

И.К. БуткевичИнститут физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, ул. Косыгина, 2, г. Москва, РФ, 117334
e-mail: butkevich@kapitza.ras.ru

НЕТРАДИЦИОННЫЙ ВЗГЛЯД НА ТИП ДЕТАНДЕРОВ КРИОГЕННЫХ ГЕЛИЕВЫХ УСТАНОВОК МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Современные криогенные гелиевые установки (КГУ), в том числе и ожижители малой и средней производительности, ведущих криогенных фирм комплектуются турбодетандерами. КГУ этого типа характеризуются относительно малым временем непрерывной работы (8-10 ч) и достаточно частыми пусками (1-2 раза в неделю). Анализ основных показателей таких КГУ (эффективность, надёжность, уровень автоматизации, эксплуатационные затраты и удобство эксплуатации) позволяет сделать вывод о неочевидности преимуществ турбодетандеров перед поршневыми детандерами. В результате проведённого сравнения предпочтение отдаётся поршневому детандеру, которым свойственны меньшие эксплуатационные затраты при ожижении относительно небольших количеств гелия.

Ключевые слова: Гелий. Ожижение. Криогеника. Криогенная гелиевая установка. Производительность. Эффективность. Турбодетандер. Поршневой детандер. Надёжность. Эксплуатационные затраты. Ремонт.

I.K. Butkevich

UNTRADITIONAL VIEW TO THE TYPE OF EXPANDERS OF CRYOGENIC HELIUM PLANTS OF SMALL AND AVERAGE PRODUCTIVITY

Modern cryogenic helium plants (CHP) including the small and average productivity liquefiers of leading cryogenic companies are completed with turboexpanders. CHP of this type are characterized by relatively little time of continuous work (8-10 h) and rather frequent commissioning (1-2 times a week). The analysis of the main rates of such cryogenic helium plants (efficiency, safety, a level of automatization, operational loss and maintainability) has shown inevident advantages of turboexpanders over piston expanders. As a result of the experimental comparison piston expanders have been more preferable because of their low operational losses while liquefaction of relatively small amounts of helium.

Keywords: Helium. Liquefaction. Cryogenics. Cryogenic helium plant. Productivity. Efficiency. Turboexpander. Piston expander. Safety. Operational losses. Repair.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных криогенных гелиевых установках (КГУ) применяются два класса расширительных машин — газодинамические и объёмные. Из газодинамических машин наибольшее распространение получили турбодетандеры (ТД), из объёмных — поршневые детандеры (ПД). Области их применения, как отмечается в [1,2], являются ориентировочными. Тем не менее, общая тенденция такова, что с ростом объёмной производительности преимущественно используются турбодетандеры, что подтверждается рис. 1. По мере совершенствования турбодетандеров эта граница постоянно сдвигается в область меньших расходов, подтверждая высказанный в [2] тезис, что «...в тех случаях, когда эффективность ТД и ПД сопоставимы, предпочтение всегда отдаётся ТД».

Немаловажную роль в выборе типа детандера иг-

рает и известный факт более высокого уровня надёжности машин газодинамического действия, например, турбокомпрессоров. Анализ, который провёл Стробридж из Национального бюро стандартов США, очень укрупнённо сравнив надёжность двух КГУ, комплектуемых различными типами машин (поршневыми или турбомашинами), позволил ему сделать вывод о нецелесообразности применения поршневых машин в КГУ, предназначенных для длительного криостатирования сверхпроводящих устройств (СПУ) типа сверхпроводящих линий электропередач. Результаты сравнительного анализа Стробриджа представлены в таблицах 1 и 2, в которых $T_{6,p}$ — время безотказной работы в часах, $\lambda = 1/T_{6,p}$ — интенсивность отказов.

С учётом данных табл. 1, среднее время наработки на отказ КГУ с поршневыми машинами $T_{6,p} = 1/\lambda_{КГУ} = 1818$ ч.

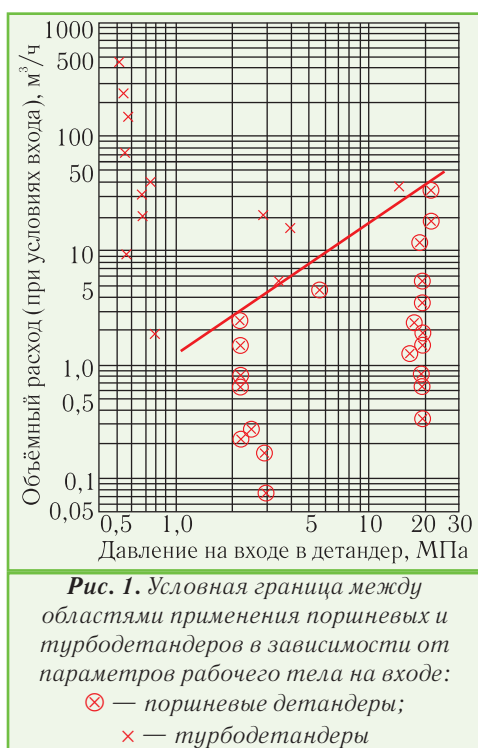


Таблица 1. Рефрижераторная КГУ с поршневыми машинами

Оборудование	λ	$T_{б.р}$
Поршневой компрессор	0,00020	5000
Теплообменники	0,00001	100000
Поршневой детандер («тёплый»)	0,00016	6250
Поршневой детандер (холодный)	0,00016	6250
Регуляторы	0,00002	50000
Итого	$\lambda_{КГУ} = 0,00055$	

Таблица 2. Рефрижераторная КГУ с турбомашинами

Оборудование	λ	$T_{б.р}$
Винтовой компрессор	0,00005	20000
Теплообменники	0,00001	100000
Турбодетандер («тёплый»)	0,00002	50000
Турбодетандер (холодный)	0,00002	50000
Регуляторы	0,00002	50000
Итого	$\lambda_{КГУ} = 0,00012$	

Среднее время безотказной работы КГУ с турбодетандерами, согласно табл. 2, $T_{б.р} \approx 8000$ ч. Таким образом, такая установка могла бы отработать годовую кампанию ($\tau = 8000$ ч), но с малой вероятностью $P_{нд} = \exp(-\lambda\tau) = \exp(-0,00012 \cdot 8000) \approx 0,37$.

Вероятность безотказной работы КГУ с поршневыми детандерами в течение года ничтожно мала. Действительно, $P_{нд} = \exp(-0,00055 \cdot 8000) = 0,12$.

Следовательно, по мнению Стробриджа, не может быть и речи об использовании таких КГУ в крупных системах длительного действия. Нельзя не отметить, что этот вывод касается установок с нерезерви-

руемым и неремонтируемым оборудованием [3]. Как видно из приведённых значений вероятности безотказной работы, использование КГУ даже с турбомашинами в течение годовой кампании без специальных мер по повышению уровня надёжности установки не представляется возможным [3]. Это означает, что окончательное решение о типе машин КГУ должно приниматься, исходя из капитальных и эксплуатационных затрат, в том числе и затрат на обеспечение необходимого уровня надёжности.

Похоже, что вывод Стробриджа был распространён такими ведущими криогенными фирмами, как «Sulzer» (Швейцария), позже «Linde» (Германия) и «Air Liquide» (Франция), и на коммерческие ожижители гелия средней и малой производительности. Так, «Linde Kryotechnik» сегодня выпускает коммерческие ожижители гелия типа TCF-20 производительностью от 18 до 78 л/ч жидкого гелия на базе винтовых компрессоров с турбодетандерами.

Не претендуя на ревизию границы применения поршневых и турбодетандеров в крупных криогенных установках и системах (в том числе и гелиевых), в настоящей статье хотелось бы высказать соображения относительно преждевременного отказа от поршневых машин и поршневых гелиевых детандеров в КГУ малой и средней производительности (примерно до 100 л/ч).

2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЖИЖИТЕЛЕЙ

Эффективность гелиевых ожижителей зависит от многих факторов [3], однако одними из определяющих являются КПД детандеров и оптимальное давление термодинамического цикла [4]. Для гелиевых ожижителей оптимальное давление цикла 2,0-2,5 МПа. КПД поршневых детандеров лежит в диапазоне от 0,75-0,80 при условиях их работы в ступени предварительного охлаждения (СПО) и до 0,85-0,90 при использовании в ступени окончательного охлаждения (СОО). КПД турбодетандеров СПО в КГУ малой и средней производительности составляет не более 0,65-0,70 по результатам пересчёта с учётом данных для ожижителей «HELIAL-1000» «Air Liquide» и «TCF-20» «Linde Kryotechnik».

Создание же малоразмерных турбодетандеров для СОО с КПД более чем 0,6 представляется весьма проблематичным. Кроме того, сложности разработки малых турбодетандеров на большую степень расширения определили использование в гелиевых ожижителях винтовых компрессоров с давлением нагнетания не более 1,5 МПа. Всё это привело к значительному возрастанию затрат энергии на производство жидкого гелия. Так, по данным «Air Liquide» и «Linde», только расход электроэнергии на привод компрессора в такой установке составляет 1,7-2,0 кВт·ч/л, в то время как у отечественной установки КГУ-150/4,5 с одним поршневым детандером в СПО это значение — около 1,5 кВт·ч/л. Это при том, что цикл с двумя последовательно включёнными турбодетандерами, при прочих равных условиях, должен быть

эффективнее цикла с одним детандером¹.

Есть и ещё один показатель, о котором зачастую забывают при выборе типа детандеров. Это — время пуска. Коммерческие ожижители гелия малой и средней производительности, как правило, используются в различных научно-исследовательских лабораториях, институтах, университетах, где потребности в жидком гелии не столь велики. Поэтому регламент их эксплуатации обычно ограничивается одним-двумя пусками в неделю по 8 ч работы за пуск. Понятно, что при таком режиме работы непроизводительное время пуска существенно ухудшает энергетические характеристики установки. При этом для ожижителей с ПД время пуска и захлаживания составляет около 1,5 ч, а для турбодетандерных ожижителей — примерно 2,5 ч (19 и 28 % от продолжительности работы, соответственно) и более. Это легко объясняется тем, что современные ПД с электромагнитным приводом клапанов и электромагнитным порошковым тормозом [5] обеспечивают регулирование производительности практически до 100 %, например, изменением частоты вращения кривошипа, позволяя форсировать холодопроизводительность ожижителя на стадии его захлаживания. Малоразмерные гелиевые турбодетандеры не обладают такой возможностью.

Применение детандера в СОО КГУ малой и средней производительности вообще становится целесообразным только при использовании ПД, высокий КПД которого обеспечивает значительное увеличение производительности. Неслучайно в современных установках СОО с турбодетандерами находит применение только в КГУ с производительностью в ожижительном режиме более 400 л/ч. Нельзя не отметить и тот факт, что использование регулируемого ПД в СОО позволяет также сократить и время пуска. Закономерен вопрос: «Почему же не использовать ПД в СОО ожижителей гелия с турбодетандерными СПО?». Ответ лежит на поверхности. Ни фирма-разработчик и изготовитель криогенного оборудования, ни потребитель никогда не будут отдавать предпочтение КГУ с разнотипным оборудованием, так как это потребует дополнительных специалистов, оборудования, ЗИП, иными словами, так или иначе, приведёт к увеличению стоимости изготовления установки и её эксплуатации.

3. АВТОМАТИЗАЦИЯ

Сложность автоматизации традиционных гелиевых поршневых детандеров с механическим приводом клапанов явилась ещё одной причиной вытеснения последних турбодетандерами в автоматизированных КГУ любой производительности ведущих криогенных

фирм. Однако опыт автоматизации ожижителей гелия с традиционными поршневыми детандерами, приобретенный в Институте физических проблем РАН, показывает, что и такие детандеры могут быть автоматизированы. Это достигается оснащением механизмов изменения времени открытия клапанов впуска и выпуска электроприводами, а также использованием в управляющем процессоре компьютера карты быстрых процессов и соответствующего программного обеспечения обработки индикаторной диаграммы детандера².

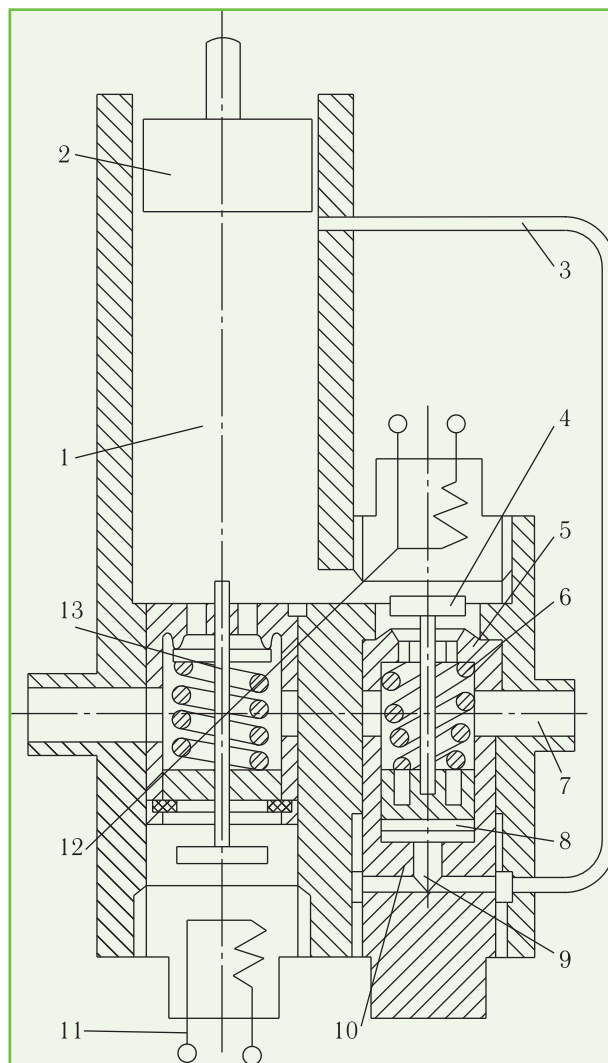


Рис. 2. Конструкция электромагнитного привода клапанов поршневого детандера: 1 — цилиндр; 2 — поршень; 3 — импульсная трубка; 4 — выпускной клапан; 5 — седло выпускного клапана; 6 — пружина; 7 — выпускной патрубок; 8 — камера пневмопривода; 9 — канал; 10 — поршень пневмопривода; 11, 12 — электромагниты; 13 — впускной клапан

¹⁾ По данным фирмы «Linde» [7] за счёт повышения КПД турбодетандеров (первой ступени до 0,75 и второй — 0,80) и усовершенствования теплообменных аппаратов (высокоэффективных пластинчато-ребристых теплообменников) в новой модели ожижителя L140 (в остальном он — полный аналог старой модели TCF20) удалось снизить затраты энергии до 1,0 кВт·ч/л и обеспечить время захлаживания менее 2,5 ч (по сравнению с 4 ч для ожижителей типа TCF).

²⁾ Фирма «Linde» предлагает автоматизированные ожижители гелия базовой модели L410 с производительностью 39 л/ч (с жидкоазотной СПО) с поршневыми детандерами с автоматическим регулированием их частоты вращения.

В СОО ожижителей гелия ОГ-400, ОГ-800, а также КГУ ОРГ-300-1200/4,5 («Пингвин-2») нашли применение разработанные в НПО «Криогенмаш» гелиевые поршневые детандеры типа ДПГ-33-20/2,5 с электромагнитным приводом клапанов (рис. 2), порошковым электромагнитным тормозом и электронной системой управления [6]. Такая конструкция поршневого детандера и разработанное программное обеспечение практически решили проблемы, связанные с его автоматизацией.

4. НАДЁЖНОСТЬ

Выводы, сделанные Стробриджем относительно использования поршневых машин в криогенных гелиевых системах с длительным сроком непрерывной работы, нельзя распространять на малые и средние КГУ с кратковременными пусками, так как перерывы между пусками обычно используются для профилактических и ремонтных работ. По этой причине низкая надёжность поршневых компрессоров и детандеров не может служить основанием для отказа от их использования. С другой стороны, не имея, в силу объективных причин, достаточной статистики по интенсивности отказов криогенных расширительных машин, прибегают к использованию данных, взятых из опыта эксплуатации аналогичных «тёплых» поршневых машин и турбокомпрессоров. Однако опыт эксплуатации КГУ различной производительности как с поршневыми, так и с турбодетандерами показывает, что отказы и тех, и других машин чаще всего происходят по причинам, связанным не с надёжностью узлов этих машин, а с надёжностью других элементов криогенных установок. Одними из таких элементов являются системы масло- и влагоочистки гелия и его глубокой криогенной очистки. Этим криогенные турбины (турбодетандеры) разительно отличаются от тёплых машин. Если принять во внимание, что интенсивность отказов современных систем криогенной очистки (по разным причинам) приближается к интенсивности отказов поршневых детандеров, то легко объясняется тот факт, что за всё время исследований, испытаний и эксплуатации криогенных гелиевых установок и систем (более 40 лет) мне удалось зафиксировать отказы как ПД, так и ТД на 80-85 % из-за сбоев в работе систем очистки. Причиной остальных отказов были нарушения в системе торможения, управления и защиты. Таким образом, и с точки зрения надёжности, особенно КГУ с достаточно коротким временем непрерывной работы и возможностью проведения регулярных профилактических работ, преимущество турбодетандеров становится неочевидным.

5. ОСОБЕННОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

В случае примерно одинаковой интенсивности отказов ПД и ТД основное влияние на стоимость эксплуатации оказывают затраты на восстановление и его продолжительность. При этом продолжительность восстановления имеет немаловажное значение, так как

для выполнения программы экспериментальных исследований фирмы (предприятия, учреждения) вынуждены на период ремонта КГУ закупать жидкий гелий «на стороне». Он, конечно, более дорогой, чем произведённый на собственной установке. Иными словами, для поддержки заданного уровня надёжности системы обеспечения экспериментальных работ применяется своеобразное неоднородное резервирование [3].

Ещё хуже обстоит дело, если фирма занимается обеспечением стороннего потребителя жидким гелием. В настоящее время такими регулярными потребителями незначительных количеств жидкого гелия являются многочисленные томографы с СП-магнитами, которым поставляется жидкий гелий, производимый установками малой и средней производительности. Срыв поставок жидкого гелия чреват потерей заказчика, вплоть до банкротства. Таким образом, скорейшее восстановление вышедшей из строя машины и, желательнее, с минимальными затратами становится одной из основных задач.

Опыт эксплуатации поршневых гелиевых детандеров позволяет сделать вывод, что основными узлами, нарушающими работоспособность детандера, являются клапаны и его поршневое уплотнение. При этом типичные неисправности — нарушение герметичности клапанов и увеличение утечки гелия через щелевое поршневое уплотнение из-за разрушения фторопластового покрытия поршня, выполненного либо из наборных колец, либо методом напыления. В качестве материала для покрытия поршня используется обычно фторопласт-3; для уплотнения клапанов — фторопласт-4. В каждой фирме, НИИ или специализированном предприятии, где эксплуатируют КГУ малой или средней производительности, всегда имеется механическая мастерская, обеспечивающая выполнение токарных, фрезерных, а часто и шлифовальных работ. Это позволяет в достаточно короткий срок и с малыми затратами произвести ремонт вышедшего из строя узла поршневого детандера. Чаще же в наборе ЗИПа к КГУ имеются по одному впускному и выпускному клапану, одной резервной поршневой паре. В этом случае время восстановления поршневого детандера занимает обычно не более 8 ч. Использованный ЗИП, естественно, подлежит восполнению или в результате ремонта вышедшего из строя узла, или приобретения (обычно это касается поршневой пары с напылённым поршнем) нового узла у фирмы-изготовителя.

При отказе турбодетандера обычно наблюдается разрушение опор ротора, что сопровождается поломками рабочего колеса и, часто, направляющего аппарата (при отказе, связанном с загрязнением гелия замерзающими примесями). Единственный путь быстрого ремонта в этом случае — замена отказавшей машины резервной и затем скорейшее восполнение резерва за счёт приобретения новой машины у её изготовителя, так как вышедший из строя турбодетандер, как правило, восстановлению не подлежит. Затраты времени на замену, в зависимости от конструкции детандера, составляют обычно от 4-ёх до 6-ти ч. Время

же и затраты на изготовление нового турбодетандера на порядок превышают соответствующие характеристики при ремонте или изготовлении узла (клапана или поршневой пары) поршневого детандера. Учитывая, что в турбодетандерной КГУ используются две ступени расширения, необходимо для обеспечения приемлемых показателей надёжности иметь два резервных турбодетандера (первой и второй ступени).

Таким образом, при прочих равных условиях стоимость ремонта КГУ с турбодетандерами возрастает в несколько раз по сравнению с установкой, созданной на базе поршневого детандера. Кроме того, фирма, эксплуатирующая такую КГУ, попадает в зависимость от изготовителя, чего нет в случае использования поршневого детандера, так как поршневую пару с напылением всегда можно заменить на пару с наборным поршнем, которую можно изготовить на любом машиностроительном предприятии, вплоть до механической мастерской НИИ или учебного института (университета).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показывает, что преимущественное использование турбодетандеров в КГУ малой и средней производительности вместо поршневых машин неочевидно. Для подтверждения сделанного вывода хочу сослаться на результаты моего общения с американским коллегой — *Хосе Аренсибиа*, главой компании «Arencibia Associates». Будучи в России в 2006 г., он интересовался гелиевыми поршневыми детандерами, так как, по его словам, ожидается значительный спрос на них, особенно в странах, территориально удалённых от основного производителя ком-

мерческих гелиевых ожижителей — фирмы Линде для возможной замены турбодетандеров на поршневые детандеры в КГУ малой и средней производительности именно в связи с большей ремонтпригодностью последних и, как следствие, более дешёвой их эксплуатацией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Техника низких температур/ **А.М. Архаров, К.С. Буткевич, А.Г. Головинцев и др.** — М.: Энергия, 1975. — 512 с.
2. **Давыдов А.Б., Кобулашвили А.Ш., Шерстюк А.Н.** Расчет и конструирование турбодетандеров. — М.: Машиностроение, 1987. — 230 с.
3. **Буткевич И.К.** Обеспечение высокого уровня надёжности криогенных гелиевых систем// Технические газы. — 2010. — № 2. — С. 15-19.
4. Криогенные системы. В 2 т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем/ **А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др.** — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
5. Исследование гелиевого поршневого детандера с электромагнитным порошковым тормозом/ **И.К. Буткевич, Н.А. Пуртов, В.В. Крылов и др.** — Сб. «Исследование процессов в установках и системах криогенного машиностроения». — Балашиха: НПО «Криогенмаш», 1984. — С. 90-97.
6. **Новотельнов В.Н., Суслов А.Д., Полтараус В.Б.** Криогенные машины. — СПб.: Политехника, 1991. — 335 с.
7. **Wilhelm H., Loehlein K., Ungricht T.** State of the art helium liquefaction and refrigeration plants// Proc. 9 Int. Conf. Cryogenics'2006. — Praga. — 2006. — V.1. — P.215-218.



ВНИМАНИЮ РУКОВОДИТЕЛЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ, ВЫПУСКНИКОВ ТЕХНИКУМОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКТЕЙ!



- получение высшего образования без отрыва от производства за 4 года;
- зачисление без экзаменов сразу на 3-ий курс Одесской государственной академии холода по направлению Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»;
- специальность — 7.090507 «Криогенная техника и технология»;
- форма обучения — заочная контрактная;
- завершение учебы — защитой дипломного проекта;
- диплом Министерства образования и науки Украины признается в странах СНГ.

Условия приёма по контактному тел./факсу: +38 (048) 777-00-87