru

> Поступила в редакцию 19.04.2021 г. После доработки 07.10.2021 г. Принята к публикации 15.10.2021 г.

Предложена методика расчета прогрева многослойной композитной стенки канала энергетической установки двухфазным высокоэнтальпийным потоком. Приведены результаты тестирования предложенной методики и примеры нестационарного расчета теплового состояния многослойной стенки. Методика учитывает изменение по времени температуры, давления и скорости течения двухфазного потока, а также изменение по времени геометрии стенки.

Ключевые слова: методика, энергетическая установка, теплообмен, излучение, высокоэнтальпийный поток, полидисперсный, двухфазный, пограничный слой, разностная схема, пиролиз, фильтрация

DOI: 10.31857/S000233102201006X

ВВЕДЕНИЕ

Результаты численных исследований теплового состояния теплонапряженных элементов конструкции современных и перспективных энергетических установок в высокоэнтальпийных двухфазных потоках в течение многих лет находят применение при создании теплозащитных материалов, ракетных двигателей и генераторов электроэнергии. В подавляющем большинстве прикладных задач имеется более или менее активный тепло- и (возможно) массообмен между газом и поверхностью, которую этот газ обтекает. Вследствие этого точное решение задачи теплопроводности в стенках проточного тракта требует сопряжения с решением газовой динамики.

Применительно к перспективным энергетическим установкам задача осложняется тем, что продукты сгорания твердого топлива содержат значительное количество частиц окислов металлов, которые при движении сталкиваются друг с другом, коагулируют или дробятся в результате соударений или под действием аэродинамических сил, осаждаются на стенки сопла и оказывают заметное влияние как на газовую динамику, так и на процессы тепло-массообмена на стенках.

В работе [1] предложена методика двумерного расчета прогрева стенки, включающая достаточно подробную модель термохимического разрушения поверхности. Однако данная методика не учитывает возможный пиролиз связующего композитных материалов. Кроме того, техническая реализация методики предполагает существенные ограничения на форму поверхности, что затрудняет практическое ее применение. В работе [2] построена одномерная модель пиролиза, фильтрации и термохимическо-



Рис. 1. Поверхность канала в безразмерных координатах.

го разрушения стенки. Область применения данной методики ограничена задачами, в которых двумерные эффекты, связанные с переносом тепла вдоль стенки, являются пренебрежимо малыми. Кроме того, не учитываются двумерные эффекты, возникающие в зонах контакта материалов с существенно разной теплопроводностью.

В связи с этим разработка универсальной двумерной методики расчета прогрева является достаточно актуальной.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Рассматривается прогрев (охлаждение) осесимметричной (или плоской) многослойной конструкции под действием тепловых потоков различной природы. Некоторые расположенные на поверхности материалы в процессе работы конструкции постепенно разрушаются, изменяя ее границы.

Методика ограничивается рассмотрением следующих конфигураций: многослойное плоское или многослойное осесимметричное тело – рис. 1.

На границах рассматриваемого тела возможны следующие условия теплообмена:

1. Конвективный теплообмен с высокотемпературным, турбулентным потоком газовой смеси (основной теплообмен). Он задается коэффициентами теплообмена, рассчитываемыми программой пограничного слоя на "крупных" шагах по времени, в процессе прогрева между этими шагами используются приближенные соотношения, полученные на основании закономерностей турбулентного пограничного слоя;

2. Теплоизолированные участки (внешний тепловой поток равен нулю);

3. Радиационный тепловой поток.

Часть материалов, расположенных на поверхностях с теплообменом, под действием высоких температур могут разрушаться (уноситься) во время работы, в связи с этим именно эти границы конструкции могут быть подвижными. В качестве приводящих к уносу материалов процессов рассматриваются:

 поверхностное химическое взаимодействие углерода стенки с окисляющими компонентами газового потока с образованием газообразных продуктов;

 на внешней поверхности тела допускается процесс абляции материалов под действием высоких тепловых потоков, описываемый на основе понятия об эффективной энтальпии. Внутри рассматриваемая область обычно состоит из произвольно расположенных областей разнообразных материалов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Полная система уравнений для численного моделирования прогрева стенки канала включает:

— уравнения газовой динамики для совершенного газа в цилиндрической системе координат в двумерной постановке;

- уравнения движения частиц конденсированной фазы продуктов сгорания;

- уравнения двухфазной газовой динамики;

- уравнения сжимаемого турбулентного пограничного слоя в интегральной форме;
- уравнение переноса излучения в двухфазной смеси продуктов сгорания;
- уравнение теплопроводности для стенки сопла;
- уравнение фильтрации пиролизных газов;

 уравнения, описывающие унос массы материала стенки из-за взаимодействия с продуктами сгорания и термодеструкции связующего материала.

Математическая модель прогрева

Перенос тепла внутри стенки из углепластика, в рамках рассматриваемой модели, определяется теплопроводностью по твердому телу, термодеструкцией связующего (сток тепла) и фильтрацией газов к поверхности в предположении полного теплового равновесия между твердым телом и газом (конвективный член).

Уравнения теплопроводности и фильтрации записываются в цилиндрических координатах. Переход к плоской задаче моделируется добавлением величины R_0 , много большей характерного размера тела, к координатам *r* поверхности.

В цилиндрических координатах прогрев такой конструкции описывается нестационарным двумерным уравнением теплопроводности:

$$c_{m}\rho_{m}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\lambda_{m}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{m}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + Q_{fT} + Q_{fH};$$

$$Q_{fT} = -c_{f}\rho_{f}u_{D}\frac{\partial T}{\partial x} - c_{f}\rho_{f}v_{D}\frac{\partial T}{\partial r}; \quad \text{теплообмен с пиролизными газами}$$

$$Q_{fH} = -\rho_{0}\frac{d\varepsilon}{dt}\left[\frac{H}{\chi} + c_{f}T\left(1 - \frac{\rho_{f}}{\rho_{0}}\right)\right]; \quad \text{тепло термодеструкции} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{m}}{\rho_{0}} \quad \text{или} \quad \frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{1}{\rho_{0}}\frac{d\rho_{m}}{dt} - \text{пористость}$$

$$u_{D} = -\frac{k_{f}}{\mu_{f}}\frac{\partial p_{f}}{\partial x};$$

$$v_{D} = -\frac{k_{f}}{\mu_{f}}\frac{\partial p_{f}}{\partial r};$$

где *c_m*, *ρ_m*, *λ_m* – удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности материалов, зависящие от температуры, пористости и координаты;

H – тепловой эффект разложения связующего (термодеструкции);

*c*_f – удельная теплоемкость газообразных продуктов термодеструкции;

- $\rho_f = \frac{P_f}{R_f T}$ плотность продуктов термодеструкции;
- χ доля связующего вещества, обращающаяся в газ при термодеструкции;

ρ₀ – исходная плотность материалов;

 $\lambda_m = \frac{\lambda(T) - \lambda_0}{1 - k} \varepsilon + \lambda_0 - \kappa o \Rightarrow \phi \phi$ ициент теплопроводности коксующегося материала, *k* - коксовое число;

 $\lambda(T)$ — зависимость коэффициента теплопроводности материала от температуры при предельном для данной температуры коксовании;

 $\lambda_0 = \lambda(T_0)$ – теплопроводность свежего материала (при начальной температуре). Граничное условие:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha \left(T_e - T_w \right) + Q_R + Q_f;$$

 Q_R – радиационный тепловой поток;

Q_f – тепловой поток от пиролизных газов.

Численное интегрирование уравнения (1) выполняется по неявной разностной схеме с граничными условиями третьего рода:

$$left \cdot T_{i-1,j} + center \cdot T_{i,j} + right \cdot T_{i+1,j} + top \cdot T_{i,j+1} + bot \cdot T_{i,j-1} = rightPart.$$

Где:

$$\begin{bmatrix} left = \frac{\Delta t}{4h^2} (\lambda_{x_{i+1,j}} - \lambda_{x_{i-1,j}} - 4\lambda_{x_{i,j}} - [2hC_f\rho_f U_D]); \\ bot = \frac{\Delta t}{4h^2} (\lambda_{r_{i,j+1}} - \lambda_{r_{i,j-1}} + (\frac{2}{j} - 4)\lambda_{r_{i,j}} - [2hC_f\rho_f V_D]); \\ center = (\rho_{i,j}C_{i,j} + 8\frac{\Delta t}{4h^2}(\lambda_{x_{i,j}} + \lambda_{r_{i,j}})) \\ top = \frac{\Delta t}{4h^2} (-\lambda_{r_{i,j+1}} + \lambda_{r_{i,j-1}} - (\frac{2}{j} + 4)\lambda_{r_{i,j}} + [2hC_f\rho_f V_D]); \\ right = \frac{\Delta t}{4h^2} (-\lambda_{x_{i+1,j}} + \lambda_{x_{i-1,j}} - 4\lambda_{x_{i,j}} + [2hC_f\rho_f U_D]); \\ rightPart = (\rho_{i,j}C_{i,j}T_{i,j}^{k-1} + [Q_{fq_{i,j}}]\Delta t) \end{bmatrix}$$

Математическая модель фильтрации пиролизных газов

.

При нагревании углепластика при температуре порядка 500—600 К начинается заметное разложение связующего. Этот процесс является сложным и многостадийным. В сопловом блоке реализуются очень высокие тепловые потоки в стенку и, соответственно, темпы нагрева поверхности. В результате все стадии процесса термодеструкции внутри материала происходят в достаточно узкой зоне (практически во фронте), что позволяет описывать протекающие процессы единой обобщенной реакцией.

На основе закона Аррениуса [3...5] изменение плотности материала в процессе термодеструкции связующего можно описать уравнением:

$$-\frac{d\rho_m}{dt} = k_0 \chi \rho_0 \left(\beta - \varepsilon/\chi\right) e^{-E_m/RT} = k_0 \left(\rho_m - k\rho_0\right) e^{-E_m/RT}.$$
(2)

Вместо плотности можно определять пористость материала є или долю газообразных продуктов h ($\varepsilon = h$):

$$\varepsilon = \int_{0}^{t} \chi k_0 \left(\beta - \varepsilon/\chi\right) e^{-E_m/RT} dt.$$
(3)

Модель фильтрации пиролизных газов строится на основе уравнения неразрывности для совершенного газа:

$$\frac{\partial \rho_{\nu}}{\partial t} + \operatorname{div}\left(\rho_{\nu}V_{\nu}\right) = M^{\bullet}; \tag{4}$$

и закона Дарси:

$$V_D = -\frac{K_f}{\mu_f} \operatorname{grad} p_f, \tag{5}$$

где K_f – тензор проницаемости; p_f – давление газа в порах; V_D – среднерасходная скорость для объемной плотности, т.е. – $V_D = V_V$.

Используя уравнение состояния совершенного газа и уравнение (5), уравнение неразрывности (4) можно преобразовать:

$$\frac{\partial P_f^2}{\partial t} - \frac{k_f P_f T}{\mu_f} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{T} \frac{\partial P_f^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{T} \frac{\partial P_f^2}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left(\frac{1}{T} \frac{\partial P_f^2}{\partial r} \right) \right) - \frac{k_f P_f}{\mu_f \varepsilon} \left(\frac{\partial P_f^2}{\partial x} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial P_f^2}{\partial r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) =$$

$$= 2R_f P_f \left(T \frac{M^{\bullet}}{\varepsilon} + \rho_f \frac{\partial T}{\partial t} \right).$$
(6)

Здесь: M^{\bullet} – массоприход пиролизных газов; $M^{\bullet} = \rho_0 \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_0}\right) \frac{d\varepsilon}{dt}$.

Уравнения (1)-(6) являются замкнутой системой уравнений, описывающей прогрев материалов, подверженных термодеструкции.

Массовая скорость химического взаимодействия углеродных материалов, обтекаемых горячим окисляющим газовым потоком, определяется зависимостью

$$\dot{m}_{w} = \frac{\alpha}{c_{p}} \frac{\sqrt{\left(\frac{M_{C}}{M_{e}}\Omega + 1\right)^{2} + 4B_{m}\Omega - \left(\frac{M_{C}}{M_{e}}\Omega + 1\right)}}{2\Omega}.$$

Или после очевидного преобразования:

$$\dot{m}_{w} = 2 \frac{\alpha}{c_{p}} B_{m} \frac{1}{\left(\sqrt{\left(\frac{M_{C}}{M_{e}}\Omega + 1\right)^{2} + 4B_{m}\Omega} + \left(\frac{M_{C}}{M_{e}}\Omega + 1\right)\right)}$$

 $B_m = M_C \sum_i C'_{i,e} = \frac{M_C}{M_e} \sum_i r_i$ – окислительный потенциал газовой смеси на внешней

границе пограничного слоя.

Здесь:

 M_e – молекулярный вес газовой смеси на внешней границе пограничного слоя;

M_C – молекулярный вес углерода;

r_i — мольные доли окисляющих компонент газовой смеси на внешней границе пограничного слоя;

$$\Omega = \frac{\alpha}{c_p} \frac{RT_w}{k_o P_w M_C} e^{E/RT};$$

*P*_w – давление среды вблизи стенки;

 T_{w} – температура поверхности стенки;

<u>*α*</u> – коэффициент тепломассообмена.

 c_p

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ

Для численного интегрирования системы уравнений газа используется стационарный аналог нецентральной конечно-разностной схемы Мак-Кормака [6], второго порядка точности. Интегрирование системы уравнений фракции частиц осуществлялось по модели взаимопроникающих континуумов с помощью неявной разностной схемы, имеющей также второй порядок точности [7, 8]. Во входном сечении используется условие скоростного и температурного равновесия между газовой фазой и частицами.

Расчет параметров турбулентного пограничного слоя, энтальпии восстановления и коэффициента тепло-массообмена выполняется на основе решения интегральных уравнений пограничного слоя [9]. Расчет нестационарного теплового состояния и уноса материалов стенки выполняются сопряженно для найденного предварительно поля течения невязкого газа с частицами

Для численного решения уравнения (6) (уравнение фильтрации) используется конечноразностный метод на регулярной прямоугольной разностной сетке. Решение систем разностных уравнений выполняется по неявной разностной схеме с прогонкой по строкам и столбцам.

Алгоритм решения – следующий:

 из решения системы уравнений течения двухфазной среды при заданной температуре стенки в стационарной постановке определяются поля течения и конвективный тепловой поток в стенку;

– по известному полю концентрации частиц и полю температуры частиц конденсированной фазы определяется поток излучения в стенку. Радиационная компонента теплового потока определялась в P₁ – приближении метода сферических гармоник по известным параметрам течения и температуре стенки с учетом рассчитанных по теории Ми спектральных зависимостей оптических свойств частиц дисперсной фазы [10];

 – определяются распределения температуры в сечениях по длине стенки и параметры разрушения материала для заданных моментов времени (коэффициент тепломассообмена пересчитывается в зависимости от текущей температуры поверхности стенки);

 температура поверхности с предыдущего приближения используется для расчета параметров течения двухфазной среды и радиационного потока в последующих приближениях.

ТЕСТИРОВАНИЕ

Результаты нестационарного двумерного расчета (после достижения стационарного распределения) сравниваются с приближенным решением одномерной стационарной задачи для тонкой пластины, охлаждаемой излучением, с заданными температурами на торцах. То есть с приближенным решением уравнения:

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{\sigma}{h} T^4$$
, где *h* – толщина пластины.

С граничными условиями первого рода. Значения температур в граничных узлах задавались равными установившемуся значению температуры на соответствующей границе двумерного расчета.

В двумерном расчете тепловой поток слева и справа определялся как: $Q = \sigma (T_{\infty}^4 - T_W^4) \approx 13.6 \text{ MBt/m}^2.$

Температура T_{∞} – два варианта – T_{∞} = 4000 К и 2000 К.

Ширина пластины -L = 0.1 м.

Толщина пластины — два варианта — h = 0.001 и h = 0.0005 м.

Теплоотвод вниз и вверх $Q = \sigma T_W^4$.



Рис. 2. Распределение температур в пластине.

Для моделирования плоского случая в осесимметричной двумерной задаче был задан большой радиус нижней поверхности R = 10 м.

Количество сеточных узлов: по длине 1000, по радиусу – 5.

На рис. 2 представлено расчетное стационарное распределение температуры в пластине. Сравнение профилей температуры по длине пластины показано на рис. 3 и 4.

Различие между аналитическим одномерным решением и двумерным расчетом не превышает 2%, что связано с наличием поперечного градиента температуры в пластине.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Ниже приводятся результаты расчета прогрева и эрозии стенки канала, показанного на рис. 1. Конструкция состоит из нескольких деталей, изготовленных из разных материалов. Детали (рис. 1) пронумерованы. Соответствующие номерам деталей материалы представлены в следующем списке.

Материалы стенки:

- 1. Углепластик
- 2. Углерод-углерод
- 3. Сталь
- 4. Сталь
- 5. Резина
- 6. Стеклопластик
- 7. Углепластик

Величины теплофизических параметров материалов обращенных в поток (материалы 1 и 2) моделируют свойства углепластиков и углерод-углеродных композиционных материалов:

✓ Материал 1 – Плотность ρ = 1400 кг/м³; Коксующийся; Теплопроводность – линейно возрастает от 1.5 Дж/м/К до 15 Дж/м/К; Теплоемкость – линейно возрастает от 1000 Дж/кг/К до 4000 Дж/кг/К.

✓ Материал 2 – Плотность ρ = 1900 кг/м³; Теплопроводность – линейно уменьшается от 80 Дж/м/К до 40 Дж/м/К; Теплоемкость – линейно возрастает от 1000 Дж/кг/К до 2500 Дж/кг/К.



Рис. 3. Сравнение с аналитическим решением.



Рис. 4. Сравнение с аналитическим решением.

Расчеты теплофизических и газодинамических параметров двухфазного потока, натекающего на стенку, проводились для изменяющегося по времени давления торможения и температуры торможения $T_0 = 3400$ К. Зависимость давления торможения от времени показана на рис. 5.



Рис. 5. Зависимость давления от времени.



Рис. 6. Расчетное распределение температуры.

Параметры смеси и соответствующие параметры теплообмена пересчитывались с интервалом 0.5 с. Расчет проводился до момента времени 50 с.

На рис. 6 показано расчетное распределение температуры на последний момент времени и соответствующий этому моменту контур поверхности — на рис. 7. Видны два участка повышенного уноса в области стыка материалов обусловленный ростом коэффициента теплообмена. Расчетные значения эрозионного уноса показаны на рис. 8. Динамика уноса контура канала в критическом сечении и в точках стыка материалов показана на рис. 9. На рис. 10–11 показано распределение давления пиролизных газов и прококсованный слой материала. Следует обратить внимание на то, что расчетное давление пиролизных газов в области пиролиза (граница коксового слоя)



Рис. 7. Расчетный контур поверхности в сравнении с исходным.



Рис. 8. Расчетная величина уноса поверхности.

достигает величины порядка 200 атмосфер. То есть, перепад давления между материалом и поверхностью превышает 100 атмосфер. Очевидно, что перепад давления зависит главным образом от экспериментально определяемой величины проницаемости материала (кокса). В данном случае проницаемость материала, согласно [2], принималась равной 10⁻¹⁶ [м²] и проницаемость кокса – 10⁻¹² [м²].



Рис. 9. Динамика разгара в критическом сечении и в точках стыка материалов.



Рис. 10. Давление пиролизных газов.



Рис. 11. Граница коксового слоя.

выводы

Предложена численная методика расчета прогрева многослойной стенки канала энергетической установки двухфазным высокоэнтальпийным потоком. В результате решения уравнений теплопроводности и фильтрации в осесимметричной постановке определяются тепловые потоки и нестационарное тепловое состояние многослойной конструкции из композитных материалов, подверженных термодеструкции. Приведены результаты тестирования предложенной методики и примеры нестационарного расчета теплового состояния многослойной стенки. Методика учитывает изменение по времени температуры давления и скорости течения двухфазного потока, а также изменение по времени геометрии стенки.

Обозначения: *u*, *v* – компоненты вектора скорости \vec{U} частиц; *x*, *y* – осевая и радиальная координаты; показатель адиабаты для газа ("замороженный"); C_g , C_p – удельные теплоемкости газа и материала частиц; приведенный коэффициент сопротивления и коэффициент теплообмена частиц соответственно; ρ_g – плотность газа; P_g – давление; T_g – температура; γ_g – показатель адиабаты для газа ("замороженный").

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Волкова Л.И., Волков Н.Н. Расчет двумерного теплового состояния и разрушения элементов соплового блока РДТТ. Авиакосмическая техника и технология. М., 2003. № 3. С. 37–44.
- 2. Волкова Л., Волков Н., Губертов А., Миронов В. Математическое моделирование тепломассообмена и тепловой защиты в двигателях. Двигатель. 2000. № 1(7). С. 33–35.
- 3. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
- 4. *Орлов Б.В., Мазинг Г.Ю.* Термодинамические и баллистические основы проектирования двигателей на твердом топливе". М.: Машиностроение, 1979. 391 с.

- 5. Волкова Л.И., Волков Н.Н., Губертов А.М., Миронов В.В. Тепловая защита ракетных двигателей на твердом топливе // Изв. АН. Энергетика. 2004. № 5. С. 19–32.
- 6. Васенин И.М., Рычков А.Д. Численное решение задачи о течении смеси газа и частиц в осесимметричном сопле Лаваля // Изв. АН СССР, МЖГ. 1973. № 5.
- 7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.; Ч. II. 360 с.
- 8. Васенин И.М., Архипов В.А., Бутов В.Г., Глазунов А.А., Трофимов В.Ф. Газовая динамика двухфазных течений в соплах. Томск: Изд-во ТГУ, 1986. 262 с.
- 9. Борисов Д.М., Шураев Ю.А., Миронов В.В., Руденко А.М. Метод расчета теплового состояния сопловых насадков энергодвигательных установок // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 5. С. 104–109.
- Гурина И.Н., Волкова Л.И., Волков Н.Н., Ковалкин С.С., Колпаков А.В., Миронов В.В. Использование численного моделирования радиационно-конвективного теплообмена. РНКТ 6. 2014. С. 1198.

Technique for Calculation Nonstatic Heating of Compositum Wall in High-Enthalpy Two-Phase Flow in Power Channel

A. M. Rudenko^{*a*}, *, V. V. Mironov^{*a*}, and A. V. Kolpakov^{*a*}

^a The State Scientific Center of Russian Federation – Federal State Unitary Enterprise "Research Center named after M.V. Keldysh", Moscow, Russia *e-mail: arudenko61@mail.ru

Computer calculation technique to model multilayer composite channel wall of power plant heating by a two-phase high-enthalpy flow is proposed. Test results for the technique and examples for non-stationary calculation of the thermal state of a multilayer wall are presented. Time dependence of pressure, temperature and flow rate of two-phase flow, as well as the time variation of the wall geometry are taken into account.

Keywords: technique, power plant, heat exchange, radiation, high-enthalpy flow, poly disperse, two phase, boundary layer, difference scheme, pyrolysis, filtration