

И. Н. БУДИЛОВ, Ю. В. ЛУКАЩУК

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ МЕТОДАМИ ПРЯМОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Приводятся результаты исследования теплового состояния топки-подогревателя, работающего на сероводородном газе, с целью определения причины его прогара. Исследование выполнено методом компьютерного моделирования тепловых и газодинамических процессов, а также процессов горения, протекающих в подогревателе, с использованием пакета STAR-CD. *Компьютерное моделирование; горение; теплоперенос; газовая динамика*

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при создании новых и модификации существующих изделий и конструкций все чаще применяется компьютерное моделирование с использованием различных САД-пакетов [1]. Такой подход позволяет оптимизировать конструкцию без существенных затрат за счет возможности расчета большого количества различных вариантов и выбора из них лучшего. Современные пакеты численного моделирования, такие как ANSYS, LS-DYNA, STAR-CD и др., позволяют адекватно решать различные задачи механики деформируемого твердого тела, теплопереноса, гидрогазодинамики в областях со сложной геометрией. Однако эти пакеты могут эффективно применяться не только на этапе конструирования, но и на остальных стадиях жизненного цикла изделия, например, для оценки его текущего состояния в соответствии с реальными условиями эксплуатации или для определения причин выхода изделия из строя.

В настоящей статье приводятся результаты исследования теплового состояния топки-подогревателя, использующей в качестве рабочего агента сероводородный газ. В ходе эксплуатации подогревателя произошел перегрев и прогар его стенки. Определение причины прогара и явилось основной целью исследования.

Для идентификации теплового состояния корпуса топки-подогревателя требуется адекватное моделирование условий его нагрева за счет протекающих внутри аппарата реакций горения. Поэтому в качестве инструмента был выбран «тяжелый» гидродинамический пакет STAR-CD, который позволяет моделировать как сложные термогидродинамические процессы в движущихся реагирующих средах, так и процессы теплопереноса в твердых телах, граничащих с этими средами. Для создания геометрической модели подогревателя был использован геометрический препроцессор пакета ANSYS.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Наиболее теплонапряженным элементом топки-подогревателя является его топочная камера, в боковой поверхности которой вблизи днища и произошел прогар. По этой причине именно топочная камера и стала объектом моделирования.

Топочная камера располагается горизонтально, является цилиндрической с эллиптическим днищем и имеет две горелки, расположенные кососимметрич-

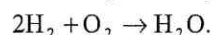
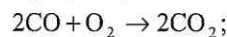
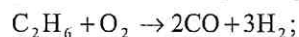
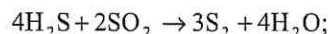
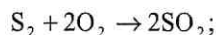
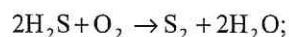
но. Ее принципиальная схема приведена на рис. 1 (показана верхняя половина).

В соответствии со схемой рис. 1 в пакете ANSYS была создана трехмерная геометрическая модель, размеры которой задавались на основе детальных чертежей топки-подогревателя. Поскольку топочная камера является кососимметричной, модель воспроизводит лишь ее верхнюю половину. На основе геометрической модели средствами ANSYS была создана конечно-элементная модель, которая была экспортирована в пакет STAR-CD и превращена в конечно-объемную модель (рис. 2). Модель содержит 50746 ячеек и включает как область движения газов, так и твердотельные элементы конструкции топки.

Моделировались следующие процессы, одновременно протекающие в топочной камере:

- 1) горение сероводородного газа в условиях недостатка окислителя (воздуха);
- 2) движение газа, воздуха и продуктов сгорания в горелках и топочной камере;
- 3) перенос тепла от газа к стенке топки по смешанному механизму конвективного и радиационного теплообмена;
- 4) теплопередача в многослойной стенке корпуса и днище топки.

Моделирование процессов горения было выполнено путем явного задания в STAR-CD основных реакций полного и неполного окисления. Горючими элементами сероводородного газа являются сероводород и этан. Горение происходит в условиях недостатка кислорода (в качестве окислителя используется воздух). Полная схема химических превращений при таком горении весьма сложна и включает несколько десятков реакций. Однако для целей исследования теплового состояния объекта достаточно рассмотреть лишь наиболее существенные из них с точки зрения тепловыделения. В результате для моделирования процесса горения были оставлены следующие реакции:



Сероводородный газ и воздух подаются в горелке по разным каналам (см. рис. 1), т. е. не перемеша-

ны. Поэтому для описания процесса горения в пакете была выбрана модель диффузионного горения в смешивающихся турбулентных потоках [2].

Движение газа в топочной камере предполагалось турбулентным, при этом была использована модель турбулентности $k-\epsilon$ для больших чисел Рейнольдса.

D – наружный диаметр топочной камеры,

T_w – температура стенки топки,

T_f – температура атмосферного воздуха,

g – ускорение свободного падения,

$\beta = \frac{1}{T_f}$ – термический коэффициент объемного

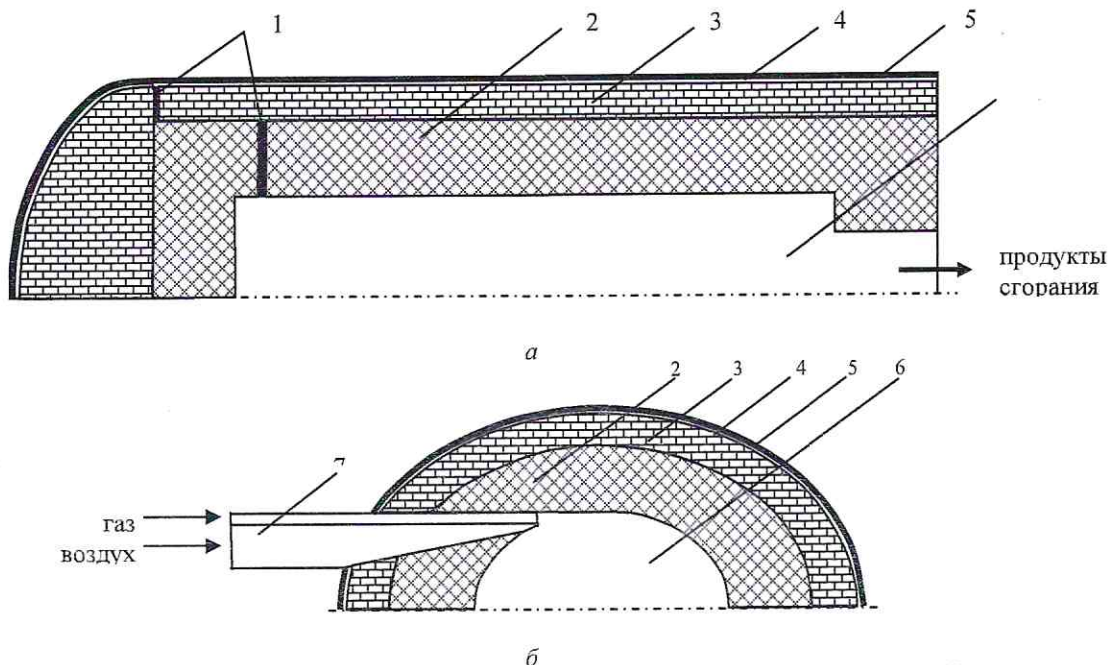


Рис. 1. Схема топочной камеры: а - продольное сечение б - поперечное сечение в зоне горелок:

1 – температурный шов (каолиновая вата); 5 – корпус топки (сталь); 2 – теплоизолятор (муллитокорунд); 6 – топочное пространство; 3 – теплоизолятор 2 (шамотный легковес); 7 – горелка; 4 – теплоизолятор 3 (муллитокремнезистый картон)

При горении большая часть тепла передается стенке топки излучением. Поэтому моделировался радиационный теплообмен между пламенем и стенкой топки, а также взаимный теплообмен между различными внутренними твердыми поверхностями топки, нагретыми до разных температур.

Расчет температуры в многослойной стенке топки производился путем решения классического трехмерного уравнения теплопроводности. При этом на наружной поверхности топки задавались граничные условия третьего рода, коэффициент теплоотдачи α в которых рассчитывался по критериальной зависимости для свободной конвекции вокруг горизонтального цилиндра [3]:

$$Nu = 0.135Ra^{1/3},$$

где $Nu = \frac{\alpha D}{\lambda}$ – число Нуссельта,

$$Ra = \frac{\beta g D^3 (T_w - T_f) Pr}{\nu^2} \text{ – число Рэлея,}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{ – число Прандтля,}$$

λ, ν, a – соответственно коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности воздуха вблизи наружной поверхности топки,

расширения.

Поскольку температура наружной поверхности стенки топки T_w заранее была неизвестна и подлежала определению в ходе расчета, коэффициент теплоотдачи α подбирался итерационно.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для исследования был выбран самый теплонеприятный режим работы подогревателя, соответствующий максимальному расходу сероводородного газа и воздуха (100 % нагрузки) согласно проекту.

Параметры максимального режима:

– расход сероводородного газа	175 м ³ /ч
– расход воздуха	463 м ³ /ч
– коэффициент избытка воздуха	0,894

в сероводородном газе:

H ₂ S	94 %
C ₂ H ₆	4 %
H ₂ O	2 %

в воздухе:

O ₂	20,6 %
N ₂	77,8 %
H ₂ O	1,6 %

– температура на входе в горелку сероводородного газа	120 °С
воздуха	120 °С

Таблица 1

	T, K	$a_0 \cdot 10^{-2}$	a_1	$a_2 \cdot 10^3$	$a_3 \cdot 10^7$	$a_4 \cdot 10^{10}$
H ₂ S	273-1000	7.509569	1.364049	-2.521018	29.391290	-11.831240
	1000-4000	7.050142	0.936018	-0.348063	0.610234	-0.040599
C ₂ H ₆	273-1000	4.053133	4.294090	1.601971	-34.858720	12.710070
	1000-4000	13.374230	3.835644	-1.262968	1.863713	-0.099717
H ₂ O	273-1000	15.643450	1.603056	-2.935163	32.187100	-11.577650
	1000-4000	12.342350	1.411668	-0.403241	0.554727	-0.029522
O ₂	273-1000	8.347609	0.292935	-0.149532	3.413617	-2.278180
	1000-4000	9.606770	0.159400	-0.032706	0.046124	-0.002933
N ₂	273-1000	9.794714	0.418147	-1.176794	16.751270	-7.259473
	1000-4000	8.690030	0.441823	-0.168797	0.299810	-0.020053
SO ₂	273-1000	4.300086	1.874821	-1.966849	12.974920	-4.000697
	1000-4000	8.415323	0.593349	-0.241562	0.452357	-0.031537
CO ₂	273-1000	3.782141	1.052633	-0.897225	4.324600	-1.140203
	1000-4000	6.825921	0.237025	-0.106578	0.204782	-0.014555

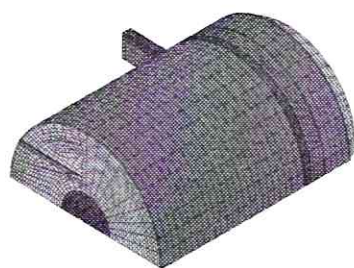


Рис. 2. Конечно-объемная модель топочной камеры

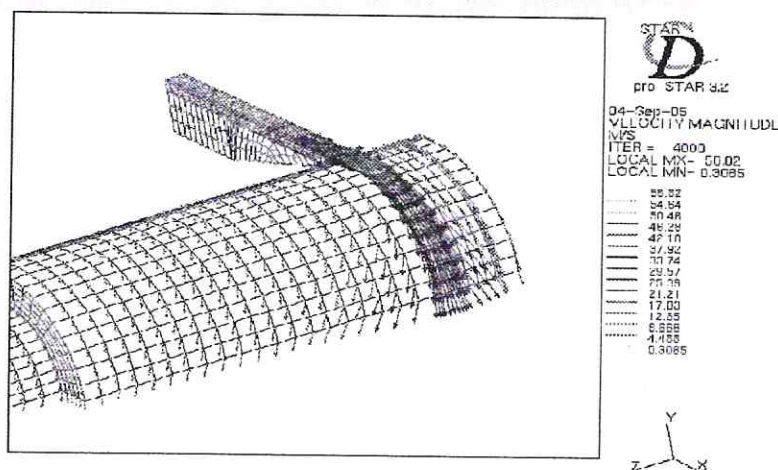


Рис. 3. Векторное поле скорости газов в топке

В результате скорость сероводородного газа на входе в горелку составила 25,3 м/с, а воздуха – 7,6 м/с.

Теплофизические свойства (плотность ρ , коэффициент теплопроводности λ и теплоемкость c) теплоизоляционных материалов стенок корпуса задавались в соответствии с ГОСТ:

– муллитокорунд (ГОСТ 24704-81)

$$\rho = 2540 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\lambda(t) = 2.54 \cdot 10^{-7} t^2 - 7.08 \cdot 10^{-4} t + 2.79 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}},$$

$$c(T) = \frac{33000}{T^2} + 7 \cdot 10^{-5} T + 1.1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}};$$

– шамотный легковес (ГОСТ 390-83)

$$\rho = 1850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\lambda(t) = 5.8 \cdot 10^{-4} t + 0.84 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}},$$

$$c(T) = \frac{30100}{T^2} + 8.7 \cdot 10^{-5} T + 1.03 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}};$$

– муллитокремнезистый картон (ГОСТ 24704-81)

$$\rho = 2230 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\lambda(t) = 2.56 \cdot 10^{-4} t + 1.78 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}},$$

$$c(T) = \frac{29000}{T^2} + 8.7 \cdot 10^{-5} T + 1.04 \frac{\text{Дж}}{\text{кг К}}.$$

Для возможности расчета тепловыделения в топке задавалась теплоемкость продуктов сгорания, которая аппроксимировалась полиномом четвертой степени

$$c_p(T) = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4.$$

Коэффициенты полинома представлены в табл.1.

На плоскости симметрии модели задавались периодические граничные условия, на выходе из топки по газу задавались специальные условия STAR-CD типа outlet, на торцевых поверхностях теплоизоляционных слоев задавалось нулевое значение теплового потока.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис. 3 представлено векторное поле скорости газа в топочной камере. Из рисунка видно, что внутри топки течение газа носит спирально-вихревой (циклонный) характер с преобладанием тангенциальной составляющей скорости, что объясняется соответствующим расположением горелок.

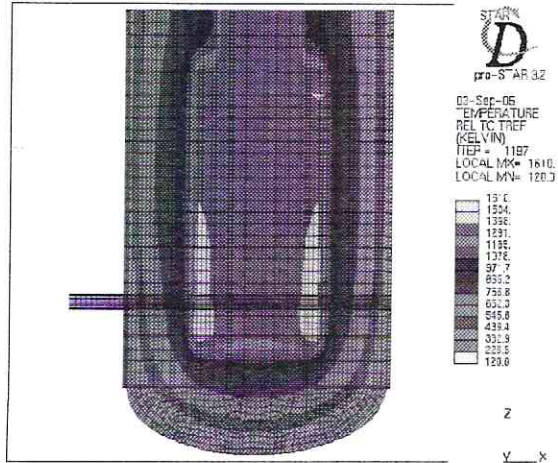


Рис. 4. Температурное поле топки, центральное продольное сечение, °С

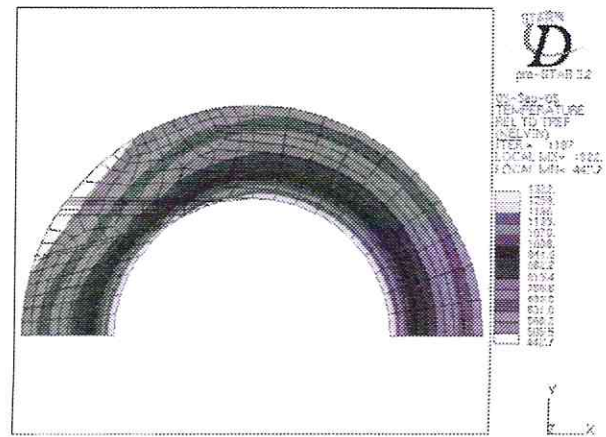


Рис. 6. Температурное поле во внутреннем температурном шве, °С

Абсолютные значения скорости лежат в диапазоне 10...30 м/с.

После выхода из горелок и воспламенения происходит расширение газовой струи, причем в зоне стенки топки, расположенной напротив горелки, струя достигает температурного шва.

На рис. 4 показано температурное поле в центральном сечении топки. Из рисунка видно, что зона максимальных температур газа располагается между поперечным сечением аппарата в зоне горелки и дном, вблизи боковой стенки и температурного шва. При этом температура в этой зоне достигает 1600°С. На рис. 5 показано температурное поле наружной поверхности топки. Видно, что зона максимальных температур находится в центральной части топки.

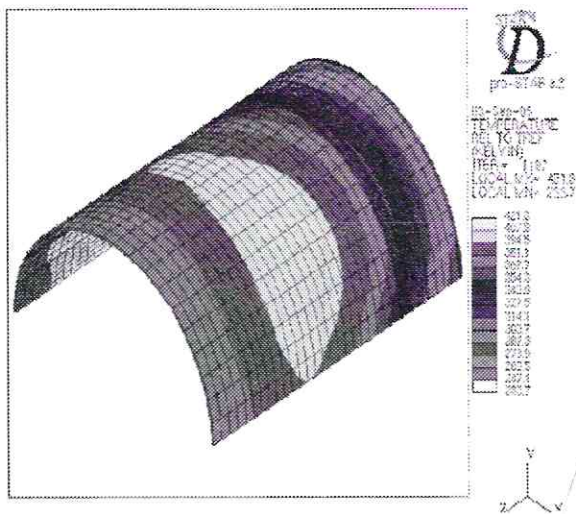


Рис. 5. Температурное поле наружной поверхности топки

На рис. 6 приведено распределение температуры в зоне внутреннего температурного шва.

Зона максимальных температур располагается напротив горелки, при этом максимальные значения температуры достигают 1320°С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного моделирования теплового состояния топки-подогревателя можно заключить, что внутренний температурный шов находится в зоне максимальных значений температуры газа в топке, которая на максимальном режиме достигает значений порядка 1600 °С. Струи воспламенившегося газа, расширившиеся после выхода из горелок, задевают внутреннюю поверхность температурного шва. Максимальная температура поверхности внутреннего температурного шва достигала в проведенных расчетах значений 1320..1355°С, что превышает рабочую температуру материала шва (1100°С). В случае негерметичности температурного шва в его окрестности велика вероятность возникновения прогара.

Таким образом, результаты выполненных численных расчетов свидетельствуют о конструктивной недоработке топки-подогревателя, заключающейся в неправильном взаимном расположении горелок и температурного шва, вследствие чего последний находится в повышенном теплонапряженном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FEM GmbH. Сборник трудов Пятой конференции пользователей программного обеспечения CAD – FEM GmbH. М. : Полигон, 2005.
2. Михеев, В. П. Газовое топливо и его сжигание / В. П. Михеев. Л. : Недра, 1966. 328 с.
3. Леонтьев, А. И. Теория теплообмена / под ред. А. И. Леонтьева. М. : Высшая школа, 1979. 495 с.