

04

Плазмотрон переменного тока, работающий на смеси аргона и сероводорода

© А.В. Суров, С.Д. Попов, Д.И. Субботин, Е.О. Серба, Г.В. Наконечный, А.В. Никонов,
К.И. Бабич, Ю.С. Денисов

Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: ura-denisov2001@yandex.ru

Поступило в Редакцию 27 марта 2025 г.

В окончательной редакции 20 апреля 2025 г.

Принято к публикации 21 апреля 2025 г.

Рассматривается новая модель плазмотрона переменного тока, который может быть использован для переработки сероводорода в газообразный водород и молекулярную серу. Установлена зависимость падения напряжения на электрической дуге и мощности от расхода сероводорода.

Ключевые слова: высоковольтный плазмотрон переменного тока, сероводород, падение напряжения на дуге, водород.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.14.60766.20325

По мере повышения требований к экологическим характеристикам моторных топлив концентрация серы в них снижается. Поскольку основным методом удаления серы из углеводородных фракций служит гидроочистка, сернистые соединения нефтяных фракций превращаются в сероводород. Его количество с увеличением сернистости нефти также возрастает. Основным методом переработки сероводорода является процесс Клауса, в ходе которого сероводород превращается в молекулярную серу и воду [1]. Далее из молекулярной серы производится серная кислота, резинотехнические изделия и индивидуальные серосодержащие соединения. Однако водород, содержащийся в сероводороде, в процессе Клауса не может быть получен в молекулярной форме, хотя многочисленные расчеты показывают, что при высокотемпературном термическом разложении сероводорода (более 2000 К) образуются водород и молекулярная сера [2]. Достижение таких высоких температур возможно при использовании источников плазмы. За период второй половины XX века исследователи установили принципиальную возможность плазменного пиролиза сероводорода с использованием плазмы различного типа [3].

Экспериментальные установки малой производительности, в которых сероводород разлагается под действием барьерного [4], коронного [5] и тлеющего разрядов [6], продемонстрировали относительно высокие степени превращения сероводорода, однако удельные энергозатраты для получения водорода были крайне высоки. Другой проблемой таких устройств была их низкая производительность, тогда как масса образующегося в нефтехимической промышленности сероводорода исчисляется миллионами тонн в год.

В 80-х годах под руководством академика Русанова выполнялись исследования переработки сероводорода с применением СВЧ-плазмотронов, которые продемонстрировали преимущества мощных источников плазмы в этой области [7]. Однако тепловой КПД и ресурс работы

таких плазмотронов были низкими. В настоящее время для переработки сероводорода продолжают исследоваться электродуговые плазмотроны [8], а также большое количество моделей микроволновых плазмотронов [9–11]. Все большее значение имеет повышение единичной мощности плазмотрона, так как это определяет возможность применения плазменного пиролиза в промышленной переработке сероводорода. Разрабатываются новые конструкции мощностью более 300 kW [12,13]. В настоящей работе приводятся новые результаты, полученные для высоковольтного плазмотрона переменного тока, работающего на смеси аргона и сероводорода.

Результаты получены на экспериментальном стенде, включающем в себя трехфазный плазмотрон переменного тока, систему электропитания с напряжением холостого хода 10 kV, систему подачи и измерения расхода плазмообразующего газа, систему охлаждения с системой измерения термического КПД и систему измерения и регистрации параметров электрических дуг. Схема плазмотрона приведена на рис. 1.

Корпус плазмотрона включает в себя три проточных разрядных канала с установленными через изоляторы стержневыми медными электродами. Подача газов организована тангенциальным способом в различные зоны разрядных каналов. Тангенциальный ввод газа обеспечивает осевую стабилизацию электрических дуг. Часть аргона ($3 \cdot 10^{-3}$ kg/s) подается в разрядные каналы в зоне электродов для их защиты от агрессивного воздействия сероводорода. Вторая часть аргона ($3 \cdot 10^{-3}$ kg/s) подается дальше по потоку в основной зоне горения дуги. Запуск плазмотрона осуществляется на чистом аргоне, а затем к потоку аргона в зоне горения дуги подмешивается сероводород. Зажигание дуг осуществляется посредством самостоятельного пробоя минимальных зазоров между электродами и стенками разрядных каналов за счет высокого напряжения холостого хода источника питания. Электрические дуги под действием

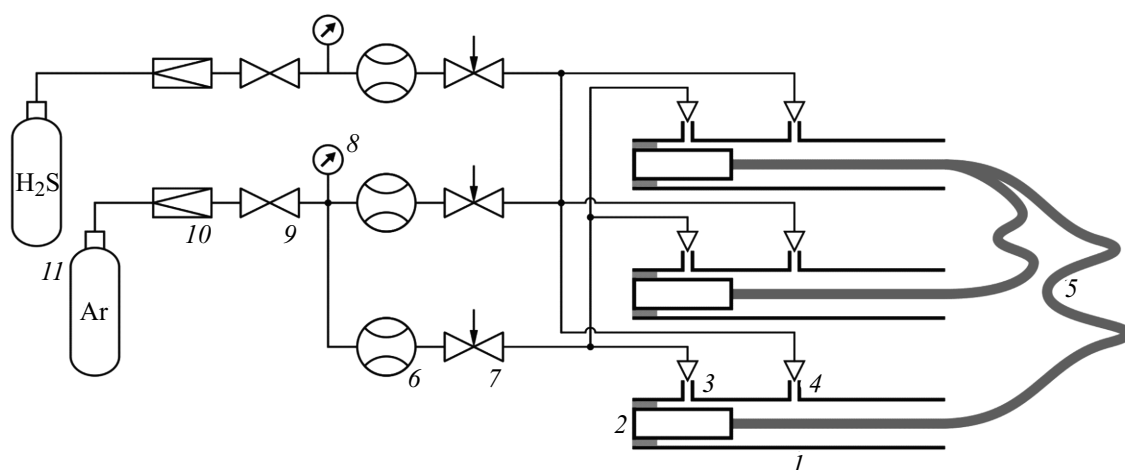


Рис. 1. Схема плазмотрона. 1 — разрядный канал, 2 — электрод, 3 и 4 — входы газа, 5 — дуга, 6 и 7 — регулятор расхода газа, 8 — манометр, 9 — вентиль, 10 — редуктор, 11 — баллон.

потока газа вытягиваются вдоль осей разрядных каналов и замыкаются между собой на выходе из них. Далее при переходе силы тока через нулевое значение горение электрических дуг возобновляется в осевых областях разрядных каналов, сохраняющих проводимость.

Система электропитания содержит коммутационное оборудование, систему измерения и регистрации электрических параметров, токоограничивающие индуктивности в каждой фазе, повышающий трансформатор и систему компенсации реактивной мощности. Индуктивности ограничивают ток, гасят пульсации тока электрических дуг и обеспечивают повторное зажигание в случае погасания дуги.

Система подачи газов включает в себя газовые ramпы с баллонами и запорно-регулирующей арматурой (вентили, газовые баллонные редукторы). Подача газов осуществляется через регуляторы массового расхода Bronkhorst с верхним пределом измерений по аргону $7 \cdot 10^{-3}$ kg/s, по сероводороду $0.63 \cdot 10^{-3}$ kg/s, погрешности измерения расхода включают 0.5 % от измеренной величины плюс 0.1 % от верхнего предела измерений.

Система охлаждения плазмотрона обеспечивает необходимый расход охлаждающей воды при избыточном давлении 0.6 МПа. Термический КПД плазмотрона определяется путем измерения потерь тепла на основе данных о разнице температур охлаждающей воды на входе и выходе контура охлаждения плазмотрона и ее расходе. Устройство измерения потерь тепла и методика измерений подробно описаны в [14].

В состав системы электропитания входит система измерения и регистрации электрических параметров работы плазмотрона, созданная на базе промышленного компьютера Advantech IPC-510 с 12-битными аналого-цифровыми преобразователями (500 kHz) производства National Instruments с частотой выборки по каждому каналу 32 kHz для обработки сигналов от датчиков тока и напряжения. Разработанное в среде LabVIEW программное обеспечение позволяет рассчитывать по мгновенным значениям токов и напряжений их дей-

ствующие значения и мощность плазмотрона, а также вести запись осциллограмм тока и напряжения на носителе компьютера. Для измерения тока используются датчики тока LA 55-P (LEM S.A.) с диапазоном измерения от -70 до 70 А, точность ± 0.65 %, нелинейность < 0.15 %, время задержки при 90 % от максимального значения диапазона измерения $< 1 \mu\text{s}$, частотный диапазон 0–200 kHz. Для измерения напряжения используются трансформаторы напряжения И50 (номинальный коэффициент трансформации 10 000/100 В, класс точности 0.2) и датчики напряжения LV 100/SP51 (LEM S.A.) с настраиваемым диапазоном измерения от ± 100 до ± 4500 В, точность ± 0.7 %, нелинейность < 0.1 %, время задержки при 90 % от максимального значения диапазона измерения 20–100 μs , частотный диапазон 3 kHz.

На рис. 2 приведены полученные в ходе экспериментов зависимости падения напряжения на дугах и

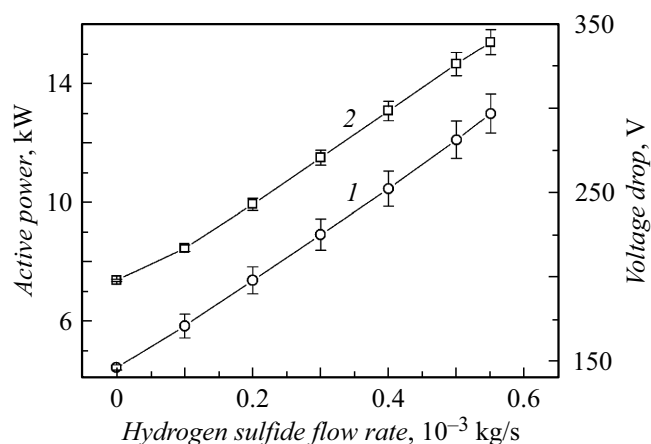


Рис. 2. Зависимости падения напряжения (1) и активной мощности (2) плазмотрона от массового расхода сероводорода, расход аргона в зоне электродов $3 \cdot 10^{-3}$ kg/s, расход аргона в зоне горения дуги $3 \cdot 10^{-3}$ kg/s, среднее действующее значение тока 31.8 А.

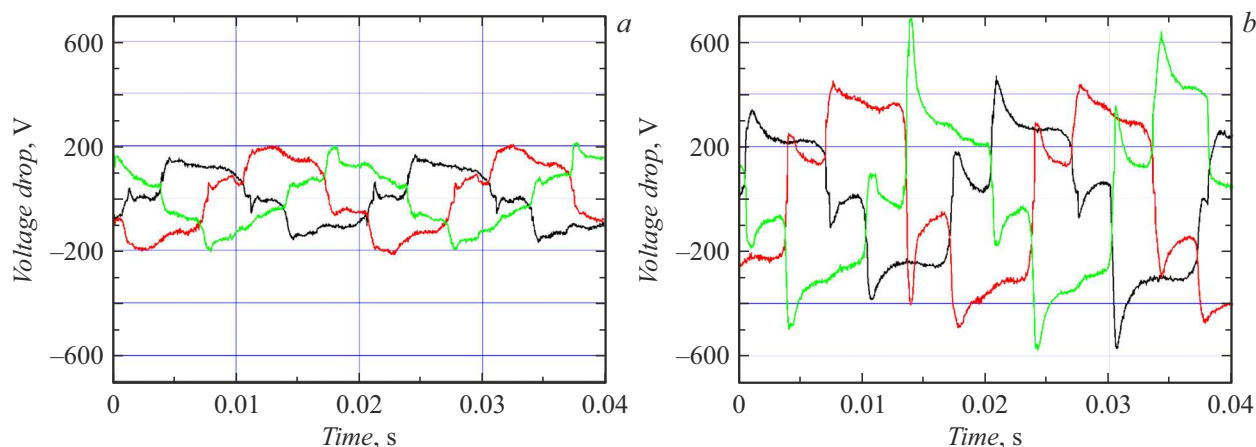


Рис. 3. Осциллограммы падения напряжения без сероводорода (а) и для расхода сероводорода $0.4 \cdot 10^{-3}$ kg/s (b), расход аргона в зоне электродов $3 \cdot 10^{-3}$ kg/s, расход аргона в зоне горения дуги $3 \cdot 10^{-3}$ kg/s, среднее действующее значение тока 31.8 А. Каждая кривая соответствует падению напряжения между фазами трехфазной системы электропитания.

активной мощности плазматрона от массового расхода сероводорода при фиксированном расходе аргона.

Как правило, рост расхода плазмообразующего газа приводит к увеличению падения напряжения на дуге и активной мощности. Это связано со снижением температуры дуги и соответственно снижением электропроводности. Снижение температуры дуги вызвано интенсификацией теплообмена между газом и дугой, а также диссоциацией в случае многоатомных газов. Следует отметить, что без подачи сероводорода увеличение расхода аргона в зоне горения дуги до $3.5 \cdot 10^{-3}$ kg/s практически не влияет на электрические параметры. Увеличение падения напряжения на дуге и активной мощности составляет порядка 2%. Это связано с относительно низкой теплоемкостью и теплопроводностью аргона. Из рис. 2 видно, что со сравнительно небольшим увеличением расхода сероводорода происходит значительный рост падения напряжения на дуге. Так, при фиксированном суммарном расходе аргона $6 \cdot 10^{-3}$ kg/s и увеличении расхода сероводорода от 0 до $0.55 \cdot 10^{-3}$ kg/s падение напряжения увеличивается от 146 до 297 В. Активная мощность при этом увеличивается от 7.4 до 15.4 кВт. Характер зависимостей близок к линейному. При подаче сероводорода под действием энергии электрических дуг образуются водород и элементарная сера. На данный эндотермический процесс расходуется часть энергии электрической дуги. Водород обладает высокой теплоемкостью и теплопроводностью, что приводит к интенсификации теплообмена с дугой и вызывает значительный рост падения напряжения и мощности. Это также можно проследить по осциллограммам мгновенных значений падения напряжения. Из рис. 3 видно, что с подачей сероводорода меняется форма осциллограмм, растут как амплитуды пиков зажигания дуг, так и сами значения падения напряжения на участках горения дуг.

Осциллограммы мгновенных значений тока имеют синусоидальную форму и на рисунках не приведены, так как форма осциллограмм и значения тока практически

не зависят от расхода аргона и сероводорода, поскольку система электропитания является источником тока.

Термический КПД был измерен для двух режимов работы плазматрона и составил 84% для режима без добавления сероводорода и 90% для расхода сероводорода $0.4 \cdot 10^{-3}$ kg/s. Для указанных условий рассчитаны среднемассовые температуры при выполнении термодинамического равновесия: 2280 и 2790 К.

Согласно [15], электрические разряды, которые работают при температуре газа 2000–4000 К (оптимальной для пиролиза сероводорода), создают предпочтительную среду для плазменной диссоциации сероводорода. Таким образом, предложенный плазматрон может быть использован для плазменного пиролиза сероводорода с получением молекулярных серы и водорода.

Финансирование работы

Исследование выполнено в рамках государственного задания по соглашению № 075-03-2025-020.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R. Abhijeet, I. Salisu, J. Anoop, Prog. Energy Comb. Sci., **80**, 100848 (2020). DOI: 10.1016/j.pecs.2020.100848
- [2] K. Karan, A.K. Mehrotra, L.A. Behie, AIChE J., **45** (2), 383 (1999). DOI: 10.1002/aic.690450217
- [3] J. Zaman, A. Chakma, Fuel Process. Technol., **41** (2), 159 (1995). DOI: 10.1016/0378-3820(94)00085-8
- [4] Y. Li, F. Gao, Y. Li, C. Shen, C. Liu, Plasma Chem. Plasma Process., **43**, 2079 (2023). DOI: 10.1007/s11090-023-10401-3

- [5] G.-B. Zhao, S. John, J.-J. Zhang, J. C. Hamann, S.S. Muknahallipatna, S. Legowski, J.F. Ackerman, M.D. Argyle, *Chem. Eng. Sci.*, **62** (8), 2216 (2007). DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.052
- [6] K. Gutsol, T. Nunnally, A. Rabinovich, A. Fridman, A. Starikovskiy, A. Gutsol, A. Kemoun, *Int. J. Hydr. Energy*, **37** (2), 1335 (2012). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.10.048
- [7] A. Balebanov, B. Butilin, V. Jivotov, V. Krokvenko, R. Matolich, S. Macheret, G. Novikov, B. Potapkin, V. Rusanov, A. Fridman, V. Yavorski, *Docl. Phys. Chem.*, **283** (1-3), 709 (1985).
- [8] K. Gutsol, R. Robinson, A. Rabinovich, A. Gutsol, A. Fridman, *Int. J. Hydr. Energy*, **42** (1), 68 (2017). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.001
- [9] D. Czykowski, B. Hrycak, R. Miotk, M. Dors, M. Jasiński, *Int. J. Hydr. Energy*, **78**, 421 (2024). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.313
- [10] M. Sassi, N. Amira, *Int. J. Hydr. Energy*, **37** (13), 10010 (2012). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.006
- [11] B. Zhang, Z. Song, Y. Pang, J. Zhang, X. Zhao, Y. Mao, J. Sun, W. Wang, *J. Clean. Prod.*, **435**, 140588 (2024). DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140588
- [12] V.L. Satchilembe, E.A. Bushihin, D.V. Ivanov, S.G. Zverev, in *2024 23rd Int. Symp. on electrical apparatus and technologies (SIELA)* (IEEE, 2024), p. 1. DOI: 10.1109/SIELA61056.2024.10637874
- [13] A.V. Surov, S.D. Popov, V.E. Popov, D.I. Subbotin, E.O. Serba, V.A. Spodobin, Gh.V. Nakonechny, A.V. Pavlov, *Fuel*, **203**, 1007 (2017). DOI: 10.1016/j.fuel.2017.02.104
- [14] Ph.G. Rutberg, V.A. Kuznetsov, E.O. Serba, S.D. Popov, A.V. Surov, Gh.V. Nakonechny, A.V. Nikonov, *Appl. Energy*, **108**, 505 (2013). DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.03.052
- [15] K. Gutsol, T. Nunnally, A. Rabinovich, A. Fridman, A. Starikovskiy, A. Gutsol, A. Kemoun, *Int. J. Hydr. Energy*, **37**, 1299 (2012). DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.10.035