

Приборы и оборудование

УДК 662.99:621.78

Максимук А.Б.¹, Олабин В.М.¹, Григорьев А.А.²

¹ Институт газа НАН Украины, Киев

² Институт кибернетики НАН Украины, Киев

Исследования гидравлической устойчивости работы многосопловой погружной горелки в режиме барботажа

Разработана методика и выполнены экспериментальные исследования на холодной модели условий незаливания донной погружной многосопловой горелки в режиме барботажа. Приведены результаты исследований и построена математическая модель процесса. Проведен анализ степени влияния разных режимных и конструктивных факторов на целевую функцию.

Ключевые слова: погружная горелка, барботажа, гидравлическое взаимодействие.

Розроблено методику та проведено експериментальні дослідження на холодній моделі умов незаливання донного зануреного багатосоплового пальника у режимі барботажа. Наведено результати досліджень та побудовано математичну модель процесу. Проведено аналіз ступеня впливу різних режимних та конструктивних факторів на цільову функцію.

Ключові слова: занурений пальник, барботажа, гідравлічна взаємодія.

Для отопления барботажных плавильных печей в Институте газа НАН Украины разработаны многосопловые погружные горелки, позволяющие сжигать газоздушную смесь в слое барботируемого расплава.

Все модификации горелок имеют целевую камеру горения, на боковых стенках которой попарно навстречу друг другу расположены сопловые отверстия, соединяющие камеру с распределительными каналами газа и воздуха или их смеси.

На рис.1 представлена конструкция одной из модификаций погружной горелки. Первоначально горелки устанавливали в ванне выходом из камеры горения вниз. В этом случае камера горения хорошо защищена от заливания рас-

плавом, однако при этом весь корпус горелки находился в расплаве. Водоохлаждаемый кожух горелки во время работы в расплаве покрывался мелкими поперечными трещинами, затем появлялись свищи, и горелка выходила из строя.

В настоящее время горелки монтируются в днище плавильной ванны печи так, чтобы корпус находился вне расплава, а выходное отверстие камеры горения было направлено вверх, как это показано на рис.1. Такое размещение позволяет значительно продлить срок службы горелок. Однако в камеру горения стал проникать расплав, который частично заполнял рециркуляционную зону камеры, тем самым уменьшая ее полезный объем и снижая стабили-

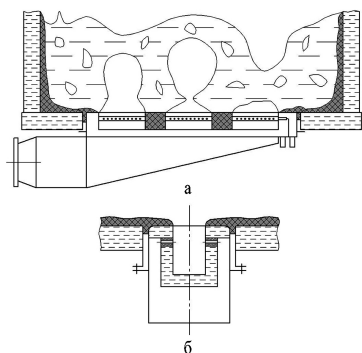


Рис.1. Схема погружной целевой горелки (а), размещение горелки в подине (б).

зационную способность, что вело к неустойчивой работе горелки и снижению эффективности использования газового топлива.

Цель настоящей работы — установление влияния режимных факторов и конструктивных геометрических характеристик камеры горения на гидродинамическую устойчивость работы горелки.

Экспериментальная установка и методика измерений

Исследования проводились на экспериментальной установке (рис.2, а), состоящей из вертикальной цилиндрической колонны и присоединенной к ее днущу модели погружной горелки.

На рис.2, б представлена схема модели погружной горелки. Торцевые стенки модели изготовлены из оргстекла. В боковых стенках попарно, навстречу друг другу расположены сопла, через которые подавался компрессорный воздух.

В качестве модельной жидкости применяли поочередно воду, динамитный глицерин, водоглицериновую смесь. Расход воздуха измерялся счетчиком РГ-250, высота весового уровня жидкости в колонне измерялась уровнеммером, нечувствительным к пульсационным колебаниям

уровня при барботаже. Фактический полезный объем рециркуляционной зоны определялся измерением расстояния от оси воздушных сопел до уровня остаточной жидкости в камере горения. Схема движения газов в камере горения и форма свободной поверхности остаточной жидкости представлены на рис.2, в.

Опыты проводились следующим образом. Колонна заполнялась модельной жидкостью до уровня 0,7 м, затем устанавливали заданный расход воздуха и определяли глубину вытеснения жидкости, после чего расход воздуха увеличивали и повторяли цикл измерений. По достижении полного вытеснения остаточной жидкости из объема рециркуляционной зоны все измерения повторялись при изменении расхода воздуха в сторону уменьшения по приведенному выше циклу.

Основные параметры менялись в следующих диапазонах:

Расход воздуха V , м ³ /ч	– 30–180
Ширина камеры горения B , мм	– 27; 37; 52
Количество воздушных сопел N , шт.	– 4; 6; 10
Диаметр воздушных сопел D , мм	– 5; 6,5; 8; 9,5
Глубина рециркуляционной зоны от оси сопел до дна камеры горения A , мм	– 28; 52; 100
Длина камеры горения L , мм	– 125

Меняли давление воздуха над слоем жидкости в колонне, а также проверяли влияние изменения вязкости модельной жидкости (вода, динамитный глицерин, водоглицериновая смесь).

На основании анализа результатов постановочных экспериментов были определены факторы, не оказывающие заметного влияния на глубину вытеснения: глубина камеры A ; давление в колонне; вязкость жидкости. В дальнейшем в качестве модельной жидкости применяли воду, давление в колонне — атмосферное. Глубина рециркуляционной зоны во всех опытах была 100 мм.

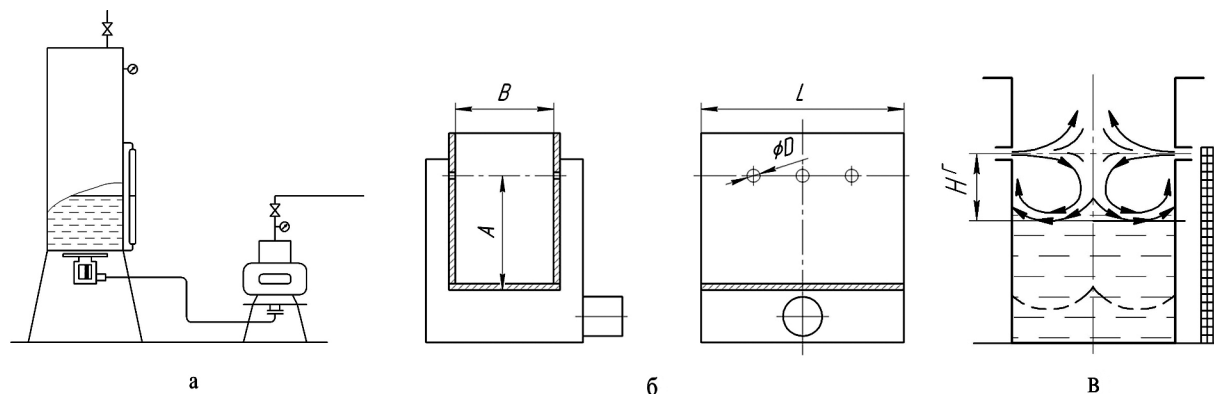


Рис.2. Схема экспериментальной установки (а) и модели погружной целевой горелки (б), а также схема движения газов и форма свободной поверхности остаточной жидкости в камере горения при неполном ее вытеснении (в).

Результаты экспериментов и их математическая обработка

В ходе исследований установлено, что наибольшее влияние на объем вытесняемой из рециркуляционной зоны жидкости имеет расход воздуха V .

На рис.3 представлены данные об изменении глубины вытеснения H в зависимости от расхода воздуха при разном количестве сопел. Видно, что зависимость $H \Gamma = f(V)$ имеет вид возрастающей степенной функции параболического типа.

С увеличением количества сопел при постоянных значениях остальных параметров глубина вытеснения жидкости уменьшается, что свидетельствует о том, что влияние падения скорости истечения воздуха сказывается сильнее, чем влияние улучшения равномерности его подвода.

На рис.4 представлена зависимость глубины вытеснения жидкости от ширины щели при

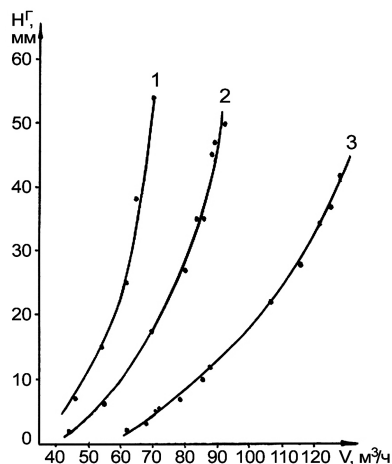


Рис.3. Зависимость глубины вытеснения жидкости от расхода воздуха при разных количествах сопел N , шт.: 1 — 4; 2 — 6; 3 — 10 ($D = 5 \text{ мм}$, $B = 52 \text{ мм}$, $L = 125 \text{ мм}$).

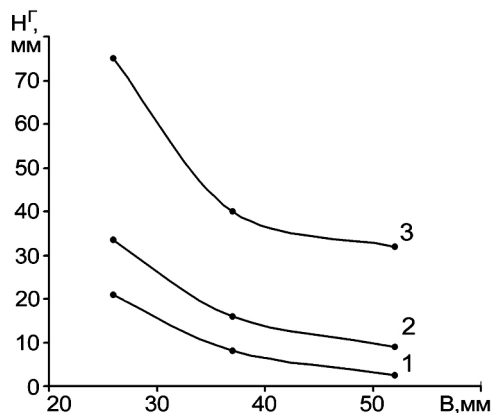


Рис.4. Зависимость высоты вытеснения жидкости от ширины щели B при разных расходах воздуха V , $\text{м}^3/\text{ч}$: 1 — 45; 2 — 58; 3 — 87 ($D = 5 \text{ мм}$, $N = 6 \text{ шт.}$, $L = 125 \text{ мм}$).

разных значениях расхода воздуха. Видно, что зависимость $H \Gamma = f(B)$ имеет вид убывающей степенной функции с отрицательным показателем.

При проведении экспериментов периодически наблюдались единичные залповые прорывы жидкости в рециркуляционную зону камеры горения. В большинстве случаев они проходили по торцевым стенкам и через межсопловые промежутки. Впоследствии прорвавшаяся жидкость снова вытеснялась.

Обработка экспериментальных данных заключалась в процедуре построения математического описания исследуемого процесса.

При разработке и оптимизации технологических процессов широко используют методы теории идентификации, базирующиеся на статистическом описании процессов на основе результатов экспериментальных исследований [1, 2].

Выбор вида параметрической модели в принципе произволен и проводится на основе соображений удобства и простоты вычислений, а также особенностей экспериментальных данных.

Сущность построения многофакторных математических моделей гидрогазодинамических процессов заключается в совместном анализе влияния физико-технологических параметров процесса и конструктивных факторов на устойчивость камеры горения к заливанию.

При построении моделей использовались методы корреляционно-регрессионного анализа.

При решении задачи исследований аппроксимирующая функция имела вид мультипликативной:

$$Y = A_0 X_1^{A_1} X_2^{A_2} \dots X_n^{A_n}, \quad (1)$$

где A_0 — коэффициент; $A_1, A_2 \dots A_n$ — показатели степени.

Выбор модели вида (1) обуславливался тем, что линейная модель оказалась неадекватной, а ее расширение с добавлением квадратичных членов, отражающих взаимодействие между независимыми переменными несмотря на повышение точности потребовало значительного увеличения количества экспериментальных данных, не исключая при этом возможности искажения модели.

Выбранная модель содержит минимальное число параметров, с ее помощью легко можно связать степень влияния каждой из независимых переменных с одним параметром.

Параметрической эмпирической модели свойственны следующие ограничения: надежна только для экспериментально изученной совокупности условий; отражает, но не раскрывает механизм изучаемого процесса.

Для принятия решений по статистическим многофакторным моделям применительно к поставленной цели исследований недостаточно иметь информацию, связанную лишь со статически оптимальным решением. Был проведен анализ модели на чувствительность, связанный с исследованием возможных изменений исходной модели.

Анализ чувствительности дает возможность оценить степень влияния каждого фактора на выходные параметры, определить наихудшие режимы работы камеры горения, оценить стабильность выходных параметров при наличии дестабилизирующих факторов и выбрать конструктивно-технологические факторы в качестве регулировочных при решении задач оптимизации, а также позволяет определить, какие регулировочные факторы и в каком направлении следует изменять в первую очередь.

При построении эмпирических моделей была применена система стохастического моделирования, реализующая тонкие статистические методы. Система, кроме стандартного метода наименьших квадратов, реализует несколько модификаций робастных методов, рассчитывает коэффициенты авторегрессии.

На этапе постановочных экспериментов с помощью компьютерного анализа полученных данных уточнялась методика исследований, отсеивались малозначимые факторы, выбирался вид статистического анализа, наилучшим образом учитывающий особенности экспериментальных данных.

Был выбран один из робастных методов [3], позволяющий достаточно точно оценивать параметры при наличии грубых ошибок, которые несут в себе опасность при исследовании классических оптимальных статистических процедур, вплоть до совершенной их непригодности.

С помощью робастной статистики достигаются следующие цели: описание структуры наилучшей подгонки массива данных; определение отклоняющихся значений данных (резко выделяющихся наблюдений) или, если это необходимо, выделяющихся структур; определение и предупреждение о появлении значений данных,

Статистические характеристики уравнения

R ² = 0,916		Rc ² = 0,899		MAPE = 4,14		LOG (Hchel)
PAR.	ESTIMATE	ST. DEV.	T	BC, %	VARIABLE	
1	-0,82937	0,10331	8,03	13,3	LOG (Nchel)	
2	-1,27093	0,10810	11,76	20,5	LOG (Dschel)	
3	-1,62969	0,06231	26,16	12,2	LOG (Bchel)	
4	2,08743	0,05807	35,95	54,4	LOG (Vchel)	
5	9,79230	0,19980	18,98		CONST	
SE	0,39019	DW 2,28	RHO(1)	-0,14	1-24	

оказывающих сильное влияние (точки разбалансировки); выявление непредвиденных сериальных корреляций и построение оценок корреляционного параметра аппроксимирующего автомодельного процесса для уточнения доверительных интервалов.

Получена модель вида

$$H\Gamma = 44,35829 V^{2,08743} B^{-1,62969} \times D^{-1,27093} N^{-0,82937}. \quad (2)$$

Статистические характеристики уравнения приведены в таблице.

Для удобства анализа расход воздуха V заменен выражением, содержащим скорость выхода воздуха из сопел W :

$$V \rightarrow 0,785 D^2 N W.$$

После подстановки в уравнение (2) и приведения подобных членов получено выражение, принятое в качестве рабочего:

$$H\Gamma = 2,12068 W^{2,08743} B^{-1,62969} \times D^{2,90393} N^{1,25806}. \quad (3)$$

Полученное уравнение позволяет определить объем зоны рециркуляции камеры горения, свободный от жидкости, в зависимости от режимных и конструктивных факторов.

Количественно степень влияния конструктивно-технологических факторов на выходные параметры можно оценить с помощью коэффициентов влияния и коэффициентов эластичности [4].

Коэффициент влияния A_{y_j} определяется как частная производная от рассматриваемого уравнения функциональной зависимости по каждому j -му фактору:

$$A_{y_j} = \partial Y / \partial X_j.$$

Коэффициент эластичности удовлетворяет условию

$$B_{yx_j} = A_{yx_j} (X_j / Y_{\text{ном}}),$$

где $X_j / Y_{\text{ном}}$ — номинальные значения факторов и выходного параметра.

Коэффициент эластичности показывает, на сколько процентов изменится (увеличится при $\partial Y/\partial X_j > 0$ или уменьшится при $\partial Y/\partial X_j < 0$) выходной параметр при увеличении факторного признака X_j на 1 %.

Рассчитаем коэффициенты эластичности при следующих номинальных значениях факторов, входящих в состав модели для водоохлаждаемой камеры горения по уравнению (3): $B = 40$ мм; $W = 100$ м/с; $D = 10$ мм; $N = 6$ шт.

Для уравнения (3):

$$A_{H^{\Gamma}B} = 2,411; A_{H^{\Gamma}W} = 2,47;$$

$$A_{H^{\Gamma}D} = 17,19; A_{H^{\Gamma}N} = 12,41.$$

При номинальных значениях факторов $H^{\Gamma} = 59,22$ мм, тогда

$$B_{H^{\Gamma}W} = 4,17; B_{H^{\Gamma}B} = 1,628;$$

$$B_{H^{\Gamma}D} = 2,9; B_{H^{\Gamma}N} = 1,258.$$

Формируем матрицу коэффициентов из $B_{H^{\Gamma}X_j}$, характеризующую чувствительность к регулированию:

$$(H^{\Gamma}) \begin{matrix} X_1(W) & X_2(B) & X_3(D) & X_4(N) \\ Y_1[4,17; & 1,628; & 2,9; & 1,258]. \end{matrix}$$

Наибольшие значения 4,17; 2,9; 1,628, то есть параметр наиболее чувствителен к факторам и регулировочным элементам W , D и B .

Перенос результатов моделирования на промышленное оборудование производится на основе выводов работ [5, 6] об идентичности полей динамического давления струй равного импульса.

Расчеты показали, что в условиях производства при подогреве воздуха на горение в рекуператоре до 350 °С и при нормальной нагрузке на горелку по смеси (2750 м³/ч) обеспечивается глубина вытеснения $H^{\Gamma} = 190$ мм при заложениях в конструкции 65 мм. Без заливания стабилизационной полости горелки, например, при останове струи и прекращении загрузки шихты в печь допустимо снижение нагрузки на горелку на 35 %.

Выводы

Получена математическая модель, позволяющая определить объем рециркуляционной зоны камеры горения, свободной от жидкости, в зависимости от величины режимных и конструктивных факторов. Модель позволяет установить допустимый диапазон изменения нагрузки без заливания горелки.

Список литературы

1. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. — М. : Наука, 1984. — 320 с.
2. Попков Ю.С., Киселев О.Н., Петров Н.П., Шмудьян Б.Л. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем. — М. : Энергия, 1976. — 440 с.
3. Хампель Ф., Ронchetti Э., Рауссеу П., Штаэль В. Робастость в статистике. — М. : Мир, 1989. — 512 с.
4. Статистический словарь / Гл. ред. М.А.Королев. — М. : Финансы и статистика, 1989. — 623 с.
5. Марков Б.Л., Кирсанов А.А. Физическое моделирование в металлургии. — М. : Металлургия, 1984. — 119 с.
6. Баптизманский В.Н., Паниотов Ю.С. К вопросу холодного моделирования продувки металла // Изв. вузов. Черн. металлургия. — 1989. — № 6. — С. 26–30.

Поступила в редакцию 26.10.11

Maksymuk O.B.¹, Olabin V.M.¹, Grigoriev O.A.²

¹ The Gas Institute of NASU, Kiev

² The Cybernetics Institute of NASU, Kiev

The Investigation of Hydraulic Operational Stability of Multinozzle Submerged Combustion Burner in Bubbling Regime

The method and experimental studies of cold model investigation of submerged combustion burner hydraulic interaction with bubbling melting bath are developed. The investigations results and the process mathematical model are given. The analysis of different regimes influence degree and the influence of construction factors on criterion function is performed.

Key words: submerged combustion burner, bubbling, hydraulic interaction.

Received October 26, 2011