

УДК 621.165

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕЧЕНИЯ ОДНОФАЗНОЙ И ДВУХФАЗНОЙ РАБОЧИХ СРЕД В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН

И.Е. Аннопольская

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*
Контактный тел.: 8 (0572) 95-95-74
E-mail: anna@ipmach.kharkov.ua

А.С. Ковалев

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*
Контактный тел.: 8 (0572) 95-95-43

А.А. Тарелин

Доктор технических наук, профессор, руководитель
отдела общетехнических исследований в энергетике*
Контактный тел.: 8 (0572) 94-27-44
E-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua

*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного
НАН Украины
г. Харьков

Наведено методику та результати ідентифікації параметрів математичних моделей (ММ) аеродинамічного потоку в елементах енергетичних установок. В подобицях розглянуто проблему ідентифікації по експериментальним даним параметрів ММ пари, що нерівноважно конденсується в проточній частині турбіни

Ключові слова: ідентифікація, математична модель, аеродинамічні розрахунки, конденсація

Приведены методика и результаты идентификации параметров математических моделей (ММ) аэродинамического потока в элементах энергетических установок. Подробно рассмотрена проблема идентификации по экспериментальным данным параметров ММ неравновесно конденсирующегося пара в проточной части турбины

Ключевые слова: идентификация, математическая модель, аэродинамические расчеты, конденсація

Methodic and identification parameters results of mathematical models (MM) for aerodynamic flow in energy units elements are presented. The identification parameters MM problem for no equilibrium condensation of wet steam flow in turbines using experimental data is considered in details

Key words: identification, mathematical model, aerodynamic calculations, condensation

1. Введение

При усложнении и детализации математического описания реальных процессов повышению уровня сходимости расчета и эксперимента препятствует внесение в модель неопределенностей в виде неточно известных коэффициентов, не вполне обоснованных допущений и т.д. Эти недостатки могут быть устранены путем идентификации математической модели по экспериментальным данным.

Целью идентификации является получение адекватной ММ, обеспечивающей минимум (в пределах заданных отклонений) расхождений между данными испытаний исследуемого объекта и результатами расчета по модели. Известно, что наиболее конструктивные результаты могут быть получены при решении задач идентификации в узком смысле, т.е. с заданной структурой модели, за счет уточнения ряда наименее достоверных параметров путем их вариации в выбранном диапазоне изменения. При этом структура мате-

матической модели определяется объектом исследования и степенью детализации (паровая турбина или газотурбинный двигатель в целом, цилиндр низкого давления, ступень, направляющий аппарат и т.д.)

Обычно испытания энергетических машин и их элементов проводятся на различных режимах с измерением возможно большего количества параметров (откликов). На этих же режимах производится расчет по модели. После соответствующей обработки результатов эксперимента суть задачи идентификации ММ сводится к минимизации т.н. «невязок» - разницы между экспериментальными и расчетными значениями контролируемых параметров и характеристик.

Следовательно, задача идентификации представляет задачу одно- или многокритериальной оптимизации (поиск минимума одной «невязки», их суммы, или одновременная минимизация всех «невязок»), и ее решение может быть достигнуто с использованием современных математических методов поиска оптимальных решений при соответствующей постановке задачи: выборе критериев качества, варьируемых параметров и ограничений.

Варьируемые параметры, корректируемые в процессе идентификации (независимые переменные), контролируемые параметры и характеристики (критерии идентификации), их диапазоны отклонения, вектор «невязок» выбираются для каждого исследуемого объекта.

Для решения задач параметрической идентификации в ИПМаш им. А.Н. Подгорного НАН Украины разработана методика и программный комплекс, ее реализующий - система Optimum [1,2]. Она позволяет в едином информационном пространстве решать задачи многоцелевой и многоуровневой оптимизации параметров и характеристик, а также их идентификации по экспериментальным данным, представленным в числовом, программном или графическом виде.

Отличительной особенностью разработанного подхода является решение задачи параметрической идентификации без каких-либо преобразований математической модели объекта, т.е. расчет критериев идентификации, невязок, параметров и характеристик установки ведется по тем же алгоритмам, что и при реальном проектировании, с сохранением традиционных взаимосвязей и последовательностей.

С использованием Optimum, совместно с ГП «Ивченко – Прогресс» была проведена идентификация параметров ММ газотурбинного двигателя АИ-25ТЛ по экспериментальным данным.

В качестве варьируемых параметров, корректируемых в процессе идентификации (независимых переменных), выбирались коэффициенты моделирования характеристик узлов двигателя и коэффициенты полных потерь скорости и давления.

Критериями идентификации являлись основные характеристики двигателя: расход топлива, импульс тяги, давление за компрессорами, расход воздуха, температура газов перед турбинами, частота вращения роторов и т.д.

По результатам идентификации была создана ММ двигателя АИ-25ТЛШ [2], описывающая его характеристики во всем диапазоне режимов работы и условий эксплуатации самолета. Проведенные по ней численные исследования показали возможность увеличения

ресурса без превышения максимально-допустимых значений температуры газов и частот вращения роторов.

Сопоставление некоторых критериев исходной и идентифицированной ММ АИ-25ТЛШ представлено на рис. 1, 2.

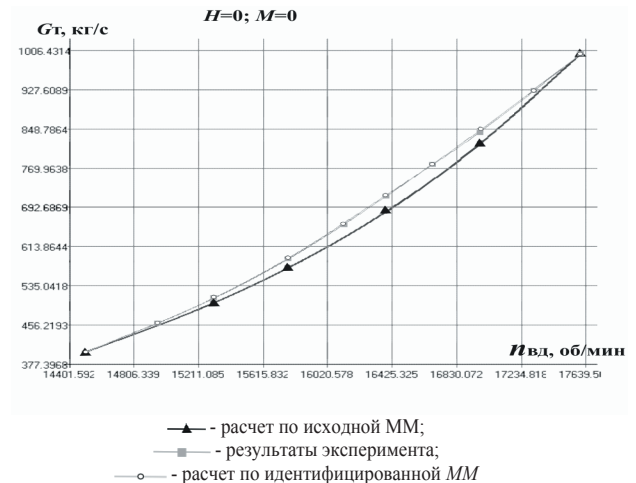


Рис. 1. Изменение расхода топлива двигателя АИ-25ТЛ (АИ-25ТЛШ)

Из анализа приведенных зависимостей следует, что исходная ММ давала существенное отклонение от экспериментальных данных, а результаты, полученные по идентифицированной ММ, совпадают с экспериментом в пределах 0,5...1%.

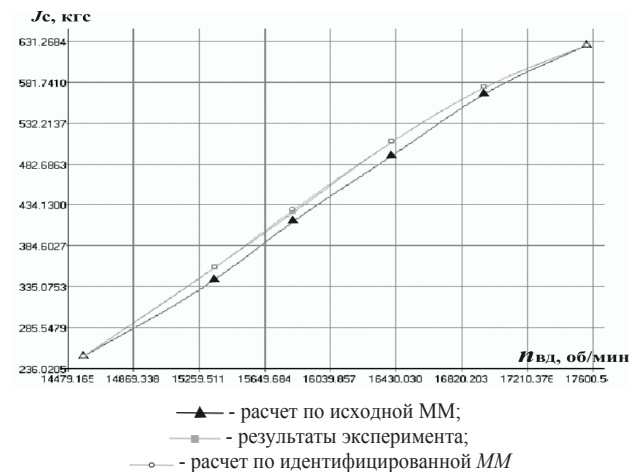


Рис. 2. Изменение импульса тяги двигателя АИ-25ТЛ (АИ-25ТЛШ)

Особый интерес представляет идентификация ММ, отражающих сложные термогазодинамические процессы, происходящие в проточной части цилиндра низкого давления паровых турбин в зоне фазового перехода.

Несмотря на многочисленные исследования в области влажно-паровых турбин [3 – 8], вопрос расширения пара в этой зоне до настоящего времени не потерял актуальности. Исследования в области влажного пара в основном были направлены на изучение закономерностей и влияния различных факторов на процесс

фазового перехода и исследований неравновесного расширения [6, 8]. Процесс расширения пара в области между линией насыщения и зоной Вильсона носит неравновесный характер. Этот процесс сопровождается нарастающим переохлаждением пара. Метастабильное состояние пара, возникающее в результате неравновесного расширения, может приводить к скачкам конденсации и конденсационной нестационарности [4, 6, 8].

При рассмотрении процесса расширения пара в зоне фазового перехода во влажно-паровых ступенях турбины необходимо учитывать весь комплекс физических явлений, а также возникающие при этом отличия реального процесса от равновесного, возрастающие потери от влажности, изменение расходных характеристик решеток во влажном паре. Кроме того, необходимо знать дисперсный состав и траектории движения влаги (или твердых частиц) в потоке, что позволяет определять условия каплеударной или абразивной эрозии лопаток, области интенсивного коррозионного воздействия, сепарационные характеристики скоростных влагоотделяющих устройств и ловителей твердых частиц и т. д. Очень важно также уметь точно определять как место, так и интенсивность спонтанного скачка конденсации. Для учета неравновесности и кинетики протекающих процессов требуются специальные методы расчета.

Для углубленного изучения данного вопроса необходимы как экспериментальные, так и расчетные исследования. Механизм процесса конденсации может быть изучен только на базе теории фазовых превращений. Термодинамическая неравновесность высокоскоростных потоков конденсирующегося и влажного пара основана на общей теории нуклеации Френкеля [9].

При создании математической модели течения неравновесно конденсирующегося пара в канале произвольной формы приняты следующие предположения:

1) какие бы кинетические процессы ни происходили (конденсация, испарение), скольжение фаз относительно друг друга отсутствует (односкоростная модель);

2) исследуются процессы в области относительно небольших влажностей ($h < 0,3$), когда объемом, занимаемым каплями, по сравнению с объемом пара можно пренебречь;

Для принятых допущений давление смеси P с большой степенью точности можно принять равным давлению паровой фазы, так как [5]

$$P = \beta_1 P_1 + \beta_2 P_2,$$

где β_1 – объемная концентрация паровой фазы; P_1 – давление паровой фазы; β_2 – объемная концентрация жидкой фазы; P_2 – давление жидкой фазы; причем $\beta_2 \ll 1,0$.

Аналогично можно показать, что плотность смеси с большой степенью точности можно определить как

$$\rho = \rho_1 \gamma^{-1},$$

где ρ_1 – плотность паровой фазы; $\gamma = 1 - h_s$ – массовая концентрация пара; h_s – массовая концентрация влаги, вызванная спонтанной конденсацией.

Внутренняя энергия смеси по свойству аддитивности может быть записана в таком виде:

$$e = \gamma e_1 + (1 - \gamma) e_2,$$

где $e_1 = P[(k-1)\rho_1]^{-1} + \xi_1$ – внутренняя энергия паровой фазы; $e_2 = C_2 T_2 + \xi_2$ – внутренняя энергия конденсированной фазы; k – отношение теплоемкостей пара; C_2 – теплоемкость жидкой фазы; T_2 – температура жидкой фазы; ξ_1 и ξ_2 – постоянные для фиксированного давления величины, которые определяются свойствами вещества.

Будем также считать, что паровая фаза подчиняется уравнению состояния пара

$$P_1 = z \rho_1 R T_1,$$

где z – коэффициент сжимаемости; R – газовая постоянная.

Используя уравнение энергии при наличии неравновесных фазовых превращений следует помнить, что энергия смеси в данном случае уже не является величиной, однозначно определяемой температурой T и давлением P . Она зависит еще и от концентрации конденсированной фазы.

В случае расширения неравновесно конденсирующегося пара систему газодинамических уравнений необходимо дополнить кинетическими уравнениями конденсации (испарения). Общее кинетическое уравнение, описывающее произвольный релаксационный процесс, имеет вид

$$\frac{dh_i}{dt} = f(h_i, P, T)$$

Здесь h_i – релаксационный параметр, характеризующий систему в процессе перехода из неравновесного состояния в равновесное. Это уравнение справедливо и для процессов, сопровождающихся внутренними фазовыми превращениями в замкнутой системе. В нашем случае h_i может быть массовой концентрацией жидкой фазы h_s , вызванной спонтанной конденсацией.

Правая часть уравнения кинетики (6), которое определяет скорость фазовых превращений, т. е. скорость изменения массовой концентрации жидкости на спонтанно образовавшихся каплях h_s , в этом случае имеет вид

$$f(h_s, P, T) = \bar{\omega}_s = \frac{4}{3} \pi \rho_2 r_c^3 \frac{I}{\rho} + \frac{4}{3} \pi \rho_2 \int_{r_c}^{\infty} r^2 f(r) \dot{r} dr,$$

где ρ_2 – плотность жидкой фазы; r_c – радиус капли критического размера; I – скорость образования центров конденсации в пересыщенном паре (скорость ядрообразования); r – радиус капли; $f(r)$ – функция распределения капель по размерам; $\dot{r} = dr/dt$ – скорость роста (испарения) капель.

Скорость спонтанного образования новых центров конденсации можно определить [5] по формуле

$$I = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left[\exp\left(-K_{\text{cor}} \frac{4\pi\sigma}{3k_b T_1} r_c^2\right) \right] \frac{1}{\rho_2} \frac{P_1}{k_b T_1} \sqrt{\frac{\sigma \mu}{N_A}}. \quad (1)$$

Здесь σ – коэффициент поверхностного натяжения; k_b – постоянная Больцмана; μ – вес одного моля воды; N_A – число Авогадро, K_{cor} – коэффициент коррекции.

Скорость роста (испарения) каплей можно определить по формуле Герца-Кнудсена

$$\dot{r} = \frac{\alpha_k P_1}{\rho_2 \sqrt{2\pi R T_1}} \left[1 - \frac{P_s(T_2)}{P_1} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \right], \quad (2)$$

где α_k – коэффициент конденсации; $P_s(T_2)$ – давление насыщения при температуре капли T_2 .

Вывод уравнения основан на балансе энергий, поэтому скорость роста (испарения) каплей не зависит от их радиуса.

Произведем для уравнений кинетики конденсации преобразования, аналогичные проведенным в [5], и получим полную систему дифференциальных уравнений расчета течения влажного пара с учетом неравновесной спонтанной конденсации

$$\frac{\partial}{\partial t} f + \frac{\partial}{\partial x} F_x + \frac{\partial}{\partial y} F_y = F_r, \quad (7)$$

где f, F_x, F_y, F_r – вектор-столбцы

$$f = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_x \\ \rho u_y \\ E \\ \rho(\Omega_s)_0 \\ \rho(\Omega_s)_1 \\ \rho(\Omega_s)_2 \\ \rho h_s \end{bmatrix}, \quad F_x = \begin{bmatrix} \rho u_x \\ P + \rho u_x^2 \\ \rho u_x u_y \\ (P + E) u_x \\ \rho(\Omega_s)_0 u_x \\ \rho(\Omega_s)_1 u_x \\ \rho(\Omega_s)_2 u_x \\ \rho h_s u_x \end{bmatrix}, \quad F_y = \begin{bmatrix} \rho u_y \\ \rho u_x u_y \\ P + \rho u_y^2 \\ (P + E) u_y \\ \rho(\Omega_s)_0 u_y \\ \rho(\Omega_s)_1 u_y \\ \rho(\Omega_s)_2 u_y \\ \rho h_s u_y \end{bmatrix}, \quad F_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \rho(\omega_s)_0 \\ \rho(\omega_s)_1 \\ \rho(\omega_s)_2 \\ \rho \bar{\omega}_s \end{bmatrix}$$

Сравнение многочисленных экспериментальных данных и результатов, полученных при помощи расчетных математических моделей, показало необходимость введения поправочных коэффициентов в классическую формулу для скорости ядрообразования при спонтанной конденсации.

В монографии Салтанова [5] поправочный коэффициент для скорости ядрообразования был введен в показатель экспоненты (формула (1)).

Но, вероятно, результаты расчетов с поправочным коэффициентом в этом виде не в полной мере давали желаемые результаты, и в дальнейших работах он вошел непосредственно перед формулой для скорости ядрообразования [5].

Существует также проблема определения коэффициента конденсации α_k , входящего в формулу роста каплей (формула (2)).

У Салтанова [5] он равен единице, хотя в экспериментах разных авторов [6] он изменяется от 0,001 до 1.

Следовательно, даже расчеты неравновесно расширяющегося влажного пара в соплах Лавала, где поток является практически одномерным, требуют внесения в математическую модель поправочных коэффициентов [5]. Течение влажного пара в турбинной ступени носит существенно неоднородный характер,

что приводит к необходимости введения в ММ дополнительных поправочных коэффициентов. Определить их можно непосредственно идентифицируя математическую модель по результатам экспериментов.

Так как модель процесса расширения неравновесно конденсирующегося пара достаточно сложна, соответственно и расчет по ней каждого варианта требует значительного времени, для апробации возможности идентификации такой модели был выбран самый простой вариант – ММ течения пара в сопле Лавала с двумя поправочными коэффициентами.

Идентификация модели течения неравновесно конденсирующегося пара в канале произвольной формы проводилась по экспериментальным данным, полученным Г. А. Салтановым для спонтанной конденсации [6]. Исследования были выполнены для осесимметричного сопла со следующими геометрическими характеристиками: профиль дозвуковой части представляет собой сопряжение окружностей двух радиусов $R_1 = 3,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и $R_2 = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; диаметр входного сечения этого участка $d_0 = 6,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, диаметр горла сопла $d_{kp} = 0,81 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; сверхзвуковая часть сопла выполнена конической с углом полураствора $\delta = 3^\circ$ и длиной $l_{св} = 2,68 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. Число Маха на выходе из сопла, рассчитанное для показателя энтропии $k = 1,3$, равно $M_p = 2$. Полное давление перед соплом $p_0 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Расчетная сетка для решения осесимметричной задачи построена равномерным разбиением на 340 ячеек вдоль оси сопла и на 32 ячейки по радиусу сопла. Система дифференциальных уравнений интегрируется с помощью явной монотонной схемы Годунова первого порядка точности. Разностные уравнения для интегрирования по схеме Годунова системы газодинамических уравнений имеют тот же вид, что и для однофазной среды. При этом, однако, следует помнить, что плотность ρ и энергия e определяются для среды в целом на основании соотношений аддитивности. Для системы кинетических уравнений разностные уравнения будут несколько отличаться вследствие отличия от нуля правой части.

В соответствии с рассмотренной ранее постановкой задачи, в качестве критериев идентификации были выбраны давления в различных точках вдоль оси сопла (всего 12 точек), для которых имелись соответствующие замеры.

Варьируемыми параметрами приняты:

1. Поправочный коэффициент в экспоненте формулы для скорости ядрообразования при неравновесном расширении пара K_{cor} ;

2. Коэффициент конденсации α_k .

Диапазон изменения варьируемых параметров:

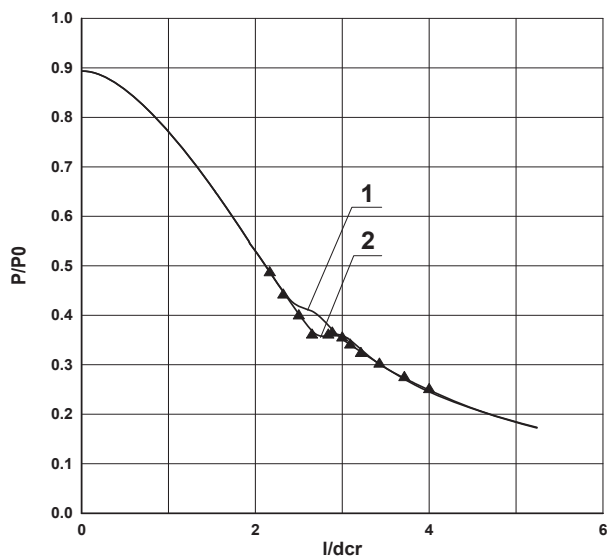
- для поправочного коэффициента $K_{cor} - 1 - 3$;

- для коэффициента конденсации $\alpha_k - 0,1 - 1$.

Функциями цели при решении задачи идентификации являются невязки по выбранным двенадцати критериям и представляют собой разницу между расчетными и измеренными давлениями в 12 точках по длине сопла. При этом диапазон отклонения расчетных данных от экспериментальных не должен превышать 1-1,5%.

Следовательно, поставленная задача является многокритериальной и может быть решена с исполь-

зованием соответствующих математических методов поиска оптимальных решений, входящих в систему Optimum.



1 – начальное распределение ($\alpha_k = 0,1; K_{cor} = 1,0$)
 2 – результаты идентификации ($\alpha_k = 1,0; K_{cor} = 1,7429$)
 ▲ – данные эксперимента

Рис. 3. Изменение давления вдоль оси сопла Лавалья при неравновесном расширении влажного пара

Начальные значения варьируемых параметров для задачи идентификации были такими: $\alpha_k = 0,1; K_{cor} = 1,0$. Изменение давления вдоль сопла, рассчитанное по разработанной математической модели при этих значениях варьируемых параметров существенно отличается от экспериментальных данных в области скачка конденсации (рис. 3, кривая 1).

После проведения идентификации ММ были получены следующие значения варьируемых параметров: $\alpha_k = 1,0; K_{cor} = 1,7429$. Результаты расчета распределения давления вдоль оси сопла с этими значениями варьируемых параметров показаны на рис. 3 (кривая 2), Они практически совпадают с экспериментальными данными.

Полученная идентифицированная ММ течения неравновесно конденсирующегося пара в канале про-

извольной формы дает возможность производить расчеты для выбранной конфигурации сопла с требуемой степенью точности. Для других каналов задача идентификации должна быть проведена заново и может дать несколько иные значения варьируемых параметров.

Разработанный подход и система Optimum могут быть в дальнейшем использованы для решения задач параметрической идентификации различного уровня сложности при наличии необходимой информации по результатам экспериментальных исследований.

Литература

1. Антипов Ю.П. Модельно-программный комплекс для решения задач оптимизации и идентификации параметров создаваемых энергетических установок / Ю.П. Антипов, И.Е. Аннопольская, В.В. Паршин и др. // Пробл. машиностроения. 2004. – 7, № 4. – С. 11 – 14.
2. Аннопольская И.Е. Идентификация параметров математических моделей газотурбинных двигателей по результатам испытаний на этапах проектирования и доводи / И.Е. Аннопольская, Ю.П. Антипов, В.В. Паршин и др. // Пробл. машиностроения. 2004. – 7, № 3. – С. 3 – 8.
3. Кириллов И. И. Основы теории влажнопаровых турбин / И. И. Кириллов, Р. И. Яблоник – Л.: Машиностроение, 1969. – 264 с.
4. Дейч М. Е. Газодинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. – М.: Энергия, 1968. – 424 с.
5. Салтанов Г. А. Неравновесные и нестационарные процессы в газодинамике однофазных и двухфазных сред. – М.: Наука, 1979. – 286 с.
6. Салтанов Г. А. Сверхзвуковые двухфазные течения / Под ред. М. Е. Дейча, В. Ф. Степанчука. – Минск: Высш. шк., 1972. – 480 с.
7. Горбунов В. Н. Неравновесная конденсация в высокоскоростных потоках газа / В. Н. Горбунов, У. Г. Пирумов, Ю. А. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1984. – 432 с.
8. Качуринер Ю. Я. Комплекс программ «Влажный пар» // Тр. НПО Центр. котлотурбин. ин-та. Основные физико-технические проблемы энергооборудования. – СПб, 2003. – 186 с.
9. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкости. – М.: Изд-во АН СССР, 1945. – 592 с.