

УДК 621.43.068

*В.Н.БГАНЦЕВ*, к.т.н., ИПМаш НАН України**СНИЖЕНИЕ РАСХОДА КИСЛОРОДА ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА РАБОТЫ ДИЗЕЛЯ С МЕХАНИЧЕСКИМ УДАЛЕНИЕМ ИЗБЫТОЧНЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА**

У статті розглянуто проблему надлишкових витрат кисню при здійсненні замкнутого циклу дизельної енергоустановки універсального призначення для випадку механічного видалення продуктів згорання. Пропонується спосіб повернення кисню, що знаходиться у продуктах згорання, у циркулюючу газову суміш за рахунок використання газорозподільних мембран. Для цієї мети перевага віддається мембранам у вигляді молекулярних сит, для яких характерно незрівнянно нижчий гідравлічний опір у зрівнянні із мембранами, виготовленими на основі полімерних плівок.

**Введение.** Вероятно, что в ближайшем будущем интерес к энергоустановкам с замкнутым циклом (ЗЦ) работы будет расти. Они могут выступить в качестве эффективных источников энергии в виде газогенерирующих энергоустановок при нефтедобыче, энергообеспечении при выполнении подводных работ, в безвыбросных автотранспортных энергоустановках, а также как источники энергии для различных подземных сооружений. Уже сейчас достаточно интенсивно развивается строительство подземных бункеров для комфортного существования людей в условиях глобального потепления и высоких температур окружающей среды. И здесь в качестве основных или аварийных источников энергии могут быть рассматриваемые энергоустановки.

В качестве двигателя внутреннего сгорания в энергоустановках с ЗЦ работы в основном используются дизельные двигатели. При осуществлении ЗЦ дизельной энергоустановки (ДЭУ) отработавшие газы (ОГ) дизеля охлаждают, путем конденсации удаляют из них водяной пар, механическим или химическим путем освобождают от избыточного диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), подмешивают к ним кислород, подогревают полученную искусственную газовую смесь (ИГС) и направляют на впуск дизеля.

Кислород, расходуемый в процессе сгорания топлива, постоянно поступает в циркулирующее рабочее тело из специально создаваемых запасов, организованных в виде разнообразных систем хранения. В зависимости от способа организации ЗЦ дизеля освобождение контура циркуляции от избыточных продуктов, образующихся при сгорании топлива, может осуществляться различными способами. В простой и наиболее распространенной схеме водяной пар конденсируют и накапливают в цистернах, а избыточный диоксид углерода с помощью эвакокомпрессора направляют за пределы установки. Это может быть закачка в нефтяную скважину или выброс за борт подводного аппарата или же ожигание и последующее накопление в соответствующих цистернах.

В ОГ дизеля всегда присутствует кислород, так как этот тип ДВС работает с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha > 1$ . В связи с этим в эвакуируемом избыточном диоксиде углерода присутствует и кислород и из-за этого на соответствующую величину приходится увеличивать расход кислорода на подпитку. Неэкономное расходование кислорода при этом снижает эффективность ДЭУ ЗЦ. В связи с этим поиск путей минимизации расхода окислителя в ЗЦ представляет собой актуальную задачу.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В ДЭУ ЗЦ с химическим поглощением избыточного  $\text{CO}_2$  с данной проблемой не сталкиваются, так как кислород из контура циркуляции не выводится и не связывается с веществом-поглотителем. Для нормальной работы дизеля, в циркулирующую ИГС достаточно добавить кислород, стехиометрическое количество которого оценивается как  $3,324 G_T$ , где  $G_T$  – расход топлива дизелем. Соответствующее соотношение в зависимости от режима работы дизеля поддерживается автоматической системой регулирования.

Существуют, но пока на уровне патентов схемы ДЭУ ЗЦ, в которых избыточные продукты сгорания удаляются в твердом виде [1], благодаря отбору тепла от них за счет использования кислорода, хранящегося в криогенном виде и при наличии таких устройств как криогенный насос, морозильник, льдогенератор, обеспечивающие замораживание избыточных продуктов сгорания.

В патенте [2] предлагается при переходе на работу по ЗЦ в качестве топлива использовать генерируемый при взаимодействии с водяным паром водород. Установка однако не лишена химического поглотителя  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , образующихся при выгорании углеводородных смазок. Кислород, хранящийся в специальной емкости, при осуществлении ЗЦ работы не теряется.

Разработанные японскими специалистами в конце 70<sup>-х</sup> годов предыдущего столетия автономные подводные энергоустановки HIRUP-30 и HIRUP-30E работали с выбросом избыточных продуктов посредством специального эвакокомпрессора [3] через клапан, отрегулированный на давление, соответствующее глубине погружения.

Отрицательная сторона таких схем – неизбежные потери кислорода и невозможность использования других газов в качестве инертной части рабочего тела. Удельный эффективный расход кислорода составил  $2,011 \text{ кг/кВт}\cdot\text{ч}$ .

В связи с повышенным расходом кислорода приходилось обеспечивать большой запас его для непрерывной работы установки. Ликвидировать излишние расходы кислорода удалось в последних разработках безвыбросных энергоустановок, где в качестве источника энергии используется двигатель Стирлинга.

Обусловлено это тем, что источник тепла для работы такого двигателя получают при сжигании стехиометрических смесей различных топлив и окислителя и не имеющих его избыточного количества в продуктах сгорания.

**Цель и постановка задачи.** Цель работы – снижение расхода кислорода в ДЭУ ЗЦ при механическом удалении избыточных продуктов из циркулирующей газовой смеси.

Основные задачи включали:

- анализ возможности отделения кислорода из выбрасываемой смеси с помощью молекулярной мембраны;
- разработка способа использования молекулярных мембран для предлагаемых целей в схемах ДЭУ ЗЦ.

**Основные этапы и результаты исследования.** Механическое удаление избыточных продуктов при осуществлении ЗЦ работы ДЭУ является наиболее простым способом, так как для этого необходимо наличие в схеме установки соответствующего регулятора давления и эвакокомпрессора. Однако потери кислорода с удаляемыми продуктами снижают эффективность этого способа. Относительное количество теряемого кислорода (по отношению к общей подпитке) можно выразить зависимостью:

$$C_{O_2} = \frac{3.19G_T \cdot g_{O_2}}{3.324G_T + 3.19G_T \cdot g_{O_2}} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $G_T$  – расход топлива дизелем, кг/ч;

$g_{O_2}$  – массовая доля кислорода в ОГ.

Числитель зависимости (1) характеризует массовый расход кислорода в ОГ, а знаменатель – общее количество кислорода, идущего на подпитку.

После простых преобразований зависимость (1) приобретает вид:

$$C_{O_2} = \frac{1}{(1.042/g_{O_2}) + 1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Рассчитанные по зависимости (2) значения  $C_{O_2}$  для двигателя мощностью 100кВт приведены в таблице 1:

Таблица 1- Относительные потери кислорода в процессе подпитки

Относительная мощность дизеля, %	Массовая доля кислорода в ОГ	Относительные потери кислорода при подпитке, %
100	0,144	12,1
70	0,165	13,7
30	0,185	15,1
холостой ход	0,202	16,2

Как видно из таблицы 1 относительные потери кислорода при подпитке ДЭУ ЗЦ возрастают с уменьшением мощности дизеля. В этом плане более выгодным является режимы работы дизеля с нагрузкой более 50%.

Уменьшить потери кислорода при механическом удалении избыточных продуктов из ДЭУ ЗЦ можно путем внесения некоторых изменений в технологическую схему и применяя при этом газовые разделительные мембраны. Принцип их действия основан на различной проницаемости компонентов газовой смеси через активную поверхность. При этом различают компрессионный (сжатие над мембраной) и вакуумный (разряжение над мембраной) способы [4].

В последнее время с появлением технологий "сжигание топлива с нулевым выбросом", где наиболее перспективным считается сжигание в атмосфере кислорода, стало активно развиваться направление создания мембран в виде молекулярного сита с калиброванными отверстиями, на которых и происходит селекция.

Такие молекулярные сита обладают несравнимо меньшим гидравлическим сопротивлением, чем пленочные мембраны [5]. При соответствующей организации технологической схемы ДЭУ ЗЦ подобные газоразделительные устройства могут быть использованы для снижения или исключения потерь кислорода при механическом удалении избыточных продуктов сгорания. Схема ДЭУ ЗЦ с газоразделительной мембраной приведена на рис. 1.

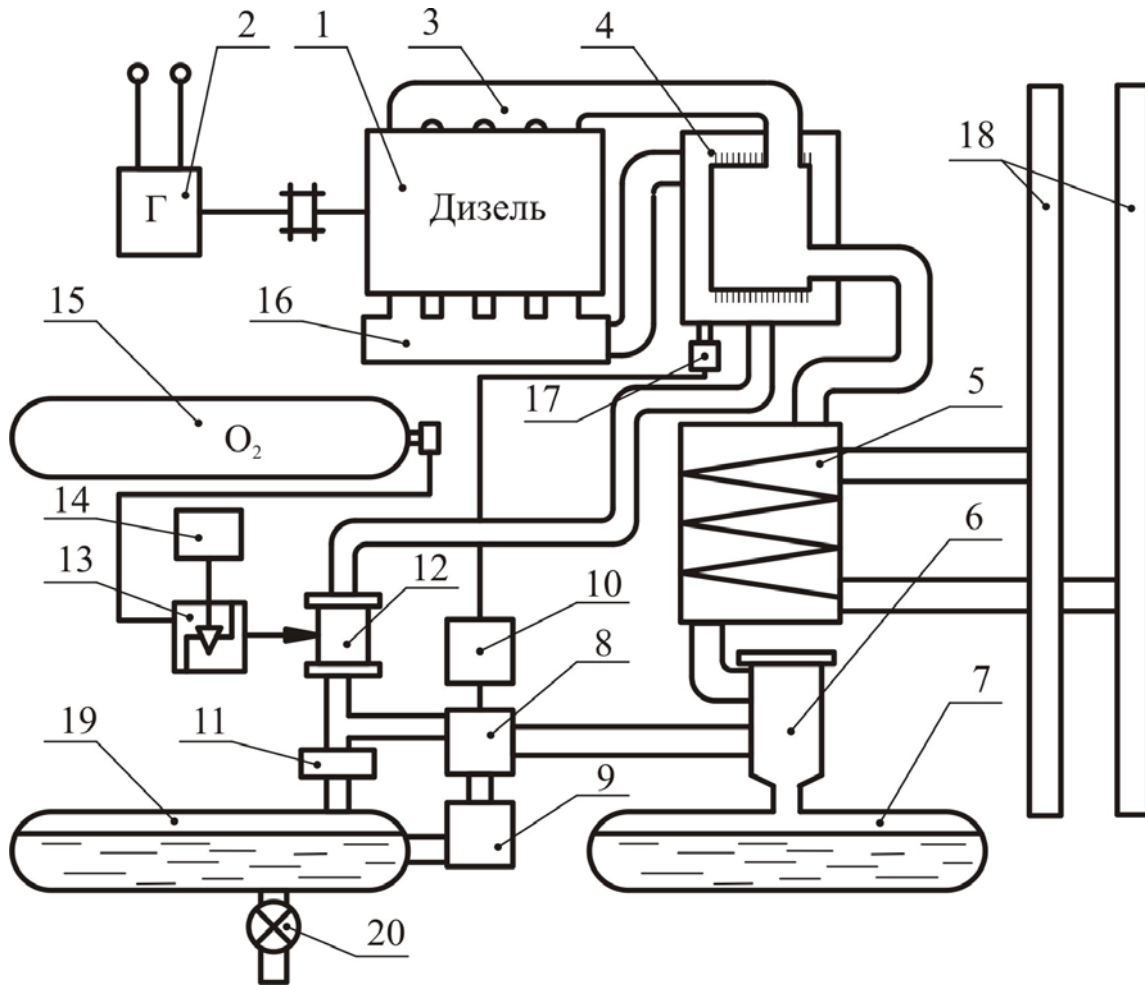


Рисунок 1- Принципиальная схема ДЭУ ЗЦ:

1 – ДВС, 2 – генератор, 3 – выпускной коллектор, 4 – подогреватель ИГС, 5 – охладитель ОГ, 6 – сепаратор влаги, 7 – сборник конденсата, 8 – регулятор давления ИГС, 9 – компрессор, 10 – блок управления, 11 – газоразделительная мембрана, 12 – кислородный смеситель, 13 – регулятор расхода кислорода, 14 – блок управления, 15 – емкость с кислородом, 16 – впускной коллектор, 17 – датчик давления ИГС, 18 – внешний контур охлаждения, 19 – накопительная емкость для  $\text{CO}_2$ , 20 – клапан сброса.

Приведенная схема установки отличается от описанной в [6] наличием емкости 19 для сбора избыточных продуктов и кислородной разделительной мембраны 11. Избыточные продукты, а это в основном увлажненная смесь  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ , сжимается эвакокомпрессором 9 до ожижения  $\text{CO}_2$ . Из присутствующей смеси газовой фазы  $\text{CO}_2$  и кислорода последний компонент через газоразделительную мембрану 11 возвращается в контур циркуляции. Таким образом, расход кислорода на подпитку из расходной емкости 15 в зависимости от режима работы дизеля снижается от 12 до 16% масс. Накопленный в процессе работы ДЭУ ЗЦ  $\text{CO}_2$  можно использовать по соответствующему назначению.

На основе предлагаемой схемы ДЭУ ЗЦ (рис.1) может быть создана безвыбросная энергоустановка для автотранспортного средства. В иностранных публикациях уже начинают появляться подобные схемы. Причем накопительную цистерну для сжиженного  $\text{CO}_2$  предлагается разделять подвижной перегородкой, с

одной стороны которой находится запас топлива, а с другой - накапливающийся  $\text{CO}_2$ . По мере расходования топлива и заполнения объема цистерны  $\text{CO}_2$  подвижная перегородка перемещается.

После расходования топлива, на специальных заправочных станциях ожигенный  $\text{CO}_2$  сливается, а в освободившийся объем цистерны за подвижной перегородкой закачивается топливо. Попутно освобождается соответствующая цистерна от конденсата водяного пара. Газоразделительная мембрана в этом случае не позволяет в цистерне для избыточного  $\text{CO}_2$  накапливаться смеси его с кислородом. К тому же присутствие кислорода снижает парциальное давление  $\text{CO}_2$  и требует больших уровней общего давления для перевода этого компонента в жидкое состояние.

Для получения кислорода на борту автотранспортного средства организуют второй контур с целью разделения воздуха из окружающей среды в высокотемпературном мембранном реакторе. При этом используют теплоту отработавших газов дизельного двигателя.

### Выводы

Использование газоразделительных мембран в системах снабжения ДЭУ ЗЦ кислородом повышает эффективность таких установок, в которых осуществляется механическое удаление избыточных продуктов из циркулирующей газовой смеси. При существующих технологиях производства газоразделительных мембран, применение их в ДЭУ ЗЦ незначительно увеличит стоимость установки, зато будут сэкономлены средства на организацию хранения окислителя – кислорода. Для одного и того же запаса кислорода в составе системы хранения возрастает время автономной работы ДЭУ ЗЦ при наличии системы отделения кислорода от избыточных продуктов, что также способствует повышению эффективности эксплуатации подобных установок.

На основе предлагаемой схемы ДЭУ ЗЦ может быть создан спектр разнообразных энергоустановок, как стационарных так и транспортных, способных функционировать в условиях отсутствия связи с окружающей средой или же не загрязняющих ее вредными выбросами.

**Список литературы:** 1. Пат. РФ. Дизельная энергетическая установка замкнутого цикла с удалением продуктов сгорания в твердом виде / А.Б. Тихонов, Е.С. Класников // МПК<sup>6</sup> F02B51/04, №02070985, Заявл.04.11.95, Оpubл. 27.12.96. 2. Пат. РФ. Анаэробная установка замкнутого цикла / Н.Г. Кириллов, В.В. Дыбок, С.С. Воскресенский // МПК<sup>6</sup> F25B27/02, F02B47/10. №2171956, Заявл. 25.05.2000, Оpubл. 10.08.2001. 3. Tadataka Asada and Masashi Nagai. Investigations on Recycle and Closed-Cycle Diesel Engines. / Tadataka Asada and Masashi Nagai // SAE Technical Paper Series. – 1980. – №800964. – P. 1–22. 4. Дытнерский Ю.И. Мембранное разделение газов. – М. – 1991. – 344 с. 5. Mkrtychan V.R., Zubakha S.N. Synthetic polimeric membranes / V.R.Mkrtychan, S.N. Zubakha. // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. –2010.-Vol.46. – №2. – P.108–111. 6. Бганцев В.Н. Особенности использования когенерационных установок с поршневыми двигателями внутреннего сгорания в системах активации малодебетных нефтяных скважин / В.Н. Бганцев // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №2. – с. 141–143.