

Высоцкий С.П., д.т.н.

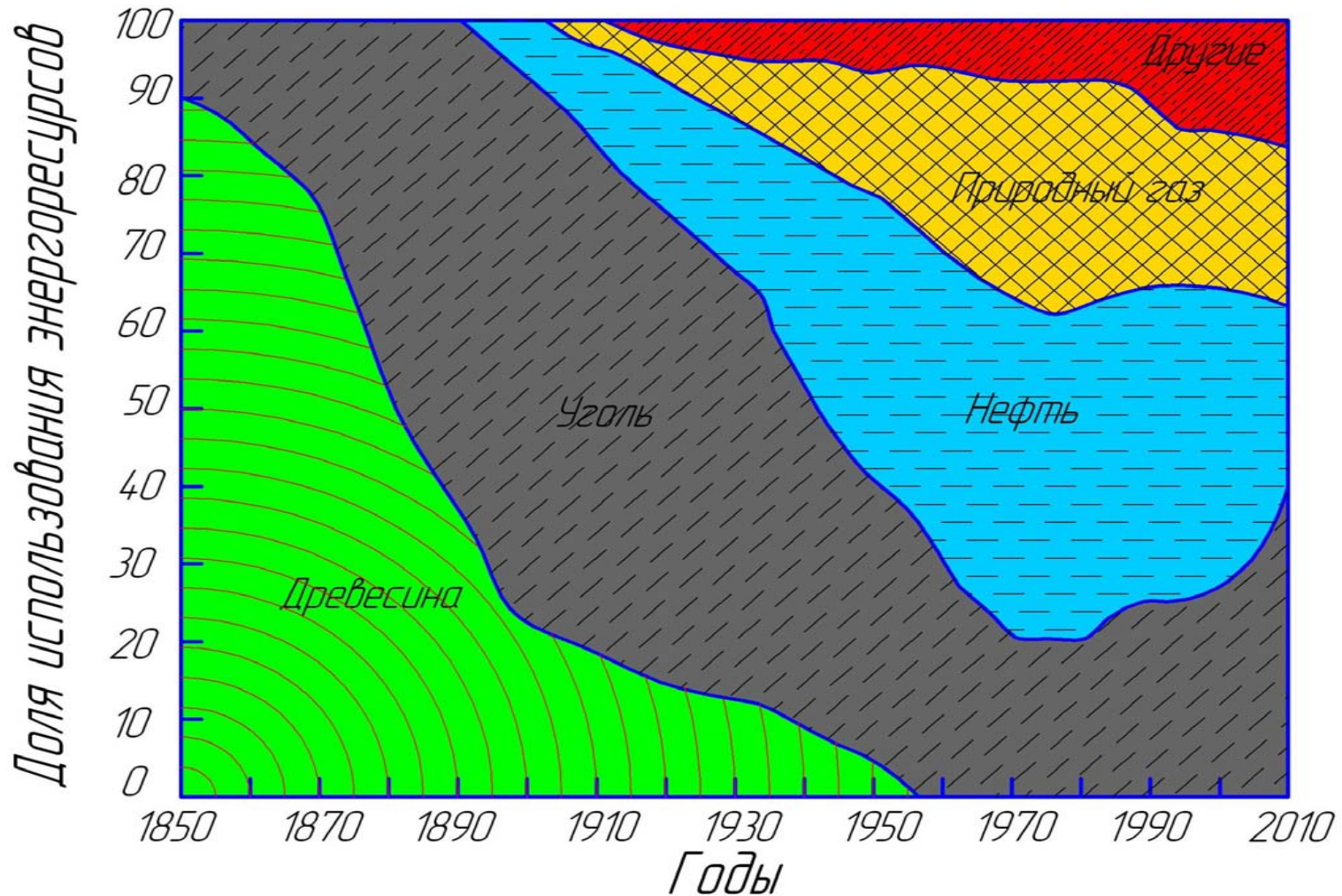
АДИ «ДонНТУ»

## Выбор направлений снижения эмиссии углекислого газа

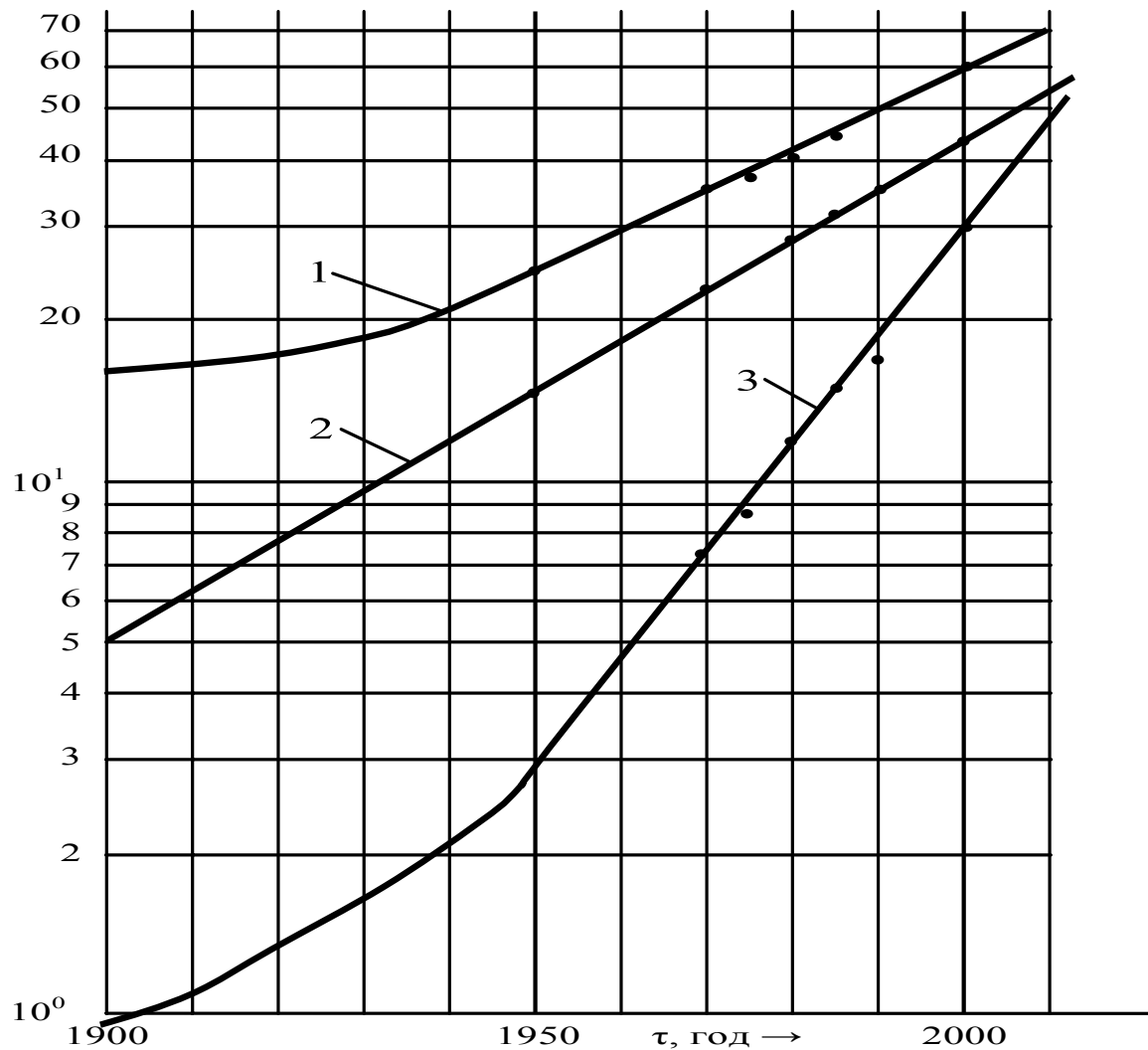
- По оценкам экспертов предполагается, что в ближайшие 20 лет произойдет удвоение потребления энергии. При этом более 50% выработки энергии будет обеспечено за счет ископаемых источников энергии.

Изменение потребления различных энергоресурсов во времени в мировой практике показано на рис. 1.

## Доля использования энергоресурсов в мире



**Анализ мирового потребления энергоресурсов при обработке статистических данных показал, что имеет место экспоненциальный рост численности населения Земли, потребленных энергоресурсов и удельного энергопотребления (рис. 2).**



- 1 – население, млрд. человек · 10<sup>-1</sup>;  
 2 – удельное энергопотребление, т. у. т · 10<sup>-1</sup>/чел ;  
 3 – потребление ТЭР млрд. т. у. т.

Рисунок 2 – Изменение численности населения Земли, потребления энергоресурсов и удельного энергопотребления

Использование угля в прошлом веке постепенно уменьшалось. Этому способствовало относительное увеличение стоимости угля по сравнению с нефтью и газом и давление «зеленых». Альтернативой угля стало наиболее экологически чистое ископаемое топливо – природный газ и атомные электростанции. Рост производства энергии на атомных электростанциях продолжался до аварии на Чернобыльской АЭС. Произошло осознание большой опасности этого вида получения энергии.

В научных публикациях, в периодической печати прослеживается тенденция – единственным альтернативным энергоносителем для Украины является уголь. Рассмотрим кратко состояние с добычей основных трёх видов ископаемого топлива. Рекордная добыча угля составляла в 1976 г. 218 млн. тонн, нефти и газового конденсата в 1972 г. 14,4 млн. тонн, природного газа в 1975 г. – около 69 млрд. м<sup>3</sup>.

**Однако объемы добычи органического топлива постоянно снижаются, годовая добыча угля составляет в настоящее время примерно 80 млн. тонн. 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 1т. 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.**

**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 0,7кг/кВт·ч.**

**В соответствии с национальной энергетической программой, принятой несколько лет назад предполагалось проведение комплексной механизации и реконструкции 31 энергоблока ТЭС, в том числе с использованием ПГУ, а также введение в эксплуатацию новых энергоблоков. Однако выполнение программы в основном не вышло за пределы «косметических» ремонтов.**

**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. Следует признать, что задачи, стоящие перед экономикой страны решаются недостаточно профессионально.**

**Необходим поиск путей выхода из достаточно сложного положения. В прошлом веке Лион Фейхтвангер высказал немного парадоксальную мысль: «Вопреки сложившимся заблуждениям, весь мир состоит не из вопросов, а из ответов, надо только догадаться, на что конкретно они отвечают».**



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.

- Согласно оценке международной комиссии по изменению климата (IPCC) эмиссия углекислого газа к 2050 г. по отношению к уровню 2000 г. должна быть снижена на 50-85 %. Наряду с этим по оценкам международного энергетического агентства (IEA) применение мероприятий по очистке газов от CO<sub>2</sub> и его захоронению обеспечит к 2050 г. снижение эмиссии CO<sub>2</sub> на 26% [3].

Влияние различных газов на парниковый эффект существенно отличается. Эмиссия парниковых газов в первую очередь касается таких газов как : двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ) , метан ( $\text{CH}_4$ ) , закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) , фтор и хлоруглеводороды а также гексафторид серы ( $\text{SF}_6$ ) .

Всемирный институт ресурсов приводит данные по коэффициентам влияния на парниковый эффект . Они учитывают степень вредного влияния газов , как соотношение эквивалентной массы  $\text{CO}_2$  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)

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

- 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 .
- Целеобразно оценить влияние различных видов топлива на эмиссию двуокиси углерода. В таблице 2 приведены усредненные данные по величине эмиссии CO<sub>2</sub> при сжигании различных видов топлива табл.2 – удельная эмиссия CO<sub>2</sub> .

Табл.2

Удельная эмиссия CO<sub>2</sub> при сжигании 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 современных условиях существует три направления снижения выбросов углекислого газа при использовании угля в качестве топлива. Первое направление — предварительная газификация угля с удалением  $\text{CO}_2$  из продуктов газификации. Синтетический газ, получаемый в процессе газификации, состоит в основном из окиси углерода,  $\text{CO}$  и водорода. В процессе очистки синтетического газа в скрубберах из него удаляется  $\text{CO}_2$ , который затем за счет сжатия переводится в жидкое состояние и направляется на захоронение. Процесс основан на внутрицикловой газификации. Предполагается, что в ФРГ на крупномасштабной установке мощностью  $450 \text{ MWt}$  можно будут проверены технико-экономические показатели в начале 2014 г. Преимуществом технологии является малое снижение эффективности цикла генерации. Недостатком является сложность технологического процесса .
- Второе направление — сжигание твердого топлива в среде почти чистого кислорода. Дымовые газы в этом случае состоят в основном из  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ . 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  $\text{CO}_2$ . 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 (1374 дол) на расход дымовых газов 1 млн м<sup>3</sup>/час (примерно на один энергетический блок 300 MВт). 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).

- 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 электро-станций [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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, так и нарушение земной поверхности.
- В любом случае применение систем улавливания CO<sub>2</sub> 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 *MВт* 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, углекислота 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. 3 приведена диаграмма равновесий фаз угольной кислоты при разных температурах, которая подтверждает указанные показатели.

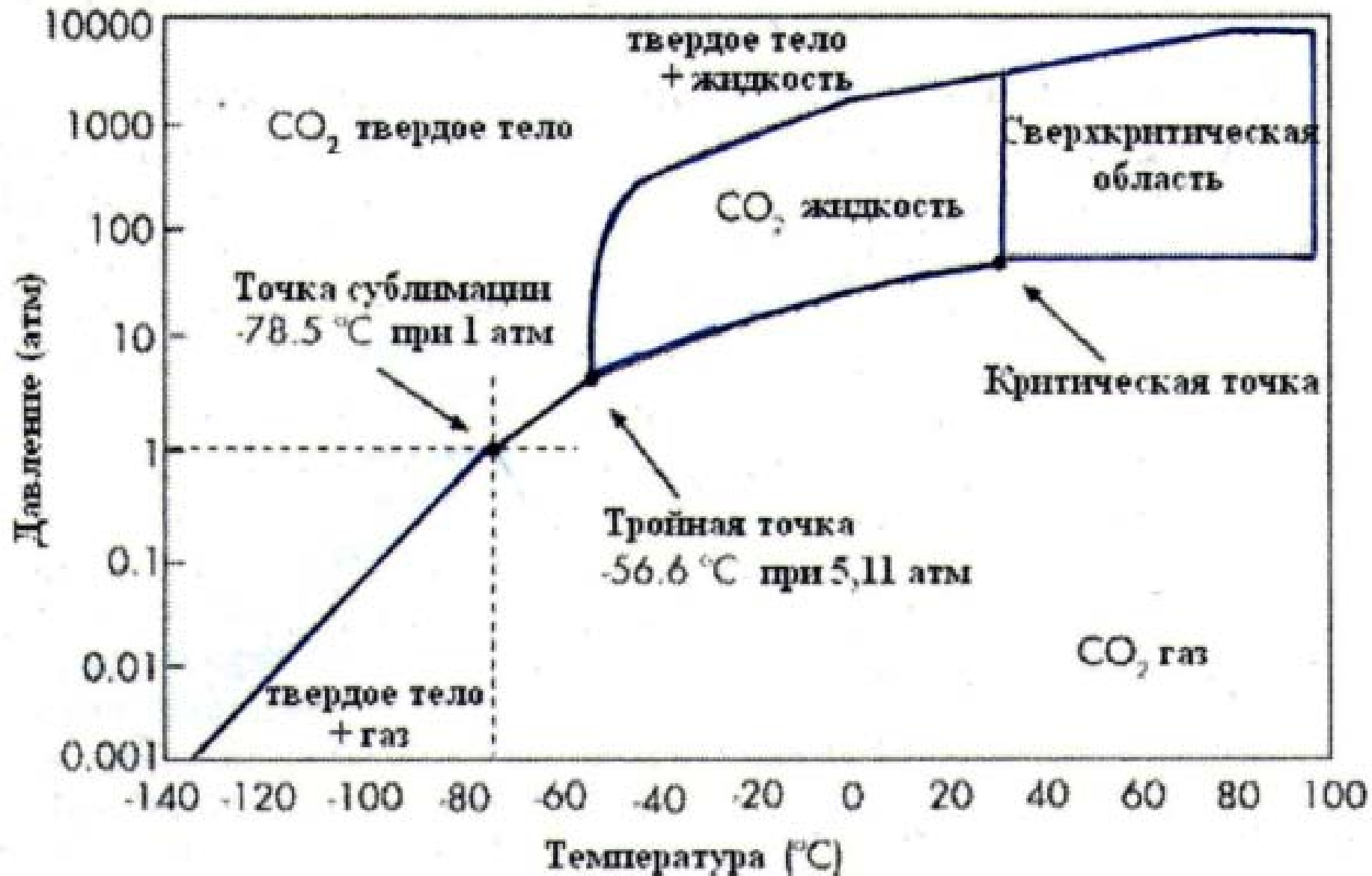


Рис 3. Фазовая диаграмма равновесий углекислоты в зависимости от температуры и давления

- При транспортировке углекислоты 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 расход меры могут измерять только однофазный поток.
- Наиболее предпочтительным для снижения эмиссии двуокси углерода является широкое использование биомассы для генерации электрической энергии, теплоты и приготовления биогаза, его использования в двигателях внутреннего сгорания и бытовых условиях. 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 1. При грамотном ведении лесного хозяйства древесина может обеспечить энергоснабжение некоторых регионов Украины.

**Таблица – Потенциал биомассы в Украине**

Вид биомассы / излишков биомассы	Валовой сбор, млн. т	Кoeffи- циент отходов	Кoeffи- циент доступ- ности	Общее коли- чество отходов, млн. т	$Q^p_n$ , МДж/кг	Количество биомассы, доступное для получения энергии		Энергетичес- кий 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
<b>Всего</b>				<b>44,46</b>			<b>18,98</b>	<b>6,25</b>

**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.**

**Во многих странах мира увеличилось количество заводов по производству таблетизированного топлива из отходов древесины. Даже Россия, которая является энергонезависимой страной, построила 9 заводов по производству таблетизированного топлива.**

**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.**

**В настоящее время в мировой практике произошла определённая трансформация позиций по использованию биоэнергонасителей. В начале энергонасители получали за счет использования отходов. В настоящее время в Европе фермеры активно начали выращивать энергетические культуры.**

**Одной из наиболее перспективных культур является мискантус – слоно́вая трава. Сравнение энергетических показателей этой культуры с другими, приведенные в таблице 2, 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. На рис. 5 показана плантация слоно́вой травы. Удельные затраты и выход энергии при выращивании энергетических культур показаны на рис. 7.**

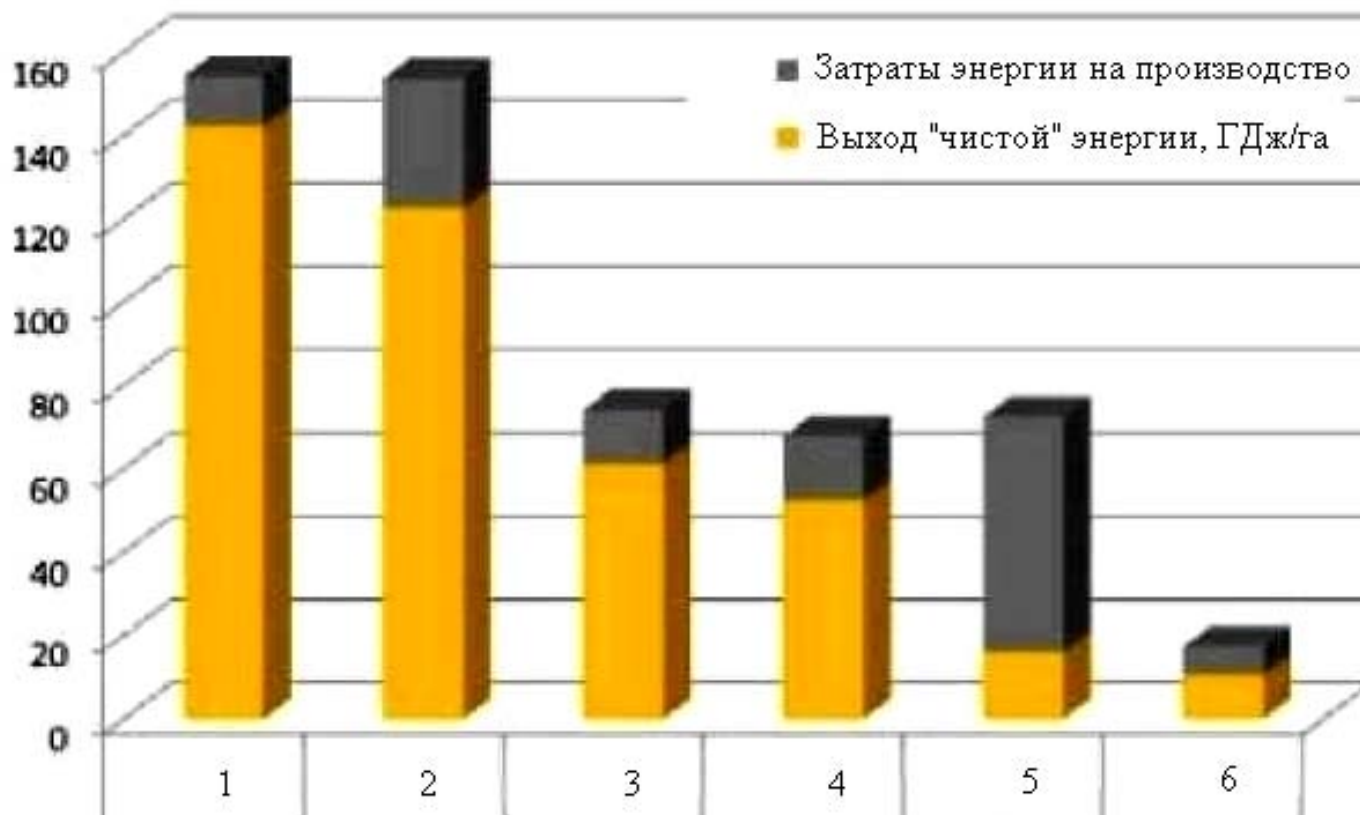
**Таблица – Сравнение энергетических показателей слоновой  
травы с другими культурами**

<b>Культура</b>	<b>Потребление энергии на производство, МДж/га</b>	<b>Выход энергии, МДж/га</b>	<b>Соотно- шение</b>
<b>Слоновая трава</b>	<b>9,224</b>	<b>300,0</b>	<b>32,5</b>
<b>Ива</b>	<b>6,003</b>	<b>180,0</b>	<b>30,0</b>
<b>Пшеница</b>	<b>21,46</b>	<b>189,34</b>	<b>8,8</b>
<b>Рапс</b>	<b>19,39</b>	<b>72,0</b>	<b>3,8</b>



# Плантация слоновой травы (мискантус)



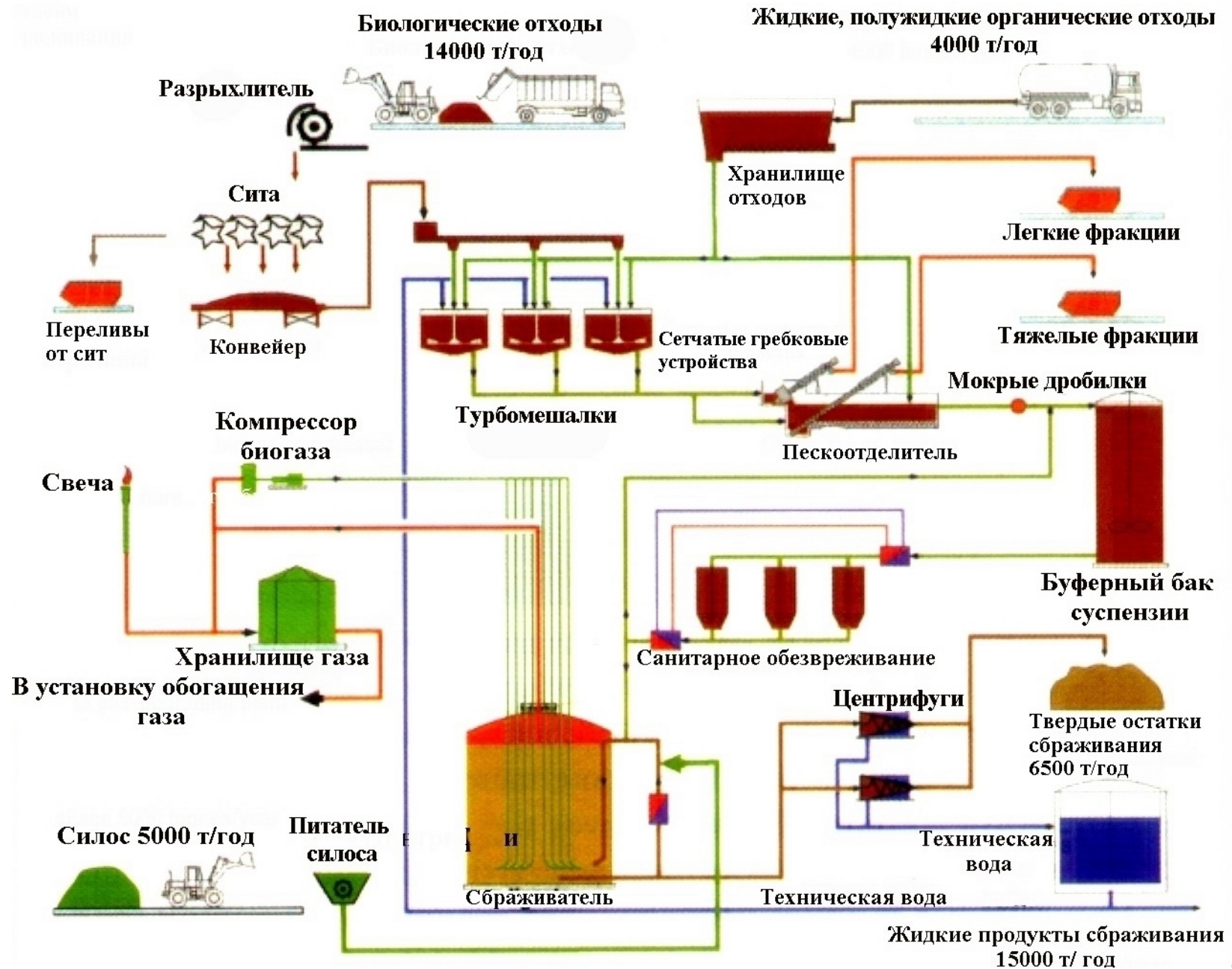


**Рис. 7 - Удельный выход энергии при выращивании энергетических культур.**

1 – сорго, пеллеты; 2 – кукурузный силос; 3, 4 – многолетние травы при конверсии, соответственно, в биогаз и жидкое топливо; 4 – этанол из целлюлозы; 5 – этанол из кукурузных зерен; 6 – биодизель из соевых бобов.

В Швеции организовано производство биогаза за счет сбраживания биологических жидких и полу жидких отходов и отходов сельскохозяйственных культур. Схема организации производства показана на рис. 8. Калорийность биогаза существенно зависит от содержания в нём метана (рис. 9).

Отмывка биогаза водой под давлением позволяет удалить из него основную массу загрязнителя – двуокиси углерода и существенно повысить калорийность газа.



**Рис. 8 – Схема производства биогаза**

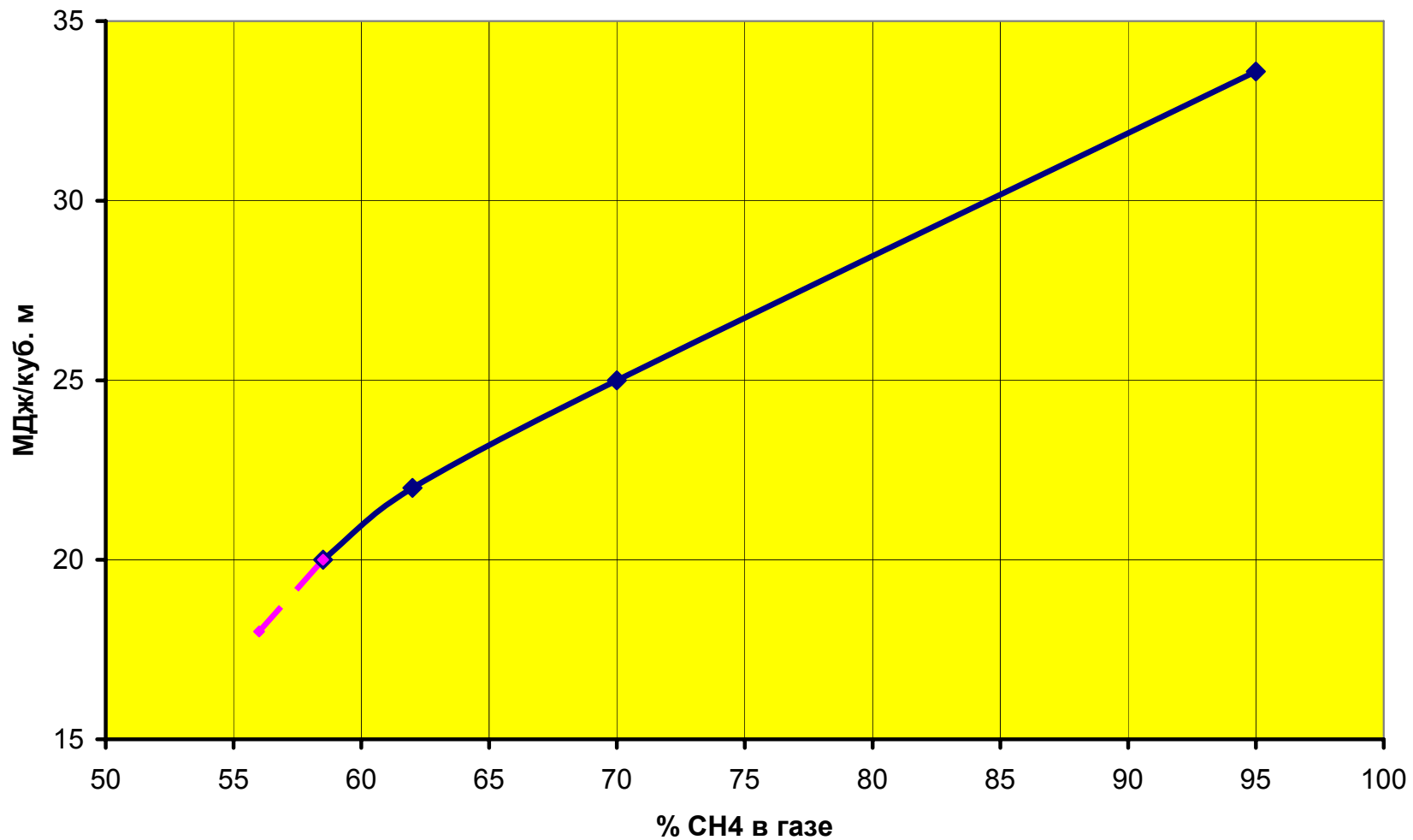


Рисунок 9 – Зависимость калорийности газа от содержания в нем метана.

Эффективными методами снижения потребления энергоресурсов являются применение когенерации, аккумулирования тепла и использование тепловых насосов.

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, этим 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 применение 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, снизить стоимость электрообогрева как производственных площадей, так и отдельных квартир, в которых устанавливаются теплонакопители.

Тепловой аккумулятор в сравнении с другими аккумуляторами обладает следующими преимуществами: простота устройства, относительно низкая себестоимость, эффективные массогабаритные характеристики, долговечность.

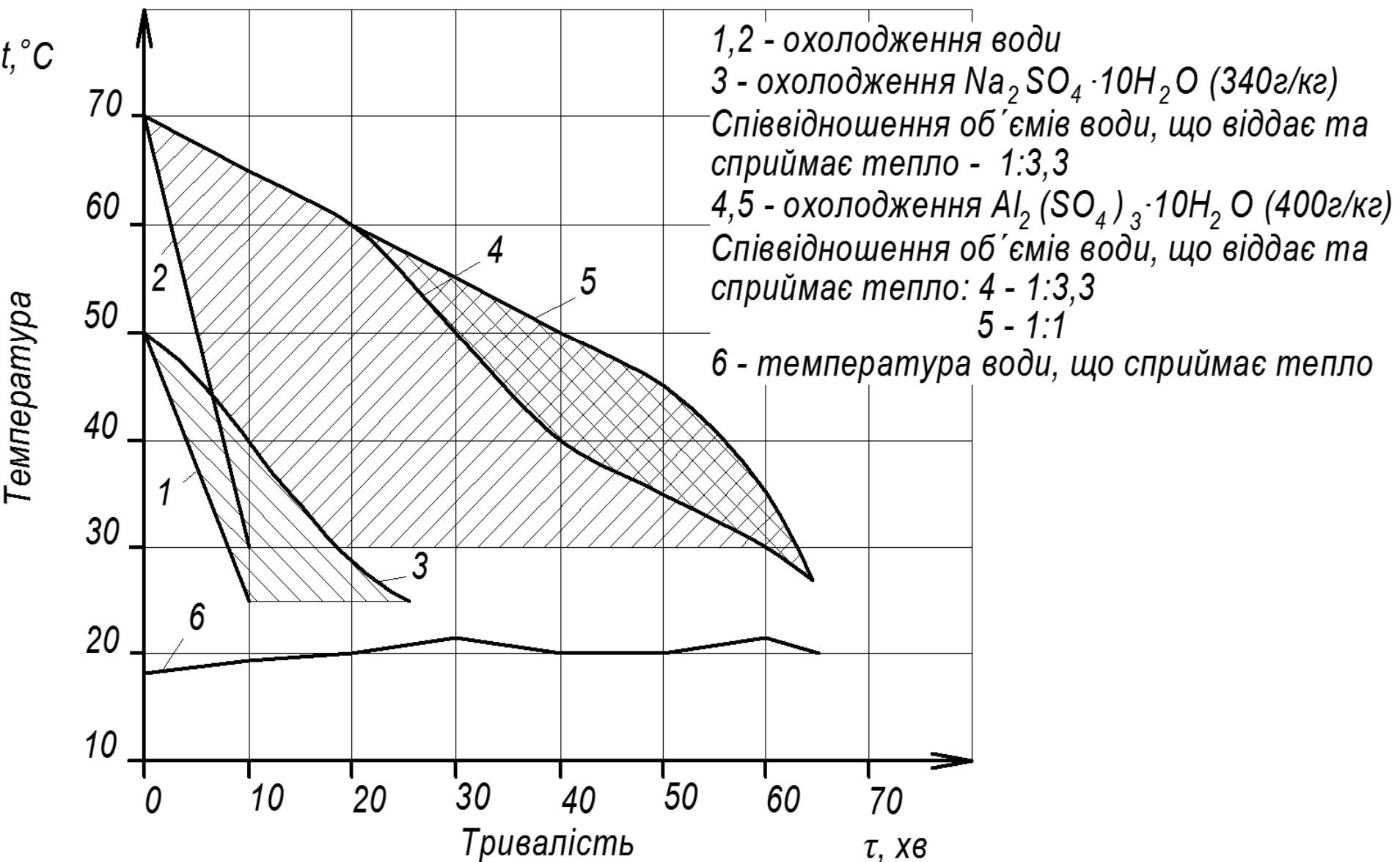


При наличии теплоаккумулятора вся тепловая энергия установки генерации электроэнергии используется для его зарядки. Избыток электроэнергии также направляется в теплоаккумулятор. Таким образом, КПД автономного источника становится соизмеримым с КПД котла (порядка 85 %), а стоимость электроэнергии, получаемой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

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

Наиболее приемлемыми аккумуляторами тепла с фазовым переходом являются сульфат натрия, нитрат лития и сульфат алюминия. Схема аккумуляирования тепла с использованием сульфата алюминия и сульфата натрия приведена на рисунке.

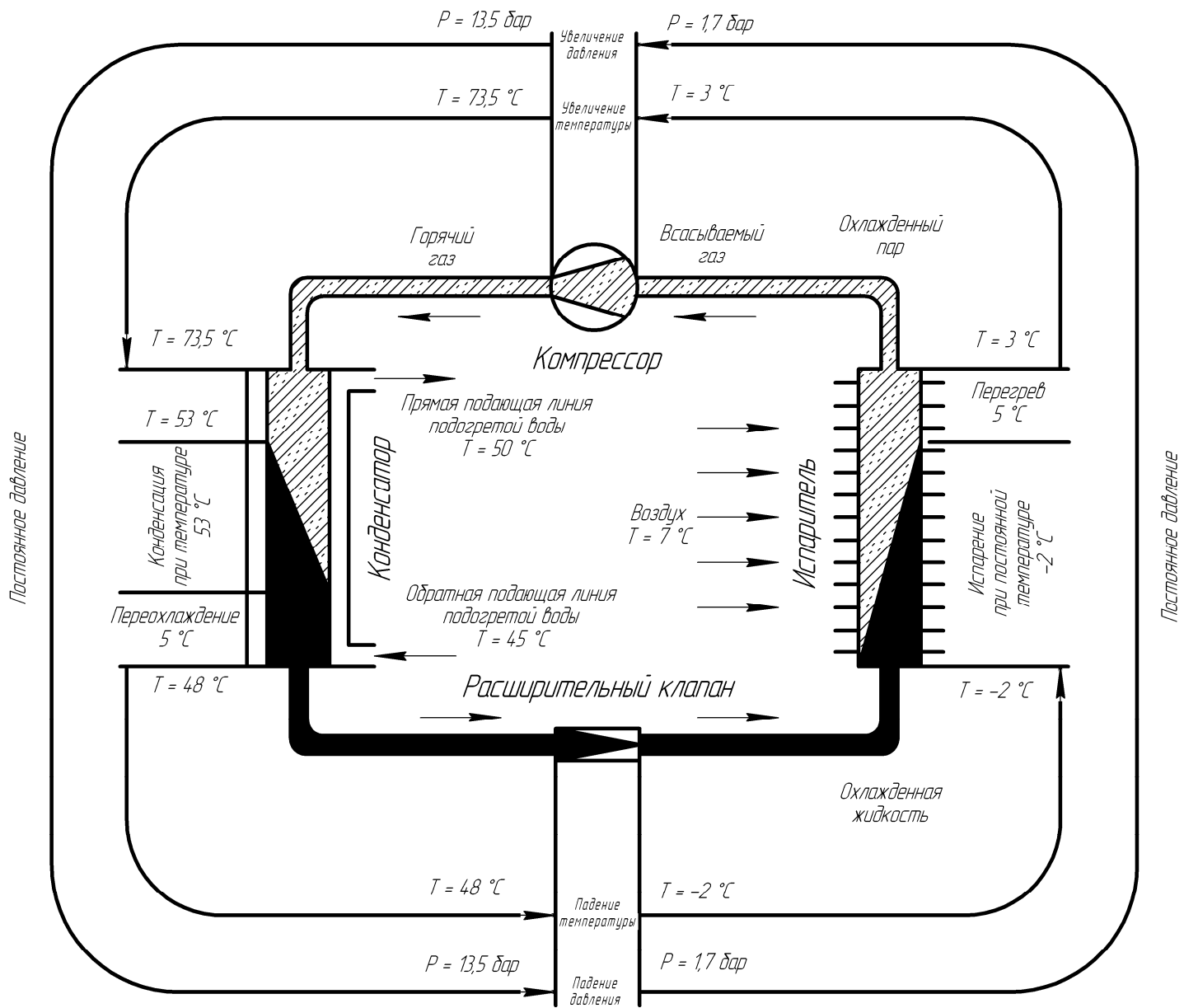
# Порівняльна характеристика аккумулявання тепла сульфатом алюмінія ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ) та сульфатом натрія ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )



При использовании тепловых насосов возможно применение трех сред из которых отбирается тепло: воздуха, воды и почвы.

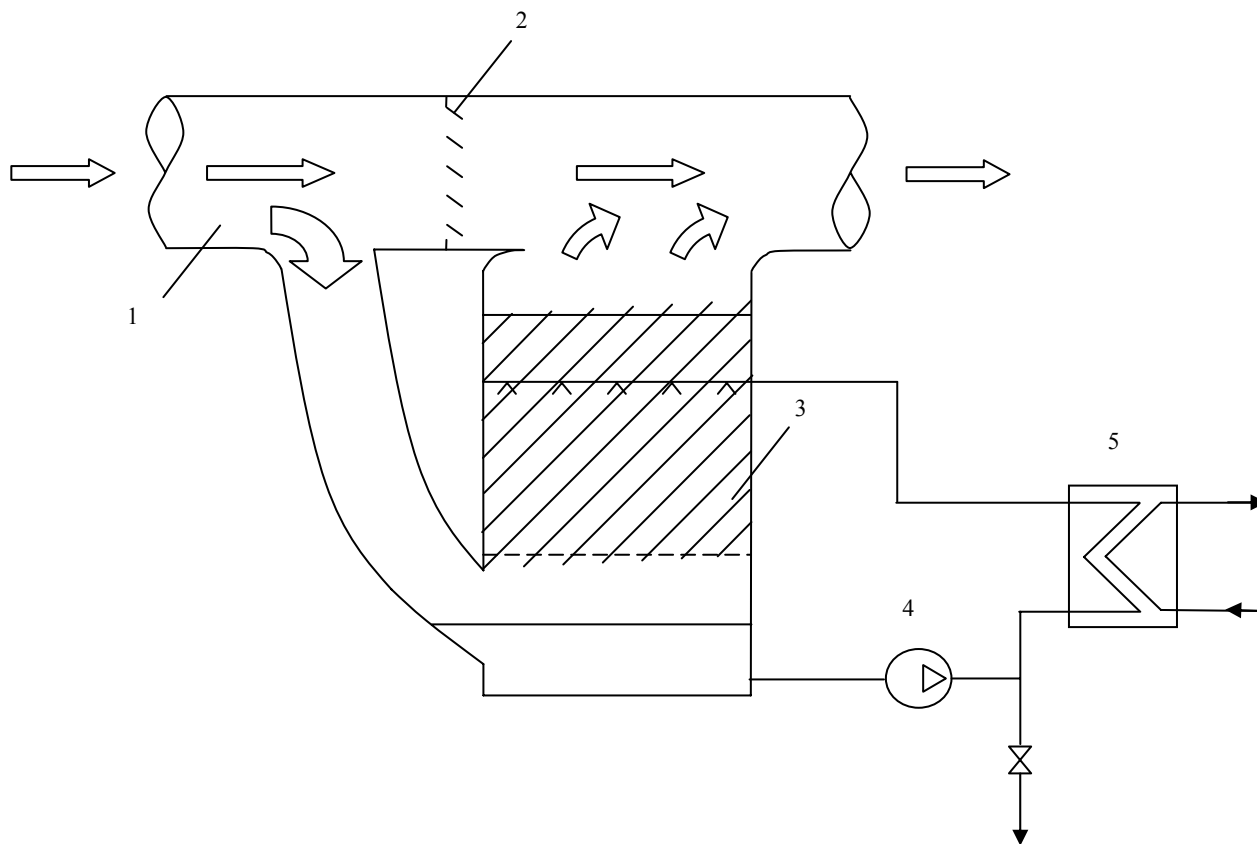
В умеренном климате тепловые насосы обеспечивают надежный отпуск тепла. Большая часть насосов работает при температуре нагретой воды до 55 °С, а в некоторых случаях даже 65 °С (рис. 12). Самым привлекательным источником тепла является вода, вследствие ее высокой теплоемкости, однако при отсутствии поблизости водных источников это трудно осуществимо. В странах ЕС широко используют в качестве источника тепла – почву.

Современные тепловые насосы имеют коэффициент превращения энергии от 2,5 до 4,5 что при КПД генерации электроэнергии на уровне 0,35 позволяет обеспечить общую эффективность генерации тепловой энергии, которая превышает эффективность генерации тепла в водогрейных котлах в 1,4-1,5 раза.



**Рис. 12 – Схема теплового насоса.**

**Эксплуатируемые водогрейные котлы на теплофикационных котельных могут быть оборудованы контактными экономайзерами, что обеспечит экономию природного газа 15-20 %.**



**Рис. 13 - Схема утилизации тепла дымовых газов при сжигании в котлах природного газа.**

1 – дымоход; 2 – шибер; 3 – контактный экономайзер; 4 – циркуляционный насос; 5 – поверхностный подогреватель.