

4. И с а е в, Г. И. Определение границы перехода от вязкостного к вязкостно-гравитационному режиму при переходном режиме вынужденного движения органических теплоносителей / Г. И. Исаев, И. Т. Арабова, Ф. Х. Мамедов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1991. – № 2. – С. 116–120.

5. Г р а н и ц ы режимов улучшенной теплоотдачи при сверхкритическом давлении органических теплоносителей / Г. И. Исаев [и др.] // ИФЖ. – 2001. – Т. 74, № 5. – С. 78–80.

6. И с а ч е н к о, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981.

7. И к р я н н и к о в, Н. П. К расчету теплоотдачи в однофазной околокритической области при вязкостно-инерционном течении / Н. П. Икрянников, Б. С. Петухов, В. С. Протопопов // ТВТ. – 1973. – Т. 11, № 5. – С. 1068–1075.

Представлена кафедрой  
теплоэнергетики

Поступила 20.04.2006

УДК 621.311

## **К ПОСТРОЕНИЮ РАСХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЭС И ИХ ОПЕРАТИВНОЙ КОРРЕКЦИИ**

**Инж. НАСИБОВ В. Х.**

*АзНИИ энергетики и энергопроектирования*

Как известно, для управления режимом работы энергосистемы, оптимизации краткосрочных режимов и оперативной их дооптимизации необходимы аналитические расходные характеристики (РХ) и характеристики относительных приростов (ХОП) расхода энергоносителя. Для агрегатов ГЭС они строятся на основе имеющихся графиков расходно-напорных характеристик, представленных заводом-изготовителем или полученных в результате специальных опытов.

Рассматриваем методику аналитического построения расходных характеристик  $Q = f(H, P)$  и характеристик относительного прироста  $q = f(H, P)$  для ГЭС. Анализ графиков показывает, что напорно-расходные графики представляют собой зависимости  $Q = f(H)$  при различных мощностях агрегата  $P$ , поддерживаемых постоянными. Для получения аналитического выражения необходимо для каждого значения  $P$  аппроксимировать зависимость  $Q = f(H)$ , но в этом случае получается около 30 различных уравнений только для одного агрегата, и очень трудно использовать их в процессе дооптимизации режима. Для уменьшения числа аппроксимирующих уравнений зависимостей  $Q = f(H, P)$  и  $q = f(H, P)$  можно использовать метод факторного планирования эксперимента с аппроксимацией данных зависимостей линейной или квадратичной моделями в соответствии с требуемой точностью. Для линейной модели расходная характеристика может аппроксимироваться билинейной характеристикой вида

$$Q = a_0 + a_1P + a_2H + a_{12}PH, \quad (1)$$

а для квадратичной модели – квадратической характеристикой вида

$$Q = a_0 + a_1P + a_2H + a_{12}PH + a_{11}P^2 + a_{22}H^2. \quad (2)$$

При этом аппроксимация должна осуществляться не менее чем для двух диапазонов изменения напора в зависимости от крутизны функции напора от расхода воды  $Q = f(H)$ . Для построения этих характеристик используется метод факторного планирования эксперимента.

Для нахождения коэффициентов уравнений регрессии по линейной модели нужно использовать полный факторный эксперимент (ПФЭ), а по квадратичной модели можно воспользоваться ортогональным центральным композиционным планированием (ОЦКП) эксперимента.

Первая характеристика строится на основе ПФЭ  $N = 2^k = 2^2 = 4$ , а вторая – на основе ОЦКП  $N = 2^k + n_\alpha + n_0$ , где  $k$  – число факторов (в нашей задаче  $k = 2$ ,  $P$  и  $H$  – переменные);  $n_\alpha = 2k$  – число звездных точек  $n_\alpha = 2 \cdot 2 = 4$ ;  $n_0$  – число экспериментальных точек в центре эксперимента  $n_0 = 1$ . Таким образом, число всех экспериментов  $N = 2^2 + 2 \cdot 2 + 1 = 9$ . Матрицы планирования ПФЭ  $N = 2^2 = 4$  и ОЦКП  $N = 2^2 + 4 + 1 = 9$  приведены в [2], где первые четыре эксперимента относятся к ПФЭ, а 5–9-й эксперименты используются в построении модели второго порядка. Формулы для определения коэффициентов  $a_i$  приведены в [2]. Здесь переменные  $P$  и  $H$  представляются в нормированном виде, т. е. принимают значения +1 и –1.

На основе приведенной методики для трех ГЭС «Азерэнерджи» – Мингечаурской ГЭС, Шамкирской ГЭС и Варваринской ГЭС, которые могут принимать участие в той или иной степени в оптимизации и дооптимизации режима по активной мощности при оперативном управлении, построены аналитические РХ и ХОП агрегатов.

Для Варваринской ГЭС рассматривались два уровня  $H$  и  $P$ :

- $P = 3,5$ – $5,5$  МВт;  $H = 5,5$ – $6,5$  м;
- $P = 2,5$ – $3,5$  МВт;  $H = 4,0$ – $5,5$  м.

Матрица планирования с исходными экспериментальными и расчетными данными, полученными по линейной и квадратичной моделям, приведена в табл. 1.

Получены следующие уравнения:

$$Q_1 = 89,62 + 23,37P - 9,62H - 3,37PH; \quad (3)$$

$$Q_2 = 84,87 + 18,62P - 15,12H - 6,37PH; \quad (4)$$

$$Q_1 = 73,84 + 22,66P - 9,58H - 3,37PH + 4P^2 + 1,4H^2; \quad (5)$$

$$Q_2 = 73,14 + 17P - 15H - 6,37PH + 7,5P^2 + 4,5H^2. \quad (6)$$

Среднеквадратическая ошибка моделей в экспериментальных точках составила:

- при линейной модели:  $\sigma_{Q1} = 2,0$  м<sup>3</sup>/с (2,3 %);  $\sigma_{Q2} = 4,83$  м<sup>3</sup>/с (6,04 %);
- при квадратичной модели:  $\sigma_{Q1} = 9,4$  м<sup>3</sup>/с (10,9 %);  $\sigma_{Q2} = 3,2$  м<sup>3</sup>/с (4 %).

Из полученных результатов следует, что при напоре 5,5–6,5 м большей

точностью обладает билинейная модель, а при напоре от 4,0 до 5,4 м – квадратичная модель. Поэтому принимаем:

- при  $H = 5,5-6,5$  м  $Q_1 = 89,62 + 23,37P - 9,62H - 3,37PH$  (СКО = 2,3 %);
- при  $H = 4,0-5,5$  м  $Q_2 = 73,14 + 17P - 15H - 6,37PH + 7,5P^2 + 4,5H^2$  (СКО = 4 %).

ОЦКП второго порядка:

$$N = 2^2 = 4; \alpha = 1;$$

$$n_\alpha = 4; \varphi = 0,6667; n_0 = 1.$$

Таблица 1

Матрица планирования для Варваринской ГЭС

	$x_0$	$x_1$ $P$	$x_2$ $H$	$x_3$ $x_1^2 - \varphi$	$x_4$ $x_2^2 - \varphi$	$x_1x_2$	$\hat{y}_1$ $Q_1, \text{ л/кв}$	$\hat{y}_2$ $Q_1, \text{ л/кв}$	$y_1$ $Q_1$	$y_2$ $Q_2$
1	+	-	-	0,33	0,33	+	72,5 62,7	75,0 76,7	72,5	75
2	+	+	-			-	125,9 114,8	124,9 123,5	126	125
3	+	-	+			-	60,0 50,3	57,5 59,5	60	57,5
4	+	+	+			+	100,0 87,5	82,0 80,7	100	82
5	+	-	0	0,33	-0,66	0	66,2 55,1	66,2 63,6	67,5	65
6	+	+	0	0,33	-0,66		113,0 100,5	103,5 97,6	110	92,5
7	+	0	-	-0,66	0,33		99,2 84,8	100,0 92,6	96,5	93
8	+	0	+	-0,66	0,33		80,0 65,6	69,7 62,6	77,5	60,5
9	+	0	0	-0,66	-0,66	0	89,6 73,8	84,8 73,1	86	80
+1	5,5 МВт		6,5 м							
-1	3,5 МВт		5,5 м							
+1	3,5 МВт		5,5 м							
-1	2,5 МВт		4,0 м							

Для агрегатов Мингечаурской ГЭС приняты следующие два уровня:

- $P = 30-65$  МВт,  $H = 54-68$  м;
- $P = 30-40$  МВт,  $H = 40-54$  м.

Матрица планирования с исходными данными, взятыми из напорно-расходной характеристики Мингечаурской ГЭС, а также расчетные значения, полученные по уравнениям для первого и второго уровней, приведены в табл. 2.

Уравнения расходных характеристик для первого и второго уровней выглядят следующим образом:

$$Q_1 = 89,8 + 28,55P - 8,55H - 4,16PH + 1,33P^2 + 3,33H^2; \quad (7)$$

$$Q_2 = 87,14 + 10,23P - 13,6H - 1,5PH + 6,25H^2. \quad (8)$$

СКО моделей в экспериментальных точках:

$$\sigma_{Q1} = 10,4 \text{ м}^3/\text{с}, \text{ или } 3,78 \%;$$

$$\sigma_{Q2} = 3,33 \text{ м}^3/\text{с}, \text{ или } 1,24 \%.$$

Таблица 2

Матрица планирования для Мингечаурской ГЭС

	$x_1$ $P$	$X_2$ $H$	$y_1$ $Q_1$	$\hat{y}_1$ $Q_1$	$Y_2$ $Q_2$	$\hat{Y}_2$ $Q_2$	$q_1$	$q_1$	$q_2$	$q_2$
1	–	–	70	70,3	95	95,3	2,3	2,311	3,2	3,205
2	+	–	136,7	127	119	119,1	2,1	2,101	2,9	2,905
3	–	+	60	61,5	70	71,1	2,0	2,04	2,3	2,345
4	+	+	110	110,3	87,7	88,5	1,7	1,73	2,2	2,24
5	–	0	64	62,9	78,3	76,9	2,1	2,076	2,6	2,55
6	+	0	118,7	119,7	98,3	97,4	1,8	1,816	2,4	2,35
7	0	–	100	101,6	105,4	107,0	2,1	2,106	3,0	3,055
8	0	+	85,3	87,9	79,7	79,8	1,8	1,78	2,3	2,28
9	0	0	91,7	89,8	89,0	87,1	1,9	1,84	2,5	2,45
+1	65 МВт		68 м							
–1	30 МВт		54 м							
+1	40 МВт		54 м							
–1	30 МВт		40 м							

Для Шамкирской ГЭС приняты следующие два уровня:

- $P = 50\text{--}190$  МВт,  $H = 48\text{--}55$  м;
- $P = 50\text{--}140$  МВт,  $H = 37\text{--}48$  м.

Матрица планирования с исходными данными, взятыми из напорно-расходной характеристики Шамкирской ГЭС, а также расчетные значения, полученные по уравнениям для первого и второго уровней, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Матрица планирования для Шамкирской ГЭС

	$x_1$ $P$	$X_2$ $H$	$y_1$ $Q_1$	$\hat{y}_1$ $Q_1$	$Y_2$ $Q_2$	$\hat{Y}_2$ $Q_2$	$q_1$	$q_1$	$q_2$	$q_2$
1	–	–	70	70,3	95	95,3	2,3	2,311	3,2	3,205
2	+	–	136,7	127	119	119,1	2,1	2,101	2,9	2,905
3	–	+	60	61,5	70	71,1	2,0	2,04	2,3	2,345
4	+	+	110	110,3	87,7	88,5	1,7	1,73	2,2	2,24
5	–	0	64	62,9	78,3	76,9	2,1	2,076	2,6	2,55
6	+	0	118,7	119,7	98,3	97,4	1,8	1,816	2,4	2,35
7	0	–	100	101,6	105,4	107,0	2,1	2,106	3,0	3,055
8	0	+	85,3	87,9	79,7	79,8	1,8	1,78	2,3	2,28
9	0	0	91,7	89,8	89,0	87,1	1,9	1,84	2,5	2,45
+1	90 МВт		55 м							
–1	50 МВт		48 м							
+1	140 МВт		48 м							
–1	50 МВт		37 м							

Уравнения расходных характеристик для первого и второго уровней выглядят следующим образом:

$$Q_1^{\text{KB}} = 257,64 - 17,5P + 149,5H - 12,5PH + 4,75P^2 + 3,25H^2; \quad (9)$$

$$Q_1^{\text{л}} = 265 - 17,5P + 150H - 12,5PH; \quad (10)$$

$$Q_2^{\text{кв}} = 244,1 + 120P - 32H - 16,75PH + 7,5P^2 + 11H^2; \quad (11)$$

$$Q_2^{\text{л}} = 251 + 120,5P - 32H - 16,5PH. \quad (12)$$

СКО моделей в экспериментальных точках:

$$\sigma_{Q1,\text{кв}} = 0,97 \text{ м}^3/\text{с}, \text{ или } 0,37 \%;$$

$$\sigma_{Q1,\text{л}} = 2,7 \text{ м}^3/\text{с}, \text{ или } 1,03 \%.$$

Сравнивая результаты, легко заметить, что квадратичные модели лучше описывают характеристики, и в дальнейшем только они используются.

Из полученных уравнений следует, что при напоре  $H = 48\text{--}55$  м и  $H = 37\text{--}48$  м большей точностью обладает квадратичная модель:

$$Q_1^{\text{кв}} = 257,64 - 17,5P + 149,5H - 12,5PH + 4,75P^2 + 3,25H^2; \quad (13)$$

$$Q_2^{\text{кв}} = 244,1 + 120P - 32H - 16,75PH + 7,5P^2 + 11H^2. \quad (14)$$

Расходные характеристики  $Q = f(P, H)$  для указанных ГЭС в натуральных значениях переменных  $P, H$  приведены ниже.

Для Варваринской ГЭС:

$$Q_1 = 275,66 - 65,2P - 149,5H - 17PH + 30P^2 + 8,05H^2 \quad (H = 4\text{--}5,5 \text{ м});$$

$$Q_2 = 186,84 + 27,06P - 56,06H - 6,74PH + 4P^2 + 5,6H^2 \quad (H = 5,5\text{--}6,5 \text{ м}).$$

Для Мингечаурской ГЭС:

$$Q_1 = 753,6 + 3,23P - 23,66H - 0,03PH + 0,001P^2 + 0,2H^2 \quad (H = 54\text{--}68 \text{ м});$$

$$Q_2 = 953,68 + 4,05P - 37,26H - 0,043PH + 0,38H^2 \quad (H = 40\text{--}54 \text{ м}).$$

Для Шамкирской ГЭС:

$$Q_1 = 749,6 + 5,31P - 36,63H - 0,074PH + 0,0037P^2 + 0,44H^2 \quad (H = 37\text{--}48 \text{ м});$$

$$Q_2 = 981,34 + 4,5P - 38,78H - 0,05PH + 0,0006P^2 + 0,39H^2 \quad (H = 48\text{--}55 \text{ м}).$$

При оптимизации режима по активной мощности нужны характеристики относительных приростов расхода воды на ГЭС. В соответствии с расходными характеристиками ГЭС построены характеристики относительных приростов расхода воды на ГЭС согласно выражению  $q = \partial Q / \partial P$ .

Характеристики относительного прироста расхода воды на Мингечаурской и Шамкирской ГЭС в натуральных значениях мощности агрегата  $P$  (МВт) и напора (м) получились следующие.

Для Мингечаурской ГЭС:

$$q_1 = 18,15 - 0,0266P - 0,5H + 0,0004PH + 0,004H^2 \quad (H = 40\text{--}54 \text{ м});$$

$$q_2 = 11,2 - 0,008P - 0,218H - 0,000067PH + 0,000036P^2 + 0,001H^2 \quad (H = 54\text{--}68 \text{ м}).$$

Для Шамкирской ГЭС:

$$q_1 = 19,8 - 0,031P - 0,688H + 0,00026PH + 0,00009P^2 + 0,0072H^2 \quad (H = 37\text{--}48 \text{ м});$$

$$q_2 = 8,72 + 0,0011P - 0,22H - 0,0001PH + 0,00001P^2 + \\ + 0,0019H^2 \quad (H = 48-55 \text{ м}).$$

Указанные методика и подход аналитического определения характеристик ГЭС в целях оптимизации и дооптимизации режима энергосистемы по активной мощности могут быть применены и для других энергосистем.

### ВЫВОДЫ

1. Предложена методика аналитического построения расходных характеристик и характеристик относительного прироста расхода воды на ГЭС с применением метода планирования эксперимента и регрессионного анализа.

2. Проанализированы погрешности линейной и квадратичной моделей и показано, что для необходимой точности аппроксимация характеристик должна осуществляться не менее чем для двух диапазонов изменения напора в зависимости от крутизны функции расхода воды от напора  $Q = f(H)$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гусейнов, Ф. Г. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики / Ф. Г. Гусейнов, О. С. Мамедяров. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 150 с.
2. Мамедяров, О. С. Регрессионный анализ установившихся режимов электрической системы / О. С. Мамедяров // Электричество. – 1982. – № 5. – С. 10–24.

Представлена Ученым советом

Поступила 10.11.2005

УДК 666.9

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА КАЛЬЦИТА

**Инж. КОЖЕВНИКОВ А. Г.**

*РУП «Белорусский металлургический завод»*

В металлургических процессах удельный расход извести (1 кг на 1 т продукции) составляет: при конверторном способе производства стали – 80–100, мартеновском – 15–50, электросталеплавильном – 40–60, агломерация шихты – 20–60. Использование высококачественной извести при выплавке металла увеличивает производительность металлургических агрегатов, снижает удельный расход топлива и повышает срок службы футеровки. Следовательно, решение научно-технических задач по модернизации и оптимизации на существующих заводских мощностях по производству извести позволяет увеличить выпуск основной продукции металлургического предприятия.