



## ENVIRONMENTALLY FRIENDLY GASES IN HIGH VOLTAGE ELECTRICAL INSTALLATIONS

### ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТІ ГАЗИ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Кур'як В.В. / Кирик В.В.

*d.t.s., prof. / д.т.н., проф*

Вовчинський Д.О. / Вовчинський Д.О.

*graduate student / магістрант*

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",*

*Kyiv, Prosp.Peremohy, 37, 03056*

*Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського", м. Київ, пр-т Перемоги, 37, 03056*

**Анотація.** Стаття присвячена дослідженню впливу елегазу на навколишнє середовище при його застосуванні в електроустановках високої напруги та аналізу альтернатив у вигляді екологічно чистих електротехнічних газів. Акцентовано увагу на проблемі глобального потепління та парникових газах, які йому сприяють, оскільки їх концентрація в повітрі досягає значних рівнів. В електроенергетичній промисловості значного поширення набув електротехнічний газ – гексафторид сірки (елегаз  $SF_6$ ) з досить низькою сумісністю з екологією. Висвітлено пошук екологічно чистого електротехнічного газу з технічними характеристиками не гіршими ніж відповідної  $SF_6$  для використання в промислових цілях. Виконано аналіз інформації про синтезований газ  $g^3$  «зелений газ» як альтернативу елегазу. Виявлено шляхи створення високоефективних малогабаритних високовольтних розподільних пристроїв, які відповідають як технічним характеристикам, так і екологічним вимогам.

**Ключові слова:** екологічні вимоги, елегаз,  $SF_6$ , зелений газ, високовольтне обладнання.

#### Вступ.

Екологічні аспекти все частіше займають перше місце в усіх сферах нашого повсякденного життя – технічному, політичному, промисловому та суспільному. Не останнє місце серед головних проблем займає глобальне потепління та парникові гази, які йому сприяють, оскільки їх концентрація в повітрі досягає значних рівнів. В електроенергетичній промисловості значного поширення набув електротехнічний газ – гексафторид сірки (елегаз  $SF_6$ ) з досить низькою сумісністю з екологією. Тому на теперішній час актуальним є питання пошуку екологічно чистого електротехнічного газу з технічними характеристиками не гіршими ніж відповідної  $SF_6$  для використання в промислових цілях.

#### Основний текст.

Безумовно, найважливішим застосуванням елегазу є обладнання для передачі електроенергії високої напруги. Для цієї мети використовується приблизно 10 000 тонн елегазу на рік, що відповідає приблизно 80 % від загального обсягу його виробництва.

На електричних підстанціях використовують ізоляційний газ у вимикачах, перемикачах і вимірювальних трансформаторах. Використовують елегаз і в розрядниках перенапруги, шинах, роз'єднувачах і заземлювачах. Елегаз – це універсальний газ, який має багато корисних властивостей. Він виділяється своєю чудовою здатністю гасити дугу та діелектричними ізоляційними властивостями. Крім того, він хімічно інертний, негорючий та нетоксичний для



людей і тварин. Ці властивості дозволяють виробникам проектувати розподільні пристрої, які є компактними та нечутливими до кліматичних умов і потребують мінімального обслуговування.

Однак елегаз також має істотний недолік – це потужний парниковий газ. Дійсно, це один із семи газів, включених до Кіотського протоколу [1], спрямованого на скорочення викидів парникових газів. Його потенціал глобального потепління (ПГП) у 23 500 разів перевищує  $\text{CO}_2$ , а термін його життя в атмосфері становить 3200 років, що заслужено ставить його на перше місце в списку Кіотського протоколу. Елегазові розподільні пристрої, як правило, безпечні для навколишнього середовища, оскільки докладаються всі зусилля для того, щоб компоненти, що містять елегаз, були абсолютно газонепроникними. Однак, якщо лише один кілограм елегазу витікає в атмосферу, це матиме вплив на глобальне потепління, еквівалентний приблизно 23,5 тоннам  $\text{CO}_2$ .

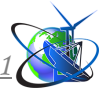
Досить тривалий часу виконуються дослідження в напрямку знаходження альтернатив  $\text{SF}_6$  для використання в силовому електротехнічному обладнанні високої напруги. Відповідно, екологічно прийнятне рішення досі не було знайдено, бо існують численні, дуже жорсткі технічні характеристики розподільних пристроїв високої напруги, яким вони повинні відповідати. До них належать: висока діелектрична міцність, хороша дугогасна здатність, низька температура кипіння, високий тиск парів при низькій температурі та інші. Газ також має відповідати вимогам охорони здоров'я та безпеки, таким як низька токсичність та негорючість. І, звичайно ж, екологічні вимоги, такі як: низький ПГП, відсутність потенціалу руйнування озонового шару та мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Пошук відповідної заміни включав вивчення простих “непарникових” газів, таких як азот і повітря. Однак їх діелектрична міцність становить лише третину міцності елегазу. Таким чином, їх використання для електричної ізоляції та гасіння електричної дуги в пристроях підстанцій означатиме різке збільшення об'єму та тиску наповнення пристроїв щонайменше в 2,5 рази. Це не тільки впливає на дизайн корпусу, безпеку та вартість, але і суперечить необхідності розробки більш компактного електричного обладнання з меншою площею.

Досліджувалися і перфторвуглецеві сполуки (ПВФ). Деякі ПФВ мають діелектричну міцність, яка викликає інтерес, але їх ПГП коливається в діапазоні від 5 000 до 12 000, що виключає їх з розгляду. Без уваги не залишився трифторйодметан ( $\text{CF}_3\text{I}$ ), який має діелектричну міцність вищу за  $\text{SF}_6$ , з ПГП менше 5 і терміном служби в атмосфері лише кілька днів. Однак  $\text{CF}_3\text{I}$  класифікується як мутагенна категорія 3 класу, тому про його використання в промислових цілях не може бути й мови.

Використання гібридних систем ізоляції, що поєднують газ (сухе повітря, азот або  $\text{CO}_2$ ) з твердою ізоляцією і наносяться в вигляді смоли на струмопровідні частини, не підвищило ступінь діелектричної міцності в порівнянні з елегазом, притому значно збільшило площу пристрою.

Представлені гази не можуть розглядатися як заміник елегазу. Компанія



GE Grid Solutions зосередила свої зусилля на серії нових фторованих молекул, які показали перспективні характеристики.

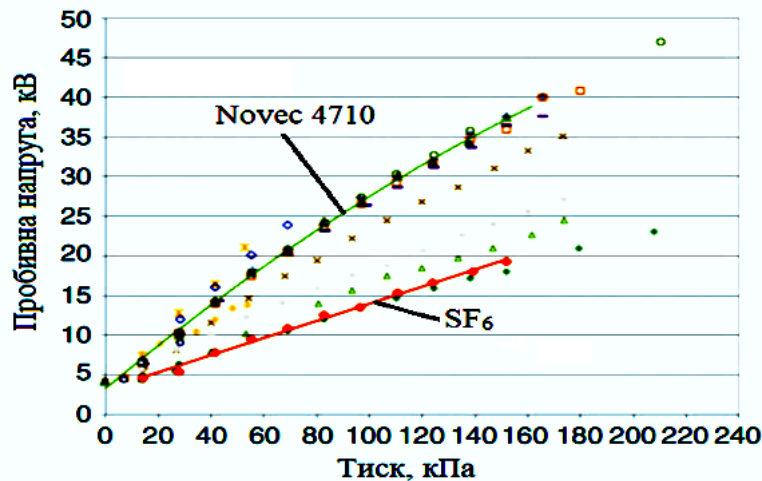
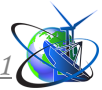
Фторкетони (загальна формула  $C_nF_{2n}O$ ) використовувалися для пожежогасіння протягом останнього десятиліття. Молекула  $C_6F_{12}O$  має діелектричну міцність у 1,7 рази вищу, ніж елегаз, тобто як чистий газ він має дуже високу ізоляційну здатність та низький рівень токсичності з ЛД<sub>50</sub> (летальна доза) приблизно  $100\ 000\ \text{см}^3/\text{м}^3$ . Газ практично не впливає на навколишнє середовище і має тривалість існування в атмосфері близько одного тижня, завдячуючи нестабільності групи кетону під ультрафіолетовим випромінюванням. Таким чином, його ПГП становить 1 або менше, порівняно з 23 500 для  $SF_6$ . Однак молекула  $C_6F$ -кетону має температуру кипіння  $49^\circ\text{C}$ , що робить її рідкою за стандартних умов. Тому,  $C_6F$ -кетон не можна використовувати як чистий матеріал, а лише як добавку при низькому тиску.

Існують інші фторкетони з діелектричною міцністю, подібною до  $C_6F$ -кетону, але з нижчою молекулярною масою і нижчою температурою кипіння. Так кетони  $C_5F$  і  $C_4F$  мають температуру кипіння  $27^\circ\text{C}$  та  $0^\circ\text{C}$  відповідно. Точка кипіння  $27^\circ\text{C}$  означає, що він має недостатній тиск пари при низьких температурах, що робить  $C_5F$ -кетон непридатним для застосування під високою напругою. З іншого погляду,  $C_4F$ -кетон з точкою кипіння  $0^\circ\text{C}$  створить вищий тиск пари за низьких температур. Однак  $C_4F$ -кетон має вищий рівень токсичності (ЛД<sub>50</sub>  $\approx 200\ \text{см}^3/\text{м}^3$ ) і в поєднанні з вищим тиском його парів представлятиме неприйнятну небезпеку при транспортуванні.

Інтерес викликають молекули гідрофторолефіни (ГФО) з ПГП менше 10. Ці молекули включають ненасичені вуглеці (подвійні зв'язки  $C=C$ ) і є частково фторованими та гідрогенізованими. Таким чином, їх діелектрична міцність становить приблизно 80 % від діелектричної міцності  $SF_6$ . Однак було виявлено, що вони є легкозаймистими в певних ситуаціях, та можуть створювати вуглецевий пил і відкладення на ізоляторах за дугового розряду або іскріння, і саме це фактор не дозволяє використовувати цей газ в обладнанні високої напруги.

Особливі дослідницькі зусилля також були спрямовані на багатообіцяючу хімічну групу під назвою фтор нітрили, яка має низьку токсичність. Напруга пробою різних фторнітрилів наведена на рисунку 1.

Синтезована спеціальна сполука гептафтор-ізобутиронітрил Novac 4710 з сімейства фторонітрилів. Газ має низьку токсичність, високу діелектричну міцність, відносно помірний ПГП і низьку температуру кипіння. Рідина Novac 4710 має ПГП приблизно 2100, температуру кипіння  $-4,7^\circ\text{C}$ , діелектричну міцність приблизно вдвічі вищу, ніж  $SF_6$  при атмосферному тиску, високу теплопередачу та низьку токсичність, що робить її найкращим кандидатом для заміни елегазу. Novac 4710 є матеріалом, який поєднує всі необхідні властивості в одній суміші, тоді як усі інші потенційні кандидати мають недоліки в тій чи іншій категорії. Поліпшення однієї властивості часто призводить до змін інших властивостей. Структура молекули рідини Novac 4710 дозволила створити комбінацію властивостей без суттєвої втрати в жодній із інших.



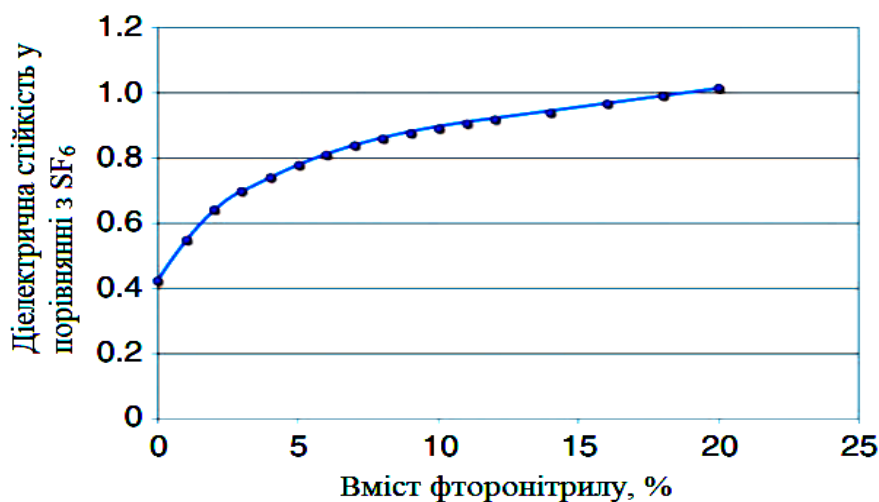
**Рисунок 1 – Напруги пробою різних фторнітрилів та інших сполук**

Джерело:[2]

Оскільки чиста діелектрична рідина Novac 4710 розріджується при низькій температурі, тому вона сама по собі не може замінити  $\text{SF}_6$ . В подальшому було виявлено, що найкращим рішенням є змішування Novac 4710 з  $\text{CO}_2$  для створення газової суміші, придатної для гасіння дуги. Суміш отримала назву – зелений газ для мережі «g<sup>3</sup>».

Розроблено три суміші, які дозволили охопити більшість специфікацій для внутрішнього та зовнішнього застосування.

За лабораторних і прикладних випробувань діелектричної міцності встановлено, що при змішуванні g<sup>3</sup> в межах від 0 до 20% з вуглекислим газом відповідно до об'єму газу в комплектному розподільному пристрої з елегазовою (КРПЕ) ізоляцією промислової частоти напругою 145 кВ встановлено, що для суміші без додавання Novac 4710, тобто чистий  $\text{CO}_2$  в об'ємі, діелектрична міцність становить приблизно 40% від значення  $\text{SF}_6$ . При вмісті рідини Novac 4710 від 18% до 20%, діелектрична міцність суміші еквівалентна  $\text{SF}_6$ , як показано на рисунку 2.



**Рисунок 2 – Графік діелектричної міцності суміші фторнітрилу +  $\text{CO}_2$**

Джерело:[2]



ЛД<sub>50</sub> для g<sup>3</sup> змінюється від приблизно 100 000 см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> до 190 000 см<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> для 10 %-ої до 4 %-ої суміші фторонітрилу з СО<sub>2</sub> відповідно. Ці цифри були підтверджені випробуваннями, проведеними незалежною акредитованою токсикологічною лабораторією [2]. Додаткові вимірювання токсичності, проведені після тесту з вимиканням кола зі струмом, демонструють, що використаний g<sup>3</sup> в основному трохи менш токсичний, ніж використаний SF<sub>6</sub>.

Здатність g<sup>3</sup> до розсіювання тепла була визначена шляхом випробувань підвищення температури на системі шин 420 кВ, заповненій газовою сумішшю під тиском 5,5 бар для мінімальної робочої температури -25°C. Потім результати порівнювали із системою, наповненою елегазом під тиском 5,5 бар. Тестова установка була оснащена датчиками температури для контролю підвищення температури. Враховуючи, що розсіювання тепла в системі КРПЕ здебільшого обумовлено конвекцією, було визначено константу Вермеера. Константа Вермеера пов'язана з фізичними властивостями газу, такими як густина ρ, теплопровідність λ, питома теплоємність C<sub>p</sub> і динамічна в'язкість η за виразом (1):

$$C = 0,1683 \left( \frac{\rho^2 \cdot \lambda^2 \cdot C_p}{\eta} \right) = 13,8. \quad (1)$$

Це означає, що чистий газ має вищу тепловіддачу, ніж елегаз.

Сталу конвекції g<sup>3</sup> визначалась за виразом газової суміші (2),

$$C_{\text{суміші}} = C_1 (x_1)^{0,75} + C_2 (x_2)^{0,75} \quad (2)$$

де C<sub>i</sub> та x<sub>i</sub> означають коефіцієнт конвекції та об'ємну частку газу i. Тепловіддача g<sup>3</sup> трохи нижча, ніж у чистого газу SF<sub>6</sub>, але все ж вища, ніж СО<sub>2</sub>.

Розробники задекларували, що за допомогою g<sup>3</sup> потенціал глобального потепління можна знизити більш ніж на 98% порівняно з SF<sub>6</sub> залежно від застосування. ПГП g<sup>3</sup> було розраховано згідно з положенням про F-газ, де загальний потенціал глобального потепління суміші, яка містить фторований парниковий газ, розраховується як середньозважене значення, отримане із суми вагових часток окремих речовин, помножених на їхній ПГП.

Суміш g<sup>3</sup> також є негорючою, не руйнує озоновий шар і залишається однорідною протягом тривалого періоду часу, навіть якщо вона охолоне до мінімальної номінальної температури розподільного пристрою.

Окрім наведеного встановлено, що газова суміш з g<sup>3</sup> здатна комутувати струм в силових колах високої напруги, тобто може використовуватися як заміник елегазу для електроустаткування.

### Висновки.

Аналіз інформації про синтезований газ g<sup>3</sup> переконливо свідчить, що суміші «зеленого газу» виступають альтернативною заміною елегазу. Це відкриває можливості створення високоефективних малогабаритних високовольтних розподільних пристроїв, які відповідають як технічним характеристикам, так і екологічним вимогам.

Газова суміш на основі фторнітрилу під назвою «g<sup>3</sup>», зелений газ для мережі, безумовно, позитивно вплине на проблему навколишнього середовища, яка все частіше постає у центрі уваги урядів і світової спільноти.





### Література:

1. Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (укр/рос) ООН; Протокол, Міжнародний документ від 11.12.1997 Retrieved from: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_801](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801)

2. Yannick Kieffel, Todd Irwin, Philippe Ponchon, and John Owens. Green Gas to Replace SF<sub>6</sub> in Electrical Grids / Retrieved from: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7450928>

***Abstract.** The article is devoted to the study of the impact of elegas on the environment when it is used in high-voltage electrical installations and the analysis of alternatives in the form of environmentally friendly gases. Attention is focused on the problem of global warming and the greenhouse gases that contribute to it, as their concentration in the air reaches significant levels. Sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) with a rather low compatibility with ecology has become widely used in the electric power industry. The search for an ecologically clean gas with technical characteristics no worse than the corresponding SF<sub>6</sub> for use in industrial purposes is highlighted. The analysis of information on synthetic gas g<sup>3</sup> "green gas" as an alternative to SF<sub>6</sub> was performed. Ways to create highly efficient small-sized high-voltage distribution devices that meet both technical characteristics and environmental requirements have been identified.*

***Key words:** environmental requirements, SF<sub>6</sub>, green gas, high-voltage equipment.*

Стаття відправлена: 16.12.2022

© Вовчинський Д.О.