

## ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЙ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

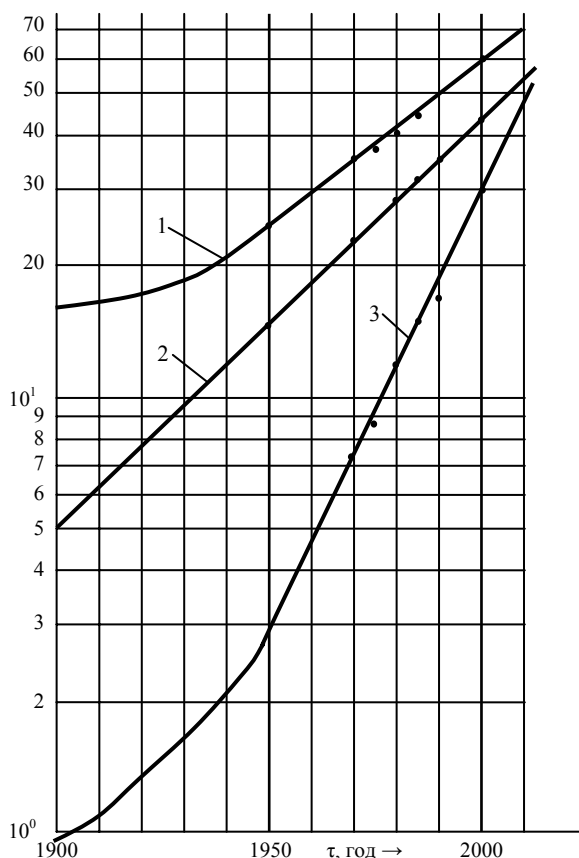
**С.П. Высоцкий**

*Автомобильно-дорожный институт ГВУЗ «ДонНТУ», Горловка, Украина  
kf-ebg@adidonntu.org.ua*

Рассмотрены основные пути снижения эмиссии парниковых газов. Использование технологий улавливания диоксида углерода, его транспортировки и захоронения приводит к существенному повышению стоимости электроэнергии. Перспективными направлениями для снижения эмиссии двуоксида углерода являются применение возобновляемых энергоресурсов и более эффективных технологий генерации тепловой и электрической энергии.

Основным источником эмиссии углекислого газа антропогенного происхождения являются процессы сжигания топлива при производстве электрической (на тепловых электростанциях), тепловой (в различного рода коммунальных и производственных котельных) и механической энергии (в различного рода движущихся средствах). По оценкам экспертов предполагается, что в ближайшие 20 лет произойдет удвоение потребления энергии. При этом более 50% выработки энергии будет обеспечено за счет ископаемых источников энергии.

Анализ мирового потребления энергоресурсов при обработке статистических данных показал, что имеет место экспоненциальный рост численности населения Земли, потребленных энергоресурсов и удельного энергопотребления (рис. 1).



В научных публикациях, в периодической печати прослеживается тенденция – единственным альтернативным энергоносителем для Украины является уголь. Однако объемы добычи угля постепенно снижаются. По существующим оценкам запасов угля промышленной категории в Украине хватит на 250-300 лет. Чтобы его добыть необходимы инвестиции и новые технологии, так как 80 % оборудования ТЭК физически и морально устарели. Удельные затраты энергоресурсов на добычу 1 тонны угля весьма существенны и составляют: тепловой энергии 89 Мкал, электроэнергии – 125 кВт·ч. Кроме этого на обогащение 1 т. угля расходуется 10,3 кВт·ч электроэнергии.

Сложность положения использования энергоресурсов усугубляется тем, что производство электрической энергии на тепловых электростанциях осуществляется с низким КПД. Примерно 2/3 энергии, получаемой при сжигании топлива рассеивается в окружающей среде.

Рисунок 1 – Изменение численности населения Земли, потребления энергоресурсов и удельного энергопотребления (1 – народонаселение, млрд. человек  $\cdot 10^{-1}$ ; 2 – удельное энергопотребление, т. у. т  $10^{-1}$  / чел; 3 – потребление ТЭР млрд. т. у. т.)

Удельный расход топлива и КПД генерации связаны простой зависимостью:

$$B = \frac{0,123}{\eta}, \text{ кг у.т. / кВт} \cdot \text{ч}$$

Таким образом, при калорийности энергетического угля 4500 ккал/кг (18,8 МДж/кг) удельный расход реального топлива составляет 0,580 кг/кВт ·ч. Расходы топлива и выбросы в окружающую среду весьма большие. Уместно отметить, что ни один из отечественных энергоблоков не оборудован устройствами для очистки газов от оксидов серы и азота. При использовании для генерации растительного сырья, например, прессованной соломы удельные расходы составляют 0,7 кг/кВт ·ч.

Сложность задач, стоящих перед экономикой Украины состоит в том, что все наши отрасли производства ресурсо- и энергоемки. Для создания одного доллара ВВП в Украине используется около 1 т сырья, а в США – 3 килограмма.

Сжигание огромного количества ископаемых топлив приводит к выбросу в атмосферу такого количества углекислого газа, которое уже не ассимилируется в процессе фотосинтеза. Это приводит к губительному изменению климата планеты. Атмосфера планеты перегревается, что уже прослеживается на всех континентах. Увеличивается количество ураганов торнадо. Каждый год становится теплее предыдущего. Возникает необходимость поиска путей сокращения выбросов основного компонента, обуславливающего парниковый эффект – углекислого газа.

Следует отметить, что кроме углекислого газа парниковый эффект обусловлен наличием в атмосфере целого ряда других газов. Влияние отдельных газов на создание указанного эффекта оценить достаточно сложно, поскольку их действие не аддитивно. Так, доля действия паров воды составляет от 36 до 70 %, углекислого газа от 9 до 26 %, метана от 4 до 9% и озона от 3 до 7 %. При этом верхняя граница соответствует действию только данного газа нижняя – когда присутствует смесь газов [1,2].

Из приведенных данных следует интересный вывод. Увеличение выработки электроэнергии на атомных станциях, с одной стороны, исключает эмиссию углекислого газа, а с другой стороны, увеличивает эмиссию паров воды. Это обусловлено меньшим термическим КПД атомных энергоблоков. Однако превышение эмиссии паров воды и обусловленное этим увеличение парникового эффекта все же меньше влияния эмиссии углекислого газа для традиционных тепловых электростанций. Это обусловлено тем, что время «жизни» двуокиси углерода в атмосфере составляет 130 лет а паров воды несколько дней или недель.

Влияние различных газов на парниковый эффект существенно отличается. Всемирный институт ресурсов приводит данные по коэффициентам влияния на парниковый эффект. Они учитывают степень вредного влияния газов, как соотношение эквивалентной массы CO<sub>2</sub> к массе данного газа. При этом общее влияние оценивается по сумме произведений массы выброса на соответствующий переводной коэффициент. Так, например эмиссия одного килограмма гексафторида серы эквивалентна эмиссии 23,9 тонн двуокиси углерода (см. табл. 1).

В странах СНГ основным источником выбросов двуокиси углерода являются тепловые электростанции. Предполагается, что к 2020 году эмиссия двуокиси углерода на ТЭС Украины составит примерно 79 млн. тонн. В странах Европейского союза эмиссия парниковых газов в настоящее время составляет около двух миллиардов тонн. Доля Украины от этого показателя в настоящее время составляет 22,4 процента [4].

Таблица 1 – Приведенные коэффициенты эмиссии парниковых газов

Тип парникового газа	Двуокись углерода	Метан	Закись азота	Фтор и хлор углеводород	Гексафторид серы
<b>Коэффициент влияния на парниковый эффект</b>	1,0	21	310	1300	23900

Целесообразно оценить влияние различных видов топлива на эмиссию двуокси углерода. В таблице 2 приведены усредненные данные по величине эмиссии CO<sub>2</sub> при сжигании различных видов топлива.

В современных условиях существует три направления снижения выбросов углекислого газа при использовании угля в качестве топлива. Первое направление — предварительная газификация угля с удалением CO<sub>2</sub> из продуктов газификации. Синтетический газ, получаемый в процессе газификации, состоит в основном из окиси углерода, СО и водорода. В процессе очистки синтетического газа в скрубберах из него удаляется CO<sub>2</sub>, который затем за счет сжатия переводится в жидкое состояние и направляется на захоронение. Процесс основан на внутрицикловой газификации.

Второе направление – сжигание твердого топлива в среде почти чистого кислорода. Дымовые газы в этом случае состоят в основном из CO<sub>2</sub> и паров воды и практически не содержат соединений азота. При этом дымовые газы частично направляются на рециркуляцию. После охлаждения газов и конденсации паров воды в дымовых газах остается практически только CO<sub>2</sub>. Эта технология пока не используется на крупномасштабных установках в энергетике, однако уже применяется в других отраслях промышленности. Преимуществом этой технологии является значительное снижение общей массы выбросов, получение высококонцентрированного потока CO<sub>2</sub>. Недостатком является то, что получение чистого кислорода требует больших затрат энергии.

По третьему направлению CO<sub>2</sub> удаляют из дымовых газов с использованием растворов химических сорбентов. После нагрева сорбента происходит удаление CO<sub>2</sub> и восстановление поглотительной способности сорбента. Достоинством этого процесса является то, что сорбционная очистка дымовых газов является полностью отработанной технологией. Недостатком является то, что оборудование занимает много места, в связи с чем его сложно интегрировать в существующие системы генерации энергии. Кроме этого применение этой технологии связано с высокими эксплуатационными расходами до 1000 евро (1300 дол) на расход дымовых газов 1 млн м<sup>3</sup>/час (примерно на один энергетический блок 300 МВт). При этом удельные затраты на улавливание 1 т CO<sub>2</sub> оцениваются примерно в 30 евро (41 дол). Предполагается, что к 2030 г. этот показатель снизится до 20 евро/т (27 дол/т).

Таблица 2 – Удельная эмиссия CO<sub>2</sub> при сжигании различных видов топлива

Вид топлива	Единица измерения	Коэффициент эмиссии
Антрацит	г/МДж	98-180
Бурый уголь	г/МДж	90-95
Природный газ	г/МДж	50-55
	г/м <sup>3</sup>	1,92
Авиационный бензин	кг/л	2,17
Дизельное топливо (№ 1, 2)	кг/л	2,65
Бензин	кг/л	2,32
Топливо для реактивных двигателей	кг/л	2,49
Мазут (№ 5, 6)	кг/л	3,08
Пропан	кг/л	1,51

В соответствии с приближенными оценками экспертов глобальные «хранилища» для закачки CO<sub>2</sub> составляют от 100000 до 200000 млрд тонн. По данным экспертов ФРГ геологические формации, включая выработанные месторождения природного газа и нефти, могут обеспечить захоронение CO<sub>2</sub>, произведенного за 40-130 лет эксплуатации тепловых электростанций [1]. В Украине такие геологические формации, которые могут быть использованы для захоронения CO<sub>2</sub>, расположены в Западной Украине, Харьковской и Полтавской областях. Следует отметить, что в настоящее время многие из этих «хранилищ» используются как буферные емкости накопления природного газа. Таким образом,

существует конкурентное использование этих емкостей. Можно отметить также положительный эффект от закачки, состоящий в том, что это увеличивает дебит существующих нефтеносных скважин.

Риски, которые связаны с захоронением  $\text{CO}_2$  в геологических формациях, включают возможные утечки и прямое неблагоприятное влияние на окружающую среду, состоящие в воздействии на климат, нанесении ущерба персоналу и оборудованию. Как было отмечено в [4], закачка  $\text{CO}_2$  создает опасность образования водноуглекислотных смесей с возникновением угольной кислоты. Последняя может растворить вскрышные породные образования, привести к нарушению их сплошности и вызвать как неконтролируемые утечки  $\text{CO}_2$ , так и нарушение земной поверхности.

В любом случае применение систем улавливания  $\text{CO}_2$  на тепловых электростанциях связано со снижением эффективности генерации энергии и с необходимостью дополнительных капитальных вложений. Применение на ТЭС более высоких параметров пара (давление, температура), комбинированных циклов генерации энергии позволяет частично или полностью компенсировать потери экономичности при использовании систем очистки газов. Переоснащение существующей ТЭС мощностью 800 МВт системой очистки газов требует дополнительных капитальных вложений в 300-400 миллионов евро (404-539 млн долларов), т.е. увеличения капитальных вложений почти в 1,5 раза.

Дополнительные затраты включают: очистку дымовых газов от диоксида серы, захлаживание дымовых газов, абсорбцию  $\text{CO}_2$ , теплообменное оборудование, десорбцию  $\text{CO}_2$  и ее сжатие для ожижения перед транспортом.

По сравнению с другими веществами, которые транспортируются по трубопроводам, например, нефтью, природным газом и водой, угольная кислота ведет себя необычно вследствие того, что тройная точка в системе равновесия фаз расположена в области близкой к температуре окружающей среды. Таким образом, при небольших изменениях давления и температуры происходят существенные изменения физических свойств (переход в другую фазу, изменение плотности, сжимаемости). На рис. 2 приведена диаграмма равновесий фаз угольной кислоты при разных температурах, которая подтверждает указанные показатели.

При транспортировке угольной кислоты на дальние расстояния (несколько сот километров) вследствие изменений внешних условий возникает возможность образования многофазных потоков. Это затрудняет как транспорт, так и измерение расходов потоков, так как расходомеры могут измерять только однофазный поток.

Наиболее предпочтительным для снижения эмиссии двуокиси углерода является широкое использование биомассы для генерации электрической энергии, теплоты и приготовления биогаза, его использования в двигателях внутреннего сгорания и бытовых условиях [5]. В настоящее время в Англии и скандинавских странах биомасса уже широко используется на котельных установках тепловых электростанций. Начаты работы по применению древесных отходов на котельных установках и в Российской Федерации. В Англии биомасса (солома, отходы древесины и пр.) применяются в котельных установках при совместном сжигании с пылевидным углем.

Потенциал производства биомассы в Украине по различным культурам приведен в таблице 3. При грамотном ведении лесного хозяйства древесина может обеспечить энергоснабжение некоторых регионов Украины.

Одним из доступных ресурсов является солома, которая отличается малой влагоемкостью и может быть вовлечена в производство энергии после её дробления и таблетизации. Стоимость этого продукта при разной схеме уборки урожая составляет от 55 до 70 грн/т.

Перспективным энергоносителем во многих районах является тополь и верболоз. Выращивание тополя попутно решает экологическую проблему. Он очищает воздух от пыли и ряда токсинов. Сообщается, что за год одно растение может вырасти на 15-20 мм в диаметре и 2,5-3,5 метра высотой. Механизированная «уборка» тополей может быть осуществлена с использованием установок размещенных на тракторах с отбором мощности.

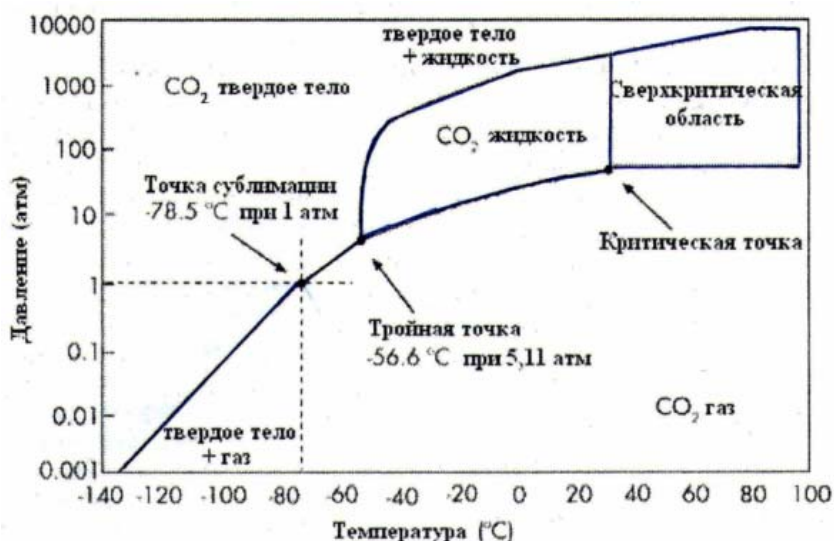


Рисунок 2 – Фазовая диаграмма равновесий углекислоты в зависимости от температуры и давления

Таблица 3 – Потенциал производства биомассы в Украине

Вид биомассы / излишков биомассы	Валовой сбор, млн. т	Коэффициент отходов	Коэффициент доступности	Общее количество отходов, млн. т	Q <sub>н.р.</sub> , МДж/кг	Количество биомассы, доступное для получения энергии		Энергетический потенциал биомассы, доступной для получения энергии, млн. т НЭ
						%	млн. т	
Злаковые культуры / солома	28,53	1,0	0,85	24,25	15,7	20	4,85	1,82
Кукуруза на зерно / стебли	5,34	1,2	0,7	4,49	13,7	50	2,24	0,74
Сахарная свекла / ботва, жмых	17,66	0,4	0,4	2,83	13,7	50	1,41	0,46
Подсолнечник / стебли	2,31	3,7	0,7	5,97	13,7	50	2,99	0,97
Древесина / отходы древесины	5,4	0,84	0,9	4,1	9,0	71	2,91	0,62
Навоз (сухое вещество)	7,39	-	0,62	4,58	15,0	100	4,58	1,64
Всего				44,46			18,98	6,25

Одной из наиболее перспективных культур является мискантус – слоно́вая трава. Сравнение энергетических показателей этой культуры с другими, приведенные в таблице 4, показывает, что с ней может конкурировать только ива. Однако большая сложность выращивания и «уборки» энергетического урожая ивы указывают на то, что другие культуры практически неконкурентоспособны по сравнению со слоно́вой травой. Слоно́вая трава является многолетним растением и требует возделывания почвы один раз в 4 года. При её выращивании решается проблема с эмиссией углекислого газа и улучшается биоразнообразие в зоне выращивания этой культуры. Удельные затраты и выход энергии при выращивании энергетических культур показаны в табл. 4.

Важным направлением снижения эмиссии парниковых газов является уменьшение потребления энергоресурсов. Эффективными методами снижения потребления энергоресурсов являются применение когенерации, аккумулирования тепла и использование тепловых насосов.

Таблица 4 – Сравнение энергетических показателей слоновой травы с другими культурами

Культура	Потребление энергии на производство – ПЭ, МДж/га	Выход энергии – ВЭ, МДж/га	Соотношение ВЭ/ПЭ
Слоновая трава	9,224	300,0	32,5
Ива	6,003	180,0	30,0
Пшеница	21,46	189,34	8,8
Рапс	19,39	72,0	3,8

Когенерация – это совместное комбинированное производство электроэнергии и тепла. Смысл когенерации в том, что при прямой выработке электрической энергией, создается возможность утилизировать попутное тепло. При применении когенерационного способа производства тепла и электроэнергии экономится около 40 % топлива. Выражая денежными средствами, получается, что потребитель за такое же количество энергии заплатит лишь 60 % его стоимости.

Тепло и электроэнергия вырабатываются в непосредственной близости их потребления, при этом отпадают как затраты на распределение энергии, так и потери при магистральной передаче энергии. Тепло, возникающее в когенерационной установке, используется для отопления объектов, при подготовке горячей воды или для получения технологического тепла. Так как при применении когенерационного способа производства тепла и электроэнергии экономится 40 % топлива, то и на столько же снижается, с экологической точки зрения, загрязнение окружающей среды.

Энергоснабжение от когенераторной установки позволяет снизить ежегодные расходы на электро- и теплоснабжение по сравнению с энергоснабжением от энергосистем примерно на 100 \$ за каждый кВт номинальной электрической мощности когенераторной электростанции, в том случае, когда когенераторная установка работает в базовом режиме генерации энергии (при 100 % нагрузке круглогодично).

Аккумуляция тепла особенно выгодно при установке 3-х уровневых счетчиков электроэнергии при которых можно потреблять внепиковую энергию по цене почти в 3 раза меньшую базового тарифа. Аккумуляция тепла позволяет: повысить теплоустойчивость зданий, повысить КПД автономных источников электроэнергии и, соответственно, эмиссию CO<sub>2</sub>, снизить стоимость электрообогрева как производственных площадей, так и отдельных квартир, в которых устанавливаются теплоаккумуляторы. Тепловой аккумулятор в сравнении с другими аккумуляторами обладает следующими преимуществами: простота устройства, относительно низкая себестоимость, эффективные массогабаритные характеристики, долговечность.

При наличии теплоаккумулятора вся тепловая энергия установки генерации электроэнергии используется для его зарядки. Избыток электроэнергии также направляется в теплоаккумулятор. Таким образом, КПД автономного источника становится соизмеримым с КПД котла (порядка 85 %), а стоимость электроэнергии, получаемой на такой установке, будет в несколько раз ниже сетевой.

Процессы аккумуляции тепла происходят путем изменения физических параметров теплоаккумулирующих веществ и за счет использования энергии связи атомов и молекул веществ (за счет фазового перехода).

Наиболее приемлемыми аккумуляторами тепла с фазовым переходом являются сульфат алюминия, сульфат натрия и нитрат лития. Сравнительная характеристика отвода тепла от воды и сред с теплоаккумулирующими веществами сульфатами алюминия и натрия приведена на рис. 3.

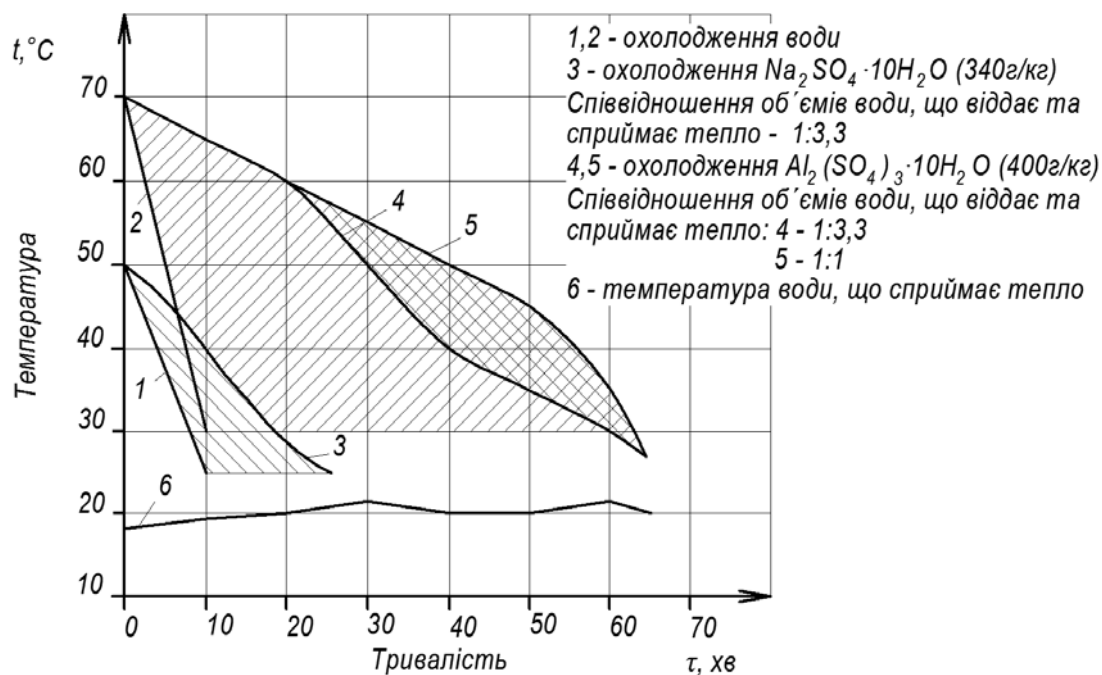


Рисунок 3 – Сравнительная характеристика аккумуляирования тепла сульфатом алюминия ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) и сульфатом натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )

### Выводы

1. Анализ путей снижения эмиссии углекислого газа показывает, что внедрение технологий очистки дымовых газов требует увеличения капитальных вложений на сооружение нового энергетического оборудования больше в 1,5 раза по сравнению с традиционными технологиями генерации энергии, применяемыми в стране.

2. В условиях дефицита инвестиций снижение эмиссии парниковых газов на отечественных ТЭС целесообразно осуществлять по пути когенерации и совместного сжигания биологического топлива и угля.

3. Выработку электрической энергии на установках с использованием биотоплива целесообразно осуществлять на установках небольшой мощности.

4. При захоронении углекислого газа в подземных горизонтах возможно использование отработанных нефтяных скважин. Это позволяет также увеличить дебит работающих скважин.

5. При транспортировке углекислого газа к местам его захоронения необходимо учитывать его особые свойства.

### Список литературы

1. Sean Black. Carbon capture the moment: A chilled ammonia pilot project // Power Engineering – 2008.- Vol. 16, Issue 5, June.

2. H. van Veen, Y.C. van Delft, E.M. van Dorst, P.P.A.C. Pex. Water gas shift membrane reactor for  $\text{CO}_2$  emission reduction and hydrogen production. Presented at the 6<sup>th</sup> Netherlands Process Technology Symposium (NPS6). Veldhoven, The Netherlands, 24-25 October 2006. February 2007.

3. Tobias Jokenhövel, Rudiger Schneider, Helmut Rode. Salt of the earth: carbon capture via amino acid flue gas scrubbing // Power Engineering – 2010.- Vol. 18, Issue 5, May.

4. Высоцкий С.П. Проблемы эмиссии углекислого газа. // Экотехнологии и ресурсосбережение: Научно-технический журнал.- К., 2007.- № 2.- С. 47-50.

5. Высоцкий С.П., Чернюк А.А. Применение биомассы как альтернативного источника энергоснабжения // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Науково-виробничий збірник / АДІ ДонНТУ.- Горлівка, 2007.- № 2 (5).- С. 191-197.