

ГАЗОВЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ

Л. М. Коченда¹, П. А. Кравцов^{1,}*

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина, 188300, Россия

Представлены разработанные и созданные авторами газовые системы для детекторов в различных экспериментах в течение 30 лет. Большая часть систем — рециркуляционного типа, с частичной очисткой газа от влаги и кислорода. Описаны уникальные газовые системы, работающие при больших давлениях (20 бар) и при давлении ниже атмосферного, обеспечивающие чистоту рабочего газа до 1 ppb, двухконтурные системы с дополнительным контуром циркуляции, а также система с двумя независимыми контурами для разных газов. Рассматриваются различные методики очистки газов и измерения остаточных примесей.

The paper presents gas systems for nuclear physics detectors developed and created by the authors in various experiments over 30 years. Most of the systems are of the recirculation type, with partial purification of gas from moisture and oxygen. Unique gas systems operating at high pressures (20 bar) and at pressures below atmospheric, providing working gas purity of up to 1 ppb, dual-circuit systems with an additional circulation circuit, and a system with two independent circuits for different gases are described. Various methods of gas purification and measurement of residual impurities are considered.

PACS: 29.40.–n

ВВЕДЕНИЕ

Газовые системы широко используются для газовых детекторов во многих экспериментах. Основные задачи этих систем: стабилизация давления в детекторе (избыточного или абсолютного), защита детектора от критических значений давления, снабжение свежей газовой смесью, очистка газа (как правило, от влаги и кислорода), анализ состава смеси и примесей, определение течи детектора, безопасное состояние при любых аварийных ситуациях. Системы можно разделить на два класса: проточные, с выбросом всего потока газа в атмосферу, и циркуляционные, в которых большая часть рабочего газа циркулирует через детектор и блоки очистки, обеспечивая постоянный состав и чистоту газа. В циркуляционных системах в атмосферу выбрасывается только малая часть потока через детектор, что позволяет существенно уменьшить расход

* E-mail: kravtsov_pa@pnpi.nrcki.ru

газа для больших детекторов. НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ обладает большим опытом разработки и создания газовых систем в различных экспериментах.

1. СТРУКТУРА ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ СИСТЕМЫ

Как правило, циркуляционная газовая система включает в себя следующие функциональные блоки: подготовки свежей газовой смеси, циркуляции и защиты детектора, очистки газа от примесей, анализа газа.

Блок подготовки свежей смеси содержит один или несколько контроллеров массового расхода газа для каждого компонента газовой смеси. С их помощью создается свежая газовая смесь требуемого состава. Отдельный ручной индикатор расхода с нормально открытым электромагнитным клапаном устанавливается для обеспечения безопасного режима продувки детектора в случае отключения питания.

Блок циркуляции содержит компрессор, работающий в режиме компрессора с регулируемым потоком. Для этого в большинстве систем компрессор оснащается управляемой байпасной линией, поток через которую управляется автоматическим регулятором с помощью пневмоклапана или контроллера массового расхода. Это позволяет стабилизировать давление в детекторе или на входе в компрессор с большой точностью. В некоторых случаях вместо байпасной линии давление стабилизируется с помощью массовых контроллеров расхода на входе и выходе детектора. Для простых систем давление можно стабилизировать потоком свежей смеси. В качестве компрессоров используются мембранные, вихревые компрессоры, пневматические бустеры и криогенные сорбционные компрессоры. Для надежной работы в течение длительных сеансов основной компрессор дублируется резервным. В случае открытой циркуляционной системы часть газа сбрасывается в атмосферу. Поток сброса управляется регулятором давления после компрессора и измеряется датчиком потока газа для определения течи детектора.

Защита детектора, как правило, имеет несколько уровней. Первый — механический, жидкостный ограничитель давления или предохранительный клапан на выходе детектора. Второй — электромеханическое реле давления, управляющее клапанами сброса газа и продувки. Третий — стабилизация давления управляющим контроллером системы. Четвертый — обработка аварийных ситуаций в программе управления системой.

Для очистки газа от влаги используется цеолит NaX. Регенерация при 250 °С вместо 400 °С позволяет использовать его десятилетиями без существенной потери емкости. Для очистки от кислорода используется восстановленная медь или катализатор BASF-R3-11G. При наличии углеводородов в составе газовой смеси может использоваться специальный Ni + Cr-катализатор, на котором происходит реакция образования спирта из кислорода и углеводорода. В некоторых случаях для глубокой очистки

газа используется цеолит при температуре жидкого азота, что позволяет достичь концентрации примесей кислорода и влаги ниже 1 ppb.

Блок анализа газа содержит анализаторы влаги, кислорода и может подключаться к разным точкам газовой системы для анализа примесей в детекторе, свежей смеси, на выходе блоков очистки.

2. СОЗДАННЫЕ ГАЗОВЫЕ СИСТЕМЫ

Список газовых систем, разработанных и созданных авторами, представлен в табл. 1. Все системы, за исключением трех, являются циркуляционными.

Газовая система TPC STAR разработана и запущена в 1995–1998 гг. [1] и является первой большой автоматизированной системой, созданной авторами. Система безотказно работает 27 лет с 1998 г. во всех сеансах эксперимента STAR (BNL, США), обеспечивая детектор TPC объемом 50 м³ смесью Ar + 10% CH₄ при стабильном избыточном давлении (2,00 ± 0,03) мбар. Блоки очистки газа работают с 1998 г., поддерживая требуемую концентрацию примесей в детекторе: не более 25 ppb кислорода, не более 20 ppb влаги.

При создании серии газовых систем для эксперимента PHENIX [2–4] был разработан ряд приборов: система аварийной блокировки [5], собственная электроника управления [6, 7], которая в дальнейшем использовалась во всех создаваемых установках, а также программное обеспечение для управления газовыми системами [8].

Газовые системы экспериментов STAR и PHENIX похожи по параметрам и структуре, отличаются в основном используемыми газами: TEC/TRD PHENIX — Ar + 10% CH₄, DC/PC PHENIX — Ar + 50% C₂H₆, CSC ATLAS — Ar + 30% CO₂ + 10% CF₄, MuID PHENIX — CO₂ + (9–25)% *i*C₄H₁₀, MuTR PHENIX — Ar + 30% CO₂ + 20% CF₄, TOF PHENIX — R134a + 5% *i*C₄H₁₀, HBD PHENIX — CF₄, RPC PHENIX — R134a + 4,5% *i*C₄H₁₀ + 0,5% SF₆, TOF STAR — R134a + 5% *i*C₄H₁₀ + 5% SF₆.

С помощью криогенной циркуляционной газовой системы [9] TPC MuCAP/TPC MuSUN достигнуты рекордные концентрации примесей в детекторе: менее 1 ppb кислорода и влаги, 1,03 + 0,24–0,40 ppb азота. На выходе системы концентрация азота составила 0,63 + 0,24–0,40 ppb. Для получения таких результатов потребовалось разработать не только ультрачистую систему с криогенными блоками очистки и криогенным сорбционным компрессором, но и хроматографический метод измерения примесей на таком низком уровне, а также провести его калибровку [10]. В дополнение к этой уникальной системе разработана и создана криогенная разделительная колонна для получения протия и дейтерия (рабочие газы детекторов TPC MuCAP и TPC MuSUN), которая позволила получить рекордно чистый протий с содержанием дейтерия менее 6 ppb [11].

Таблица 1. Список газовых систем с основными параметрами

Детектор	Объем, м ³ (норм. усл.)	Давление, мбар	Поток циркуляции, нл/мин	Поток свежей смеси, нл/мин	Максимальная концентрация кислорода, рртп	Максимальная концентрация влаги, рртп	Год
TPC STAR	50	2,00 ± 0,03	600	1,5–33	25	20	1998
TEC/TRD PHENIX	11,8	0,40 ± 0,01	100	1–20	10	5	2001
DC/PC PHENIX	6,6	0,40 ± 0,01	100	1–20	20	15	2001
CSC(BNL) ATLAS	1	0,01 ± 0,50	1–15	0,05–1	20	15	2001
MuID PHENIX	50	2,20 ± 0,03	30	1–20	100	10	2002
MuTR PHENIX	3	2,0 ± 0,1	5–15	0–0,2	300	10	2005
TOF PHENIX	2	2,5 ± 0,1	10–15	0,2–0,4	100	50	2006
HBD PHENIX	0,6	1,0 ± 0,1	4–10	0,1–2	2	1	2008
RPC PHENIX	0,6	2,50 ± 0,1	2,5–4,5	0,5–2,5	500	40%	2008
TOF STAR	3,9	2,50 ± 0,1	5–10	0,1–0,5	100	20	2009
TPC MuCAP	0,5	10000 ± 2,5	1–5	0	0,005	0,02	2003
TPC MuSUN	1	5000 ± 2,5	1–5	0	0,001	0,001	2008
sTGC ATLAS	0,2	0,01 ± 0,50	—	0,34	—	—	2016
RICH CBM прототип	2	2,00 ± 0,1	1–13	0–10	100	100	2010
RICH CBM	60	2,0 ± 0,1	40	0–20	9000	2000	В работе
MUCH GEM CBM	0,2	1,0 ± 0,1	2	0,1–2	10	10	В работе
MUCH RPC CBM	0,09	(5,0–10,0) ± 0,1	0,05–1	0,1–1	10	10, 40–60%	В работе
TPC MPD/NICA	18,5	2,0 ± 0,1	200	0–50	20	10	2017
PAS R3B	0,2	2000 ± 20	—	0–4	5	5	2021
Pres TPC + FT	20	20000 ± 5	2 · 15	—	10	10	2021
FISCO	0,01	700 мбар абс.	—	0,01	10	10	2023

Газовые системы для эксперимента CBM разработаны на основе опыта экспериментов STAR и PHENIX [12, 13]. Система для тестирования детектора sTGC эксперимента ATLAS — проточная система с уникальным составом газовой смеси ($\text{CO}_2 + 45\% \text{ nPenthane}$). Система детектора FISCO также представляет интерес. Хотя это простая проточная система, но детектор должен работать при абсолютном давлении 700–1200 мбар, т. е. при давлении ниже и выше атмосферного. Разработанная система стабилизирует абсолютное давление в детекторе на уровне ± 1 мбар, независимо от атмосферного давления.

Газовая система TPC MPD/NICA построена с учетом наработок системы TPC STAR. В ней удалось реализовать двухконтурную схему: внутренний контур с большим потоком циркуляции и очистки обеспечивает однородность и качество газовой смеси в детекторе, а внешний контур, расположенный на значительном расстоянии от детектора, служит для стабилизации давления, анализа, дополнительной очистки, питания свежей смесью, а также управления всей системой. Это позволило уменьшить поток между детектором и удаленной газовой системой и не повлияло на стабильность работы системы.

3. ГАЗОВАЯ СИСТЕМА PRES

Газовая система эксперимента PRES заслуживает более подробного описания. Детектор PRES представляет собой два детектора (TPC и PC — пропорциональные камеры), расположенные в едином объеме при высоком давлении (до 20 бар абсолютного давления). В TPC в качестве рабочего газа используется чистый водород (содержание примесей не более 100 ppb). В пропорциональных камерах используется смесь $\text{Ar} + 4\% \text{ CH}_4$. Поскольку объемы детекторов разделены тонкой мембраной, допустимое дифференциальное давление между ними не должно превышать 20 мбар. Основные требования к параметрам газовой системы приведены в табл. 2. Схема газовой системы показана на рисунке.

Таблица 2. Параметры газовой системы PRES

Параметр	Значение
Объем детектора (TPC), л	900
Объем детектора (PC), л	1000
Рабочее давление (абсолютное), бар	2–20
Стабильность давления, мбар	5
Погрешность измерения давления	0,01% (2,5 мбар)
Дифференциальное давление между объемами, мбар	< 20
Концентрация примесей в TPC (водород), ppb	< 100
Концентрация примесей в PC ($\text{Ar} + \text{CH}_4$), ppm	< 10
Циркуляционный поток через детекторы, slpm	15

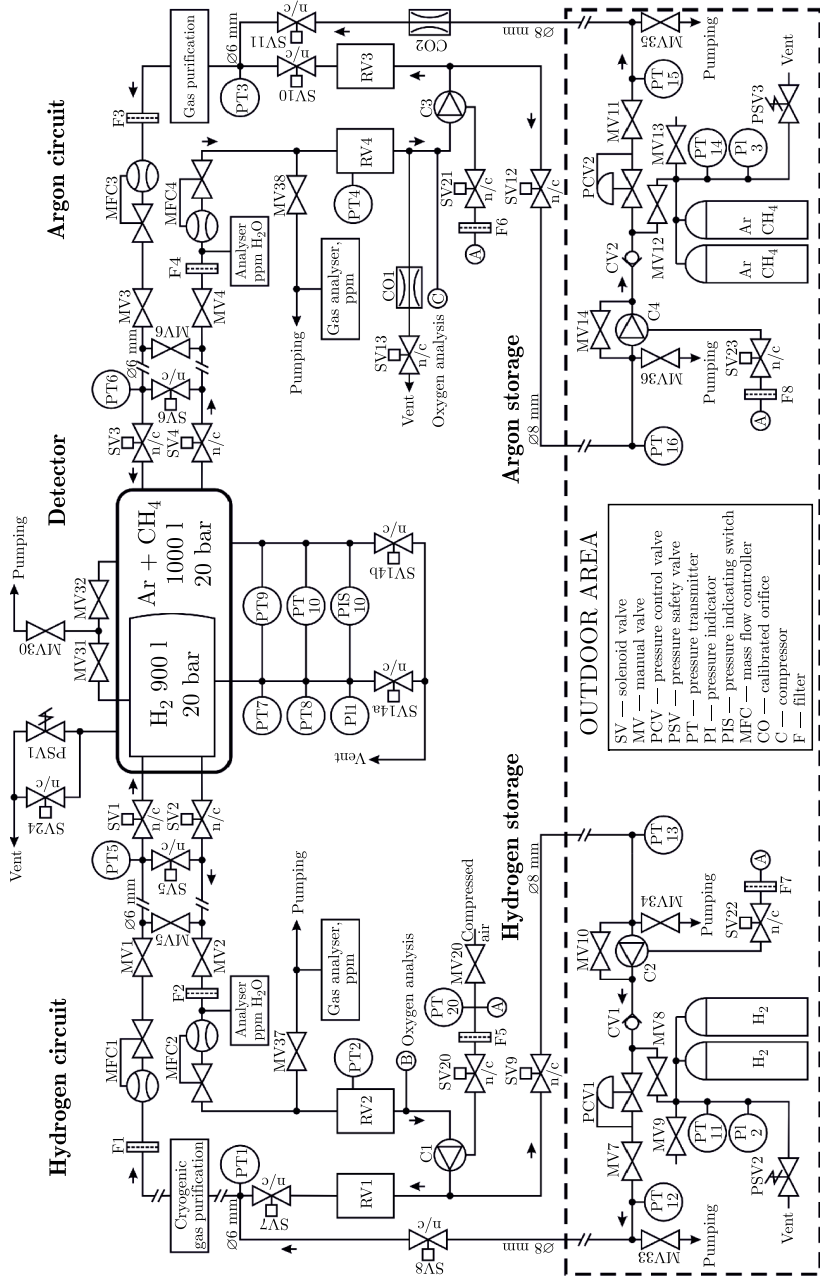


Схема газовой системы эксперимента PRES

Газовая система является двухконтурной циркуляционной системой закрытого типа. Циркуляция газа в двух контурах обеспечивается пневматическими газовыми бустерами (С1, С3). Входящий и выходящий поток в каждую камеру стабилизируется контроллером массового расхода (MFC1–MFC4). В обоих контурах установлены блоки очистки газа (криогенный блок очистки для водорода и обычный блок очистки для аргоновой смеси). Содержание влаги измеряется в каждом контуре. Для измерения содержания кислорода в каждом контуре используется специальная сборка, поскольку анализатор кислорода не может работать при давлении выше 2 бар. В каждом контуре есть блок подготовки и эвакуации газа, размещаемый около газовых баллонов.

Абсолютное давление в детекторе измеряется двумя датчиками: аналоговым (PT7) с погрешностью 0,1% для автоматической стабилизации давления и цифровым (PT8) с погрешностью 0,01% для точного измерения абсолютного давления. Дифференциальное давление между камерами детектора измеряется двумя датчиками (PT9, PT10), подключенными противоположно друг другу, с диапазоном измерения 63,5 мбар. В системе реализованы два уровня защиты детектора по дифференциальному давлению: первый обеспечивается автоматическими алгоритмами управления, а второй — с помощью показывающего реле давления (PIS1), которое управляет клапанами сброса из каждой камеры (SV14a, SV14b).

Конструктивно газовая система размещена в трех стойках (одна полноразмерная стойка с основной частью системы, малая стойка, размещаемая около детектора, а также компрессорная сборка для эвакуации и заполнения, размещаемая около площадки хранения газовых баллонов). Управление газовой системой осуществляется с помощью одного контроллера DAQ32 [7], установленного в основной стойке вместе с компьютером. Все основные алгоритмы управления реализованы во внутренней программе контроллера. Для настройки алгоритмов и мониторинга состояния системы используется специальная программа на управляющем компьютере.

В управляющей программе в контроллере реализованы три режима работы газовой системы.

1. Режим наполнения детектора. В этом режиме газ подается в детектор из баллонов хранения через редуктор, настроенный на 30 бар, и открытые клапаны SV8, SV11. Поток газа регулируется контроллерами расхода. MFC1 заполняет водородную камеру заданным максимальным потоком до указанного абсолютного давления. MFC3 работает в режиме стабилизации дифференциального давления по датчику PT9. Такая комбинация позволяет одновременно заполнять разные объемы камер при постоянном дифференциальном давлении.

2. Режим циркуляции — основной режим работы системы. В этом режиме газ постоянно циркулирует через детекторные камеры с помощью пневматических бустеров (С1, С3). Потоки газа через камеры регулируются контроллерами расхода. MFC2 и MFC4 установлены на постоянный

циркуляционный поток. Абсолютное давление в водородной камере (РТ7) стабилизируется с помощью MFC1. Дифференциальное давление (РТ9) стабилизируется с помощью MFC3.

3. Режим эвакуации используется для перекачки газа из детектора в баллоны хранения. Для этого используются как пневматические бустеры циркуляционных контуров (С1, С3), так и дополнительные эвакуационные бустеры (С2, С4).

Во всех режимах реализована защита детектора по давлению. В случае невозможности поддерживать дифференциальное давление система останавливает процесс и закрывает камеры детектора с помощью клапанов SV1–SV4. При дальнейшем росте дифференциального давления срабатывает реле давления (PIS1), которое открывает соответствующий клапан сброса (SV14a, SV14b).

В режиме заполнения система обеспечивает постоянное дифференциальное давление между камерами детектора на уровне $(5,0 \pm 0,5)$ мбар, в режиме эвакуации — $(5,0 \pm 2,0)$ мбар. Дополнительная релейная защита во всех режимах сбрасывает газ в случае превышения заданного порога по дифференциальному давлению (15–20 мбар).

В режиме циркуляции два контура газовой системы могут работать при разных потоках, при этом дифференциальное давление между камерами стабилизируется на прежнем уровне — $(5,0 \pm 0,5)$ мбар, а абсолютное давление в водородной камере стабилизируется с точностью $(20,000 \pm 0,002)$ бар. Таким образом, основные требования к газовой системе полностью выполнены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном обзоре созданных газовых систем и методов, использованных при их разработке, показана успешная работа в течение 30 лет. Первая система, разработка которой была начата в 1995 г., функционирует до сих пор без существенных сложностей. За это время создано более 20 газовых систем для различных детекторов в BNL (США), PSI (Швейцария), CBM (Германия), ПИЯФ, ОИЯИ. Все газовые системы успешно работали, обеспечивая выполнение задач экспериментов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kotchenda L. et al.* STAR TPC Gas System // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 499. P. 703–712; [http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01967-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01967-8).
2. *Kotchenda L. et al.* Gas Systems of PHENIX Central Tracking Detectors. PNPI Annual Report. 1999.
3. *Kotchenda L. et al.* PHENIX TEC-TRD Detector Gas System. PNPI Preprint 2712. Gatchina, 2007. 16 p.

4. *Kotchenda L., Kravtsov P., Tretiakov G., Trofimov V., Pisani R.* PHENIX Muon Tracking Detector Gas System // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 578. P. 172–179; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.05.119>.
5. *Kochenda L., Kravtsov P., Trofimov V.* Universal Microprocessor Interlock System // Instrum. Exp. Techn. 2000. V. 43, No. 4. P. 504–505.
6. *Kravtsov P., Trofimov V., Martyushov A.* High-Precision Temperature Measuring Instrument. PNPI Preprint 2722. Gatchina, 2007. 24 p.
7. *Kravtsov P., Trofimov V.* Multi-Channel Measuring Instrument for Slow Control Systems. PNPI Preprint 2723. Gatchina, 2007. 20 p.
8. *Kravtsov P.* Data Acquisition and Control Software of the STAR and PHENIX Gas Systems. PNPI Preprint 2593. Gatchina, 2005. 19 p.
9. *Ganzha V. et al.* A Circulating Hydrogen Ultra-High Purification System for the MuCap Experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 578. P. 485–497; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.06.010>.
10. *Ganzha V. et al.* Measurement of Trace Impurities in Ultra Pure Hydrogen and Deuterium at the Parts-per-Billion Level Using Gas Chromatography // Nucl. Instr. Meth. A. 2018. V. 880. P. 181–187; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.10.096>.
11. *Alekseev I. et al.* Cryogenic Distillation Facility for Isotopic Purification of Protium and Deuterium // Rev. Sci. Instrum. 2015. V. 86. P. 125102; <http://dx.doi.org/10.1063/1.4936413>.
12. *Kotchenda L., Kravtsov P., Eschke J., Mahmoud T., Hoehne C.* A Gas System for the CBM-RICH Prototype. CBM Progress Report. Darmstadt, 2010.
13. *Kravtsov P., Kotchenda L., Eschke J., Mahmoud T., Hoehne C.* A Slow-Control System for the CBM-RICH Gas System. CBM Progress Report. Darmstadt, 2010.