

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА (05.14.04)

УДК 621.311.22:621.57

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-89-97

Повышение энергетической и экологической эффективности теплоэлектроцентрали на основе применения абсорбционных трансформаторов теплоты

Ю.В. Яворовский, И.А. Султангузин, А.И. Бартечев, С.А. Прищепова, Е.С. Трушин, А.Ш. Алимгазин

Рассмотрена схема повышения энергетической эффективности теплоэлектроцентралей (ТЭЦ) с применением абсорбционных трансформаторов теплоты (АТТ). Цель исследования — повышение энергетической и экологической эффективности использования природного газа в системах энергоснабжения с применением паротурбинных установок и абсорбционных трансформаторов теплоты. Моделирование модернизации ТЭЦ и оценка рассеивания вредных выбросов проводились с использованием ISCManager и Thermoflex. Все расчеты выполнены для одного энергоблока ТЭЦ-21 г. Москвы. Полученные данные по повышению энергетической эффективности и снижению вредных выбросов мультиплицированы на всю энергосистему г. Москвы, основным источником тепловой и электрической энергии которой являются ТЭЦ ПАО «Мосэнерго».

Дано описание применяемых программ, в первом приближении выполнена оценка энергетического и экологического эффектов от модернизации одного энергоблока, одной ТЭЦ и всей энергосистемы города.

Ключевые слова: абсорбционный трансформатор теплоты, теплоэлектроцентраль, центральный тепловой пункт, выбросы вредных веществ, воздействие на окружающую среду, энергетическая эффективность, Industrial Source Complex, Thermoflex.

Для цитирования: Яворовский Ю.В., Султангузин И.А., Бартечев А.И., Прищепова С.А., Трушин Е.С., Алимгазин А.Ш. Акустическая эффективность экранов для снижения шума от газораспределительных пунктов и их газопроводов // Вестник МЭИ. 2020. № 4. С. 89—97. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-89-97.

Improving the Energy Efficiency and Environmental Friendliness of a Combined Heat and Power Plant through the Use of Heat Absorption Transformers

Yu.V. Yavorovsky, I.A. Sultanguzin, A.I. Bartenev, S.A. Prishchepova, E.S. Trushin, A.Sh. Alimgazin

A process arrangement for improving the energy efficiency of combined heat and power plants (CHPPs) using absorption heat transformers (AHTs) is considered. The aim of the study is to improve the energy efficiency and environmental friendliness of using natural gas in power supply systems by applying steam turbine plants and absorption heat transformers.

For modeling the modernization of a CHPP and for estimating the dispersion of harmful emissions, the ISC Manager and the Thermoflex software systems were used. All calculations were carried for one power unit of the CHPP-21 in Moscow. The obtained data on improving the energy efficiency and decreasing harmful emissions were extended for the entire power system of Moscow, in which the CHPPs operated by PJSC Mosenergo serve as the main source of heat and electricity.

The applied computer programs are described, and the energy and environmental effect from the modernization of one power unit, one CHPP and the entire power system of Moscow has been estimated in a first approximation.

Key words: absorption heat transformer, combined heat and power plant, central heat supply station, harmful emissions, environmental impact, energy efficiency, Industrial Source Complex, Thermoflex.

For citation: Yavorovsky Yu.V., Sultanguzin I.A., Bartenev A.I., Prishchepova S.A., Trushin E.S., Alimgazin A.Sh. Improving the Energy Efficiency and Environmental Friendliness of a Combined Heat and Power Plant through the Use of Heat Absorption Transformers. Bulletin of MPEI. 2020;4:89—97. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-4-89-97.

Введение

Энергоэффективное и экологичное производство тепловой и электрической энергии — залог развития общества и повышения уровня жизни людей.

Износ основного оборудования энергетического сектора — основная причина повышенных затрат на выработку энергетических ресурсов, а также увеличения вредных выбросов.

Разработка схем ТЭЦ, позволяющих снизить потребление топлива и количество выбросов вредных веществ, является перспективным направлением развития тепло- и электроэнергетики.

В мировой практике существуют примеры использования абсорбционных трансформаторов теплоты (АТТ) на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ). Это угольные станции в Китае, ни одна из которых не может быть построена без применения АТТ. Китай на данный момент считается лидером в производстве абсорбционных трансформаторов теплоты и первопроходцем в применении АТТ на ТЭЦ.

Основные исследования применения АТТ на ТЭЦ описаны в [1 — 5]. К сожалению, в данных публикациях не приведены конкретные значения величины энергетического эффекта от применения АТТ на ТЭЦ, а также нет оценки экологического эффекта от снижения вредных выбросов ТЭЦ.

Следует отметить, что статьи [1 — 5] опираются на данные об угольных ТЭЦ, а исследований о применении АТТ на газовых ТЭЦ, характерных для нашего региона, практически нет.

В связи с этим, моделирование модернизации реальной ТЭЦ для получения достоверных данных об энергетическом и экологическом эффектах — первоочередная задача для энергоэффективного и экологичного развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) г. Москвы (в частности) и России (в целом).

В качестве первого шага выполнен анализ энергосистемы г. Москвы.

Анализ энергосистемы г. Москвы

В качестве объекта исследования взята система теплоэлектроцентрали г. Москвы [6]. Выявлено, что основными источниками энергии являются ТЭЦ ПАО «Мосэнерго». На рисунках 1, 2 изображено распределение установленной электрической и тепловой мощностей ТЭЦ г. Москвы.

Из диаграмм рис. 1, 2 следует, что ТЭЦ-21, наряду с ТЭЦ-26, считается одной из самых крупных по установленным электрической и тепловой мощностям. Это делает её подходящим объектом для модернизации, поскольку вероятная установка АТТ на ней может привести к большому энергетическому и экологическому эффектам.

Она является типичной городской теплоэлектроцентралью, поскольку в состав оборудования входят

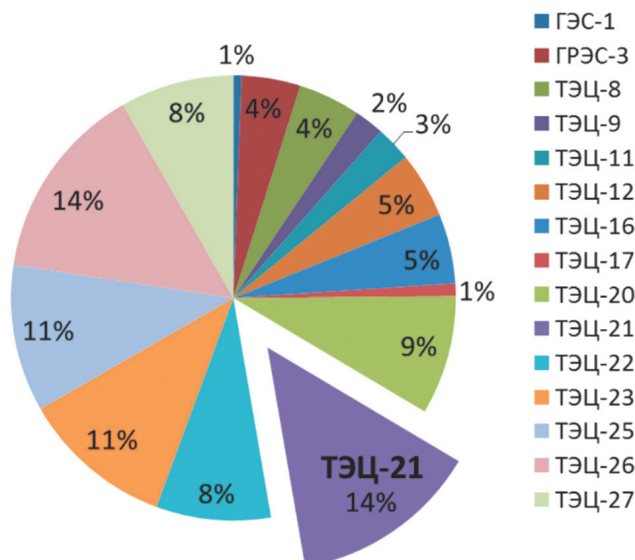


Рис. 1. Распределение установленной электрической мощности между ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

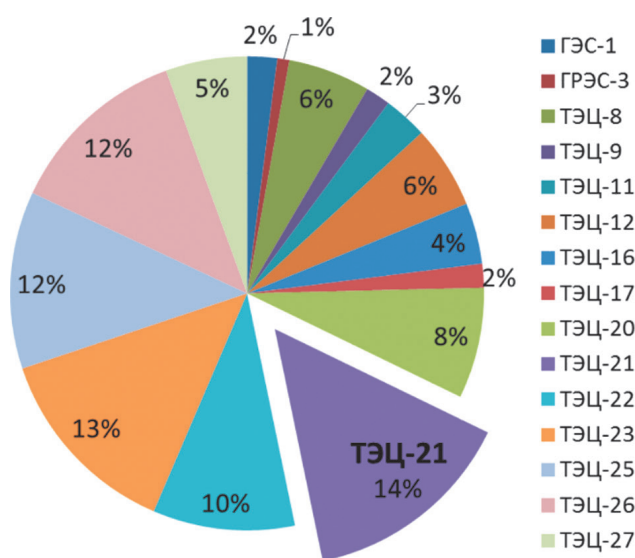


Рис. 2. Распределение установленной тепловой мощности между ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

энергоблоки с давлением 130 атм, более современные с давлением 240 атм, а также, введенный в эксплуатацию в 2008 г. парогазовый энергоблок. Теплоэлектроцентраль расположена в Северном административном округе г. Москвы, снабжает тепловой энергией жителей Северного, Северо-Восточного и Центрального административных округов, а также г. Химки Московской области.

Наряду с энергетическим эффектом, важным фактором, определяющим эффективность модернизации ТЭЦ с применением АТТ, является снижение вредных выбросов. В связи с этим проведен расчёт рассеивания выбросов от ТЭЦ до и после модернизации.

Выбросы

Для оценки воздействия выбросов вредных веществ на население взята методология Impact Pathways [7, 8]. В ее основе лежит выполнение следующих этапов [9]:

- выбор источника (определение выбросов);
- расчет рассеивания вредных выбросов (увеличение концентрации);
- определение воздействия (функция «доза–эффект»);
- экономическая оценка ущерба (стоимость).

Impact Pathways позволяет оценивать выбросы вредных веществ в атмосферу, загрязнение водоемов и почвы.

Для определения влияния вредных выбросов на окружающую среду использовано программное обеспечение ISC Manager [7], вызывающее программу Industrial Source Complex (ISC) для расчета рассеивания. Программа ISC рекомендована для использования Американским агентством по защите окружающей среды (EPA). В её основу положена статистическая теория рассеивания вредных выбросов в атмосфере, основанная на предположении, что распределение концентрации примесей в диффундирующем облаке дыма определяется в соответствии с законом Гаусса. Для вывода результатов расчета в ISC Manager применяется геоинформационная система ГИС «Карта 2008».

В качестве функции «доза–эффект» использованы результаты медицинских исследований, проведенных во многих странах мира отдельно по каждому загрязнителю и каждому физическому воздействию. Для определения суммарного физического воздействия по региону в ISC Manager рассчитана плотность населения и выявлено влияние роста приземной концентрации вредных веществ на ухудшение здоровья населения в соответствии с функцией «доза–эффект» [7, 8].

Для расчёта величин выбросов вредных веществ от ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» собрана информация о количестве дымовых труб ТЭЦ, их высоте, а также годовом выбросе вредных веществ в атмосферу (табл. 1) [10].

Результаты моделирования показали, что максимальная концентрация выбросов оксидов азота ($6,32 \text{ мкг/м}^3$) и оксидов углерода ($0,28 \text{ мкг/м}^3$) наблюдается в районе ТЭЦ-21. Предельно допустимая концентрация (ПДК) для указанных загрязняющих веществ составляет $0,06$ и $3,0 \text{ мг/м}^3$, соответственно. Рассеивание и воздействие выбросов оксидов азота изображено на рис. 3, 4. Максимальное воздействие ($0,0223 \text{ ед.}$) достигается в непосредственной близости к ТЭЦ-21, что делает снижение её выбросов актуальной задачей.

Сводные данные по воздействию вредных выбросов от ТЭЦ на население Москвы продемонстрированы в табл. 2.

Для оценки энергетического эффекта необходимо проанализировать схемы ТЭЦ до и после модернизации и порядок их расчёта.

Принципиальные схемы теплоэлектроцентрали до и после модернизации

Исходная упрощенная схема ТЭЦ дана на рис. 5 [11]. Питательная вода, поступающая в котёл, испаряется и в виде пара направляется в цилиндр высокого давления (ЦВД) паровой турбины. После срабатывания в ЦВД часть пара поступает в цилиндр низкого давления (ЦНД). После ЦНД отработавший пар переходит в конденсатор, откуда после конденсации перекачивается обратно в котёл. Контур охлаждения конденсатора состоит из градирни и насоса. Часть пара после ЦВД идет в паро-водяной теплообменник, где конденсируется, отдавая тепло, подаётся обратно в контур, смешиваясь

Таблица 1

Годовые величины выбросов вредных веществ от ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

Номер ТЭЦ	Всего, т/год	Твердые вещества, т/год	Диоксид серы, т/год	Оксиды азота (в пересчете на NO ₂), т/год	Оксид углерода, т/год
ГЭС-1	545	0	0	531	14
ТЭЦ-8	1259	2	185	1055	18
ТЭЦ-9	463	0	1	442	20
ТЭЦ-11	677	0	9	644	24
ТЭЦ-12	1230	0	2	1224	4
ТЭЦ-16	1346	0	4	1241	101
ТЭЦ-20	1388	0	5	1325	57
ТЭЦ-21	3908	0	9	3726	174
ТЭЦ-22	24834	1227	6467	17123	17
ТЭЦ-23	2636	0	1	2623	11
ТЭЦ-25	2696	0	4	2522	171
ТЭЦ-26	4592	0	4	4239	349
ТЭЦ-27	1075	0	0	1075	0

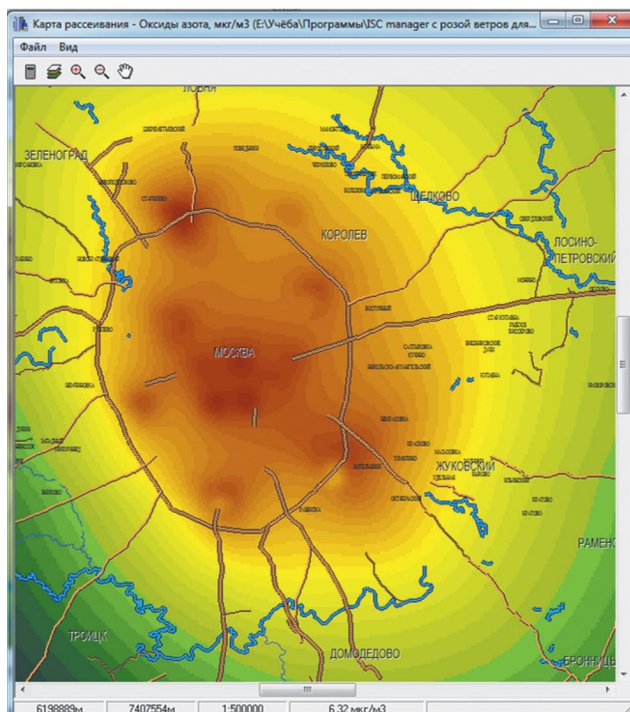


Рис. 3. Карта рассеивания оксидов азота от ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

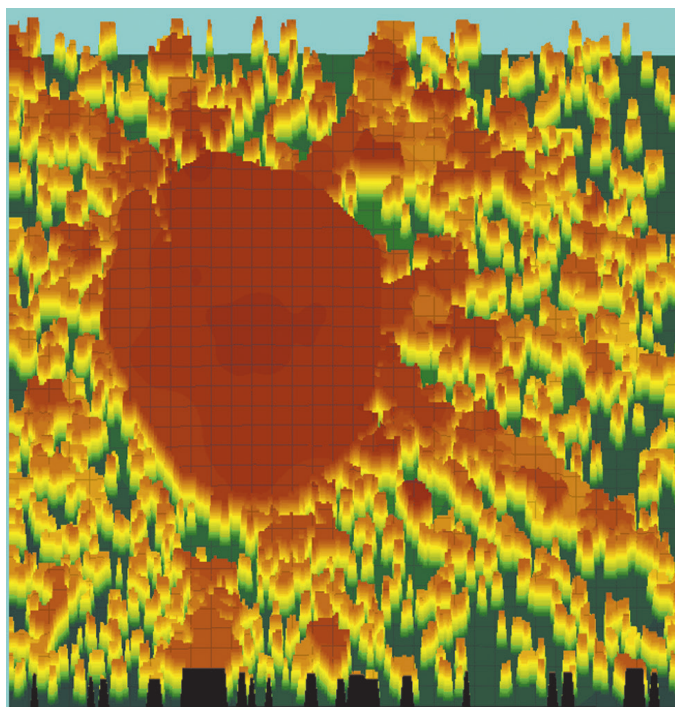


Рис. 4. Трехмерная матрица воздействия оксидов азота на население от ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

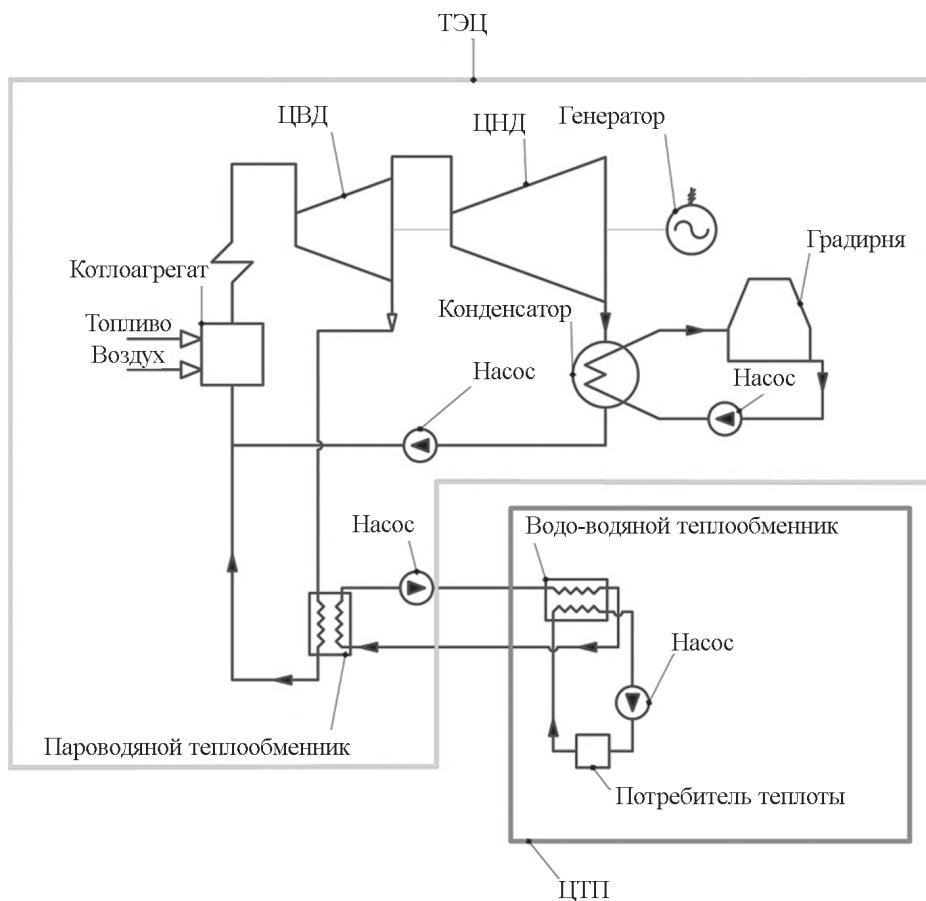


Рис. 5. Упрощенная схема ТЭЦ

Таблица 2

Ущерб от выбросов вредных веществ ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

Загрязняющие вещества	Смертность, чел./год	Ущерб, млн руб./год
Диоксиды серы	39,970	2 717,96
Твердые вещества	29,180	1 984,24
Оксид углерода	0,1500	10,20000
Оксиды азота	160,42	10908,56
Суммарно	229,72	15620,96

вается с питательной водой и поступает в котёл. Вода из нагреваемого контура паро-водяного теплообменника перекачивается насосом в водо-водяной теплообменник, установленный на центральном тепловом пункте (ЦТП), затем подаётся обратно в паро-водяной теплообменник. Контур потребителей теплоты состоит из водо-водяного теплообменника, насоса и непосредственно потребителя теплоты.

Модернизированная схема ТЭЦ (рис. 6) дополнительно включает в себя два АТТ (на ТЭЦ и ЦТП). Основная схема работает без изменений.

Часть пара из отбора ЦВД направляется в качестве греющего источника в АТТ, установленный на ТЭЦ. В качестве охлаждающего теплоносителя АТТ выступает вода из контура охлаждения конденсатора, забираемая перед градирней. При этом, часть воды поступает в АТТ на охлаждение. После нагрева в АТТ охлаждающая вода идет в паро-водяной теплообменник, где догревается и дальше перекачивается насосом в АТТ,

установленный на ЦТП, где выступает в качестве греющего теплоносителя. Греющая вода с ТЭЦ, проходя через АТТ, отдаёт часть своей тепловой энергии, затем поступает в водо-водяной теплообменник, где также играет роль греющего теплоносителя. После теплообменника вода с ТЭЦ направляется обратно в АТТ, но уже в качестве охлаждаемого теплоносителя. После АТТ охлаждённая вода поступает в контур охлаждения конденсатора ТЭЦ, смешиваясь при этом с частью воды, ранее поступившей на охлаждение в АТТ [12].

Применение АТТ на ТЭЦ и ЦТП позволит утилизировать низкотемпературную бросовую теплоту конденсатора за счёт перевода температурного графика магистральных сетей с 120/70 °С на 120/20 °С, при этом температурный график потребителей изменится с 95/70 °С на 60/40 °С. Утилизация бросовой теплоты конденсатора достигается подачей обратной сетевой воды из магистрали в контур охлаждения конденсатора, после чего данная вода догревается в АТТ и паро-

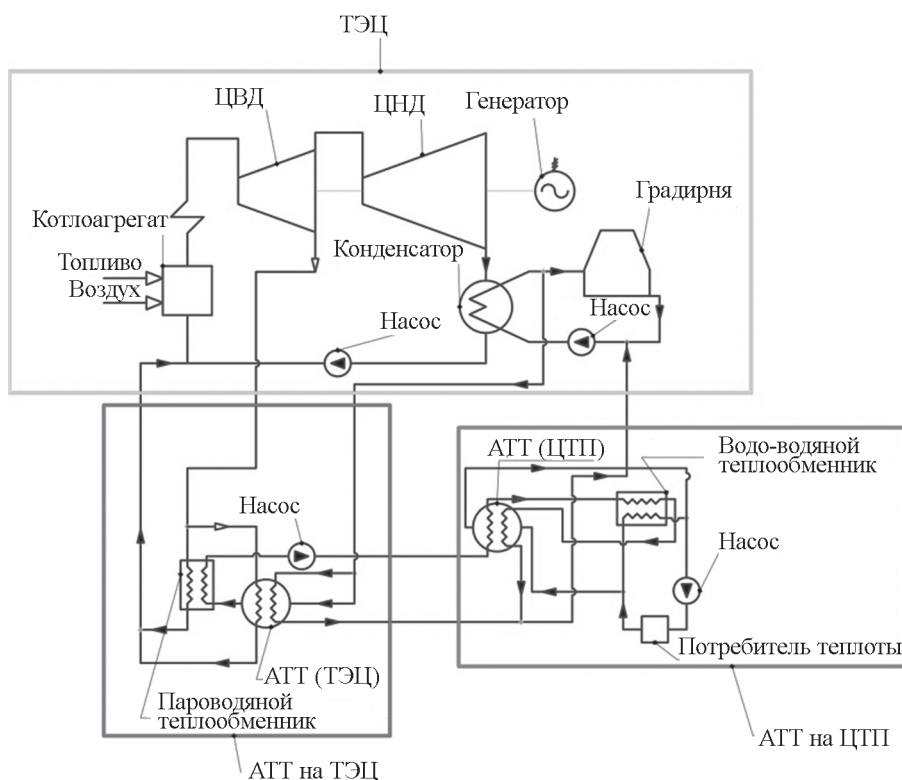


Рис. 6. Упрощенная схема ТЭЦ с АТТ

водяном теплообменнике и подаётся обратно к потребителям.

В качестве объекта для моделирования применения АТТ на ТЭЦ выбраны два паротурбинных энергоблока с давлением 240 атм, как наиболее современные и мощные на станции. Для упрощения процесса расчёта построение моделей выполнено с помощью программного комплекса Thermoflex, представляющего собой универсальную программу.

Объектами моделирования могут быть газотурбинные установки (ГТУ), ГТУ с котлами-утилизаторами (КУ), парогазовые установки (ПГУ) с КУ, ТЭЦ, ПГУ с газификацией угля, установки обессоливания воды, паросиловые электростанции на твёрдом, жидком и газовом топливе, когенерационные системы, электростанции на биомассе, солнечные и атомные электростанции, электростанции мусоросжигательных заводов, циклы Калины, органические циклы Ренкина и др [13].

Модели исходной и модернизированной схем представлены на рис. 7 — 10.

По результатам моделирования годовая экономия от использования АТТ на энергоблоке с давлением 240 атм ТЭЦ-21 составила порядка 7,1% или 54,9 тыс.т у.т./год.

Годовое снижение выбросов CO₂ для очереди 240 атм ТЭЦ-21 — 88,3 тыс. т/год, или порядка 7,09% от общего количества выбросов CO₂. Исходя из полученных данных по снижению выбросов при модернизации ТЭЦ, можно оценить уменьшение воздействия на здоровье населения с помощью программы ISC Manager.

Выбросы после модернизации

При совместной модернизации энергоблоков 130 и 240 атм вредные выбросы уменьшаются согласно данным табл. 3.

Полученные сведения можно мультиплицировать на другие ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» и, таким образом, получить в первом приближении энергетический и экологический эффекты от модернизации основных источников тепловой и электрической энергии г. Москвы.

Мультиплицирование результатов моделирования на теплоэлектроцентрали ПАО «Мосэнерго»

Годовой расход топлива на все ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» составил 23 327 тыс. т у.т. При применении АТТ на всех ТЭЦ г. Москвы годовая экономия в 7,1% позволит сократить потребление топлива на 2809 тыс. т у.т. (порядка 2442 млн м³ природного газа), что при цене на газ в 4694 руб./тыс. м³ даст экономию в 11463 млн руб. в год.

Заключение

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие заключения.

Применение АТТ на ТЭЦ и ЦТП ведет к переходу на более низкие температуры теплоносителя в системах теплоснабжения.

Представленная модернизация позволяет снизить нагрузки на градирни и, соответственно, тепловое загрязнение. В случае с энергоблоком 240 атм снижение ущерба составило 21 млн руб./год., а при совместном совершенствовании энергоблоков 240 и 130 атм — 69 млн руб./год.

Использование АТТ позволяет без модернизации энергетического оборудования ТЭЦ увеличить отпуск тепловой энергии.

Для оценки снижения воздействия вредных выбросов от ТЭЦ ПАО «Мосэнерго» на население применяется мультиплицирование результатов моделирования модернизации энергоблока 240 атм.

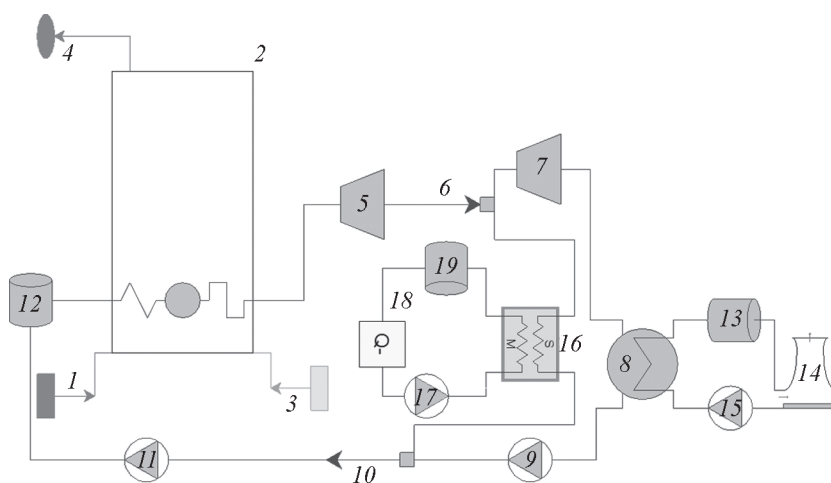


Рис. 7. Модель исходной схемы:

1, 3 — источники воздуха и топлива; 2 — котлоагрегат; 4 — отвод дымовых газов; 5 — ЦВД; 6 — разделитель потока; 7 — ЦНД; 8 — конденсатор; 9 — насос; 10 — соединитель потока; 11 — циркуляционный насос; 12 — элемент для задания типа теплоносителя; 13 — элемент для задания типа теплоносителя контура охлаждения конденсатора; 14 — градирня; 15 — циркуляционный насос контура охлаждения конденсатора

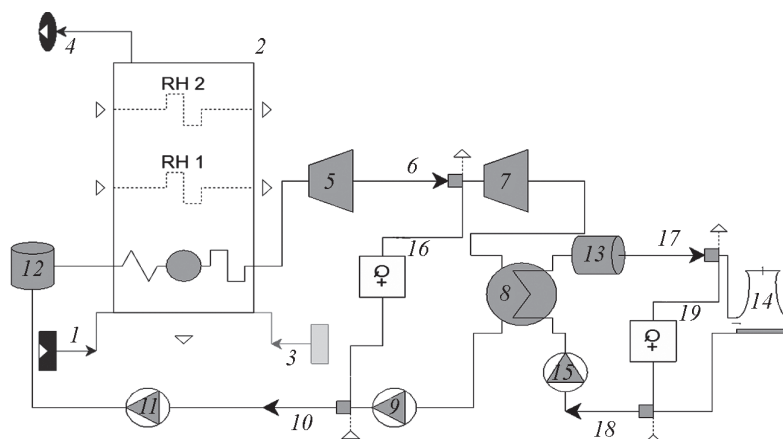


Рис. 8 Модель модернизированной ТЭЦ:

1, 3 — источники воздуха и топлива; 2 — котлоагрегат; 4 — отвод дымовых газов; 5 — ЦВД; 6, 17, 10, 18 — разделители и соединители потока; 7 — ЦНД; 8 — конденсатор; 9 — насос; 11 — циркуляционный насос; 12 — элемент для задания типа теплоносителя; 13 — элемент для задания типа теплоносителя контура охлаждения конденсатора; 14 — градирня; 15 — циркуляционный насос контура охлаждения конденсатора; 16 — связывающий элемент парового контура ТЭЦ и контура АТТ на ТЭЦ (рис. 9, позиции 1 и 4); 19 — связывающий элемент контура охлаждения конденсатора и контура АТТ на ТЭЦ (рис. 9, позиция 12)

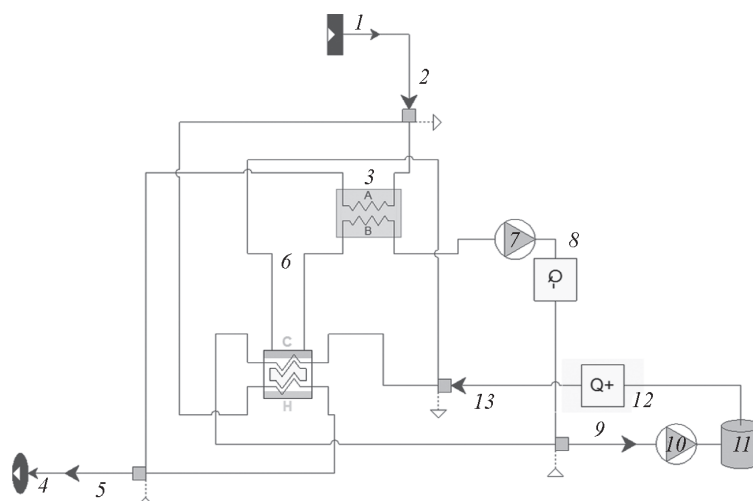


Рис. 9. Модель модернизированной ТЭЦ:

1 — пар из отбора ЦВД (вход в элемент 16 на рис. 8); 2, 9, 13 — разделители потока; 3 — паро-водяной теплообменник; 4 — обратная вода в котёл (выход из элемента 16 на рис. 8); 5 — соединитель потока; 6 — АТТ; 7 — насос; 8 — связывающий элемент контура АТТ на ТЭЦ и контура потребителя теплоты (рис. 10, позиции 1 и 4); 10 — насос; 11 — элемент для задания типа теплоносителя; 12 — связывающий элемент контура охлаждения конденсатора и контура АТТ на ТЭЦ (рис. 8, позиция 19)

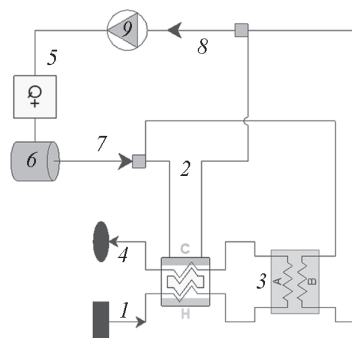


Рис. 10. Модель модернизированной ТЭЦ:

1 — горячая вода от ТЭЦ (вход в элемент 8 на рис. 9); 2 — АТТ; 3 — водо-водяной теплообменник; 4 — обратная вода на ТЭЦ (выход из элемента 8 на рис. 9); 5 — потребитель теплоты; 6 — элемент для задания типа теплоносителя; 7, 8 — разделитель и соединитель потока

Таблица 3

Снижение выбросов вредных веществ ТЭЦ-21 после модернизации энергоблоков 240 и 130 атм

Загрязняющие вещества	Выбросы, т/год		
	до модернизации	после модернизации	снижение
Твердые вещества	0,0	0,0	0,0
Диоксид серы	9,0	8,4	0,6
Оксиды азота (в пересчете на NO _x)	3 726,0	3 461,8	264,2
Оксид углерода	174,0	161,7	12,3
Всего	3 909,0	3 631,9	277,1

Таблица 4

Ущерб от выбросов вредных и загрязняющих веществ ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

Загрязняющие вещества	Смертность, чел./год		Разность, чел./год	Снижение ущерба, млн руб./год
	до модернизации	после модернизации		
Диоксиды серы	39,97	3,58	36,39	2 475
Твердые вещества	29,18	0,12	29,06	1 976
Оксид углерода	0,15	0,14	0,01	0,7
Оксиды азота	160,42	125,38	35,04	2 383
Суммарно	229,72	129,22	100,50	6 834

Данные по экологическому воздействию на население до и после модернизации, а также снижению экономического ущерба от эксплуатации ТЭЦ указаны в табл. 4. Они дают наглядное представление о экологическом эффекте. Проведенные мероприятия сократят выбросы вредных веществ на 45000 т в год, что сни-

зит смертность на 101 чел./год, а с учётом стоимости среднестатистической жизни в денежном эквиваленте составит экономию в 6 868 млн руб./год.

Продemonстрированный способ модернизации энергетически и экологически эффективен. Снижение ущерба при модернизации всех ТЭЦ — 6834 млн руб./год.

Литература

1. Sun J., Fu L., Zheng S. Experimental Study of Heat Exchanger Basing on Absorption Cycle for CHP System // Appl. Thermal Eng. 2016. V. 102. Pp. 1280—1286.
2. Tianle H., Xiaoyun X., Yi J. Simulation Research on a Variable-lift Absorption Cycle and Its Application in Waste Heat Recovery of Combined Heat and Power System // Energy. 2017. V. 140. Pp. 912—921.
3. Xiaoyun X., Yi J. Absorption Heat Exchangers for Long-Distance Heat Transportation // Energy. 2017. V. 141. Pp. 2242—2250.
4. Sun J., Fu L., Sun F., Zhang S. Experimental Study on a Project with CHP System Basing on Absorption Cycles // Appl. Thermal Eng. 2014. V. 73. Pp. 732—738.
5. Zhang H.S., Zhao H.B., Li Z.L. Performance Analysis of the Coal-Fired Power Plant with Combined Heat and Power (CHP) Based on Absorption Heat Pumps // J. Energy Institute. 2016. V. 89. Pp. 70—80.
6. Актуализация схемы теплоснабжения г. Москвы на период до 2032 г. [Электрон ресурс] www.mos.ru/dgkh/documents/skhemy/view/224419220 (дата обращения 02.04.2020).
7. Султангузин И.А. Экологическая безопасность и энергетическая эффективность промышленных теплоэнергетических систем. М.: Изд-во МЭИ, 2013.

References

1. Sun J., Fu L., Zheng S. Experimental Study of Heat Exchanger Basing on Absorption Cycle for CHP System. Appl. Thermal Eng. 2016;102:1280—1286.
2. Tianle H., Xiaoyun X., Yi J. Simulation Research on a Variable-lift Absorption Cycle and Its Application in Waste Heat Recovery of Combined Heat and Power System. Energy. 2017;140:912—921.
3. Xiaoyun X., Yi J. Absorption Heat Exchangers for Long-Distance Heat Transportation. Energy. 2017;141:2242—2250.
4. Sun J., Fu L., Sun F., Zhang S. Experimental Study on a Project with CHP System Basing on Absorption Cycles. Appl. Thermal Eng. 2014;73:732—738.
5. Zhang H.S., Zhao H.B., Li Z.L. Performance Analysis of the Coal-Fired Power Plant with Combined Heat and Power (CHP) Based on Absorption Heat Pumps. J. Energy Institute. 2016;89:70—80.
6. Aktualizatsiya Skhemy Teplosnabzheniya g. Moskvy na Period do 2032 g. [Elektron Resurs] www.mos.ru/dgkh/documents/skhemy/view/224419220 (Data Obrashcheniya 02.04.2020). (in Russian).
7. Sultanguzin I.A. Ekologicheskaya Bezopasnost' i Energeticheskaya Effektivnost' Promyshlennykh Teploenergeticheskikh Sistem. M.: Izd-vo MEI, 2013. (in Russian).

8. Rabl A., Spadaro J., Holland M. How Much Is Clean Air Worth? Calculating the Benefits of Pollution Control. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

9. Султангузин И.А. Применение методологии последовательности воздействия на окружающую среду вредных выбросов в промышленной теплоэнергетике. М.: Изд-во МЭИ, 2013.

10. Подготовка исходной информации, необходимой для формирования сводного ТЭБ г. Москвы в рамках выполнения работ по государственному контракту № 9P4/01/0173200001116000223 от 27.09.2016 г. [Электрон. ресурс] www.4science.ru/files/383f2eb66ecd46ecb8e0fbc051b920ab (дата обращения 02.04.2020).

11. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. М: Энергоатомиздат, 1987.

12. Бартев А.И., Прищепова С.А., Султангузин И.А. Оценка эффективности применения АБТТ на ТЭЦ и ЦТП в системах теплоснабжения // Энергосбережение — теория и практика: Труды IX Междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов. М.: Изд-во МЭИ, 2018. С. 163—166.

13. Федюхин А.В. и др. Применение прикладных программных средств для решения задач промышленной теплоэнергетики. М.: Изд-во МЭИ, 2016.

14. THERMOFLEX. Fully-Flexible Heat Balance Engineering Software. THERMOFLEX User's Manual. Jacksonville: Thermoflow Inc., 2013.

15. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion of Model Algorithms [Электрон. ресурс] www.epa.gov/scram001/userg/regmod/isc3v2.pdf (дата обращения 03.04.2020).

8. Rabl A., Spadaro J., Holland M. How Much Is Clean Air Worth? Calculating the Benefits of Pollution Control. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

9. Sultanguzin I.A. Primenenie Metodologii Posledovatel'nosti Vozdeystviya na Okruzhayushchuyu Sredu Vrednykh Vybrosov v Promyshlennoy Teploenergetike. M.: Izd-vo MEI, 2013. (in Russian).

10. Podgotovka Iskhodnoy Informatsii, Neobkhodimoy dlya Formirovaniya Svodnogo TEB g. Moskvy v Ramkakh Vypolneniya Rabot po Gosudarstvennomu Kontraktu № 9P4/01/0173200001116000223 ot 27.09.2016 g. [Elektron. Resurs] www.4science.ru/files/383f2eb66ecd46ecb8e0fbc051b920ab (Data Obrashcheniya 02.04.2020). (in Russian).

11. Ryzhkin V.Ya. Teplovye Elektricheskie Stantsii. M: Energoatomizdat, 1987. (in Russian).

12. Bartenev A.I., Prishchepova S.A., Sultanguzin I.A. Otsenka Effektivnosti Primeneniya ABTT na TETS i TSTP v Sistemakh Teplosnabzheniya. Energoberezhenie — Teoriya i Praktika: Trudy IX Mezhdunar. Shkoly-seminara Molodykh Uchenykh i Spetsialistov. M.: Izd-vo MEI, 2018:163—166. (in Russian).

13. Fedyukhin A.V. i dr. Primenenie Prikladnykh Programmnykh Sredstv dlya Resheniya Zadach Promyshlennoy Teploenergetiki. M.: Izd-vo MEI, 2016. (in Russian).

14. THERMOFLEX. Fully-Flexible Heat Balance Engineering Software. THERMOFLEX User's Manual. Jacksonville: Thermoflow Inc., 2013.

15. User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion of Model Algorithms [Elektron. Resurs] www.epa.gov/scram001/userg/regmod/isc3v2.pdf (Data Obrashcheniya 03.04.2020).

Сведения об авторах:

Яворовский Юрий Викторович — кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ»

Султангузин Ильдар Айдарович — доктор технических наук, профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ», e-mail: SultanguzinIA@mpei.ru

Бартев Алексей Игоревич — аспирант кафедры промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ»

Прищепова Станислава Андреевна — аспирант кафедры промышленных теплоэнергетических систем НИУ «МЭИ»

Трушин Евгений Сергеевич — студент НИУ «МЭИ»

Алимгазин Алтай Шурумбаевич — доктор технических наук, профессор Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (Астана, Республика Казахстан)

Information about authors:

Yavorovsky Yuriy V. — Ph.D. (Techn.), Head of Industrial Heat Power Engineering Systems Dept., NRU MPEI

Sultanguzin I'dar A. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Industrial Heat Power Engineering Systems Dept., NRU MPEI, e-mail: SultanguzinIA@mpei.ru

Bartenev Aleksey I. — Ph.D.-student of Industrial Heat Power Engineering Systems Dept., NRU MPEI

Prishchepova Stanislava A. — Ph.D.-student of Industrial Heat Power Engineering Systems Dept., NRU MPEI

Trushin Evgeniy S. — Student of NRU MPEI

Alimgazin Altay Sh. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Republic of Kazakhstan)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 19.12.2019

The article received to the editor: 19.12.2019