

## Проектирование котла-утилизатора вертикальной конструкции с использованием программного комплекса BOILER DESIGNER

Мошкарин А.В., д-р техн. наук, Шельгин Б.Л., канд. техн. наук, Жамлиханов Т.А., асп.

Приведены результаты разработки модели вертикального котла-утилизатора трех давлений для ПГУ-410 с использованием программного комплекса BOILER DESIGNER. Представлен пример компоновки поверхности нагрева. Выявлены преимущества вертикальной конструкции котла-утилизатора над горизонтальной.

*Ключевые слова:* газовая турбина, вертикальная конструкция, парогазовая установка, программный комплекс, поверхности нагрева, расчетная модель.

### Designing the vertical hrsg with the use of the boiler designer software

Moshkarin A.V., Shelygin B.L., Zhamlihanov T.A.

Results of the model building of a vertical HRSG of three pressures for CCGT-410 MW with the use of the BOILER DESIGNER software are presented. An example of a heating surface configuration is given. Advantages of a vertical design of a HRSG over horizontal one are revealed.

*Keywords:* gas turbine, vertical design, combined cycle with gas turbine, programme complex, surfaces of the heating, accounting model.

В настоящее время в энергетике широкое распространение получило внедрение парогазовых установок на основе ГТУ фирм ALSTOM, GENERAL ELECTRIC, SIEMENS, MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES (MHI). Постоянно совершенствуется паровой цикл ПГУ, используются двухконтурные и трехконтурные котлы-утилизаторы с промежуточным перегревом пара [1, 2].

Сотрудниками кафедры ТЭС (ИГЭУ) предложен проект расширения ОАО «Астраханская ТЭЦ-2» блоком ПГУ-410. Тепловая схема энергоблока (рис. 1) построена по блочному принципу. Она не предусматривает возможности автономного режима работы газовой турбины без парового котла-утилизатора.

Работа блока осуществляется на скользющем давлении пара в тракте паротурбинной установки. В состав основного оборудования блока входят:

- газовая турбина модели M701F4 фирмы MHI (Япония) мощностью 303,4 МВт (при температуре наружного воздуха +15 °С и относительной нагрузке 100 %; температура газов за ГТУ 602 °С при расходе 714,47 кг/с; КПД по выработке электроэнергии 38,2 %);

- котел-утилизатор трех давлений с промежуточным перегревом паропроизводительностью 414,26 т/ч (фирма-изготовитель АЕ&Е, Австрия);

- паровая конденсационная турбина трех давлений (фирма-изготовитель MHI, Япония).

Вследствие отсутствия заводских данных по котлу-утилизатору, сотрудниками кафедры ТЭС выполнен его конструкторский расчет с

использованием программного комплекса BOILER DESIGNER, разработанного фирмой OPTSIM-K (г. Москва) [3]. При этом учитывался опыт проектирования и изготовления отечественных котлоагрегатов ОАО «Машиностроительный завод “ЗиО-Подольск”». Предложен вариант котла-утилизатора с вертикальной конструкцией, который обладает следующими преимуществами над горизонтальной компоновкой поверхностей нагрева:

- малая отнимаемая площадь для строительства котла;
- простой доступ к отдельным ребристым трубам;
- благоприятные условия для транспортировки модулей;
- совмещенная (интегрированная) дымовая труба.

В качестве исходных данных принято, что в паровом котле-утилизаторе генерируется пар трех давлений: высокого давления – 12,5 МПа, 568 °С; среднего давления (после промежуточного перегрева) – 3,08 МПа, 568 °С; низкого давления – 0,52 МПа, 235,3 °С [4].

Секции поверхностей нагрева рекомендовано выполнять из труб с наружным спиральным-ленточным оребрением [5].

Согласно методике, описанной в [6, 7], была разработана расчетная модель котла-утилизатора, состоящая из двух рабочих структур: «Газоход» (газовый тракт) и «Группа Вода» (пароводяной тракт) (рис. 2, 3).

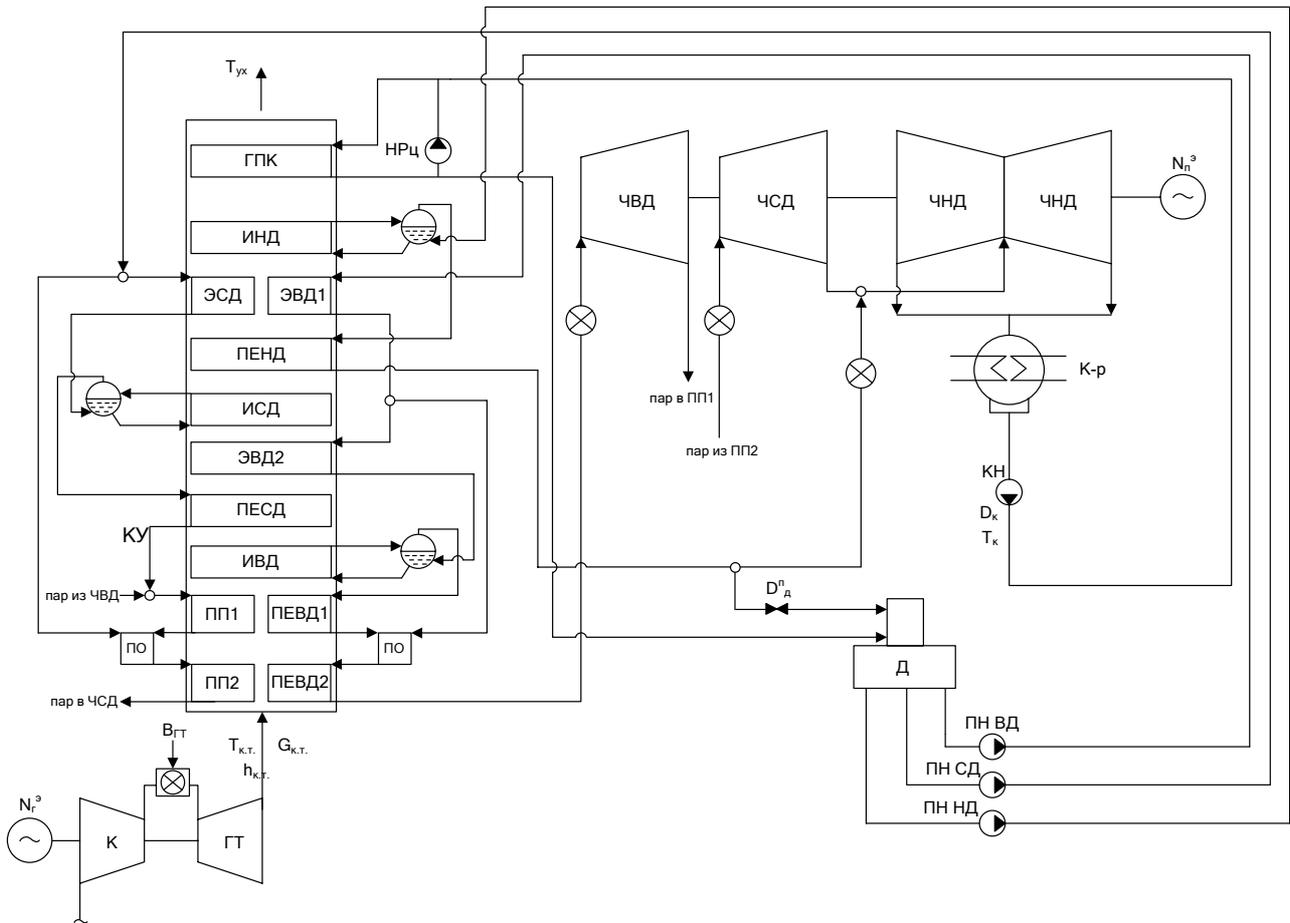


Рис. 1. Тепловая схема ПГУ-410: КУ – котел-утилизатор; К – компрессор; ГТ – газовая турбина; ПЕ – пароперегреватель; ПП – промперегреватель; И – испарительный пакет; Э – экономайзер; ВД, СД, НД – соответственно контуры высокого, среднего и низкого давления; ГПК – газовый подогреватель конденсата; ПН – питательный насос; КН – конденсатный насос; Д – деаэрактор; К-р – конденсатор; ЧВД – часть высокого давления; ЧСД – часть среднего давления; ЧНД – часть низкого давления; ПО – пароохладитель; НРЦ – насос рециркуляции

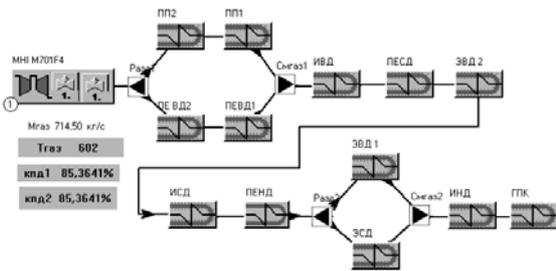


Рис. 2. Газовый тракт котла-утилизатора

Параметры уходящих газов из ГТУ были введены в блок исходных данных «Вход газов», входящий в дерево элемента «Вход газов». Максимальные значения расхода и температуры газов –  $M_{газМакс} = 714,47 \text{ кг/с}$ ,  $T_{газМакс} = 602 \text{ }^\circ\text{C}$ . Возможность изменения расхода и температуры газов обеспечивается положением соответствующих клапанов (рис. 2).

Результаты расчета параметров газового и пароводяных трактов представлены в табл. 1, 2. Значения скоростей пара в ПЕВД и ПП составляют 9,26–18,35 м/с. Средние значения скоростей воды в экономайзерных зонах (ЭВД1, ЭВД2, ЭСД, ГПК) составляют 0,51–0,68 м/с, что нор-

мально для некипящих экономайзерных поверхностей нагрева. Аэродинамическое сопротивление газового тракта котла-утилизатора составило 33,8 мбар, КПД по использованию тепловой энергии поверхностями нагрева – 85,36 %.

Основные параметры расчета горизонтальных котлов-утилизаторов для ПГУ-285 [7], ПГУ-400 [8] и вертикального для ПГУ-410 представлены в табл. 3.

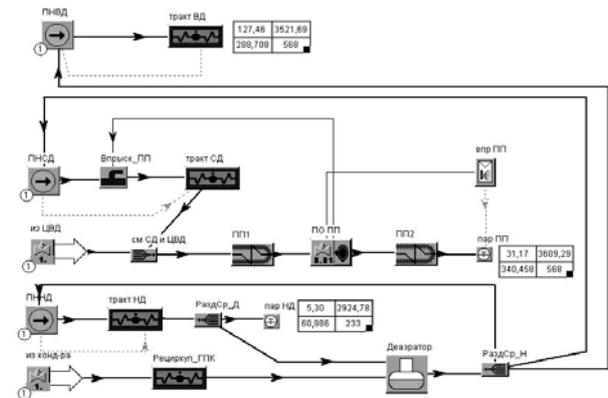


Рис. 3. Пароводяной тракт структуры «ГруппаВода»

Таблица 1. Результаты расчета газового тракта котла-утилизатора

Элемент	Температура на входе, °С	Температура на выходе, °С	Средний расход газов, м <sup>3</sup> /с	Средняя скорость газов, м/с	Коэффициент теплоотдачи от газов конвекцией, ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·К)	Коэффициент теплопередачи, ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·К)	Ток	Потери давления в тракте, мбар	Теплота, воспринятая от газов по балансу, кВт	Тепловая мощность, кВт
ПЕВД2	602	545,66	327,23	16,68	65,73	32,42	Противоток	5,22	27311,3	27311,3
ПП2	602	537,38	236,96	12,03	52,66	22,15	Противоток	4,12	22682,5	22682,5
ПЕВД1	545,66	447,61	327,23	15,24	63,2	33,4	Противоток	4,87	46908,7	46908,7
ПП1	537,38	471,06	236,96	11,14	50,85	21,52	Противоток	2,8	23027,3	23027,3
ИВД	457,46	337,48	564,19	11,49	53,37	36,34	Прямоток	2,14	96687,8	96687,8
ПЕСД	337,48	332,89	564,19	10,64	50,54	10,64	Противоток	2,05	3654,63	3654,63
ЭВД 2	332,89	290,9	564,19	10,26	49,91	30,4	Противоток	1,97	33280,3	33280,3
ИСД	290,9	263,27	366,72	9,67	48,68	31,26	Прямоток	2,75	21489,5	21489,5
ПЕНД	263,27	259,33	564,19	10,41	58,02	31,48	Противоток	0,88	3062,8	3062,8
ЭВД 1	259,33	202,36	564,19	11,55	56,68	32,93	Противоток	2,62	28804,2	28804,2
ЭСД	259,33	230,11	197,47	6,27	38,59	25,2	Противоток	1,28	7955,7	7955,7
ИНД	212,08	164,66	564,19	10,46	36,19	25,61	Прямоток	1,07	36339,5	36339,5
ГПК	164,66	92,79	564,19	6,65	46,76	38,21	Противоток	2,03	54712	54712

Таблица 2. Результаты расчета параметров пароводяных трактов КУ

Элемент	Расход среды на выходе, кг/с	Температура среды на входе, °С	Температура среды на выходе, °С	Давление среды на входе, МПа	Давление среды на выходе, МПа	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки трубы, мм	Сечение для прохода среды, м <sup>2</sup>	Средняя скорость среды, м/с	Коэффициент теплоотдачи внутри труб, ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·К)	Воспринятая теплота, кВт
ИНД	76	154,04	153,98	5,28	5,26	52	2,5	1,46	2,11	4155,33	36339,46
ПЕНД	17,22	153,44	235,4	5,22	5,2	38	2,5	0,73	12,82	105,84	3062,8
ЭВД 1	82,13	153,55	231	130,26	129,09	38	4	0,16	0,6	4506,41	28804,24
ЭВД 2	79,07	231	326,08	129,09	128,02	38	4	0,16	0,68	4938,54	33280,32
ИВД	300	328,63	328,23	128,04	126,33	52	4,5	0,38	2,26	11569,73	96687,75
ПЕВД1	77,87	329,66	474,94	128,02	126,78	38	4	0,16	9,26	2596,04	46908,66
ПО ВД	80,93	474,94	445,74	126,78	126,78						
ПЕВД2	80,93	445,74	568	126,78	125	38	4	0,16	13,33	1944,83	27311,25
ГПК	159,5	60	146,23	5,6	5,46	38	3	0,35	0,51	3240,68	54711,98
ЭСД	13,83	152,2	236,62	32,41	31,53	38	4	0,09	0,62	2961,81	7955,69
ИСД	56,24	236,68	236,01	31,56	31,18	52	2,5	0,38	1,06	5443,85	21489,54
ПЕСД	13,59	236,62	328,1	31,53	31,5	38	3	0,35	9,46	208,13	3654,63
ПП1	94,52	362,1	468,3	31,5	31,26	38	4	0,56	16,35	629,08	23027,27
ПО ПП	94,99	468,3	462,33	31,26	31,26						
ПП2	94,99	462,33	568	31,26	30,86	38	4	0,56	18,35	655,99	22682,48

Таблица 3. Основные показатели расчета котлов-утилизаторов

Наименование параметра	Тип котла		
	Горизонтальный для ПГУ-285	Горизонтальный для ПГУ-400	Вертикальный для ПГУ-410
Средний коэффициент теплоотдачи от газов конвекцией, ккал/	35,052	39,679	51,629
Средний коэффициент теплопередачи, ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·К)	21,868	26,288	28,581
Средний коэффициент теплоотдачи внутри труб, ккал/(м <sup>2</sup> ·ч·К)	2988,91	3200,67	3304,32
Паропроизводительность, т/ч	300,14	366,12	414,26
Суммарная поверхность, м <sup>2</sup>	216976,1	236295	262562
Удельная паропроизводительность, т/(ч·м <sup>2</sup> )	0,001383	0,001548	0,00157
КПД, %	84,1	83,5	85,36



Показано, что значение коэффициентов теплопередачи по различным поверхностям нагрева при вертикальной компоновке выше на 8,7–30,7 %, что обеспечивает высокую удельную паропроизводительность, более низкую металлоемкость.

#### Список литературы

**1. Состояние** и перспективы развития энергетики Центра России; Под ред. А.В. Мошкарин / Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 2000.

**2. Анализ** направлений отечественной теплоэнергетики; Под ред. А.В. Мошкарин / Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. – Иваново, 2002.

**3. Доверман Г.И.** Руководство для пользователей «Справочные материалы по программе BOILER DESIGNER» / OPTSIM-K. – М., 2004.

**4. Мошкарин А.В., Жамлиханов Т.А.** Расширение ОАО «Астраханская ТЭЦ-2» парогазовым блоком 410 МВт // Теп-

лоэнергетика: Тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 24 апреля 2008 г. / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2006. – С. 5–6.

**5. Газотурбинные** и парогазовые установки тепловых электростанций; Под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.

**6. Расчет** котельных агрегатов с использованием современных программных продуктов: Учеб. пособие / Г.И. Доверман, А.В. Мошкарин, Б.Л. Шельгин, Ю.В. Мельников / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2007.

**7. Расчет** котлов-утилизаторов с использованием программного продукта BOILER DESIGNER / Г.И. Доверман, А.В. Мошкарин, Б.Л. Шельгин, Ю.В. Мельников // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 2. – С. 3–9.

**8. Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Мельников Ю.В.** Оценка показателей паротурбинной части парогазового блока мощностью 400 МВт на сниженных нагрузках // Вестник ИГЭУ. – 2008. – Вып. 2. – С. 9–16.

Мошкарин Андрей Васильевич,  
Ивановский государственный энергетический университет  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой ТЭС,  
адрес: г. Иваново, ул. Голубева, д. 6, кв. 86.

Шельгин Борис Леонидович,  
Ивановский государственный энергетический университет  
кандидат технических наук, профессор кафедры ТЭС,  
телефон (4932) 41-60-56.

Жамлиханов Тимур Абдульверович,  
Ивановский государственный энергетический университет,  
аспирант, ассистент кафедры ТЭС,  
телефон (4932) 37-74-60.