

## ОПЫТ СОЗДАНИЯ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.

В.А. Кротевич, Д.В. Лозбин, Г.П. Никитченко, Г.А. Смоляр

***Аннотация:** Рассмотрено современное состояние проблемы обеспечения автономным электропитанием газораспределительных станций. Представлен анализ научно-технической информации о системах электропитания, применяемых в газовой отрасли. Обоснована перспективность применения для решения проблемы автономного электропитания оригинального электрогенератора, разработанного авторами, в котором скомбинированы термоэлектрический и вихревой трансформаторы энергии. Приведены результаты технологических и натурных испытаний указанного электрогенератора.*

### **Вступление**

Опыт создания и внедрения компьютеризованных комплексов коммерческого учета расхода газа и автоматик газораспределительных станций (ГРС) показал, что одним из основных условий их успешного применения является наличие автономной системы энергоснабжения с длительным сроком службы. Причем это требование одинаково жестко стоит как перед неэлектрофицированными объектами, так и перед объектами, которые подключены к электросети. Это обусловлено невозможностью удовлетворить высокие требования измерительных систем к качеству электроэнергии только за счет сетевого питания. Так называемые “плановые отключения”; слабость и ненадежность линий электропередачи, вызывающие понижение напряжения или даже отключения сети из-за перегрузок и атмосферных явлений; отсутствие маневренного оборудования на электростанциях, а, следовательно, трудность регулировки и поддержания напряжения и частоты электрического тока - негативные явления, характерные для Украинской электрической сети и сетей других стран СНГ [1]. Таким образом, и при наличии сетевого питания, ГРС, оборудованные автономными источниками питания, имеют преимущество в оперативности и надежности.

В плане решения проблем электрообеспечения автоматики ГРС и комплексов коммерческого учета газа (в частности - “ФЛОУТЕК” [2]) нами решалась задача разработки системы электропитания, удовлетворяющей следующему комплексу требований:

- электропитание должно быть автономным, простым в обслуживании и иметь ресурс более 5 лет непрерывной работы;
- источником энергии для электрогенератора должен быть поток природного газа;
- установка электрогенератора в газовую цепочку должна вносить минимальные изменения в ее технологические параметры;
- параметры вырабатываемой системой электроэнергии не должны зависеть от условий окружающей среды.

В газовой отрасли накоплен обширный опыт создания систем автономного электропитания, как с помощью традиционных источников электроэнергии, так и нетрадиционных - утилизирующих собственные энергетические ресурсы отрасли (перепады давлений, “бросовое” тепло), или использующих возобновляемые источники энергии - ветер, солнце (см. схему на рис.1)

Так, на газоперекачивающих станциях используются электростанции, утилизирующие тепло горячих выхлопных газов газотурбинных приводов.

В условиях отсутствия магистральной электросети для электрообеспечения промышленных объектов и жилых поселков используются газотурбинные передвижные электростанции.

Широкое применение нашли детандер-генераторные агрегаты (ДГА) [3,4].



Рисунок 1 Автономные источники электроснабжения, используемые в газовой промышленности.

Этот вариант использования перепада давления при дросселировании газа, наряду с очевидными преимуществами, имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих их применение на ГРС:

- вырабатываемая ДГА электроэнергия может быть использована для собственных нужд или передана внешнему потребителю только при стабилизации частоты, что трудно обеспечить на ГРС, где всегда имеют место суточные и сезонные колебания давления и расхода газа;
- Промышленные ДГА рассчитаны на значительный расход газа ( $\text{min} - 20000 \text{ м}^3/\text{час}$ )
- газ после детандера охлаждается на  $45-70^\circ\text{C}$ , в следствие чего возможно обмерзание грунта, прилегающего к трубе отвода газа и выпячивание труб из грунта с разрывами, а, следовательно, необходим подогрев газа от внешнего источника тепла до или после детандера;
- турбину и генератор необходимо герметизировать, чтобы не было утечек газа;
- сложное оборудование, требует постоянного высококвалифицированного обслуживания, что связано с большими эксплуатационными затратами.

Указанные факторы делают эффективным применение ДГА лишь при наличии специальных условий: стабильности потребления газа; наличия внешних источников тепла. Такие условия реализуются, например, на промыслах [4]. Температура газа, выходящего из скважины, достаточно высока, а переохлаждение газа в ДГА используется как одна из операций в технологической цепочке низкотемпературной сепарации. Также применение ДГА перспективно на тепловых электростанциях, где потребление газа достаточно стабильно и имеются источники “бросового” тепла для его подогрева. На электростанциях применение детандер-генераторных установок позволяет снизить на 1% удельный расход топлива [3].

Перспективными для газовой промышленности является также использование возобновляемых источников энергии.

К таким относятся, например, ветроэнергетические установки (ВЭУ).

Однако и при их применении стоят проблемы стабилизации частоты и сложности обслуживания.

Созданные в последнее время принципиально новые солнечные концентраторы для фотоэлектрических генераторов [6,7] позволили повысить их эффективность и значительно (в 5 раз и более) уменьшить расход полупроводниковых материалов а, следовательно, и удельную стоимость установленной мощности. Разрабатываемые концентраторы в отличие от традиционных активно используют рассеянный свет, не требуют сложных устройств охлаждения и дорогостоящих прецизионных механических систем слежения за Солнцем.

В газовой промышленности применяются также термоэлектрические генераторы (ТЭГ) [6,7,8,9]. ТЭГ осуществляют прямое преобразование тепловой энергии в электрическую при помощи термоэлементов, на спаях которых создается и поддерживается разность температур. Они предназначены для малой энергетики и используются для автономного электроснабжения различных объектов, где применение традиционных источников тока не представляется возможным.

Отличительными особенностями ТЭГ являются отсутствие движущихся частей, бесшумность, высокая надежность, простота эксплуатации, работа без обслуживания, длительный срок службы.

Единичная мощность современных ТЭГ, промышленно выпускаемых для газовой промышленности, колеблется от нескольких микроватт до 200Вт.

Однако пламенное или каталитическое горение, используемое обычно для получения высокопотенциального теплового потока, является весьма проблемным по целому ряду технических и экономических критериев. Также требует специального решения задача эффективного отвода тепла от радиаторов ТЭГ на температурном уровне, близком к температурному уровню окружающей среды.

Перспективно применение ТЭГ на объектах, где имеется “бросовое” тепло, например на неэлектрофицированных газовых скважинах [6]. Термоэлектрические модули генератора размещают на манифольдной линии скважины, и они преобразуют в электрическую энергию тепловой поток от газовой трубы к окружающей среде.

Электрическая мощность, потребляемая телеметрическими системами, невелика, а пиковые нагрузки непродолжительны (см. Табл. 1 и 2). Такая величина мощности может быть получена с помощью различных типов генераторов. Поэтому при выборе концепции системы автономного электропитания на первый план выходят требования автономности, стабильности и ресурса.

Табл. 1 Энергопотребление измерительного пункта на скважине за сутки при одном сеансе опроса скважины [8].

| Режим работы                          | Потребляемая мощность, Вт | Длительность работы, с | Потребляемая энергия, Вт×с/(А×ч) |
|---------------------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Дежурный:                             |                           |                        |                                  |
| минимальное энергопотребление (sleep) | 0,006                     | 83613                  | 501,7/0,023                      |
| прием                                 | 0,21                      | 2787                   | 585,3/0,021                      |
| Измерение                             | 4,5                       | 15                     | 67,5/0,003                       |
| Передача                              | 18                        | 3                      | 54/0,0025                        |

Таблица 2. Режимы электропитания и потребляемая комплексом “ФЛОУТЭК” электрическая мощность [4].

| Режим питания  | Потребляемая электрическая мощность при:        |   |   |
|--|---|---|---|
|  | обслуживании одного измерительного трубопровода | обслуживании трех измерительных трубопроводов | Пиковый режим: обслуживание трех измерительных трубопроводов и подзарядка аккумуляторов |
| Основной:<br>сеть переменного тока напряжением 187÷242В и частотой (50±1)Гц            | 3,10ВА  | 3,90ВА  | 10ВА  |
| Аварийный:<br>от резервного источника постоянного тока (аккумулятора) напряжением 12В. | 0,85ВА  | 1,70ВА  | -   |

Как показывает опыт создания автономных источников электропитания [5,6,7], наиболее рациональное решение этой задачи - комбинация нескольких источников тока на основе аккумуляторной батареи.

Аккумуляторная батарея в комбинации источников тока может быть как вспомогательным (аварийным) источником, так и основным.

В первом случае аккумулятор используется при падении напряжения в сети 220В или при полном ее отключении для поддержания работоспособности измерительной системы в течение периода времени, достаточного для восстановления основной сети (например, в штатной системе питания измерительного комплекса “ФЛОУТЭК” - 100 часов).

Во втором случае питание оборудования осуществляется от аккумуляторной батареи, а маломощный и, возможно, даже, не стабильный (ввиду изменяющихся условий работы) источник электроэнергии обеспечивает его непрерывную подзарядку малыми токами (до 100мА). Последнее принципиально, так как при таком режиме подзарядки практически не происходит разрушения аккумуляторной батареи.

По такой схеме предлагается использовать маломощные ВЭУ [5], солнечные электрогенераторы [6] и т.п.

В [6] описан успешный опыт применения на неэлектрофицированной газовой скважине в районе крайнего севера (Ямбург) комбинированной системы автономного электропитания телеметрического комплекса. В ее состав входят аккумуляторная батарея, солнечная батарея и термоэлектрический генератор, использующий “бросовую” теплоту газового потока из скважины (температура газа на скважинах Ямбура колеблется от 18 до 45 °С).

Наивысшая эффективность работы солнечной батареи (расчетная мощность при радиации 1000Вт/м<sup>2</sup> - 1,5 Вт) приходится на летний период, а термоэлектрического генератора (расчетная мощность при перепаде температур 40°С - 0,6Вт) - на зимний период. Неблагоприятными являются периоды до одного месяца весной и осенью, когда невелика солнечная активность и недостаточен перепад температур между газом и окружающей средой.

Описанная комбинированная система электропитания успешно прошла стендовые и промышленные испытания и активно вводится в эксплуатацию.

Однако даже такая система не является панацеей, так как, например, для условий Украины отсутствие полярного дня уменьшает эффективность солнечных батарей, а термоэлектрический генератор на бросовом тепле будет эффективно работать едва ли 2-3 месяца в году. Для обеспечения электропитанием измерительных комплексов на ГРС такая система также не применима.

Поставленная задача для ряда случаев может быть решена применением термоэлектрических генераторов, в котором источником тепла и, одновременно, холодильником служит вихревая труба (ВТ) [10].

Вихревые трубы [11] - простые, надежные, не имеющие вращающихся частей устройства, позволяют разделить расширяющийся поток газа на два: “горячий” и “холодный”; и использовать их для создания разницы температур в ТЭГ или для других целей. В газовой промышленности ВТ применяются для подогрева газа в трубопроводах на ГРС [12]; непосредственно для редуцирования давления газа [13] и т.п.

Принцип работы ВТ состоит в следующем. Если в трубу через тангенциальное сопло ввести поток газа высокого давления, то, при выполнении определенных геометрических соотношений, в ней возникнет сложный вихревой турбулентный поток, в котором, вследствие интенсивного энергообмена между осевым и периферийным вихрями (из-за наличия радиального градиента давлений), создается перепад температур по радиусу. Причем, тепло от более холодного (осевого) вихря передается к более горячему (периферийному).

При отборе части нагретого газа (в т.н. “делящей вихревой трубе” - ДВТ), или при охлаждении внешней поверхности трубы (в т.н. “охлаждаемой вихревой трубе” - ОВТ), температура выходящего из ВТ потока газа ниже температуры вводимого газа.

Создаваемые вихревой трубой тепловые потоки предлагается использовать для генерации электроэнергии в термоэлектрическом генераторе. Причем, реализуемые (в ожидаемых условиях эксплуатации ВТ на ГРС) значения температур холодного ( $T_x = -20...+5^\circ\text{C}$ ) и горячего ( $T_r = +40...+80^\circ\text{C}$ ) потоков, позволяют применить термоэлектрические модули на основе наиболее эффективных с точки зрения термоэлектричества материалов (твердые растворы  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ ) [11]. Термоэлектрические модули из таких материалов освоены промышленностью и относительно дешевы.

Сравнительно невысокий уровень термодинамического совершенства системы “ТЭГ-ВТ” ( $\approx 1\div 2\%$ ) компенсируется существенными технико-эксплуатационными и экономическими преимуществами:

- отсутствием затрат на топливо (используется энергия потока газа, проходящего через ГРС);
- простотой конструкции и надежностью эксплуатации (в конструкции нет движущихся частей),
- практически неограниченным ресурсом и качеством электроэнергии.

На рис.2. представлен вариант компоновки ТЭГ-ВТ в составе ГРС и его внешний вид (без защитного кожуха).

ТЭГ-ВТ устанавливается в байпасную линию газового тракта ГРС и осуществляет редуцирование части потока газа. Создаваемые при этом горячий и холодный потоки газа направляются в теплообменники системы термоэлектрических модулей для создания на спаях последних разницы температур. После теплообменников потоки газа объединяются и возвращаются (100%) в магистраль низкого давления ГРС. Тепловой поток, используемый в ТЭГ, передается от горячего потока газа к холодному. Поэтому температурный эффект при прохождении газа через ТЭГ-ВТ соответствует величине дроссель-эффекта на используемом перепаде давлений. Дополнительных оборудования и затрат газа на подогрев не требуются.

Для построения генератора может быть использована как ДВТ (рис.2.), так и ОВТ. Во втором случае “Источником” тепла служит внешняя поверхность камеры энергетического

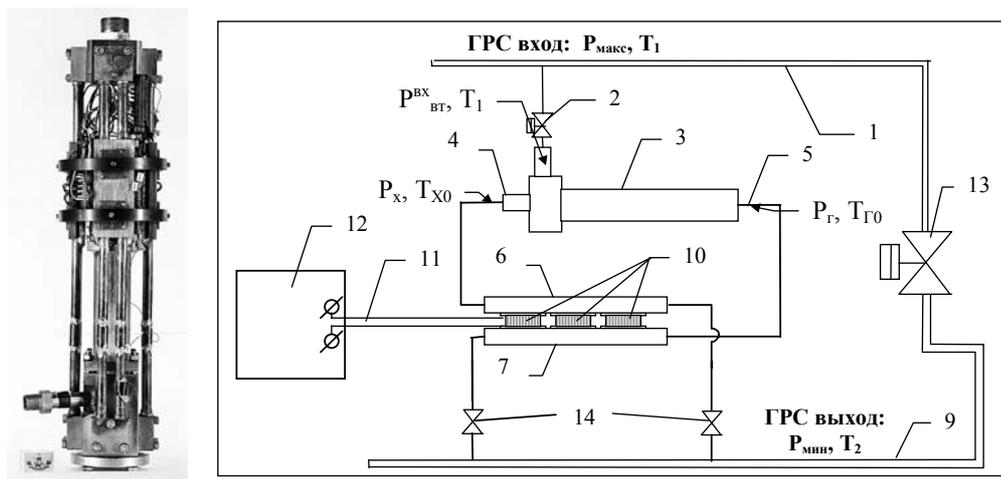


Рис.2. Внешний вид (без защитного кожуха) и компоновка электрогенератора ТЭГ-ВТ в составе ГРС.

1 - магистраль газа высокого давления; 2 - регулирующий клапан; 3 - вихревая труба (ВТ) делящая противоточная; 4 - коллектор холодного потока ВТ; 5 - коллектор горячего потока ВТ; 6 - "холодный" теплообменник; 7 - "горячий" теплообменник; 9 - магистраль низкого давления; 10 - термоэлектрические модули; 11 - соединительный кабель; 12 - потребитель электроэнергии; 13 - штатный регулирующий клапан; 14 - задвижка.

разделения ОВТ, а источником "холода" может служить входящий поток газа высокого давления, выходящий из ОВТ охлажденный поток или внешний источник холода (водяное или воздушное охлаждение).

Выходные параметры ТЭГ-ВТ (электрическая мощность, напряжение и сила тока) определяются типом, количеством и схемой коммутации использованных термоэлектрических модулей, тепловыми потоками на "горячей" ( $Q_G$ ) и "холодной" ( $Q_X$ ) поверхностях и соответствующими им температурами  $T_G$  и  $T_X$ .

Указанные  $Q_G$  и  $Q_X$  (и, соответственно,  $T_G$  и  $T_X$ ) для заданной температуры окружающей среды  $T_{oc}$  определяются калибром ВТ, располагаемыми уровнями давлений и температуры газа в магистралях, номинальным расходом газа через ГРС.

На рис.3. приведена оценка энергетических возможностей ТЭГ-ВТ для вихревых труб калибра  $10 \div 40$  мм и систем  $8 \div 90$  модулей, произведенная по авторской методике [12].

Как видно из рис. 3, для каждой конкретной задачи, с учетом располагаемых параметров потока газа на ГРС, можно подобрать оптимальные калибр ВТ и параметры системы термоэлектрических модулей, обеспечивающие требуемую электрическую мощность генератора.

Соотношение давлений газа на входе и выходе ГРС может быть более 8...9. В этом случае целесообразно применение каскада вихревых труб, что позволит увеличить тепловые потоки и разницу температур на спаях ТЭГ при одновременном уменьшении расхода газа.

Для электропитания комплекса учета газа "ФЛОУТЕК" был разработан и изготовлен опытный образец ТЭГ-ВТ (шифр ТЭГ-14/06, расчетное напряжения питания потребителя - не менее 14В по цепи постоянного тока - не менее 0,6А, рис.4). В основе его конструкции - ОВТ калибра 32мм и система из 16 серийных термоэлектрических модулей МТ2-127-1,6.

Были проведены технологические (на сжатом воздухе) и натурные (на природном газе в составе штатного оборудования ГРС) испытания генератора. Определялись выходные электрические характеристики для различных параметров рабочего газа и величин внешней нагрузки.

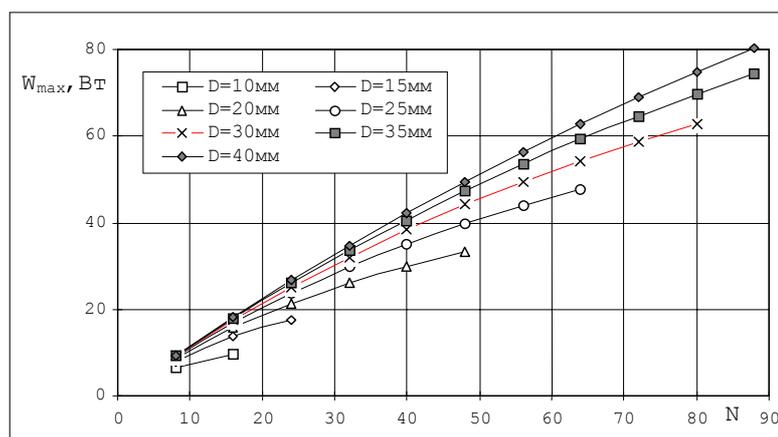


Рис.3 Расчетная зависимость мощности генератора ТЭГ-ВТ от количества термоэлектрических модулей (МТ-127-1,6 производство НПФ “Модуль”, г. Киев) для ВТ калибра 10...40мм. Параметры газа на входе в ВТ; давление - 18ата, температура - 20 °С; на выходе: давление - 3 ата.

Вольтамперные характеристики генератора имеют линейный характер (рис. 4).

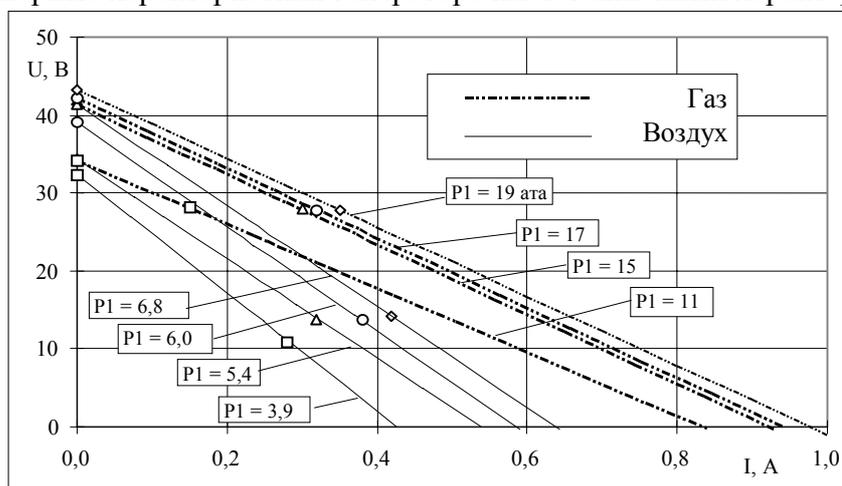


Рис.4 Экспериментальные вольтамперные характеристики ТЭГ14/06, полученные при работе на сжатом воздухе и природном газе при различном давлении на входе в генератор. Давление на выходе из генератора  $P_0$ : для испытаний на сжатом воздухе - 1ата, для испытаний на природном газе - 3,2 ата.

Как видно из рис. 4 при  $P_1 \geq 6,5$ ата (соответствующий расход газа  $G \geq 700 \text{ нм}^3/\text{час}$ ) генератор обеспечивает рабочий режим энергопотребления комплекса «ФЛОУТЭК»  $14\text{В} \times 0,2\text{А}$ , а при  $P_1 \geq 15$ ата ( $G \geq 1200 \text{ нм}^3/\text{час}$ ) генератор обеспечивает также возможность подзарядки аккумуляторов.

Такие параметры газового потока реализуются на большей части ГРС, а, следовательно, ТЭГ-14/06 может служить основой для обеспечения их автономным электропитанием.

## ВЫВОДЫ.

1. Применительно к проблеме электрообеспечения технологических устройств газовой отрасли разработана концепция автономной системы электропитания комплекса ФЛОУТЕК на основе оригинального термоэлектрического генератора. Источником “тепла” и “холода” в предложенном генераторе является вихревая труба, преобразующая энергию

сжатого природного газа в тепловую при его редуцировании, например, на газораспределительных станциях.

Предложенный генератор перспективен ввиду:

- экономичности (не требует сжигания газа, прост в обслуживании);
- надежности (не имеет движущихся частей);
- большого ресурса (определяется ресурсом термоэлектрических модулей - не менее 5 лет непрерывной работы);
- электровзрывобезопасности;
- возможности оптимизации конструкции под конкретного потребителя электроэнергии.

2. Разработан, изготовлен и испытан в натуральных условиях термоэлектрический генератор ТЭГ14/06 (номинальная мощность 10Вт по цепи 14В постоянного тока) для электропитания комплекса учета газа типа “ФЛОУТЕК” и автоматики ГРС выпускаемой фирмой «УКРГАЗТЕХ». Генератор создан на основе охлаждаемой вихревой трубы калибра 32 мм и системы 16 термоэлектрических модулей типа МТ2-127-1,6.

Результаты экспериментальных исследований показали:

2.1 Электрогенератор ТЭГ14/06 - работоспособен в условиях ГРС при круглогодичной непрерывной эксплуатации;

2.2 Рабочие характеристики ТЭГ14/06 ( $U \geq 14В$ ,  $I \geq 0,6А$ ) удовлетворяют техническим требованиям к электропитанию комплекса “Флоутек” при параметрах рабочего газа - давление на входе  $P_1 \geq 14$ ата и давлении на выходе  $P_0 = 3$ ата;

Литература:

1. Белоусенко И.В. Основные направления концепции развития энергетики ОАО “Газпром” на основе применения собственных электростанций и энергоустановок. // Изв. РАН Энергетика.-2001.- № 5. - с.с.54-63
2. Комплекс измерительный “ФЛОУТЕК”. // Бюллетень ДП “Украинские газовые технологии”, г. Киев. 2001г
3. Степанец А.А. Об эффективности детандер-генераторных агрегатов в тепловой схеме ТЭЦ” Энергетик, №4, 1999, с.2-4.
4. Зарницкий Г.Э. Теоретические основы использования энергии давления природного газа. М.: “Недра”. - 1968г.- 297с.
5. Абдрахманов Р.С., Назмеев Ю.Г., Якимов А.В. Об эффективности использования ветроэнергетики в регионах с умеренными скоростями ветра // Изв. РАН. - Энергетика. – 2001. - № 5.- С.93-102.
6. Ананенков А.Г., Булучевский А.Н., Каратаев Ю.П., Кудояр Ю.А., Ремизов В.В., Салихов З.С., Семенов В.Ф., Якупов З.Г. Автономная система энергоснабжения на газовой скважине // Газовая промышленность. - 2001. - № 7. - С.56-58.
7. Алешин В.Н., Ананенков А.Г., Петров В.А., Салихов З.С. Нетрадиционная энергетика в газовой промышленности // Газовая промышленность. 2001. - № 8. - С.46-49
8. Малета Е., Ярыгин В., Седых А. и др. Термоэлектрические установки для газовой промышленности./ Наука и техника в газовой промышленности. - М.: ООО”ИРЦ Газпром”, 1998, с. 21-36.
9. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. - Киев: Наук.думка,1979. - 768с.
10. Лозбін В.І., Лозбін Д.В., Смоляр Г.А., Кротеви́ч В.А. Термоелектричний генератор для живлення приладів контролю газорозподільних станцій. Проблеми економії енергії: сб. матеріалів III міжнародної науково-практичної конференції. Львів, вид. НУ ЛП. 2001.- С.194.
11. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. – Москва: Машиностроение, 1969г.

12. Ильский О.Г., Юдин А.С. Применение вихревых трубок на объектах магистральных газопроводов // Газовая промышленность. - 1968. - №5. - С. 16-19.
13. Белостоцкий Ю.Г., Никулихин В.Г., Кошелев А.М. Способ подогрева расширяющегося потока газа и устройство для его реализации. Патент РФ 2143650 выдан 23.12.98, опубликован в БИ №36 27.12.99.