

Э.П.ВОЛКОВ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Том 1

ОХРАНА
ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА
ОТ ВЫБРОСОВ ТЭС

МОЕЙ ЖЕНЕ И ДРУГУ
ВАЛЕНТИНЕ ИВАНОВНЕ ВОЛКОВОЙ
ПОСВЯЩАЕТСЯ

Э.П.ВОЛКОВ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

В пяти томах

Москва
Издательский дом МЭИ
2014

Э.П.ВОЛКОВ

ИЗБРАННЫЕ ТРУДЫ

Том 1

ОХРАНА
ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА
ОТ ВЫБРОСОВ ТЭС

Москва
Издательский дом МЭИ
2014

УДК 621.311.22:502.5
ББК 31.37:20.18
В 676

Волков Э.П.

В 676 Избранные труды: в 5 т. / Э.П. Волков. — М.: Издательский дом МЭИ, 2014 — .

ISBN 978-5-383-00877-5

Т. 1. Охрана воздушного бассейна от выбросов ТЭС. — 2014. — 368 с.: ил.

ISBN 978-5-383-00886-7

В книге рассмотрен комплекс вопросов, связанных с влиянием тепловых электростанций на окружающую среду, изложены методы очистки дымовых газов от токсичных примесей, а также методы снижения выбросов токсичных веществ в атмосферу. Приведены физические модели и основы расчета приземных концентраций вредных выбросов тепловых электростанций. Достаточно подробно изложены теоретические и экспериментальные основы, связанные с изучением подъема дымового факела над устьем одно- и многоствольных дымовых труб. Даны общая модель и структурная схема автоматизированной системы контроля загазованности атмосферы в результате выбросов ТЭС и промышленных предприятий и рассмотрено влияние различных факторов на уровень загазованности атмосферы.

Книга предназначена для работников научно-исследовательских институтов и аспирантов, а также для инженерно-технических работников электростанций, наладочных и проектных организаций.

Табл. 21. Ил. 158. Библиогр. 182 назв.

554/355

УДК 621.311.22:502.5
ББК 31.37:20.18

ISBN 978-5-383-00886-7 (т.1)
ISBN 978-5-383-00877-5



© Волков Э.П., 2014
© ЗАО «Издательский дом МЭИ», 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|------------|
| Предисловие | 8 |
| Предисловие автора | 13 |
| Введение | 15 |
| Глава первая. ВЫБРОСЫ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В АТМОСФЕРУ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ | 18 |
| 1.1. Содержание токсичных веществ в топливе и дымовых газах | 18 |
| 1.2. Влияние вредных выбросов электростанций на человека и природу | 24 |
| 1.3. Процессы преобразования загрязнений в приземном слое атмосферы | 29 |
| 1.4. Нормы радиационной безопасности для атомных электростанций | 34 |
| Глава вторая. Золоулавливание на тепловых электростанциях | 40 |
| 2.1. Характеристики летучей золы | 40 |
| 2.2. Основы теории золоулавливания | 44 |
| 2.3. Инерционные золоуловители | 50 |
| 2.4. Мокрые золоуловители | 54 |
| 2.5. Электрофильтры | 58 |
| Глава третья. Снижение выбросов оксидов серы и азота на тепловых электростанциях | 65 |
| 3.1. Сернистость топлива и удаление серы на нефтеперерабатывающих заводах | 65 |
| 3.2. Переработка сернистого топлива перед сжиганием на ТЭС | 67 |
| 3.3. Очистка продуктов сгорания от оксидов серы | 70 |
| 3.4. Образование оксидов азота в топках котлов | 77 |
| 3.5. Методы подавления образования оксидов азота в топках котлов | 85 |
| Глава четвертая. Газоочистка на атомных электростанциях | 91 |
| 4.1. Вентиляционные установки атомных электростанций | 91 |
| 4.2. Дезактивация газообразных радиоактивных отходов | 98 |
| 4.3. Очистка вентиляционного воздуха на атомных электростанциях | 103 |
| Глава пятая. Расчет концентраций вредных выбросов ТЭС в атмосфере | 107 |
| Глава шестая. Экспериментальное исследование распространения пассивных примесей в изотропных турбулентных потоках | 120 |
| 6.1. Моделирование распространения пассивной примеси в атмосфере | 120 |
| 6.2. Распространение пассивной примеси выбросов от точечного и линейного источников в потоках с различной интенсивностью турбулентности | 129 |
| 6.3. Расчетная модель определения концентраций пассивных примесей | 145 |
| Глава седьмая. Стеновые исследования процесса подъема факела над устьем газоотводящих труб | 152 |
| 7.1. Различные подходы к оценке начального подъема факела | 152 |

| | |
|---|------------|
| 7.2. Моделирование подъема дымового факела в аэродинамической трубе | 159 |
| 7.3. Исследование гидродинамической составляющей подъема факела..... | 173 |
| 7.4. Исследование теплового всплытия факела в «чистом» виде | 181 |
| 7.5. Физическое моделирование полного подъема дымового факела | 185 |
| 7.6. Исследование подъема факела над устьем многоствольных дымовых труб | 202 |
| Глава восьмая. Натурные исследования и расчет высоты и траектории подъема факела над устьем газоотводящих труб при различных режимах и метеорологических условиях..... | 215 |
| 8.1. Натурные исследования подъема факела над устьем одноствольных труб | 215 |
| 8.2. Натурные исследования подъема факела над устьем многоствольных труб | 233 |
| 8.3. Подъем факела над устьем дымовых труб при инверсионном состоянии атмосферы | 235 |
| Глава девятая. Общие принципы построения автоматизированной системы контроля загазованности атмосферы выбросами ТЭС..... | 242 |
| 9.1. Схема расчета концентраций газообразных ингредиентов и натурные исследования загазованности атмосферы в районе расположения мощной ТЭС | 242 |
| 9.2. Общая и структурные схемы системы контроля загазованности атмосферы выбросами ТЭС | 249 |
| 9.3. Принципы размещения периферийных контрольно-измерительных станций | 256 |
| Глава десятая. Методы и приборы измерения концентраций вредных выбросов ТЭС | 267 |
| 10.1. Методы измерения концентраций вредных выбросов ТЭС | 267 |
| 10.2. Приборы для измерения концентраций вредных примесей в уходящих газах ТЭС | 276 |
| 10.3. Инструментальные средства автоматического контроля загазованности атмосферного воздуха..... | 280 |
| Глава одиннадцатая. Основные подсистемы автоматизированной системы контроля загазованности атмосферы выбросами ТЭС..... | 285 |
| 11.1. Подсистема контроля вредных веществ от выбросов ТЭС | 285 |
| 11.2. Подсистема контроля метеорологических параметров..... | 293 |
| 11.3. Периферийные контрольно-измерительные станции | 308 |
| Глава двенадцатая. Регулирование уровня загазованности атмосферы с помощью АСК ЗВ | 310 |
| 12.1. Анализ влияния различных факторов на уровень концентраций газообразных ингредиентов | 310 |
| 12.2. Снижение концентраций газообразных вредных примесей у поверхности земли..... | 313 |
| 12.3. Снижение выбросов оксидов азота из топок котельных установок | 317 |

| | |
|---|-----|
| Глава тринадцатая. Технико-экономическая оценка природоохранных мероприятий | 336 |
| 13.1. Общие положения по расчету ущерба от воздействия вредных выбросов ТЭС | 336 |
| 13.2. Методика расчета средних приземных концентраций вредных примесей от выбросов ТЭС..... | 339 |
| 13.3. Оптимизация мероприятий по защите воздушного бассейна от вредных выбросов ТЭС | 349 |
| Заключение | 356 |
| Список литературы | 360 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга является первой в собрании основных трудов академика Э.П. Волкова — выдающегося ученого-энергетика, который в течение 50 лет занимается фундаментальными и прикладными исследованиями в электроэнергетике, определяя в последнее время по существу основные направления ее развития.

Под его руководством на базе выполненных им, его учениками и сотрудниками возглавляемого им Энергетического института им. Г.М. Кржижановского комплексных исследований разработаны «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года», «Программа модернизации электроэнергетики РФ» и «Программа модернизации Единой национальной электрической сети России». Это стало возможным на базе созданных математических моделей, описывающих переходные и установившиеся режимы работы энергосистем, моделей, позволяющих вести исследования устойчивости и надежности работы энергетических сетей, и моделей оптимизации генерирующих мощностей, структуры и оптимальных связей высоковольтных электрических сетей России, образующих совместно с генерирующими мощностями Единую электроэнергетическую систему страны — крупное завоевание отечественной науки и техники.

Все это позволило сформулировать методические принципы обоснования развития электроэнергетики страны в условиях ее либерализации и создать моделирующие комплексы для решения задач анализа, управления режимами и развития сложных энергосистем и их объединений, включая Единую энергетическую систему.

Но кроме общэнергетических проблем акад. Э.П. Волков долго и результативно занимался исследованием процессов горения твердого топлива и энерготехнологического его использования. В этих исследованиях большое внимание было уделено разработке математических моделей и методов расчета практически всей совокупности физико-химических процессов, протекающих при сжигании органического твердого топлива: газодинамики и теплопереноса в газодисперсных средах; горения полидисперсной системы частиц; переноса излучения; выделения летучих и образования оксидов азота.

Моделирование процессов в химически реагирующих турбулентных газодисперсных потоках базируется на подходе, в основу которого положены континуальное описание дисперсной фазы и использование уравнений для плотностей вероятности распределений частиц топлива по скоростям, температурам и др.

Разработаны модели горения низкоконцентрированных газодисперсных турбулентных потоков при факельном и слоевом (кипящем) способах сжигания твердого топлива, различные модели выгорания частиц, учитывающие наличие пористой структуры, золы обложки, диффузионного сопротивления транспортировке окислителя. Полученные модели применяются для расчета прямоточных и вихревых горелочных устройств и камер сгорания при сжигании пылевидного топлива, а также для двумерного и трехмерного моделирования топочных процессов в камерных топках котлов. Разработанные модели используются также при оптимизации процессов сжигания топлива в топках с кипящим классическим и циркулирующим слоями.

Проведенные исследования послужили основой для создания Э.П. Волковым и его учениками технологии прямоточно-вихревого сжигания всех видов топлива, реализованной на более чем 150 работающих котлах.

Выдающиеся результаты получены Э.П. Волковым и сотрудниками Энергетического института им. Г.М. Кржижановского в исследованиях процесса пиролиза твердого топлива и создания энерготехнологических установок по переработке сланца с получением искусственной нефти. Данный цикл исследований связан с разработкой физических и математических моделей процесса пиролиза угля и сланца, проведением экспериментальных лабораторных и стендовых исследований и расчетом реальных промышленных установок.

Результатом научных исследований стало создание первых в мире энерготехнологических установок по переработке сланца, использующих в качестве теплоносителя горячую золу сланца (УТТ-3000), единичной производительностью 1 млн т сланца в год с получением около 250 000 т «искусственной нефти» — сланцевого масла, высококалорийного газа и других товарных продуктов. Такие установки на сегодняшний день являются наиболее крупными, а также экономически и термодинамически самыми эффективными в мире.

За данную работу акад. Э.П. Волков удостоен высшей международной награды — премии «Глобальная энергия».

Основные труды акад. Э.П. Волкова представлены в пяти книгах.

В первой книге содержатся результаты исследований по актуальной для энергетики проблеме — охране окружающей среды от вредных выбросов тепловых электростанций. Здесь представлены все составляющие исследуемой проблемы, начиная от характеристик топлива и содержащихся в них токсичных примесей, характеристик процессов их образования, методов снижения количества выбросов в атмосферу и заканчивая процессами их распространения в атмосфере и определения концентраций вредных примесей на уровне дыхания людей.

Наиболее интересным в научном плане является получение критериальных формул для расчета высоты подъема дымового факела над устьем газоотводящих труб при различных режимах работы энергетического оборудования и разных метеорологических условиях. Данные формулы, полученные как расчетным, так и экспериментальным путем (моделированием в аэродинамических трубах и в результате проведения натурных экспериментов), тестированы с использованием результатов практически всех расчетных и экспериментальных работ, проведенных в мировой практике. Тем самым получена универсальная критериальная зависимость, обобщающая результаты всех этих работ. С использованием полученных зависимостей дана расчетная модель для определения концентрации вредных примесей на уровне дыхания людей и показано, что подобные расчеты дают адекватные результаты при различных режимах работы оборудования и метеоусловиях. Расчетная модель послужила основой для создания первой в бывшем СССР автоматизированной системы контроля загрязнения воздуха выбросами тепловых электростанций, реализованной на энергетическом комплексе, состоящем из тепловой электростанции, работающей на угле и газе, и атомной электростанции, общей мощностью около 10 000 МВт.

Совокупность всех приведенных в книге результатов исследований позволяет получить полную картину работ по охране окружающей среды от выбросов тепловых электростанций, проведенных у нас в стране за большой период времени (30—40 лет), включая подготовку официальных нормативных методик расчета концентраций вредных примесей, обязательных для использования всеми промышленными предприятиями страны.

Во второй книге, посвященной исследованию гидродинамики, конструкциям, оптимальному выбору, типизации и проблемам эксплуатации газоотводящих труб тепловых и атомных электростанций,

с единых позиций исследуются и приводятся результаты по выбору существующих оптимальных аэродинамических схем и разработке новых конструкций газоотводящих труб. В книге представлены элементы и результаты расчетов газоотводящих труб всех существующих конструкций: процессов гидродинамики, тепломассообмена; выбора материалов; прочностные расчеты; выбора оптимальных параметров, а также типизация дымовых труб и их элементов (цоколей диффузоров), проблемы эксплуатации и контроля параметров.

Итоговым материалом является методика расчета и определения основных параметров дымовых труб ТЭС и АЭС, которая использовалась при выборе всех труб промышленных объектов (тепловых электростанций и промпредприятий) в бывшем СССР и применяется в настоящее время в РФ и СНГ.

В книге имеются материалы по разработке и возведению уникальной дымовой трубы с кремнебетонным стволом высотой 320 м и технологии, позволяющей индустриальным методом монтировать ствол высотой 320 м и диаметром 10 м за 28 дней. К такой трубе были подключены три энергоблока общей мощностью 2400 МВт.

Третья книга трудов посвящена проблемам моделирования процессов горения твердого топлива и его пиролизу. Об этих исследованиях упоминалось в первой части настоящего предисловия.

В четвертой книге рассматриваются важнейшие на современном этапе развития мирового сообщества задачи получения искусственной нефти, возникающие при решении проблем исчерпания обычных энергетических ресурсов.

В ней приводятся данные о мировых запасах нефти и сланца, история создания в различных странах технологий получения искусственной нефти из сланца, технологические схемы и конструкции различных установок.

Основное внимание уделено разработке, технологическим схемам и конструкциям отдельных узлов и методам их расчета, технологии, созданной Энергетическим институтом им. Г.М. Кржижановского, по переработке сланца с использованием твердого теплоносителя и установки УТТ-3000 (установка с твердым теплоносителем производительностью 3000 т сланца в сутки).

Данная книга служит энциклопедией и является памятным вкладом всех сотрудников ЭНИНа, создавших метод и установку, равным которым нет на сегодняшний день в мире. Здесь приводятся и теоретические основы расчета, и методы их осуществления, громадный массив

экспериментальных материалов, связанных с исследованием процессов пиролиза, которые применены для целого класса твердого топлива.

Наконец, пятая книга трудов посвящена проблемам модернизации и развития электроэнергетики России. Сюда включены работы акад. Э.П. Волкова за последние 15—20 лет. Здесь излагаются как модели, созданные для проведения расчетов по развитию и оптимизации электроэнергетики страны, так и конкретные материалы по ее модернизации, приводятся этапы модернизации, их количественные характеристики по всем секторам электроэнергетики с требуемыми финансовыми ресурсами и механизмами реализации Программы.

В книге даются основные направления развития технологий, генерирующих мощностей и электросетевого хозяйства.

Новыми являются исследования и разработки инновационных технологий и оборудования на основе использования явления высокотемпературной сверхпроводимости, сильноточной электроники и современных средств диагностики, анализа и управления процессами и режимами электрических сетей.

Данная книга позволяет проанализировать современное состояние электроэнергетики страны и увидеть пути ее перехода на мировой уровень на временном отрезке до 2030 г.

Таким образом, представляемая читателю серия работ акад. Э.П. Волкова позволяет получить материалы по широкому спектру научных исследований в области электроэнергетики. Каждая книга найдет своих читателей среди научных сотрудников, инженеров, аспирантов и студентов, которым, я надеюсь, это принесет большую пользу.

В.Е. Фортков, академик РАН,
Президент Российской академии наук