

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

УДК 621.1.36.7(035.5)

### Расчет и визуальное отображение водно-химического режима систем оборотного охлаждения на ТЭС

© 2013 г. Очков В.Ф.<sup>1</sup>, Орлов К.А.<sup>1</sup>, Иванов Е.Н.<sup>2</sup>, Макушин А.А.<sup>1</sup>  
НИУ МЭИ<sup>1</sup> – ОАО ВТИ<sup>2</sup>

**Статья посвящена вопросам, связанным с обработкой охлаждающей воды на тепловых электростанциях. Проанализированы проблемы, возникающие при эксплуатации оборотных систем охлаждения с градирнями. Рассмотрено программное обеспечение для контроля, управления и отображения гидравлического и химического режима работы циркуляционной системы Яйвинской ГРЭС.**

**Ключевые слова:** техническое водоснабжение, тепловая электрическая станция, накипеобразование, электронные таблицы Excel.

DOI: 10.1134/S0040363613070072

Большая часть природной воды, потребляемой ТЭС и АЭС, используется в системах охлаждения для конденсации пара. Основные требования к качеству охлаждающей воды сводятся к тому, чтобы она имела температуру, обеспечивающую требуемую глубину вакуума в конденсаторе, не вызывала при нагреве образования в системе охлаждения минеральных отложений и биологических обрастаний, а также коррозии оборудования и трубопроводов.

Для охлаждения конденсаторов используются прямоточные системы при наличии водотоков с большим дебитом воды или оборотные системы двух типов:

с прудами-охладителями;

с градирнями или брызгальными бассейнами [1].

При прямоточной системе охлаждения вода проходит через конденсатор турбины однократно, причем забор воды из реки производится обязательно из створа, расположенного выше по течению, чем сброс воды. На тепловых электростанциях с охлаждающей водой сбрасывается огромное количество тепла в водоемы. Так, удельное количество тепла, отводимого с охлаждающей водой при нагреве ее в конденсаторах турбин на 8–10°С, составляет на ТЭС около 4.3 кДж/(кВт·ч) при расходе воды 100–130 кг/(кВт·ч). Для того чтобы влияние сбрасываемого тепла не нарушало экологическую обстановку в водоеме, тепловые сбросы по санитарным нормам не должны вызывать повышения собственной температуры водо-

ема более чем на 5°С в зимнее время и на 3°С в летнее. Эти нормы могут быть выдержаны лишь в том случае, если удельная тепловая нагрузка на водоем не превышает 12–17 кДж/м<sup>3</sup>.

До последнего времени применение прямоточных систем не вызывало особых затруднений, но рост мощностей ТЭС и ограниченность дебита воды привели к тому, что возможности их применения в настоящее время практически исчерпаны, поэтому доля оборотных систем существенно возросла.

При оборотной системе охлаждения вода проходит через конденсатор многократно. Охлаждение нагретой воды, покидающей конденсатор, осуществляется путем ее частичного испарения. Экономически более выгодны естественные водохранилища, однако они обладают тем недостатком, что во многих случаях в них не удается создать нормальный тепловой режим.

В статье рассмотрена наиболее распространенная система охлаждения – система оборотного охлаждения (СОО) с градирнями, в которых один и тот же объем воды используется многократно и требуется лишь небольшая добавка воды для восполнения потерь в охлаждающих устройствах<sup>3</sup>.

Основные проблемы, которые возникают при работе СОО, – биологическое обрастание, образование минеральных отложений. Для предотвращения биологических обрастаний в системах

<sup>1</sup> 111250, Москва, Красноказарменная ул., НИУ МЭИ.

<sup>2</sup> 115280, Москва, Автозаводская ул., д. 14/28, ОАО ВТИ.

<sup>3</sup> В статье не рассматриваются сухие градирни, которые используются в местах с большим дефицитом воды.

охлаждения и удаления сформировавшихся отложений применяются следующие способы.

*Очистка конденсаторных трубок резиновыми шариками.* Для удаления мягких, илистых биологических отложений – обрастаний – из конденсаторных трубок может применяться непрерывная их очистка монолитными резиновыми шариками плотностью  $1 \text{ г/см}^3$  с диаметром, равным внутреннему диаметру конденсаторных трубок.

*Обработка воды сильными окислителями.* Для борьбы с биообрастаниями, приводящими к интенсификации коррозионных процессов и ухудшению вакуума в конденсаторах, обрабатывают охлаждающую воду сильными окислителями, такими, как хлор и его производные, а также медьсодержащими солями.

Для предотвращения образований минеральных отложений в конденсаторах оборотных систем применяют:

- продувку системы;
- стабилизационную обработку циркуляционной воды различными реагентами;
- физическую обработку воды в магнитном или акустическом поле [1].

Далее рассматриваются некоторые способы предотвращения образования минеральных отложений.

*Подкисление циркуляционной воды* проводится для частичного снижения карбонатной жесткости  $J_{\text{к}}$  до значения, равного или несколько ниже предельно допустимой карбонатной жесткости  $J_{\text{к.пред}}$  с использованием  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в качестве наиболее дешевого и доступного реагента.

*Рекарбонизация воды.* Предотвращения процесса гидролиза гидрокарбонатов с образованием иона  $\text{CO}_3^{2-}$  можно добиться методом восполнения десорбированного в градирне  $\text{CO}_2$  до его равновесного значения в охлаждающей воде. Так как стабилизация воды в этом случае происходит в результате насыщения ее углекислым газом, процесс называется рекарбонизацией воды. В качестве источника  $\text{CO}_2$  на ТЭС используют продукты сгорания топлива. При рекарбонизации не происходит заметного увеличения солесодержания воды, что упрощает сброс продувочной воды СОО в естественные водоемы.

*Магнитная обработка воды* производится в аппаратах, в которых поток охлаждающей воды пересекает силовые линии магнитного поля напряженностью до  $10^5 \text{ А/м}$ , создаваемого электромагнитной катушкой или постоянными магнитами. Несмотря на то что теоретические основы воздействия магнитного поля на воду и ее примеси до сих пор не разработаны, экспериментально

установлено, что при наложении магнитного поля на нестабильную по карбонату кальция воду, содержащую ферромагнитные примеси ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), происходит снижение интенсивности образования отложений на теплопередающих поверхностях.

Удаление отложений из конденсаторных трубок производится во время ремонта оборудования с помощью химических очисток или с применением шомполированных труб с шарошками или со шлангами, по которым вода под высоким давлением подводится к специальным насадкам, имеющим отверстия для выхода воды в таких направлениях, чтобы обеспечивалось как снятие отложений, так и движение насадок по конденсаторной трубке [1].

*Фосфатирование.* В настоящее время наиболее эффективными для борьбы с накипеобразованием являются технологии, основанные на применении фосфонатов (ОЭДФ, НТФ, ИОМС и др.). Фосфатирование охлаждающей воды в СОО производится для торможения процесса образования твердой фазы  $\text{CaCO}_3$ , фосфаты задерживают их дальнейший рост, увеличивают допустимую степень пересыщения раствора и тем самым стабилизируют состав воды. При использовании оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОЭДФК) стабильный безнакипный режим оборотной системы сохраняется до значений  $J_{\text{к}} = 7.5 \text{ мг-экв/дм}^3$ . Все эти технологии опираются на нормативные сертифицированные документы: ГОСТ, СНИП, руководящие документы, методические рекомендации и т.д. (подробнее о руководящих документах по водоподготовке см. [2]).

*Продувка системы.* Повсеместно используемым методом снижения минерализации охлаждающей воды является продувка СОО, т.е. отвод части циркулирующей воды с заменой ее свежей. При продувке происходит общее понижение концентраций всех примесей, в том числе ионов  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , что способствует ослаблению процессов коррозии в оборотной системе. Вывод солей из оборотной системы происходит при продувке и потерях при капельном уносе из градирни. Так как основным назначением продувки является поддержание карбонатной жесткости циркуляционной воды ниже предельно допустимой величины ( $J_{\text{к.пред}}$ ), значение требуемой продувки можно определить по следующим уравнениям:

$$J_{\text{к.пред}} (P_{\text{ун}} + P_{\text{прод}}) = J_{\text{к.доб}} (P_{\text{исп}} + P_{\text{ун}} + P_{\text{прод}}),$$

$$P_{\text{прод}} = \frac{P_{\text{исп}} J_{\text{к.доб}}}{J_{\text{к.пред}} - J_{\text{к.доб}}} - P_{\text{ун}},$$

где  $J_{\text{к.доб}}$  — карбонатная жесткость воды, добавляемой для восполнения потерь в  $\text{COO}$ , мг-экв/дм<sup>3</sup>;  $P_{\text{ун}}$  — доля потерь воды в градирнях за счет капельного уноса, %;  $P_{\text{исп}}$  — доля потерь воды в градирнях за счет испарения, %;  $P_{\text{прод}}$  — доля продувки, %.

Для природных вод с окисляемостью до 25 мг  $\text{O}_2/\text{л}$  в интервале температур 30–65°C предельная стабильная карбонатная жесткость находится по формуле Крушеля:

$$2.8J_{\text{к.макс}} = 8 + \frac{\text{Ок}}{3} - \frac{t - 40}{5.5 - \frac{\text{Ок}}{7}} - \frac{2.8J_{\text{нк}}}{6 - \frac{\text{Ок}}{7} + \left(\frac{t - 40}{10}\right)^3},$$

где  $\text{Ок}$  — окисляемость воды; мг  $\text{O}_2/\text{л}$ ,  $J_{\text{нк}}$  — некарбонатная жесткость воды, мг-экв/кг;  $t$  — температура воды, °С.

Продувка является простейшим способом предотвращения накипеобразования и позволяет снизить коэффициент упаривания, однако она целесообразна лишь тогда, когда затраты на перекачку воды и оборудование для продувки не превышают затрат на другие способы коррекции оборотной воды.

Обычно стабилизационная обработка охлаждающей воды совмещает комплекс мероприятий, включающих как продувку, так и обработку воды химическими реагентами. На Яйвинской ГРЭС используется  $\text{COO}$  с градирнями. Для предотвращения образования минеральных отложений на станции организованы продувка системы и коррекционная обработка охлаждающей воды раствором ОЭДФК. Эта кислота относится к классу дифосфоновых кислот, обладающих высокой комплексообразующей способностью и стойкостью к гидролизу, хорошо растворяется в воде, кислотах, щелочах, метаноле и этаноле.

При обработке воды, пересыщенной по карбонату кальция, ОЭДФК образует прочный комплекс с ионами  $\text{Ca}^{2+}$ , который сорбируется на поверхности ранее образованных кристаллов и центров кристаллизации и препятствует их дальнейшему росту и агломерации. Отсутствие эффективных и активных центров кристаллизации благодаря блокированию поверхности кристаллов обеспечивает поддержание раствора в пересыщенном состоянии без выделения накипи [3].

Система охлаждения конденсаторов турбин на электростанции является одной из самых неустойчивых и труднорегулируемых систем относительно поддержания оптимального водно-химического режима [4]. Без использования специальной математической модели, вручную сложно подобрать оптимальный режим работы  $\text{COO}$ . Фирма “Триеру” ([www.trieru.ru](http://www.trieru.ru)) и Всероссийский

теплотехнический институт ([www.vti.ru](http://www.vti.ru)) создали программное обеспечение для контроля управления и отображения гидравлического и химического режима работы циркуляционной системы Яйвинской ГРЭС. У специалистов химического цеха, занимающихся проблемами организации оптимального водно-химического режима оборотных систем охлаждения, часто возникают определенные трудности в работе, которые связаны с малой информативностью руководящих документов. Такие документы содержат расчетные составляющие: таблицы, формулы, графики, работать с которыми вручную довольно трудоемко и долго. В настоящее время разработаны специальные программы расчетов с возможностью применения рекомендаций нормативных документов. Данные программы разрабатываются под конкретные задачи, содержат расчеты технико-экономических показателей, являются весьма информативными и наглядными. Самое главное, что эти расчеты не требуют обращений специалистов к нормативной документации.

Для Яйвинской ГРЭС был произведен расчет гидравлического и химического режима работы циркуляционной системы, включающий в себя расчеты технологий водоиспользования в программах Excel и Mathcad. На рис. 1, а, б показаны схемы обработки охлаждающей воды, отображенные в программе Excel, на которой выведены все исходные и расчетные данные, с их помощью специалист должен отслеживать режим работы циркулярной системы и управлять им. Математическая модель, заложенная в программу, позволяет отслеживать критические режимы, при которых система будет выведена из “равновесия”; например, программа будет информировать о превышении дозы вводимой ОЭДФК или о том, что данный режим может привести к образованию накипи и т.д.

На мнемосхеме оператор может изменить вводом с клавиатуры ПК следующие параметры работы системы:

- показатели качества добавочной воды;
- расход воды на циркуляционном насосе;
- концентрацию рабочего раствора ОЭДФК;
- стоимости добавочной воды и реагента ОЭДФК.

Кроме того, оператор с использованием мышки может изменять следующие параметры работы системы:

- температуру:
  - наружного воздуха;
  - воды после конденсатора;
  - воды после циркуляционного насоса;
  - добавочной воды;

## Данные по режиму СОО

Показатель	Номер режима		
	1	2	3
Продувка ЦС, т/ч	85.00	70.00	79.00
Расход НД ОЭДФК, л/ч	8.80	8.80	9.40
Режим	Без накипи	С накипью	Без накипи
Затраты, руб/ч:			
всего	100.29	95.99	99.77
на воду	82.69	78.39	80.97
на ОЭДФК	17.60	17.60	18.80
Состав и показатели циркуляционной воды			
Жесткость, мг-экв/дм <sup>3</sup> :			
общая расчетная $J_o^{\text{расч}}$	5.71	6.25	5.91
предельно допустимая карбонатная по Крушелю $J_{\text{пр}}$	5.61	5.82	5.69
Содержание, мг-экв/дм <sup>3</sup> :			
$\text{Ca}^{2+}_{\text{расч}}$	3.77	4.13	3.90
$\text{Mg}^{2+}$	1.94	2.13	2.01
$\text{Na}^+$	0.79	0.86	0.81
$\text{Cl}^-_{\text{расч}}$	1.01	1.11	1.05
$\text{SO}_4^{2-}_{\text{расч}}$	0.41	0.44	0.42
Щелочность $\text{Що}_{\text{расч}}$ , мг-экв/дм <sup>3</sup>	5.07	5.56	5.25
Карбонатный индекс $I_k$ , (мг-экв/дм <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>	19.09	22.94	20.46
Окисляемость $\text{Ok}_{\text{расч}}$ , МГО/дм <sup>3</sup>	25.36	27.79	26.25
Расчетное значение коэффициента упаривания $K_y^{\text{расч}}$	2.54	2.78	2.62
рН	8.12	8.16	8.14

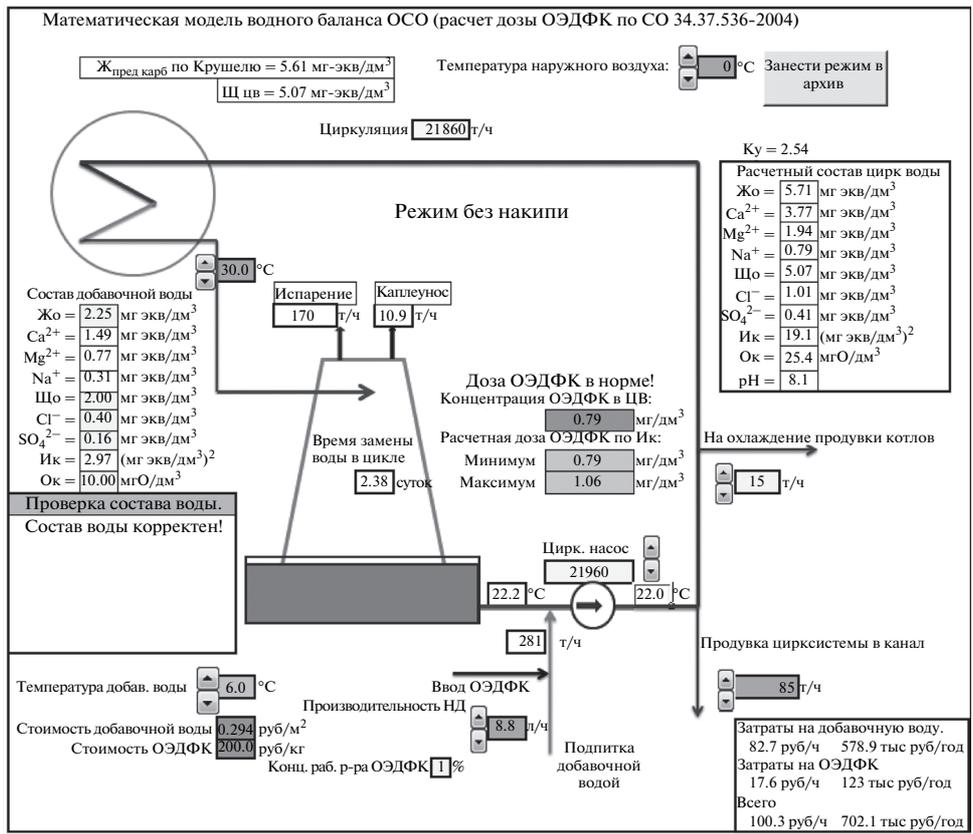
продувку системы;

производительность насоса-дозатора рабочего раствора ОЭДФК.

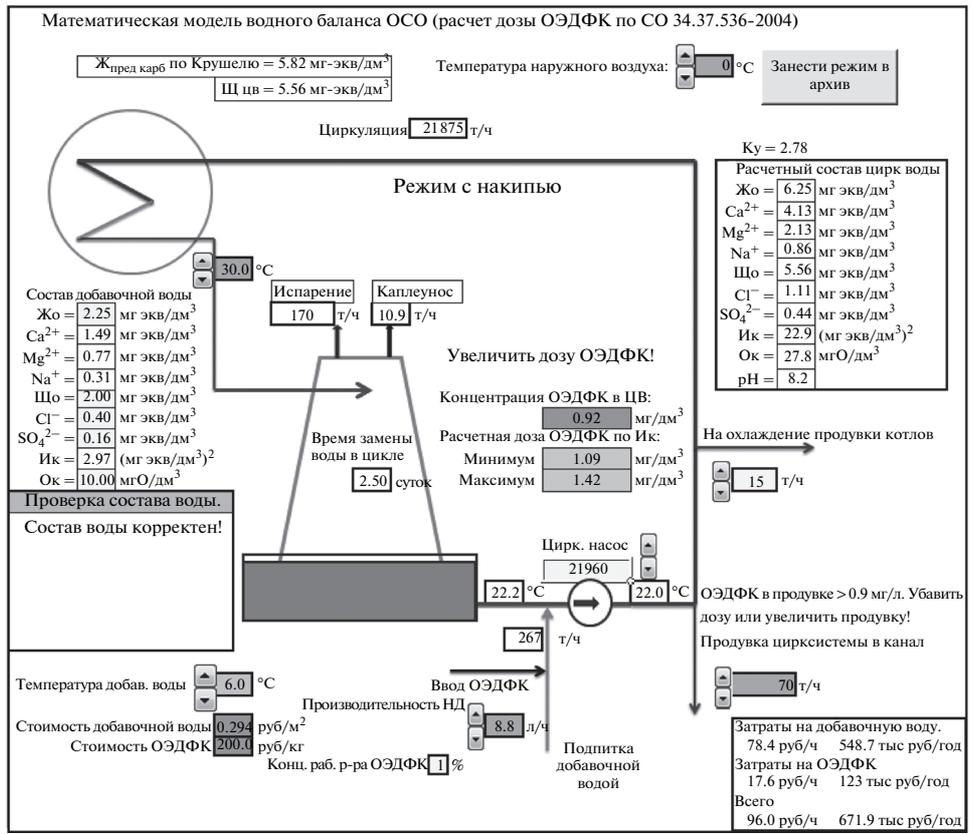
После изменения хотя бы одного из вышеприведенных параметров программа автоматически пересчитывает состав воды и дает рекомендации по оптимальной дозе корректирующего реагента

ОЭДФК (уменьшить или увеличить дозу), определяет режим работы циркуляционной системы (с образованием или без образования накипи).

Программа обрабатывает введенные параметры и выдает на печать данные по составу добавочной и оборотной воды, температуру циркулирующей воды за градирней, значения по расходам воды



а)



б)

Рис. 1. Математическая модель водного баланса ОСО в программе Excel (расчет дозы ОЭДФК по СО 34.37.536-2004). а – режим без накипи, б – режим с накипью

J73				
A	B	C	D	E
1	Архив расчетов режимов			
2	Дата		08.02.2012	08.02.2012
3	Время		12:43:37	12:43:50
4	Затраты, руб/час	Всего	216.90	220.74
5		На воду	192.70	198.14
6		На ОЭДФК	24.20	22.60
7	Состав добавочной воды	Жо	2.25	2.25
8		Ca <sup>2+</sup>	1.49	1.49
9		Mg <sup>2+</sup>	0.77	0.77
10		Na <sup>+</sup>	0.31	0.31
11		Шо	2.00	2.00
12		Cl <sup>-</sup>	0.40	0.40
13		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.16	0.16
14		Ик	2.97	2.97
15		Ок	10.00	10.00
16	Состав циркуляды	Жо <sup>расч</sup>	10.19	9.26
17		Жо <sup>факт</sup>	10.00	10.00
18		Ca <sup>2+</sup> расч	6.73	6.11
19		Ca <sup>2+</sup> факт	7.00	7.00
20		Mg <sup>2+</sup>	3.47	3.15
21		Na <sup>+</sup>	1.40	1.28
22		Шо <sup>расч</sup>	9.06	8.24
23		Шо <sup>факт</sup>	11.00	11.00
24		Cl <sup>-</sup> расч	1.81	1.65
25		Cl <sup>-</sup> факт	2.00	2.00
26		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> расч	0.72	0.66
27		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> факт	0.70	0.70
28		Ик	60.95	50.35
29		Ок расч	45.30	41.18
30		Ок факт	45.00	45.00
31	Жпр по Круш.	10.65	-0.98	
32	Ку расч.тн.	4.53	4.12	
33	pH	8.49	8.45	
34	Расходы, т/ч	ЦВ на котлы	14.00	33.00
35		Продувка ЦС	120.00	120.00
36		Испарение	510.77	510.26
37		Кап. унос	10.68	10.67
38		Добав. вода	655.45	673.93
39		ЦВ в конденсатор	21366	21347
40	Температура, °С	Наруж. возд.	-5.0	-5.0
41		Доб. Воды	3.0	3.0
42		ЦВ за к-ром	30.0	30.0
43		ЦВ за град.	6.1	6.1
44		ЦВ на к-тор	6.0	6.0
45	Конц. ОЭДФК в ЦВ, расч мг/дм <sup>3</sup>		0.84	0.69
46	Конц. ОЭДФК в ЦВ, факт мг/дм <sup>3</sup>		0.70	0.70
47	Расчетная доза ОЭДФК по Ик min, мг/дм <sup>3</sup>		5.94	4.24
48	Расчетная доза ОЭДФК по Ик max, мг/дм <sup>3</sup>		7.23	5.20
49	Конц. р-ра ОЭДФК, %		1.00	1.00
50	Расход НД ОЭДФК, л/ч		12.10	11.30
51	Режим			Режим с накипью
52	Ку SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		4.53	4.12
53	Ку Cl <sup>-</sup> факт		5.00	5.00
54	Ку Ca <sup>2+</sup> факт		4.71	4.71
55	Ку Cl <sup>-</sup> /Ку Ca <sup>2+</sup> факт		1.06	1.06
56	Жрасч-Жфакт		0.19	-0.74
57				

Рис. 2. Архивирование данных режима в программе Excel

(циркуляция, испарение, каплеунос, подпитка добавочной водой), экономические показатели (часовые и среднегодовые затраты на добавочную воду, ОЭДФК), концентрацию ОЭДФК в циркулирующей воде.

На рис. 1, а показан режим работы без накипи, а на рис. 1, б – с накипью вследствие изменения продуктивности с 85 до 70 т/ч при неизменном значении расхода ОЭДФК. Пользователя информируют о том, что в данном случае концентрация ОЭДФК в циркулирующей воде ниже минимальной расчетной дозы, для чего нужно увеличить расход насоса-дозатора ОЭДФК и затем увеличить продуктивность для создания безнакипного режима. В программе предусмотрена возможность подбора наиболее оптимального режима в зависимости от внешних условий с опорой на экономические показатели конкретного выбранного режима (эксплуатационные затраты на добавочную воду и реагенты). Учет экономической составляющей весьма важен, так как он позволяет минимизировать затраты на расходы добавочной воды, которые достаточно велики. В таблице приведены три режима работы при разных значениях расхода ОЭДФК и продуктивности. В режиме 3 удалось при неизменных исходных параметрах добиться безнакипной работы и минимизировать затраты.

После подбора оптимального режима специалист может вывести на печать или сохранить в архиве результаты расчетов в виде таблиц. Данная система позволяет сохранять и автоматически архивировать данные конкретного режима и записывать их в столбец с датой и временем обращения к программе. Результаты архивирования данных представлены на рис. 2 в виде таблицы.

Такая же математическая модель была построена в среде Mathcad, фрагменты которой представлены на рис. 3, где показан результат расчета экономической составляющей. Среда Mathcad имеет свои плюсы: специалист может видеть расчетные формулы, которые обычно скрыты в Excel, и вникать в суть данной проблемы, иметь возможность не только использовать модель, но и при желании выкладывать результаты своих расчетов в сеть Интернет, делаясь опытом с другими специалистами данной области. Сотрудниками Московского энергетического института ([www.mpei.ru](http://www.mpei.ru)) и фирмы "Триеру" ([www.trie.ru](http://www.trie.ru)) разработана технология публикаций технической информации с возможностью непосредственных расчетов по ней. Расчетный сервер доступен по адресу:

Moscow Power Engineering Institute: Mathcad Calculation Server - Windows Internet Explorer

http://tw.t.mpei.ac.ru/MCS/Worksheets/ogk4/Model-modes-yaivinskaya-GRES-RD.xmcd

**Экономическая часть**

Затраты на подпиточную воду

Стоимость подпиточной воды за 1 м<sup>3</sup>:  $\Pi_{\text{подп. в.}} = 0.29$  руб/м<sup>3</sup>

Время работы за год:  $\tau_{\text{ч. год}} = 7000$  час

Расход подпиточной воды:  $Q_{\text{подп. ЦС}} = 355.58 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$

Часовая стоимость подпиточной воды:  $\Pi_{\text{подп. в час}} = \Pi_{\text{подп. в.}} Q_{\text{подп. ЦС}} = 103.118 \frac{\text{руб}}{\text{ч}}$

Среднегодовая стоимость подпиточной воды:  $\Pi_{\text{подп. в год}} = \Pi_{\text{подп. в час}} \tau_{\text{ч. год}} = 721.827$  тыс руб

**Затраты на ОЭДФК**

Стоимость ОЭДФК 1 дм<sup>3</sup>:  $\Pi_{\text{ОЭДФК}} = 200$  руб/дм<sup>3</sup> Recalculate

Расход водного раствора ОЭДФК:  $Q_{\text{н. д.}} = 7.9 \frac{\text{л}}{\text{ч}}$

Часовая стоимость ОЭДФК:  $\Pi_{\text{ОЭДФК. час}} = \Pi_{\text{ОЭДФК}} Q_{\text{н. д.}} C_{\text{ОЭДФК}} = 15.8 \frac{\text{руб}}{\text{ч}}$

Среднегодовая стоимость ОЭДФК:  $\Pi_{\text{ОЭДФК. год}} = \Pi_{\text{ОЭДФК. час}} \tau_{\text{ч. год}} = 110.6$  тыс руб

**Всего**

Суммарная часовая стоимость подп. воды и ОЭДФК:  $\Pi_{\Sigma. \text{ час}} = \Pi_{\text{подп. в. час}} + \Pi_{\text{ОЭДФК. час}} = 118.9 \frac{\text{руб}}{\text{ч}}$

Суммарные годовые затраты на подп. воды и ОЭДФК:  $\Pi_{\Sigma. \text{ год}} = \Pi_{\text{подп. в. год}} + \Pi_{\text{ОЭДФК. год}} = 832.4$  тыс руб

Рис. 3. Фрагмент расчета математической модели в среде Mathcad (экономическая часть)

www.vpu.ru/mas. В Mathcad, при необходимости, можно самостоятельно добавлять или корректировать какие-то расчетные составляющие, не обращаясь при этом к разработчикам программного обеспечения, быстро и оперативно реагируя на определенные изменения.

В то же время использование пакета Excel позволяет значительно облегчить работу персонала химического цеха, так как этот пакет широко распространен и знаком большинству пользователей компьютера.

#### Список литературы

1. Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. Водоподготовка. М.: Изд-во МЭИ, 2003.
2. Очков В.Ф., Иванов Е.Н., Макушин А.А. Живые руководящие документы по водоподготовке // Водоснабжение и канализация. 2011. № 7–8. С. 114–119.
3. Кишневский В.Ф. Современные методы обработки воды в энергетике. Мультимедийный обучающий курс “Электронной энциклопедии энергетики”. М.: ООО “Триеру”. 2012.
4. Боднарь Ю.Ф. Оптимизация водно-химического режима оборотных систем охлаждения с градирнями // Энергосбережение и водоподготовка. 2008. № 3. С. 8–11.