

УДК 621.18

ЕРЕМЕЕВ Е. А., ЖДАНОВА А. В., студенты гр. ТЭБ-231
Научный руководитель: УШАКОВ К. Ю., к.т.н., доцент (КузГТУ)
г. Кемерово

СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ «BOILER DESIGNER»

В последние годы в промышленности активно развивается направление создание цифровых двойников технологических объектов и оборудования. В России такая тенденция активно развивается начиная с 2020 года, когда активизировались первые крупные внедрения цифровых технологий в промышленном секторе [1]. В настоящее время все большее количество крупных компаний начинают заниматься разработкой и внедрением цифровых двойников эксплуатируемого оборудования с целью определения способов повышения эффективности его работы и оптимизации эксплуатационных режимов.

Под цифровым двойником понимается виртуальная копия какого-либо физического объекта, процесса или системы, которая максимально точно воспроизводит характеристики и поведение материального оригинала. Некоторые цифровые двойники имеют способность полностью синхронизироваться с оригиналом в реальном времени через данные с датчиков [2, 3].

Использование цифровых двойников позволяет моделировать различные сценарии и условия эксплуатации, прогнозировать сбои, поломки, выявлять недостатки без риска для реального объекта. Это делает данную технологию важным инструментом повышения надежности и эффективности работы промышленных установок.

В настоящее время выделяют несколько типов цифровых двойников. К основным относят [4, 5]:

- цифровой двойник компонента – модель отдельной детали или узла;
- цифровой двойник объекта – модель конкретного оборудования или технологического устройства;
- цифровой двойник процесса – модель технологических процессов, происходящих в оборудовании;
- цифровой двойник системы – комплексная модель, объединяющая несколько объектов и процессов в рамках одной технологической системы.

В теплоэнергетическом секторе наиболее актуальна задача по созданию цифровых двойников котельных агрегатов, используемых на действующих теплоэлектростанциях. Создание цифрового двойника котельного агрегата позволяет исследовать влияние различных параметров на его работу. В процессе моделирования можно изменять отдельные характеристики (расход топлива, параметры теплоносителя, давление, режим горения и т.п.) и проводить сравнительный анализ полученных результатов. Это дает возможность выявлять наиболее эффективные режимы эксплуатации и оценивать последствия изменения технологических параметров.

На данный момент функциональным отечественным программным обеспечением для моделирования котельных агрегатов, а также паровых турбин, является «Boiler Designer». Программа является полностью отечественной разработкой, что обеспечивает полный суверенитет создания цифровых двойников котельных агрегатов без угрозы закрытия программы и опасности санкций. Интерфейс данной программы представлен на рисунке 1.

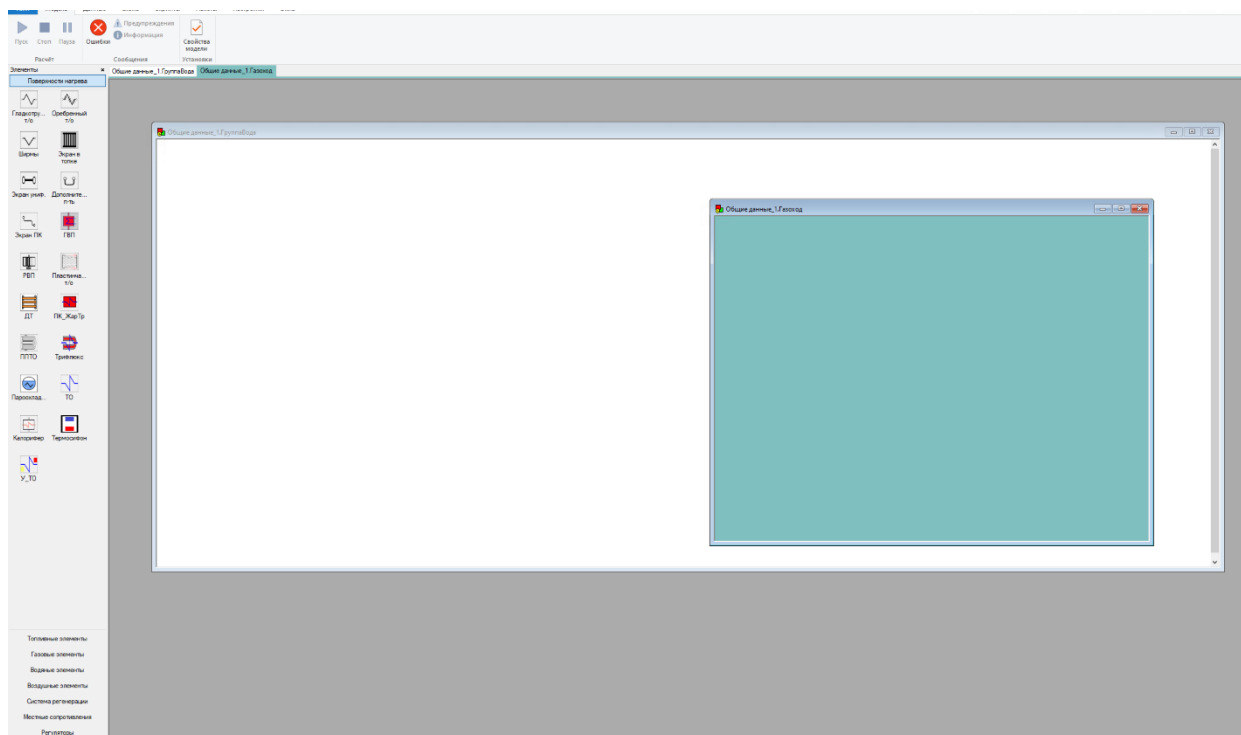


Рисунок 1. Интерфейс ПО «Boiler Designer»

В работе с использованием ПО «Boiler Designer» был создан цифровой двойник парового энергетического котельного агрегата ТП-87-1 (Е-420/140 Ж). После настройки и устранения всех ошибок был совершен успешный пуск цифровой модели котельного агрегата. В его результате были получены подробные характеристики оборудования, температуры и скорости движения дымовых газов и теплоносителя. Разработанная модель представлена на рисунках 2 и 3.

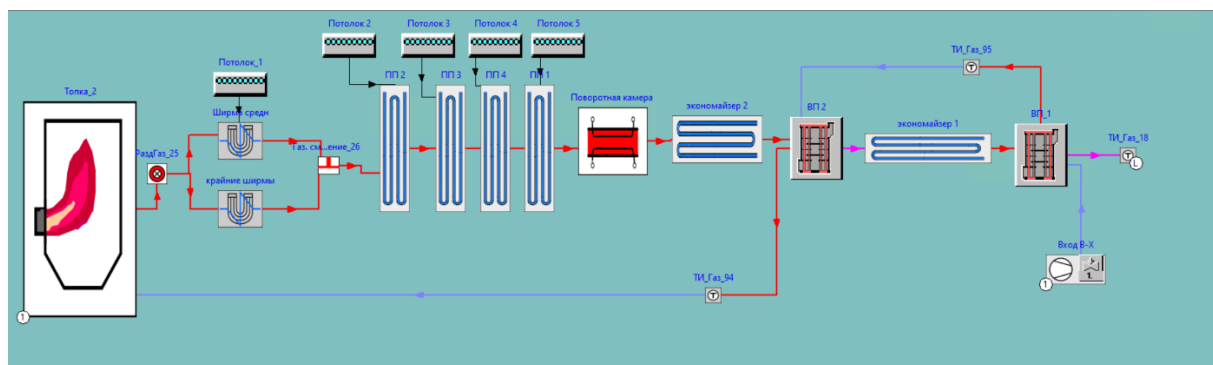


Рисунок 2. Газовый тракт энергетического котла ТП-87-1 в ПО «Boiler Designer»

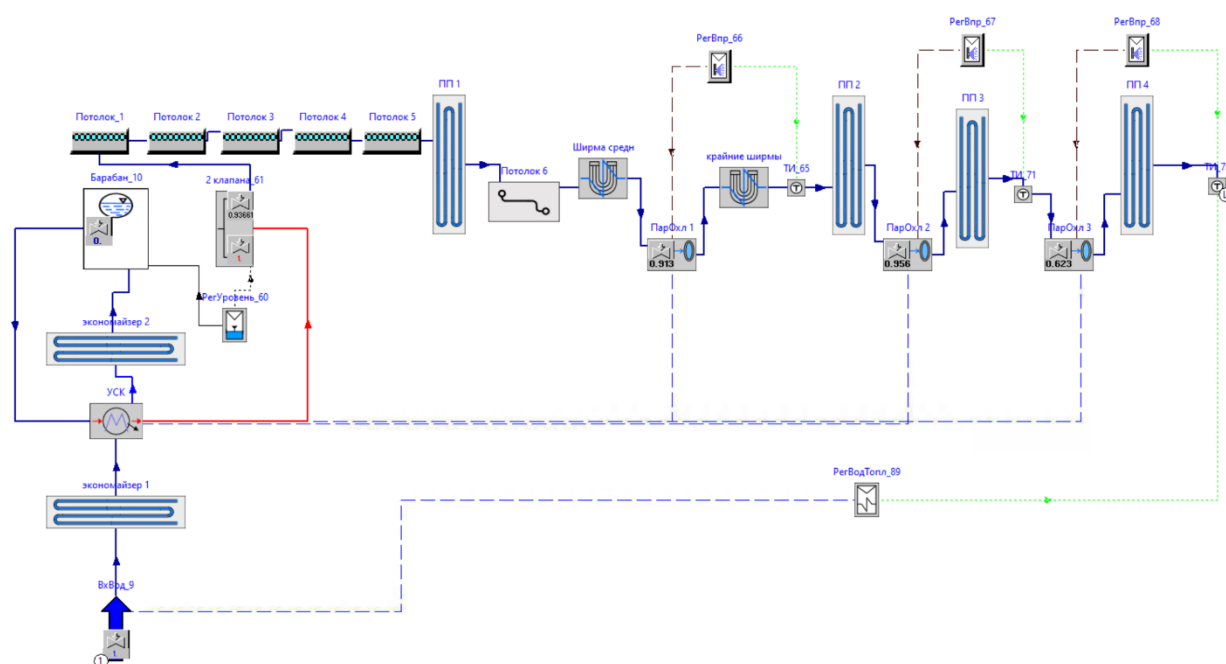


Рисунок 3. Пароводяной тракт энергетического котла ТП-87-1 в ПО «Boiler Designer»

По результату расчета программное обеспечение формирует подробные табличные отчеты по газовому и пароводяному тракту, представленные на рисунке 4 и 5, а также графический отчет, представленный на рисунке 6.

Имя элемента	Температура на входе [°C]	Температура на выходе [°C]	Средний расход газов [м³/с]	Средняя скорость газов [м/с]	Коэф. теплоотдачи от газов конвекцией [Вт/м²·K]	Коэф. теплоотдачи излучением [Вт/м²·K]	Коэф. теплопередачи [Вт/м²·K]	Ток [-]	Потери давления в газовом тракте [Па]	Среднегеометрический темп. напор [°C]	Тепло, воспринимаемое от газов по балансу [кВт]	Тепло, воспринимаемое излучением из топлива [кВт]	Тепловая мощность [кВт]
Топка_2	0,00	1167,58	155,18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ВП_1	30,00	283,57	132,28	9,68	80,82	0,00	32,23	Прямоток	735,46	69,54	44376,70	0,00	44376,70
Ширма средн	1167,58	1018,89	78,22	7,77	47,75	21,40	78,79	Прямоток	7,54	712,29	17509,56	9029,72	26539,96
крайние ширмы	1167,58	1024,94	78,22	7,79	50,35	22,71	82,03	Прямоток	15,11	668,22	17156,89	9932,04	27089,06
ВП 2	283,57	464,77	132,28	14,98	83,61	0,00	32,17	Прямоток	1157,41	112,71	33072,64	0,00	33072,64
ПП 2	1021,91	953,20	160,27	9,88	47,06	24,64	50,69	Прямоток	19,21	505,60	11593,65	2244,94	13776,32
ПП 3	953,20	839,05	165,35	9,46	43,42	22,22	49,12	Прямоток	5,42	387,37	25066,72	1,53	25072,58
ПП 4	839,05	766,04	170,44	8,97	45,64	19,06	48,60	Прямоток	21,18	260,34	14762,65	0,00	14758,00
ПП 1	766,04	679,86	175,53	8,58	42,67	14,24	44,63	Прямоток	10,71	371,19	19382,87	0,00	19383,61
Поворотная камера	679,86	679,53	178,07	10,27	17,23	-	-	-	0,01	-	92,455491	0,000000	92,46
Потолок 6	-	-	-	-	0,00	16,63	16,58	Прямоток	-	319,88	92,46	0,00	92,46
экономайзер 2	679,53	573,43	178,07	7,99	73,76	23,85	64,81	Противоток	153,73	310,43	29675,77	0,00	29682,13
ВП 2	573,43	452,00	178,07	24,07	52,19	5,00	32,17	Прямоток	555,06	112,71	33072,64	0,00	33072,64
экономайзер 1	452,00	363,92	178,07	5,94	60,19	17,46	57,56	Противоток	218,17	154,50	23390,09	0,00	24696,75
ВП_1	363,92	191,24	178,07	21,14	58,48	1,69	32,23	Прямоток	1318,26	69,54	44376,70	0,00	44376,70

Рисунок 4. Табличный формат отчета работы котла по газовому тракту

Имя элемента	Расход среды на выходе [т/ч]	Температура среды на входе [°C]	Температура среды на выходе [°C]	Давление среды на выходе [МПа]	Давление среды на выходе [МПа]	Паросодержание [%]	Наружный диаметр [мм]	Толщина стенки трубы [мм]	Число параллельных труб [-]	Сечение для прохода среды [м2]	Средняя скорость среды [м/с]	Массовая скорость среды [кг/м2*с]	Кэф. теплоотдачи внутри труб [Вт/м2*К]	Воспринятое тепло [кВт]
экономайзер 1	440,00	230,00	272,50	15,50	15,26	-43,244499	25,00000	3,50000	330,00	0,08	1,80	1455,46	13888,07	24698,19
экономайзер 2	440,00	294,21	334,39	15,26	15,12	-6,592514	25,00000	3,50000	350,00	0,09	2,01	1372,29	15176,42	29631,06
правый	105,00	334,74	493,72	15,12	15,03	168,307058	60,00000	6,00000	218,00	0,39	0,82	73,94	9938,38	50757,36
левый	105,00	334,74	493,72	15,12	15,03	168,307058	60,00000	6,00000	218,00	0,39	0,82	73,94	9938,38	50757,36
фронтовой	105,00	334,74	342,28	15,12	15,02	97,672741	60,00000	6,00000	118,00	0,21	0,80	136,59	15521,37	30194,53
задний	105,00	334,74	342,28	15,12	15,02	97,672741	60,00000	6,00000	118,00	0,21	0,80	136,59	15521,37	30194,53
Потолок_1	419,99	342,78	342,40	15,12	14,94	100,646059	32,00000	4,00000	129,00	0,06	20,71	1999,09	21388,77	1360,09
Потолок 2	419,99	342,40	342,03	14,94	14,88	100,541075	32,00000	4,00000	129,00	0,06	21,04	1999,09	22358,37	62,20
Потолок 3	419,99	342,03	341,59	14,88	14,82	100,393905	32,00000	4,00000	129,00	0,06	21,13	1999,09	22329,94	34,41
Потолок 4	419,99	341,59	341,03	14,82	14,74	100,209611	32,00000	4,00000	129,00	0,06	21,24	1999,09	22309,32	35,41
Потолок 5	419,99	341,03	340,72	14,74	14,70	100,103417	32,00000	4,00000	129,00	0,06	21,33	1999,09	22269,73	7,40
ПП 1	419,99	340,72	360,31	14,70	14,69	116,348239	38,00000	4,00000	608,00	0,43	3,23	271,46	3056,30	19383,55
Потолок 6	419,99	360,31	359,32	14,69	14,54	115,874274	32,00000	4,00000	129,00	0,06	26,34	1999,09	14103,40	92,83
Ширма средн	419,99	359,32	406,65	14,54	14,52	137,794615	38,00000	4,00000	304,00	0,21	8,16	542,91	3618,60	26539,98
ПарОхл 1	432,79	406,65	396,28	14,52	14,52	133,786639	-	-	-	-	-	-	-	-
крайние ширмы	432,79	396,28	460,01	14,52	14,48	155,385423	38,00000	4,00000	304,00	0,21	10,06	559,46	2892,41	27089,15
ПП 2	432,79	460,01	497,74	14,48	14,32	165,333342	32,00000	5,00000	360,00	0,14	18,30	878,49	3910,21	13785,65
ПарОхл 2	454,33	497,74	470,38	14,32	14,32	157,637082	-	-	-	-	-	-	-	-
ПП 3	454,33	470,38	540,04	14,32	14,25	176,137969	32,00000	5,00000	720,00	0,27	10,25	461,10	2238,14	25072,41
ПарОхл 3	469,49	540,04	518,58	14,25	14,25	170,554587	-	-	-	-	-	-	-	-
ПП 4	469,49	518,58	559,98	14,25	14,14	180,479608	32,00000	6,00000	720,00	0,23	13,79	576,55	2670,36	14757,76

тракту

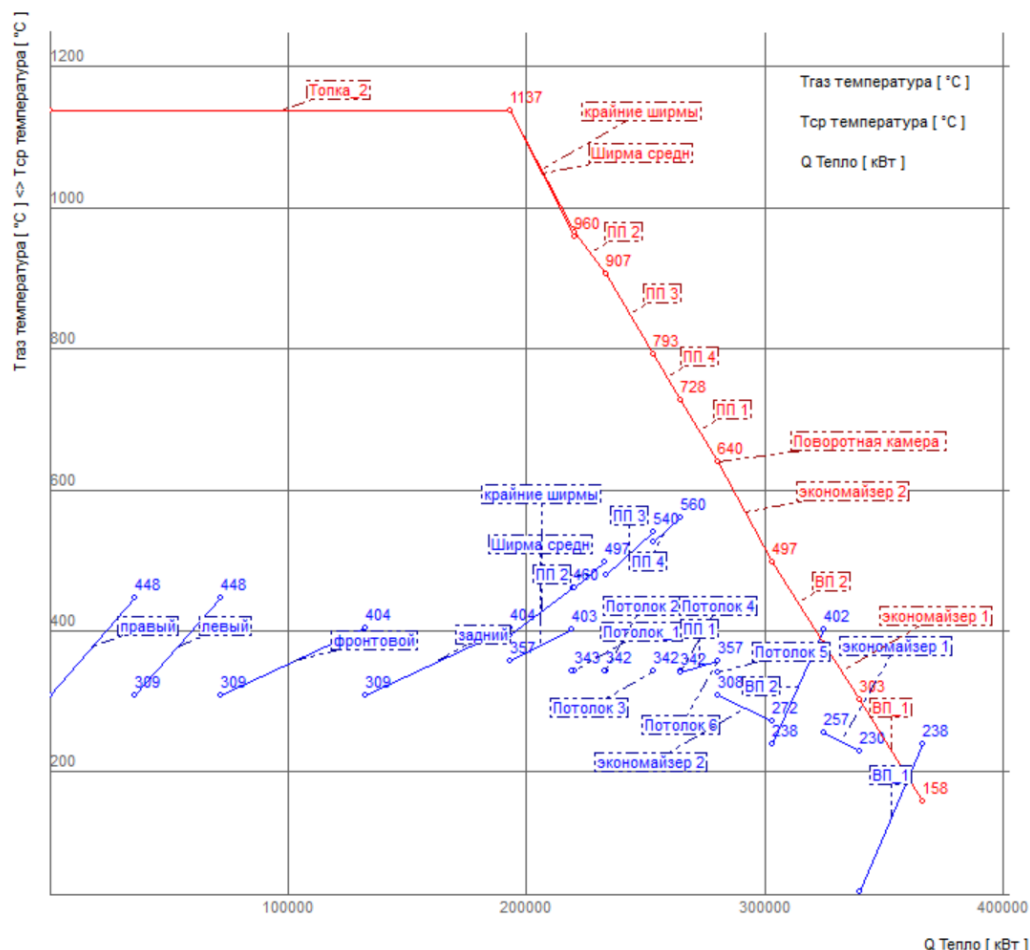


Рисунок 6. Отчет в формате графиков зависимости температуры от количества теплоты

На основании полученных отчетов можно определить температуру дымовых газов на каждой поверхности нагрева, средний расход и скорость движения,

потери давления, воспринятое тепло и тепловую мощность отдельных элементов котельного агрегата. Анализ графических зависимостей позволяет оценить распределение тепловой нагрузки по поверхностям нагрева и определить наиболее интенсивные зоны теплообмена.

Таким образом, созданный цифровой двойник позволяет детально анализировать тепловые процессы, происходящие в котельном агрегате. С помощью модели можно определить количество теплоты, воспринимаемое каждой поверхностью нагрева, а также оценить необходимый расход топлива для поддержания заданных параметров пара. Использование подобных моделей открывает широкие возможности для оптимизации режимов работы котлов и повышения эффективности их эксплуатации.

Исследование реализовано в рамках работы студенческого конструкторского бюро «УникУм» при поддержке Фонда Мельниченко и АО «СИБИАЦ».

Список литературы:

1. В России активно растет рынок цифровых моделей. – Текст : электронный // ФГБУ «РФИ Минприроды России» : официальный сайт. – 2023. – URL https://ai.mnr.gov.ru/news/Mass_media_about_digitalization/v-rossii-aktivno-rastet-rynok-tsifrovyykh-modeley (дата обращения 9.03.2026)
2. Лихтциндер, Б. Я. Цифровые двойники / Б. Я. Лихтциндер // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2023. – Т. 17, № 8. – С. 30-37. – DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-8-30-37.
3. The Digital Twin: Demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems / Thomas H.-J. Uhlemanna, Christoph Schock other // Procedia Manufacturing. – №9. – 2017. – с. 113-120. – DOI : <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.043>
4. Кравченко, А. А. Природа, сущность и классификация цифровых двойников / А. А. Кравченко // Экономика и управление. – 2025. – Т. 31, № 1. – С. 125-134. – DOI 10.35854/1998-1627-2025-1-125-134.
5. Касьянова, Н. Т. К вопросу о классификации цифровых двойников по уровню сложности и зрелости / Н. Т. Касьянова, Е. С. Тумашева, Н. В. Матвеева // Бюллетень инновационных технологий. – 2024. – Т. 8, № 1(29). – С. 19-23. – EDN WZSHAV.