

Криогенный способ эвакуации элегаза из высоковольтного оборудования линейных ускорителей

А.И. Тарасов, Н.А. Курочкин, Л.С. Ширшов
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

В настоящее время для электроизоляции высоковольтного оборудования применяют воздух, азот и шестифтористую серу (элегаз) или их смесь. Из них наибольшей электрической прочностью, превышающей прочность азота и воздуха примерно в 2.5 раза, обладает элегаз. Причина этого заключается в том, что элегаз является электроотрицательным газом, и в состав его молекулы SF_6 входит фтор — галоген, легко присоединяющий к себе электрон и образующий устойчивые отрицательные ионы [1].

При увеличении давления электрическая прочность элегаза возрастает и может быть выше электрической прочности жидких и некоторых твердых диэлектриков [2].

Надежность элегазовой электроизоляции обеспечивается идеальной чистотой как самой конструкции (полости где находится элегаз), так и самого элегаза, так как наличие даже небольшого количества пыли, мелкой металлической стружки или других примесей значительно снижает электрическую прочность [3],[4].

Известны способы откачки газов с помощью криогенных насосов [5], основанные на конденсации откачиваемых паров и газов на рабочей поверхности криопанели. В работе [6] описан конденсационный способ откачки азота и воздуха в интервале 760 Тор — тройная точка, заключающийся в конденсации откачиваемых газов на спирали из медной трубки, охлаждаемой жидкими хладагентами H_2 и N_2 . В работе [7] приведены результаты исследования пленочной конденсации элегаза на оребренной потолочной поверхности, охлаждаемой жидким азотом, и показана отрицательная роль неконденсирующихся примесей и переохлаждения поверхности конденсации на интенсивность процесса.

Наиболее полно термодинамические свойства SF_6 приведены в [8]. Кривую давления насыщенного пара можно построить по данным, приведенным в [9].

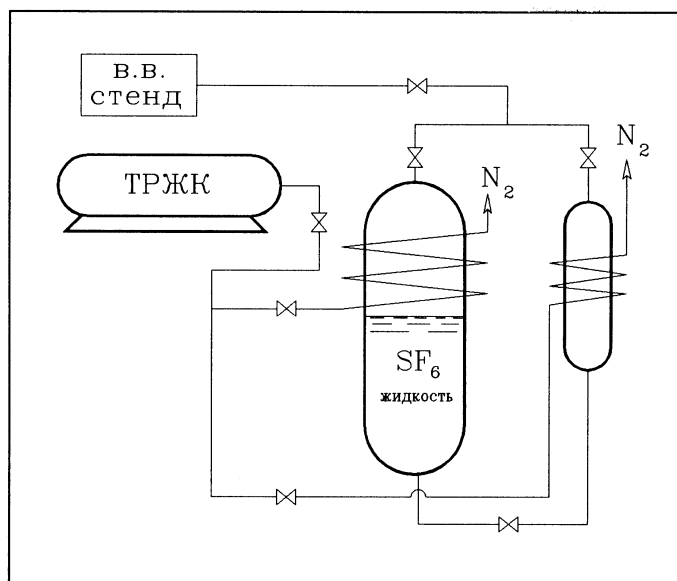


Рис. 1:

Для нормальной работы высоковольтного оборудования экспериментального стенда линейного ускорителя электронов необходимо заполнять объем 5 м³ накопителя элегазом высокой чистоты до давления 12 Ати. В процессе эксплуатации стендов элегаз эвакуируется из рабочего объема с повторным заполнением, причем эти операции необходимо производить с помощью оборудования, не вносящего посторонних примесей.

Предлагается криогенный способ эвакуации элегаза по принципиальной схеме, приведенной

на рис.1. Основными составляющими схемы являются конденсатор элегаза и криогенный кристаллизатор, охлаждаемые жидким азотом. Для эвакуации элегаза объем высоковольтного оборудования подключается к конденсатору элегаза. При охлаждении верхней поверхности сосуда и внутреннего теплообменника жидким азотом происходит пленочная конденсация элегаза и накопление в сосуде жидкого элегаза при давлении конденсации.

По окончании конденсации, соответствующей давлению 2,21 Ата, конденсатор элегаза отсекается от объекта-накопителя, к которому подключается криогенный кристаллизатор. Захлаживание жидким азотом кристаллизатора начинается с нижней части сосуда, а для равномерного и эффективного “высаживания” элегаза в твердой фазе внутренняя полость сосуда заполнена материалом с высокой теплопроводностью и развитой поверхностью. В криогенном эвакуаторе газа происходит кристаллизация элегаза, так как при давлении ниже 2,21 Ата элегаз может находиться либо в твердой, либо в газообразной фазах.

Использование кристаллизатора позволяет достичь разряжения в объекте-накопителе значительно ниже 50 мм.рт.ст., что позволяет обойтись без дополнительных вакуумных насосов для эвакуации элегаза из рабочего объема.

После окончания эвакуации элегаза из рабочего объема, криогенный кристаллизатор отсекается, и далее полости кристаллизатора и конденсатора объединяются по газу и жидкости. При необходимости подачи элегаза в высоковольтный объем в нижнюю часть конденсатора подается теплоноситель, и давление поднимается до требуемого уровня.

Для проверки предложенного способа эвакуации элегаза была изготовлена модельная установка и проведено экспериментальное исследование конденсации элегаза. Эксперименты проводились с товарным элегазом, который находился при комнатной температуре в связке из 20 стандартных баллонов вместимостью 40 л., для увеличения количества газа использовались также дополнительные емкости объемом 87 л.

Конденсация элегаза проводилась в сосуде из нержавеющей стали вместимостью 200 л. (высота емкости 1,5 м). На верхней поверхности размещался теплообменник, охлаждаемый жидким азотом. Для наблюдения за процессом конденсации использовалось окно, изготовленное из лексана (оптический материал, пластичный при низких температурах). Непосредственно перед окном размещался внутренний теплообменник, изготовленный из медной трубки с ребрами из медных пластин (поверхность теплообмена составляла около 1 м²).

В модельной конструкции криогенного кристаллизатора использовалась в качестве рабочего материала алюминиевая стружка. Кристаллизатор имел окно из лексана для наблюдения за процессом кристаллизации. За счет наполнения объема стружкой кристаллизация шла не только на поверхности сосуда, но внутри, объемно. В конструкции объемом 5,7 л с использованием 0,9 кг алюминиевой стружки удалось “высадить” 5,8 кг элегаза.

Для отвода неконденсирующихся примесей использовался сборник примесей, размещенный над верхней частью полости конденсатора, через патрубков с вентилем. Дренаж неконденсируемых примесей осуществлялся в атмосферу, а загрязненный элегаз собирался в специальный баллон.

Перед началом испытаний вакуумировался внутренний объем сосуда, и определялась его герметичность. В процессе испытаний контролировалось давление элегаза

в подключенных объемах, температура внутри сосуда и на входе в теплообменник регенеративного конденсатора. Измерялся уровень жидкого элегаза в сосуде и контролировался ротаметром расход жидкого азота.

Жидкий азот из емкости ТРЖК-3м подавался во внутренний теплообменник емкости, а затем разделялся на два потока. Основная часть паров азота подавалась на внешний теплообменник, а затем через терморегулирующий вентиль (ТРВ) в теплообменник регенеративного конденсатора и через ротаметр сбрасывалась в атмосферу. Другая часть потока паров азота подавалась в теплообменник устройства сборника примесей.

Отбор элегаза производился из сосудов с общим объемом $1,5 \text{ м}^3$, начальное давление составляло 14 Ати. Элегаз мог поступать через регенеративный теплообменник или непосредственно в верхнюю часть емкости-сборника. Через смотровое окно велось наблюдение за процессом конденсации элегаза на торцевой стенке внутреннего теплообменника. Намерзания элегаза и образования “шуги” не происходило даже при подаче через теплообменник жидкого азота. При временном прекращении подачи жидкого азота в теплообменник и отеплении на поверхности теплообменника образовывался тонкий налет изморози, который исчезал при возобновлении подачи жидкого азота.

Опробована работа устройства для сбора и удаления неконденсирующихся примесей. Для этой цели сборник отсекался от емкости $v=200$ л. и манометром контролировалась скорость падения давления. Примеси удалялись через дренажный вентиль в баллон с “грязным” элегазом или сбросом в атмосферу. Устройство для сбора и удаления неконденсируемых примесей позволяет по вторичным признакам (снижение скорости конденсации и конечное давление в сборнике) оперативно определять наличие примесей без проведения анализа сложными методами с использованием хроматографов или масс-спектрометров.

Средний расход жидкого азота составил 25 кг/час , удельный расход жидкого азота — $0,5-1 \text{ кг}$ на 1 кг сконденсированного элегаза. Производительность модельной установки в режиме конденсации элегаза составляла в диапазоне давлений ($9-6,5 \text{ Ати}$) — 46 кг/час , а в диапазоне ($6,5-2,2 \text{ Ати}$) — $27,5 \text{ кг/час}$. Время выхода на нормальный технологический режим (появления жидкого элегаза в сосуде и рост уровня) составило $1,5$ часа. Для измерения уровня элегаза в сосуде $v=200$ л использовался стандартный уровнемер жидких криогенных продуктов (УЖК), откалиброванный для измерения уровня жидкого элегаза.

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод, что модельная установка позволяет производить конденсацию элегаза криогенным способом и отделять неконденсирующие примеси. При доработке конструкции можно увеличить производительность установки и снизить удельный расход жидкого азота.

Впервые была осуществлена непрерывная конденсация элегаза на стенках теплообменника, охлажденных до низкой температуры (в данном случае 77 К). Доказано невыпадение элегаза в твердую фазу (обледенение), и продемонстрирована возможность криогенного способа эвакуации и очистки элегаза. Производительность модельной установки с охлаждением теплообменников жидким азотом в режиме конденсации элегаза достигала 50 кг/час при удельном расходе жидкого азота $0,5-1 \text{ кг}$ на 1 кг элегаза. Был проведен сбор и удаление неконденсирующихся примесей для очистки элегаза.

Основными преимуществами криогенного способа откачки элегаза являются высокая производительность и использование простой в обслуживании аппаратуры, не приводящей к загрязнению элегаза.

Список литературы

- [1] В.В.Базуткин и др. Техника высоких напряжений. – М.: Энергоиздат, 1986.
- [2] Б.М.Гохберг. Элегаз — электрическая газовая изоляция. – М.: Электричество, 1947, № 3, с. 15-19.
- [3] И.М.Бортник. Физические свойства и электрическая прочность элегаза. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
- [4] А.И.Полтев. Элегазовые аппараты.– Энергия, Ленинградское отделение, 1971.
- [5] Р.Хэфер. Криовакуумная техника. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
- [6] П.М.Кобзев, В.Б.Юферов, Б.В.Гласов. Исследование конденсационной откачки азота и воздуха в интервале 760 тор-тройная точка. // Приборы и техника эксперимента, № 1, 1970, с. 250.
- [7] Л.Т.Салехов и И.М.Мазурин. Экспериментальное исследование пленочной конденсации гексафторида серы на оребренной потолочной поверхности. // Инж.-физ. журнал. 1987, Т. 52, № 2, с. 199-205.
- [8] И.И.Перельштейн. Термодинамические свойства шестифтористой серы. М.: Госторгиздат, 1961.
- [9] В.П.Борисоглебский, Л.И.Строковский, П.Р.Жигулева. Давление насыщенных паров шестифтористой серы. Труды II Всесоюзного симпозиума по химии фторидов, 1970.