

Охрана окружающей среды

УДК 621.311:504.054

Кулик М.Н., *акад. НАН Украины, докт. техн. наук, проф.*, **Нечаева Т.П.**
Институт общей энергетики НАН Украины, Киев
ул. Антоновича, 172, 03680 Киев, Украина, e-mail: info@ienergy.kiev.ua

Влияние экологических факторов на использование технологий тепловой энергетики

Увеличение жесткости экологических требований к функционированию тепловой энергетики на органическом топливе, в частности, к содержанию в дымовых газах тепловых электростанций диоксида серы, оксидов азота и пыли, обуславливает необходимость внедрения мероприятий по снижению их выбросов за счет реконструкции существующих энергоблоков, а также строительства новых, удовлетворяющих этим требованиям. Для оценки объемов и сроков внедрения этих технологий разработаны математические модели, с использованием которых проведены расчеты по формированию перспективной структуры тепловой энергетики при вариантах уровней и сроков выполнения нормативных экологических требований, зафиксированных в Директивах Евросоюза и в проекте Национального плана Украины по сокращению выбросов от больших сжигающих установок. Расчеты показали, что выполнение этих требований в определенные Энергетическим Сообществом сроки (до 2018 г.) приводит к необходимости вложения объемов инвестиций в реконструкцию генерирующих мощностей, которые являются неподъемными для экономики Украины. Отсрочка их выполнения в соответствии с проектом Национального плана сокращения выбросов является более приемлемой и с точки зрения поэтапного вложения инвестиций, и сокращения объемов выводимых в реконструкцию мощностей, что повышает надежность функционирования энергосистемы. *Библ. 20, табл. 3.*

Ключевые слова: тепловые электростанции, выбросы загрязняющих веществ, нормативы выбросов, инвестиции, чистые энерготехнологии.

Насущной проблемой развития Объединенной энергетической системы (ОЭС) Украины является выполнение принятых Украиной экологических обязательств, в частности, соблюдение нормативных требований к содержанию в дымовых газах угольных ТЭС диоксида серы, оксидов азота и твердых частиц, регулируемых Приказом Министерства охраны окружающей природной среды Украины от 22.10.2008 г.

№ 541. В зависимости от состояния установки: существующая (введенная в эксплуатацию до 01.01.09), новая (введена после 01.01.09) или модернизированная (проведены ремонтно-восстановительные и реконструкционные работы, стоимость которых превышает 50 % стоимости новой установки той же мощности и той же технологии или обеспечивают продление ресурса работы установки на срок не менее 100 тыс. ч,

и введенная в эксплуатацию после 01.01.09) – технологические нормативы делятся на текущие и перспективные.

Текущие технологические нормативы допустимых выбросов загрязняющих веществ, ориентированные на существующее состояние угольных энергоблоков и качество угля, поставляемого на ТЭС, приведены ниже, мг/м³:

Пыль (нормативные требования действуют до 31.12.15)

| | |
|---|--------|
| Котел с жидким шлакоудалением, электрофильтр с длиной электродов: | |
| от 12 м и больше | – 400 |
| до 12 м | – 1000 |
| Котел с твердым шлакоудалением, электрофильтр | – 1000 |
| Твердое топливо: | |
| мокрые золоуловители | – 1300 |
| батареиные циклоны | – 2000 |

SO₂ (нормативные требования действуют до 31.12.17)

| | |
|---|--------|
| Факельное сжигание: | |
| антрацита и тощего угля | – 3400 |
| тощего угля | – 4500 |
| каменного угля | – 5100 |
| Сжигание в циркулирующем кипящем слое антрацита и тощего угля | – 400 |

NO_x (нормативные требования действуют до 31.12.17)

| | |
|--|--------|
| Сжигание каменного и бурого угля: | |
| жидкое или твердое шлакоудаление | – 700 |
| жидкое шлакоудаление, паропроизводительность не менее 950 т/ч | – 1300 |
| циклонная топка | – 2000 |
| Сжигание антрацита и тощего угля: | |
| жидкое шлакоудаление | – 1300 |
| жидкое шлакоудаление, паропроизводительность не менее 2650 т/ч | – 1800 |
| топка с циркулирующим кипящим слоем | – 400 |

Перспективные технологические нормативы допустимых выбросов загрязняющих веществ для новых и модернизируемых установок гармонизированы с требованиями Директивы Европейского Союза 2001/80/ЕС [1] (табл.1), которые после присоединения в 2011 г. к Договору об основании Энергетического Сообщества Украина обязалась имплементировать с 1 января 2018 г. [2].

В работах [3, 4] были проведены сравнительные оценки внедрения мероприятий на тепловых электростанциях для выполнения требований Директивы 2001/80/ЕС, результаты которых показали, что при этом конкурентоспособность электростанций снижается. Поэтому их внедрение в энергосистему возможно только при определенных условиях увеличения экологических налогов и ужесточения нормативных требований к выбросам загрязняющих веществ.

Изменения в экологическом законодательстве Евросоюза и соответствующие изменения

обязательств Сторон Договора об основании Энергетического Сообщества еще более усложнили достижение принятых обязательств для украинской тепловой энергетики. Принятая в конце 2010 г. Директива ЕС 2010/75/EU по интегрированному предотвращению и контролю за промышленными выбросами [5] прекращает с 1 января 2016 г. действие Директивы 2001/80/ЕС и вводит еще более жесткие требования к нормативным концентрациям загрязняющих веществ в дымовых газах ТЭС (см. табл.1).

24 октября 2013 г. Совет Министров Энергетического Сообщества для Сторон Договора об основании Энергетического Сообщества принял два решения, которые внесли изменения в сроки выполнения требований Директивы 2001/80/ЕС и внедрения требований Директивы 2010/75/EU [6, 7]. Конечным сроком выполнения требований Директивы 2001/80/ЕС для существующих установок определено 31 декабря 2017 г., а удельные выбросы новых установок с 1 января 2018 г. должны отвечать более жестким требованиям Директивы 2010/75/EU. В случае невозможности соблюдения нормативных требований Директивы 2001/80/ЕС с 1 января 2018 г. существующими установками для Сторон Энергетического Сообщества предоставляется возможность внедрить переходные национальные планы снижения выбросов (НПСВ) от существующих установок до 31 декабря 2027 г. к общему лимиту выбросов, который определяется на основе нормативов выбросов Директивы 2010/75/EU. Существующие установки могут быть исключены из НПСВ и не выполнять требований Директивы 2001/80/ЕС с 1 января 2018 г. при условии, что они будут эксплуатироваться не больше 20 тыс. ч с 1 января 2018 г. до 31 декабря 2023 г. По окончании этого срока они выводятся из эксплуатации или приводят за этот период показатели выбросов к жестким нормативным требованиям Директивы 2010/75/EU на уровне новых установок [6].

Удовлетворить в соответствующие сроки этим требованиям отечественным угольным ТЭС достаточно сложно из-за сжатых сроков проведения соответствующих мероприятий, высокой стоимости очистного оборудования, отсутствия стандартных решений по его установке и опыта эксплуатации, целесообразности его внедрения на мощностях, срок эксплуатации которых почти исчерпан, необходимости привлечения значительного объема инвестиций [8, 9]. Проведенные в конце 2013 г. консультантами по Юго-Восточной Европе для Секретариата Энергетического Сообщества исследования по

Таблица 1. Перспективные обязательства по концентрации загрязняющих веществ в дымовых газах энергоблоков тепловой мощностью от 500 МВт, мг/м³

| Загрязнитель | Уголь | | | Мазут | | | Природный газ | | |
|-----------------|----------------|-----------|-----------------------|---------|---------|---------|---------------|---------|---------|
| | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| SO ₂ | 200 (400*)/400 | 200/400 | 150 (200 для ЦКС)/200 | 200/400 | 200/400 | 150/200 | 35/35 | 35/35 | 35/35 |
| NO _x | 200/200** | 200/200** | 150/200 | 200/400 | 200/400 | 100/150 | 100/200 | 100/200 | 100/100 |
| Пыль | 30/50 | 30/50 | 10/20 | 30/50 | 30/50 | 10/20 | 5/5 | 5/5 | 5/5 |

Примечание. I – Приказ Минприроды № 541; II – Директива 2001/80/ЕС; III – Директива 2010/75/EU. В числителе – новая технология, в знаменателе – существующая. * Эффективность десульфуризации не менее 95 %. ** С 01.01.16.

выполнению европейских нормативов выбросов для стран-участников Энергетического Сообщества [10] показали, что для Украины обеспечение выполнения обязательств по Директиве 2001/80/ЕС для тепловой энергетики потребует около 5 млрд евро, Директивы 2010/75/EU – около 6 млрд евро, причем такие оценки основывались на существующих проектах реконструкции ТЭС и являются заниженными с учетом увеличения затрат на подобные мероприятия, а также пролонгации сроков их осуществления.

В связи с этим в Украине разрабатывается Национальный план сокращения выбросов, охватывающий теплоэнергетические установки с тепловой мощностью более 50 МВт, которые эксплуатировались в 2012 г., а также прошли реконструкцию [11]. В апреле 2014 г. Украина обратилась к Целевой рабочей группе Энергетического Сообщества с просьбой увеличить срок выполнения нормативных требований: разрешенный срок эксплуатации существующих установок, к которым не применяются требования Директивы 2001/80/ЕС и не охваченных НПСВ, увеличить с 20 тыс. до 40 тыс. ч, допустимый срок их эксплуатации перенести с 2023 г. на 2030 г., а предельный срок приведения положений национального законодательства в соответствие с требованиями Директивы 2010/75/EU перенести с 2027 на 2033 г. [12]. Поэтому срок действия НПСВ предусмотрен до 31 декабря 2033 г., но достижение лимитов на выбросы диоксида серы и пыли – до 31 декабря 2028 г. Для установок, которые не входят в НПСВ, время работы ограничивается 20 тыс. ч (для тех, которые будут выведены до конца 2023 г.) и 40 тыс. ч (для тех, которые будут выведены до конца 2033 г.).

Введение экологического налога, который превысил предыдущие ставки сборов за выбросы этих загрязняющих веществ практически в 15 раз, и введение платы за выбросы диоксида углерода приводит к увеличению расходов энергогенерирующих компаний, связанных с

его оплатой. Следствием этого является увеличение себестоимости производства электроэнергии, снижение экономической эффективности традиционных технологий на органическом топливе.

Увеличение жесткости нормативных ограничений на выбросы загрязняющих веществ тепловых электростанций на уровне требований ЕС, введение экологического налога, ставки которого для основных загрязнителей воздуха для стационарных источников сравнимы с экологическими платежами европейских стран, а также практика введения ограничений или запрета эксплуатации энергетических объектов, которые не удовлетворяют экологическим требованиям, что применяется в странах ЕС, обусловливает проведение экономически и регуляторно взвешенных мероприятий по обеспечению выполнения этих требований тепловой энергетикой с учетом энергетической безопасности страны, надежности работы энергосистемы, наличия и доступности инвестиционных и материальных ресурсов.

Цель данной работы – исследование влияния европейских экологических требований на перспективную структуру технологий тепловой энергетики посредством разработки соответствующих экономико-математических моделей и проведения адекватных расчетов.

Обоснование целесообразной реализации решений по развитию энергетики предусматривает формирование вариантов развития структуры генерирующих мощностей в условиях конкурентного рынка при устойчивом функционировании электроэнергетической системы по критериям минимизации общесистемной стоимости производства электроэнергии:

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{k \in K} \sum_{\tau \in t} c_{k\tau} w_{k\tau} \right] \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $c_{k\tau}$, $w_{k\tau}$ – себестоимость и объемы производства электроэнергии по технологии k из множества K всех технологий генерации, которые

рассматриваются при прогнозировании, в году τ этапа t прогнозного периода T .

Для обеспечения соответствия структуры генерирующих мощностей режимам электропотребления с учетом их специфики (наличия суточной и сезонной неравномерности) при моделировании рассматриваются характерные графики электрической нагрузки (ГЭН) для каждого этапа расчетного периода. Для каждого такого графика формируются соответствующие балансы покрытия его характерных зон:

$$\sum_{k \in K} (1 - \beta_{kt}) Y_{ksdzt} = P_{sdzt}, \quad (2)$$

где Y_{ksdzt} — мощность по технологии k , которая используется при покрытии z зоны соответствующего характерного ГЭН; β_{kt} — часть электроэнергии на собственные нужды; P_{sdzt} — нагрузка соответствующей зоны z времени d сезона s ГЭН.

Баланс производства-потребления электроэнергии для каждого этапа расчетного периода формализуется выражением:

$$\sum_{k \in K} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z} (1 - \beta_{kt}) Y_{ksdzt} H_{sdzt} \delta_{sd} \geq W_t, \quad (3)$$

где H_{sdzt} — длительность z зоны характерного дня d сезона s соответствующего ГЭН; W_t — потребность в электроэнергии этапа t .

Мощность Y_{ksdzt} , фактически используемая при покрытии ГЭН, ограничивается установленной мощностью с учетом ее готовности к несению нагрузки:

$$Y_{ksdzt} \leq h_{ks} X_{kt}, \quad X_{kt}^{\min} \leq X_{kt} \leq X_{kt}^{\max}, \\ X, Y \geq 0, \quad (4)$$

где h_{ks} — коэффициент готовности (доступности) технологии; X_{kt} — установленная мощность технологии k в расчетном этапе t .

Для технологий, мощность которых при покрытии графика нагрузки может изменяться в определенном диапазоне, вводятся характерные режимы работы f , которые в каждой зоне суточного ГЭН задаются коэффициентом использования установленной мощности $a_{kft} \in [0, 1]$ как части мощности от номинальной, с которой данная технология используется при покрытии соответствующей зоны ГЭН. При этом мощность Y_{ksdzt} , с которой технология используется в зоне ГЭН, определяется так:

$$Y_{ksdzt} = \sum_{f \in F} a_{kft} Y_{kfsdt}, \\ \sum_{f \in F} Y_{kfsdt} \leq \eta_{ks} X_{kt}. \quad (5)$$

Эффективность работы электростанций в составе ОЭС определяется сравнением их нормируемой (средневзвешенной) себестоимости производства электроэнергии. Расчет себестоимости производится с использованием моделей жизненного цикла, в которых учтены все ресурсы, которые потребляются и производятся технологией, начиная с ее строительства и ввода в эксплуатацию и заканчивая выводом из эксплуатации [13, 14]. Нормированная себестоимость производства электроэнергии за жизненный цикл T рассчитывается по формуле:

$$C_k^{LCOE} = \frac{\sum_{\tau=1}^T (C_{k\tau}^I + C_{k\tau}^M + C_{k\tau}^F + C_{k\tau}^P) / (1+r)^\tau}{\sum_{\tau=1}^T w_{k\tau} / (1+r)^\tau}, \quad (6)$$

где $C_{k\tau}^I$ — инвестиционные затраты, которые при расчете себестоимости учитываются в виде амортизационных отчислений и возврата процентов по кредитам; $C_{k\tau}^M$ — затраты на обслуживание и ремонты; $C_{k\tau}^F$ — затраты на топливо; $C_{k\tau}^P$ — экологические платежи; r — ставка дисконта; $w_{k\tau}$ — годовое производство электроэнергии.

Составляющие затрат в зависимости от использования мощности делятся на условно-постоянные (инвестиционные, затраты на обслуживание и ремонты), которые рассчитываются на установленную мощность технологии, а также переменные затраты (топливные, экологические), которые зависят от уровня мощности использования технологии при работе в составе энергосистемы.

С учетом распределения затрат на условно-постоянные и условно-переменные в зависимости от режимов использования технологий и приведением этих показателей к нормируемому за жизненный цикл критерий (1) принимает следующий вид:

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{k \in K} \left(C_k^c X_{kt} + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} C_{ksf}^v Y_{kfsdt} H_{sdft} \delta_{sd} \right) \right] \rightarrow \min, \quad (7)$$

где C_k^c , C_{ksf}^v — соответственно приведенные условно-постоянные годовые и условно-переменные суточные составляющие средневзвешенной за жизненный цикл стоимости производства электроэнергии по технологии k ; H_{sdft} — суточное время работы; d_{sd} — количество характерных дней соответствующего сезона.

Для моделирования влияния экологических ограничений и требований на структуру генерирующих мощностей разработано два метода формирования оптимизационных задач по раз-

виту энергетической системы в зависимости от условий соблюдения нормативных ограничений на выбросы загрязняющих веществ тепловыми электростанциями.

При оценке необходимых мер и определения объемов их реализации при условии выполнения нормативных ограничений тепловыми электростанциями на органическом топливе до определенного года этапа прогнозного периода из множества всех возможных для рассмотрения технологий на органическом топливе $K^0 \subset K$ проводится формирование множества технологий $K' \subset K^0$, которые удовлетворяют экологическим требованиям данного этапа и целесообразны к рассмотрению в оптимизационной задаче [15]. Для каждого из этапов горизонта прогнозирования формируется набор экологически чистых технологий с соответствующими вариантами мероприятий по снижению выбросов. Результатом решения оптимизационной задачи по критерию (7) являются варианты структуры генерирующих мощностей, удовлетворяющие экологическим требованиям, анализ которых позволяет определить необходимые меры и направления экологически приемлемого развития электроэнергетической системы.

При формировании множества K' технологий, которые отвечают экологическим требованиям, для теплоэнергетических технологий на органическом топливе рассчитываются удельные показатели выбросов SO_2 , NO_x и твердых частиц с использованием алгоритмов расчетов и формул, приведенных в методиках расчета выбросов загрязняющих веществ ГКД 34.02.305–2002 и CORINAIR [16], или используются рекомендованные для определенных технологий сжигания топлива из вышеприведенных или других источников информации. На основании определенного удельного показателя выбросов $b_{kp'p}$ (г/ГДж) загрязняющего вещества p' технологии генерации $k \in K^0$ при использовании топлива p и его физико-химических характеристик рассчитывается концентрация загрязняющего вещества p' в сухих дымовых газах теплоэнергетической технологии k при использовании топлива p , мг/нм³:

$$c_{kp'p} = b_{kp'p} Q_p^r / v_p,$$

где Q_p^r — низшая рабочая теплота сгорания топлива p , МДж/кг; v_p — удельный объем сухих дымовых газов, которые образуются при сжигании топлива p , нм³/кг.

Сравнение рассчитанной концентрации и нормативных требований по содержанию загрязняющего вещества в дымовых газах ТЭС на

органическом топливе позволяет определить необходимый уровень снижения выбросов загрязняющих веществ:

$$ef_{kp'p} = 1 - c_{kp'p}^n / c_{kp'p},$$

где $c_{kp'p}^n$ — нормативная концентрация загрязняющего вещества p' в сухих дымовых газах при использовании топлива p .

На основании этого показателя и соответствующих характеристик мероприятий по сокращению выбросов загрязняющих веществ формируются множества K' теплоэнергетических технологий и соответствующих вариантов мероприятий по снижению выбросов, которые обеспечивают для этих технологий производства соблюдение нормативных требований к выбросам загрязняющих веществ.

Общесистемные ограничения на валовые выбросы загрязняющих веществ теплоэнергетических технологий при их совместной работе в энергосистеме моделируются с помощью ограничений вида:

$$\sum_{k \in K'} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{z \in Z} b_{kp'pt}^n Y_{ksdft} H_{sdf} \delta_{sd} \leq O_{p't}, \quad (8)$$

где $b_{kp'pt}^n$ — предельно допустимые (нормативные) удельные выбросы загрязняющего вещества p' при использовании топлива p для технологии k , которые применяются на этапе прогнозирования t ; $O_{p't}$ — общесистемные ограничения на объемы выбросов загрязняющего вещества p' , которые применяются на этапе прогнозирования t .

За выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников платится экологический налог, но в случае превышения перспективных гармонизированных с европейскими нормативов таких выбросов, установленных приказом Минприроды Украины № 541, из-за невозможности своевременного и в полном объеме проведения соответствующих экологических мероприятий, применяются штрафные санкции в виде возмещения убытков, размер которых определяется в соответствии с «Методикой расчета размеров возмещения убытков, которые причинены государству в результате сверхнормативных выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух», утвержденной приказом Минприроды от 10.12.2008 г. № 639.

Размер убытка прямо пропорционален массе сверхнормативно выброшенного вещества и обратно пропорционален среднесуточной предельно допустимой концентрации загрязняющего вещества с поправкой на территориальные социально-экологические особенности и состояние загрязнения этим веществом атмосферного

воздуха в месте сверхнормативных выбросов. Размеры возмещения убытков за сверхнормативные выбросы 1 т загрязняющего вещества в атмосферный воздух, по наименьшим оценкам, составляют, грн/т: угольной пыли – 8932, SO₂ – 26796; NO₂ – 33495.

Для учета штрафных санкций за сверхнормативные объемы выбросов в случае невыполнения экологических требований разработан метод формирования оптимизационной модели для решения задачи определения влияния экологических требований в случае превышения нормативов выбросов загрязняющих веществ с применением штрафных санкций, в которой рассматриваются все возможные технологии генерации без предварительного отбора экологически приемлемых. Для технологий на органическом топливе в состав переменных расходов не включаются экологические платежи за объемы выбросов загрязняющих веществ.

Критерий такой оптимизационной задачи расширяется добавлением штрафов за сверхнормативные объемы выбросов, которые образуются при работе теплоэнергетических объектов в составе объединенной электроэнергетической системы в случае превышения допустимых нормативных концентраций загрязняющих веществ (см. (9)), где C^{nv}_{ksdfz} – условно-переменная составляющая себестоимости производства электроэнергии тепловыми электростанциями без учета платежей за валовые выбросы загрязнителей; C'_{p't} – платежи за валовые выбросы, которые образуются при совместной работе тепловых электростанций в энергосистеме; C''_{p't} – штрафы за сверхнормативные объемы выбросов; O'_{p't} – общесистемные объемы нормативных выбросов; O''_{p't} – общесистемные объемы сверхнормативных выбросов.

Общесистемные объемы нормативных и сверхнормативных выбросов загрязняющих веществ определяются с использованием следующего блока экологических ограничений и уравнений (10)–(12), которые заменяют ограничение (8) предыдущей оптимизационной задачи.

Как видно из ограничения (10), переменная общесистемных нормативных объемов выбросов O'_{p't} ограничивается суммарными объемами образования выбросов загрязняющих веществ при условии работы ТЭС в ОЭС с нормативными удельными показателями выбросов. Уравнение (11) определяет суммарные общесистемные объемы выбросов загрязняющего вещества при работе технологий с фактическими удельными показателями выбросов, которые складываются из нормативных и сверхнормативных объемов выбросов и не превышают общесистемные ограничения (12).

Реализация предложенных моделей проведена в среде программно-информационного комплекса прогнозирования развития энергетики «ПИРАМИДА-V», разработанного в Институте общей энергетики НАН Украины (ИОЭ НАНУ). Оптимизационные расчеты по формированию перспективной структуры ОЭС Украины проведены для двух вариантов (I и II) разных нормативных требований к выбросам загрязняющих веществ, результаты которых приведены в табл.2. При расчетах использованы собственные прогнозы ИОЭ НАНУ потребности в электроэнергии, а также объемы ввода технологий на возобновляемых источниках энергии и нового строительства АЭС, которые для корректности сравнения приняты одинаковыми для обоих вариантов. Данные по капитальным вложениям в реконструкцию существующих энергоблоков использованы из работ [17, 18], по применению очисток и их технико-экономических показателей – из [10, 19, 20].

Первый вариант структуры (I) рассчитан при условии достижения существующими ТЭС нормативных требований к 2034 г. с постепенным поэтапным приведением показателей удельных выбросов загрязняющих веществ до нормативных за счет проведения реконструкции с вводом газоочистного оборудования или замены блоков, как это предусмотрено в проекте Национального плана Украины по сокращению

$$\sum_{t=1}^T \left[\sum_{k \in K \setminus K^0} \left(C_k^c X_{kt} + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{z \in Z} C_{ksdfz}^v Y_{ksdft} H_{sdf} \delta_{sd} \right) + \sum_{k \in K^0} \left(C_k^c X_{kt} + \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{z \in Z} C_{ksdfz}^{nv} Y_{ksdft} H_{sdf} \delta_{sd} \right) + \sum_{p \in P'} (C'_{p't} O'_{p't} + (C''_{p't} + C'_{p't}) O''_{p't}) \right] \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K^0} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{z \in Z} b_{kpp'}^n Y_{ksdft} H_{sdf} \delta_{sd} \geq O'_{p't}, \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K^0} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \sum_{z \in Z} b_{kpp'} Y_{ksdft} H_{sdf} \delta_{sd} = O'_{p't} + O''_{p't}, \quad (11)$$

$$O'_{p't} + O''_{p't} \leq O_{p't}. \quad (12)$$

Таблица 2. Перспективная структура ОЭС Украины и основные показатели ее функционирования

| Показатель | 2013 г. (факт)* | 2020 г. | | 2025 г. | | 2030 г. | | 2035 г. | |
|--|--------------------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | | I | II | I | II | I | II | I | II |
| Производство электроэнергии всего, млрд кВт·год | 193,6 | 216,9 | 216,9 | 259,4 | 259,4 | 311,5 | 311,5 | 360,3 | 360,3 |
| Необходимая установленная мощность всего, ГВт, в том числе: | 54,5** | 44,3 | 44,2 | 52,8 | 52,8 | 63,3 | 63,3 | 72,9 | 73,0 |
| АЭС: | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 15,8 | 15,8 | 18,0 | 18,0 | 21,0 | 21,0 |
| существующие | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 13,8 | 12,0 | 12,0 | 7,0 | 7,0 |
| новые | – | – | – | 2,0 | 2,0 | 6,0 | 6,0 | 14,0 | 14,0 |
| ТЭС: | 34,3 | 22,8 | 22,7 | 27,7 | 27,7 | 34,4 | 34,4 | 39,7 | 39,8 |
| угольные, из них | 23,3 | 17,3 | 17,2 | 22,2 | 22,2 | 28,9 | 28,9 | 34,2 | 34,3 |
| КЭС угольные: | 22,3 | 16,3 | 16,2 | 20,7 | 20,7 | 26,9 | 26,9 | 31,7 | 31,8 |
| КЭС, малозатратная реконструкция | 3,8 | 10,2 | 0,0 | 10,2 | 0,0 | 10,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| КЭС, средnezатратная реконструкция | – | 0,7 | 0,0 | 0,7 | 0,0 | 0,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| КЭС, кардинальная реконструкция | 0,2 | 0,2 | 16,2 | 5,9 | 16,9 | 7,9 | 18,9 | 17,7 | 20,9 |
| КЭС, угольные новые | – | 0,0 | 0,0 | 4,0 | 3,8 | 8,2 | 7,9 | 14,0 | 10,9 |
| ТЭЦ угольные | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,5 |
| ТЭЦ газовые | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 | 5,5 |
| ГЭС и ГАЭС | 5,5 | 6,9 | 6,9 | 8,2 | 8,2 | 9,5 | 9,5 | 10,5 | 10,5 |
| ВЭС и СЭС | 0,94 | 0,8 | 0,8 | 1,1 | 1,1 | 1,4 | 1,4 | 1,7 | 1,7 |
| Потребление топлива, млн т у. т., в том числе: | 32,8 | 36,3 | 34,4 | 43,6 | 43,0 | 53,2 | 52,9 | 59,9 | 60,3 |
| уголь | 29,2 | 32,6 | 30,9 | 40,5 | 40,2 | 50,1 | 50,1 | 57,1 | 57,5 |
| природный газ | 2,9 | 3,6 | 3,4 | 2,9 | 2,7 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,7 |
| Выбросы загрязнителей и ПГ: | | | | | | | | | |
| SO ₂ , тыс. т | 1236,9 | 1491,6 | 48,5 | 811,1 | 70,0 | 641,6 | 94,5 | 118,1 | 119,0 |
| NO _x , тыс. т | 218,6 | 284,6 | 61,5 | 200,2 | 77,7 | 184,9 | 94,7 | 108,0 | 109,5 |
| пыль, тыс. т | 313,0 | 93,8 | 8,0 | 20,1 | 8,5 | 18,8 | 9,7 | 9,2 | 10,8 |
| CO ₂ , млн т | 104,4*** | 96,8 | 91,6 | 119,5 | 118,2 | 148,1 | 147,6 | 169,6 | 170,8 |

* По данным НЭК «Укрэнерго», Минэнергоугля и Госстата Украины (данные по выбросам загрязнителей взяты из [11]).

** Общая установленная мощность с учетом консервации, реконструкции. *** При производстве электроэнергии, газа, пара и кондиционировании воздуха.

выбросов. При этом предусматривается проведение на первом этапе малозатратной реконструкции существующих угольных энергоблоков с реконструкцией или установкой нового пылеочистного оборудования в объемах не менее 5 ГВт и средnezатратной реконструкции с дополнительной установкой сухой и полусухой сероочистки на мощностях не более 1 ГВт с учетом уже существующих проектов. Функционирование существующих мощностей без проведения реконструкции предусмотрено только до окончания первого этапа.

Проведение кардинальной реконструкции энергоблоков с установкой систем серо- и азотоочистки для выполнения требований Директивы 2010/75/EU предусматривается, начиная со второго этапа на уровне 6 ГВт, с последующим увеличением их объемов на следующих этапах. К последнему этапу энергоблоки, прошедшие мало- и средnezатратную реконструкции, проходят углубленную реконструкцию с заменой оборудования и установкой систем газоочистки для выполнения требований Директивы

2010/75/EU. Во втором варианте расчеты проведены при условии выполнения Директивы 2001/80/ЕС с 1 января 2018 г., что предусматривает проведение на первом этапе кардинальной реконструкции существующих энергоблоков с установкой систем пылегазоочистки, которые снижают содержание загрязняющих веществ в дымовых газах ТЭС до нормативных требований. При такой реконструкции предусмотрена замена оборудования блока в существующей ячейке или модернизация энергоблока с установкой котла ЦКС. Для факельного сжигания топлива для снижения выбросов оксидов серы и азота предусматривается внедрение систем мокрой десульфуризации дымовых газов и денитрификации. Ввод новых, экологически чистых технологий сжигания органического топлива в обоих вариантах предусмотрен с установкой систем пылегазоочистки, удовлетворяющих требованиям Директивы 2010/75/EU.

Необходимые инвестиции и показатели себестоимости производства электроэнергии на тепловых электростанциях согласно рассчитан-

Таблица 3. Основные экономические показатели перспективной структуры тепловой энергетики

| Показатель | 2020 г. | | 2025 г. | | 2030 г. | | 2035 г. | |
|--|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | I | II | I | II | I | II | I | II |
| Инвестиции за этап, млрд долл. | 4,4 | 22,5 | 15,2 | 8,2 | 10,5 | 10,5 | 23,9 | 8,1 |
| Кумулятивные инвестиции, млрд долл. | 4,4 | 22,5 | 19,6 | 30,7 | 30,1 | 41,2 | 54,0 | 49,3 |
| Себестоимость производства электроэнергии на КЭС, долл./ (МВт·год) | 57,2 | 55,8 | 53,3 | 53,4 | 51,9 | 52,5 | 51,1 | 51,8 |

ным вариантам перспективной структуры тепловых электростанций приведены в табл.3.

Основные результаты исследования и их обсуждение

Применение разработанных моделей влияния экологических факторов на использование технологий тепловой энергетики позволяет выполнять корректные комплексные исследования перспектив ее развития в составе электроэнергетических систем в условиях роста жесткости нормативных ограничений и требований к выбросам загрязняющих веществ и платы за выбросы парниковых газов.

Апробация разработанных моделей и соответствующего вычислительного комплекса произведена на двух характерных вариантах экологических требований к тепловой энергетике: подхода к выполнению нормативных требований, заложенного в проекте Национального плана Украины по сокращению выбросов от больших сжигающих установок (достижение существующими энергетическими установками нормативных требований Директивы 2010/75/EU к 2034 г., вариант I), и обязательства соблюдения требований Директивы 2001/80/ЕС Европейского Союза с 2018 г. (вариант II).

Сравнение результатов расчетов, полученных по этим вариантам, показало следующее. При одинаковых для обоих вариантов показателях производимой электроэнергии, объемах вводов новых мощностей на АЭС, ГЭС и возобновляемых источников энергии структура необходимых технологий тепловой энергетики на период до 2030 г. разительно различается. В частности, технология «КЭС, малозатратная реконструкция» в варианте I используется до 2030 г. включительно в объеме 10,2 ГВт, а в варианте II в этот период не используется вовсе (см. табл.2). Технология «КЭС, кардинальная реконструкция» в этот период используется по варианту I в объеме 0,2–7,9 ГВт, а по варианту II — в объеме 16,2–18,9 ГВт. По этому варианту уже к 2020 г. на существующих угольных энергоблоках общей мощностью 16 ГВт требуется установка очистного оборудования с высокой эффективностью, к 2035 г. провести за-

мену существующих котлов общей мощностью 5 ГВт на котлы ЦКС. По состоянию на 2035 г. потребуются строительство 11 ГВт новых экологически чистых угольных энергоблоков. Согласно варианту I, до 2020 г. останутся в работе 6 ГВт существующих угольных мощностей без проведения реконструкции. До 2035 г. кардинальная реконструкция будет проведена на 18 ГВт угольных энергоблоках и построено 14 ГВт новых. В варианте II для выполнения нормативных требований по выбросам преимущество имеют мероприятия по кардинальной реконструкции угольных энергоблоков по сравнению с новым строительством, которое объясняется сравнимо меньшими капитальными затратами и менее жесткими нормативами выбросов при сравнимых уровнях очистки.

Постепенное приведение к директивным показателям выбросов существующих тепловых электростанций, предусмотренное в варианте I, оказывает непосредственное влияние на общесистемные объемы выбросов, которые имеют тенденцию к снижению для всех загрязняющих веществ (см. табл.2), несмотря на увеличение общей мощности тепловых электростанций в энергосистеме. Общесистемные выбросы варианта II, напротив, имеют тенденцию роста, что объясняется фиксированными нормативными показателями выбросов. При этом валовые выбросы загрязняющих веществ для варианта I на первых трех этапах существенно превышают соответствующие показатели варианта II. Так, выбросы диоксида серы на первом этапе варианта I превышают показатель варианта II в 30 раз. К 2035 г. объемы выбросов загрязняющих веществ обоих вариантов практически сравниваются (см. табл.2) в результате использования на этом этапе теплоэнергетических технологий, удовлетворяющих нормативным требованиям. Выбросы диоксида углерода сравнимы для обоих вариантов и имеют тенденцию к росту в связи с увеличением объемов выработки электроэнергии, что объясняется использованием фиксированных показателей удельных выбросов ТЭС для всех этапов прогнозирования.

Экологические факторы имеют большое влияние на объемы инвестиций, необходимые

при розвитку теплової енергетики, що видно з табл.3. Як і следовало очікувати, максимальне різниця в інвестиціях спостерігається на першому етапі: їх необхідні обсяги за варіантом I становлять 4,4 млрд дол., за варіантом II – 22,5 млрд дол. З посиленням екологічних вимог на наступних етапах за варіантом I обсяги інвестицій різко зростають (див. табл.3), і в 2035 р. їх загальний обсяг навіть перевищує інвестиції за варіантом II (54 проти 49,3 млрд дол.). Таке перевищення пояснюється великими обсягами нового будівництва ТЕС, удільні капітальні витрати в яких перевищують відповідні показники при реконструкції енергоблоків. Показники середньої собівартості виробництва електроенергії на ТЕС за обома варіантами порівнювані на всіх етапах до 2035 р. (див. табл.3).

Важливим висновком з проведених розрахунків і аналізу є те, що підхід до виконання нормативних вимог, запропонований в проекті Національного плану України по скороченню викидів від великих сжигаючих установок, є обґрунтованим і прийнятним для теплової енергетики України, оскільки забезпечить інвестиції в теплову енергетику в 2018 р. в обсязі 22,5 млрд дол., необхідні для виконання екологічних вимог Директиви 2001/80/ЄС, що представляє для економіки України невыполнимим завданням. Також цей підхід передбачає поступовий вивід на реконструкцію і заміну існуючих енергоблоків з урахуванням надійності роботи енергосистеми, що не враховується при умові реконструкції всіх потужностей в 2018 р.

Список літератури

1. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants // Official Journal of the European Communities. 27/11/2001. L 309, P. 1–21.
2. Energy Community Acquis. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.energy-community.org/portal/page/portal/ENC_HOME/ENERGY_COMMUNITY/Legal/EU_Legislation/
3. Дубовської С.В., Коберник В.С. Економічні передумови впровадження природоохоронних технологій в теплової енергетики України // Енерготехнології і ресурсосбереження. – 2013. – № 3. – С. 59–65.
4. Дубовський С.В., Коберник В.С. Аналіз ефективності технологій перетворення енергії на ТЕС з урахуванням обмежень на викиди шкідливих емітентів // Проблеми загальної енергетики. – 2014. – Вип. 4. – С. 11–19.
5. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) // Official Journal of the European Communities. 17/12/2010. L 334. P. 17–119.
6. Decisions of the Ministerial Council of Energy Community D/2013/05/MC-EnC on the implementation of Directive 2001/80/EC on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.energy-community.org/pls/portal/docs/2386185.PDF>
7. Decisions of the Ministerial Council of Energy Community D/2013/06/MC-EnC on the implementation of Chapter III, Annex V, and Article 72(3)–(4) of Directive 2010/75/EU. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.energy-community.org/pls/portal/docs/2386186.PDF>
8. Костюковський Б. А., Шульженко С.В., Нечаєва Т.П. Напрямок забезпечення екологічних вимог по викидах забруднювачів в повітря в теплової енергетики України // Проблеми загальної енергетики. – 2009. – № 20. – С. 63–68.
9. Нечаєва Т. П., Спітківський А.І. Оцінка можливості та обсягів впровадження заходів для забезпечення виконання гармонізованих нормативів викидів забруднювачів у повітря в ОЕС України // Проблеми загальної енергетики. – 2012. – Вип. 2 (29). – С. 51–57.
10. Study on the Need for Modernization of Large Combustion Plants in the Contracting Parties of the Energy Community in the context of the implementation of Directive 2001/80/EC South East European Consultants, Ltd November 2013. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.energy-community.org/pls/portal/docs/2652179.PDF>
11. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок від 31 березня 2015 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245000387&cat_id=24494-6928
12. Energy Community Task Force on Environment. 7th Meeting. Conclusions. (8 April 2014). [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.energy-community.org/pls/portal/docs/3124025.PDF>
13. Шульженко С.В. Особливості розрахунку вартісних показників у задачах прогнозування розвитку електроенергетичних систем за ринкових умов їх функціонування // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – № 18. – С. 16–20.
14. Шульженко С.В. Показники ефективності функціонування та розвитку електричних станцій в умовах ринку // Проблеми загальної енергетики. – 2009. – № 20. – С. 7–13.
15. Нечаєва Т.П. Загальні методичні підходи до формалізації екологічних обмежень та вимог при прогнозуванні розвитку електроенергетичного ком-

- плексу // Проблеми загальної енергетики. — 2009. — № 19. — С. 63–69.
16. ЕМЕР/ЕЕА air pollutant emission inventory guidebook. Technical report No 12/2013. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/download-complete-guidebook-2013.zip>
 17. Левин М.М., Бабичев Л.А., Гуля О.М. Техническое переоснащение угольных энергоблоков 150–300 МВт // Энергетика та електрифікація. — 2013. — № 3. — С. 61–75.
 18. Чернявський М.В., Буляндра О.Ф. Результати та перспективи модернізації існуючих пилувугільних енергоблоків ТЕС України // Угольная тепло-енергетика. Проблемы реабилитации и развития : Тез. докл. 10 Междунар. науч.-практ. конф., Киев, 2014. — С. 46–49.
 19. Вольчин І.А., Дунаєвська Н.І., Гапонич Л.С., Чернявський М.В., Топал О.І., Засядько Я.І. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України. — Київ : ГНОЗІС, 2013. — 310 с.
 20. Guidance document on control techniques for emissions of sulphur, NO_x, VOCs, dust (including PM₁₀, PM_{2.5} and black carbon) from stationary sources. Working Group on Strategies and Review. Fiftieth session, 10-14 September 2012. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.unec.org/fileadmin/DAM/env/documents/2012/air/WGSR_50th/Informal/Informal_document_no2_stationary_sources_rev.pdf

Поступила в редакцію 25.05.15

Кулик М.М., акад. НАН України, докт. техн. наук, проф., **Нечаєва Т.П.**

Інститут загальної енергетики НАН України, Київ

вул. Антоновича, 172, 03680 Київ, Україна, e-mail: info@ienergy.kiev.ua

Вплив екологічних факторів на використання технологій теплової енергетики

Збільшення жорсткості екологічних вимог до функціонування теплової енергетики на органічному паливі, зокрема, до вмісту в димових газах теплових електростанцій діоксиду сірки, оксидів азоту та пилу, обумовлює необхідність впровадження заходів щодо зниження їх викидів за рахунок реконструкції існуючих енергоблоків, а також будівництва нових, що задовольняють цим вимогам. Для оцінки обсягів та термінів впровадження цих технологій розроблено математичні моделі, з використанням яких проведено розрахунки з формування перспективної структури теплової енергетики при варіантах рівнів та термінів виконання нормативних екологічних вимог, зафіксованих у Директивах Євросоюзу та в проекті Національного плану України зі скорочення викидів від великих спалюючих установок. Розрахунки показали, що виконання цих вимог у визначені Енергетичним Співтовариством терміни (до 2018 р.) призводить до необхідності вкладення обсягів інвестицій в реконструкцію генеруючих потужностей, які є непідйомними для економіки України. Відстрочка їх виконання відповідно до проекту Національного плану скорочення викидів є більш прийнятною з точки зору поетапного вкладення інвестицій та скорочення обсягів виведених у реконструкцію потужностей, що підвищує надійність функціонування енергосистеми. *Бібл. 20, табл. 3.*

Ключові слова: теплові електростанції, викиди забруднюючих речовин, нормативи викидів, інвестиції, чисті енерготехнології.

Kulyk M.M., Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine,
 Doctor of Technical Sciences, Professor, **Nechaieva T.P.**

Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
 172, Antonovicha Str., 03680 Kiev, Ukraine, e-mail: info@ienergy.kiev.ua

The Influence of Environmental Factors on the Use of Thermal Energy Technologies

Tightening environmental requirements to the operation of the fossil fuel thermal energy industry, in particular, to the content of sulfur dioxide, nitrogen oxides and dust in the flue gases emitted by thermal power plants makes necessary implementing measures to reduce such emissions. This goal could be reached by modernizing (reconstruction) the existing plants as well as constructing new ones that would comply with the more strict requirements. Mathematical models have been developed to assess the scope and timeframes for introducing such technologies and applied in calculations for the prospective structure of the thermal energy industry (plants) under scenarios with variable levels and time limits for ensuring compliance with statutory environmental requirements set forth in the EU Directives and the Draft National Plan of Ukraine to reduce emissions from large combustion plants. The calculations have shown that Ukraine's economy cannot afford the amount of investment needed for the modernization of its generating capacities to meet the requirements within the timeframes set by the Energy Community (by 2018). A deferral in accordance with the Draft National Plan would be more acceptable in terms of both staged capital investments and minimizing the need for capacity modernization decline in output which will take place when the generating capacities are modernized. This will also improve the operational reliability of the total energy system. *Bibl. 20, Table 3.*

Key words: thermal power plants, pollutant emissions, emission limit values, investment, clean energy technologies.

References

1. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. *Official Journal of the European Communities*. 27/11/2001. L 309, pp. 1–21.
2. Energy Community Acquis. [Online resource]. — Access mode: http://www.energy-community.org/portal/page/portal/ENC_HOME/ENERGY_COMMUNITY/Legal/EU_Legislation
3. Dubovskoj S.V., Kobernik V.S. Jekonomicheskie predposylki vnedrenija prirodoohrannyh tehnologii v teplovoj jenergetike Ukrainy [Economic Preconditions Implementation of Environmental Protection Technologies Thermal Energy in Ukraine]. *Jenergotehnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2013, (3), pp. 59–65. (Rus.)
4. Dubovs'kyj S.V., Kobernyk V.S. Analiz efektyvnosti tehnologii peretvorennja energii' na TES z urahuvannjam obmezhen' na vykydy shkidlyvyh emitentiv [Analysis of the effectiveness of energy transfer technologies at TPP considering the limitation for pollutant emissions]. *Problemy zagal'noi' energetyky [The Problems of General Energy]*, 2014, 4 (39), pp. 11–19. (Ukr.)
5. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *Official Journal of the European Communities*. 17/12/2010. L 334, pp. 17–119.
6. Decisions of the Ministerial Council of Energy Community D/2013/05/MC-EnC on the implementation of Directive 2001/80/EC on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants. [Online resource]. — Access mode: <http://www.energy-community.org/pls/portal/docs/2386185.PDF>
7. Decisions of the Ministerial Council of Energy Community D/2013/06/MC-EnC on the implementation of Chapter III, Annex V, and Article 72(3)-(4) of Directive 2010/75/EU. [Online resource]. — Access mode: <http://www.energy-community.org/pls/portal/docs/2386186.PDF>
8. Kostjukovs'kyj B. A., Shul'zhenko S.V., Nechajeva T.P. Naprjamky zabezpechennja ekologichnyh vymog po vykydah zabrudnjuvachiv v povitryja v teplovoj energetyky Ukrainy [Directions of ecological requirement providing on the air pollution emissions in the thermal power of Ukraine]. *Problemy zagal'noi' energetyky [The Problems of General Energy]*, 2009, (20), pp. 63–68. (Ukr.)
9. Nechajeva T.P. Spitkovs'kyj A.I. Ocinka mozhlyvosti ta obsjagiv vprovadzhenja zahodiv

- dlja zabezpechennja vykonannja garmonizovanyh normatyviv vykydiv zabrudnjuvachiv u povitrja v OES Ukrainy [Evaluation of the possibility and the scope of implementations of the measures to ensure the harmonized standards of air pollutant emissions in the United power system of Ukraine]. *Problemy zagal'noi' energetyky [The Problems of General Energy]*, 2012, 2(29), pp. 51–57. (Ukr.)
10. Study on the Need for Modernization of Large Combustion Plants in the Contracting Parties of the Energy Community in the context of the implementation of Directive 2001/80/EC. South East European Consultants, Ltd. November 2013. [Online resource]. — Access mode: <http://www.energy-community.org/pls/portal/docs/2652179.PDF>
 11. Nacional'nyj plan skorochennja vykydiv vid velykyh spaljuval'nyh ustanovok vid 31 bereznja 2015 r. [National plan to reduce emissions from large combustion plants on March 31, 2015]. [Online resource]. — Access mode: http://www.mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245000387&cat_id=244946-928. (Ukr.)
 12. Energy Community Task Force on Environment. 7th Meeting. Conclusions. 8 April 2014. [Online resource]. — Access mode: <http://www.energy-community.org/pls/portal/docs/3124025.PDF>
 13. Shul'zhenko S.V. Osoblyvosti rozrahunku vartisnyh pokaznykiv u zadachah prognozuvannja rozvytku elektroenergetychnykh system za rynkovykh umov i'h funkcionuvannja [Estimation of cost indicators for the task of electrical power system development forecast under the market liberalization conditions]. *Problemy zagal'noi' energetyky [The Problems of General Energy]*, 2008, (18), pp. 16–20. (Ukr.)
 14. Shul'zhenko S.V. Pokaznyky efektyvnosti funkcionuvannja ta rozvytku elektrychnykh stancij v umovah rynku [Efficiency indicators of power plants operation and development in the liberalized electricity market conditions]. *Problemy zagal'noi' energetyky [The Problems of General Energy]*, 2009, (20), pp. 7–13. (Ukr.)
 15. Nechajeva T.P. Zagal'ni metodychni pidhody do formalizacii' ekologichnyh obmezhen' ta vymog pry prognozuvanni rozvytku elektroenergetychnogo kompleksu [General methodical approaches to the formalization of environmental restrictions and requirements at the energy system development forecasting]. *Problemy zagal'noi' energetyky [The Problems of General Energy]*, 2009, (19), pp. 63–69. (Ukr.)
 16. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook. Technical report No 12/2013. [Online resource]. — Access mode: <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/download-complete-guidebook-2013.zip>
 17. Levin M.M., Babichev L.A., Gulja O.M. Tehniceskoe pereosnashhenie ugol'nyh jenergoblokov 150–300 MVt [Technical re-equipment of 150–300 MW coal-fired power units]. *Energetyka ta elektrifikacija [Energy and Electrification]*, 2013, (3), pp. 61–75. (Rus.)
 18. Chernjavs'kyj M.V., Buljandra O.F. Rezul'taty ta perspektyvy modernizacii' isnujuchykh pylovugil'nyh energoblokov TES Ukrainy [Results and prospects for modernization of existing coal-fired thermal power of Ukraine]. *Ugol'naja teploenergetika. Problemy rehabilitacii i razvitija : Tezisy 10 mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Coal power system. Problems of rehabilitation and development: abstracts of 10 International scientific and practical conference]*, Kiev, 2014, pp. 46–49. (Ukr.)
 19. Vol'chyn I.A., Dunajevs'ka N.I., Gaponych L.S., Chernjavs'kyj M.V., Topal O.I., Zasad'ko Ja.I. Perspektyvy vprovadzennja chystykh vugil'nyh tehnologij v energetyku Ukrainy [Prospects for the implementation of clean coal technologies in the energy sector of Ukraine], Kiev : GNOZIS, 2013, 320 p. (Ukr.)
 20. Guidance document on control techniques for emissions of sulphur, NO_x, VOCs, dust (including PM10, PM2.5 and black carbon) from stationary sources. Working Group on Strategies and Review. Fiftieth session, 10–14 September 2012. [Online resource]. — Access mode: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2012/air/WGSR_50th/Informal/Informal_document_no2_stationary_sources_rev.pdf

Received May 25, 2015