

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Манузина Анастасия Максимовна

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование способов управления импульсным потоком газа для  
питания источника плазмы**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19302

**Научный руководитель:**

П.П. Дейчули  
Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

В.Т. Астрелин  
Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин  
Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

## **Аннотация**

Целью работы является изучение способов управления напуском газа в источники плазмы. Были изучены два способа подачи и контроля потока газа: соленоидальными клапанами и контроллерами расхода газа, а также проведено их сравнение. В процессе изучения контроллеров расхода газа было определено быстроедействие контроллера расхода газа фирмы Bronkhorst серии EL-FLOW. Измерения были проведены на системе подачи газа в ВЧ (высокочастотный) - разрядный источник плазмы атомарного инжектора.

Ключевые слова: соленоидальный клапан, контроллер расхода газа, источник плазмы.

## Оглавление

1. Введение .....	4
2. Способы управления потоком газа .....	4
2.1 Соленоидальный клапан .....	4
2.2 Контроллер расхода газа .....	7
2.3 Сравнение способов управления потоком газа .....	8
3. Эксперимент .....	8
3.1 Описание установки .....	8
3.2 Измерения .....	10
4. Заключение .....	12
5. Список литературы .....	12

## 1. Введение

Источники плазмы в настоящий момент используются в различных целях: от обработки материалов, до проведения экспериментов по УТС (управляемому термоядерному синтезу), успех в которых даст людям новый неиссякаемый источник энергии. Для получения плазмы необходима ионизация рабочего газа – обычного водорода либо дейтерия. Газ подается в вакуумную камеру, после чего ионизируется в дуговом или ВЧ-разряде. Часто источники плазмы – импульсные устройства, которые работают в весьма короткий промежуток времени. Подача газа в них должна быть быстрой, стабилизированной и строго дозированной. А значит для напуска газа в них необходимы точные и быстродействующие устройства. В число таких устройств входят соленоидальные клапаны и контроллеры расхода газа, изучение и сравнение которых являлось целью этой работы.

## 2. Способы управления потоком газа

### 2.1 Соленоидальный клапан

Соленоидальный клапан (рис. 2.1.1.) – электромагнитное устройство, состоящее из корпуса, катушки с ферромагнитным сердечником внутри, к которому прикреплен диск. Сердечник с диском образуют подвижную часть клапана – якорь.

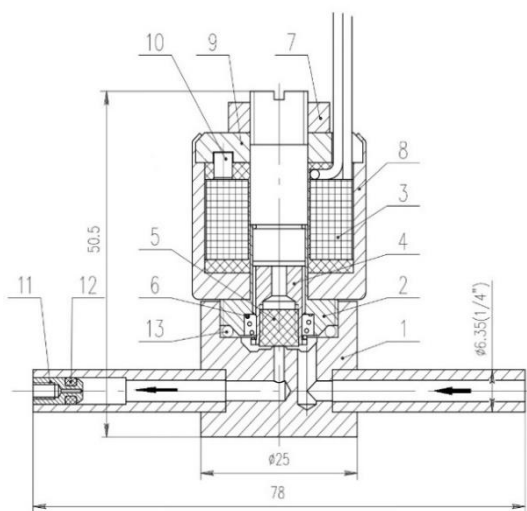


Рис. 2.1.1. чертеж соленоидального клапана: 1 – корпус ; 3 – катушка; 4 – якорь, над которым расположен зазор электромагнита; 5 –уплотнитель (витон); 6 – возвратная пружина ; 8 – корпус катушки; 11, 12 – микродиафрагма.

**Принцип работы:** при подаче тока на катушку якорь втягивается в катушку магнитным полем, тем самым открывая клапан и пропуская газ. При прекращении подачи тока якорь закрывает клапан, возвращаясь в изначальное положение при помощи силы натяжения возвратной пружины.

Рассчитаем быстродействие клапана, то есть время, за которое клапан откроется и якорь остановится, не оставляя зазора. Для этого напишем уравнение движения якоря.

Справедливы следующие соотношения для магнитного поля, создаваемого соленоидом:

$$\begin{aligned} B_{\text{ж}} &= B_{\text{в}} = B \\ \mu_0 \mu H_{\text{ж}} &= \mu_0 H_{\text{в}} \\ H_{\text{ж}} l_{\text{ж}} + H_{\text{в}} d_{\text{в}} &= IN \end{aligned}$$

Где  $B_{\text{ж}}$  – магнитное поле в железе(магнитопроводе);  $B_{\text{в}}$  – магнитное поле в воздушном зазоре;  $H_{\text{ж}}$  – напряженность магнитного поля в магнитопроводе;  $H_{\text{в}}$  – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре;  $\mu$  - магнитная проницаемость железа (1000);  $l_{\text{ж}}$  – длина магнитопровода (6 см);  $d_{\text{в}}$  – длина воздушного зазора (0,8 мм);  $I$  - ток в катушке (10 А);  $N$  – количество витков катушки (100)

Выражаем  $H_{\text{в}}$  и получаем соотношение:

$$H_{\text{в}} = \frac{IN}{d_{\text{в}} + \frac{l_{\text{ж}}}{\mu}}$$

Далее с учетом:

$$B = \mu_0 H_{\text{в}}$$

Записываем выражение для магнитного поля  $B$ :

$$B = \frac{\mu_0 IN}{d_{\text{в}} + \frac{l_{\text{ж}}}{\mu}}$$

Запишем чему будет равна сила, действующая на якорь со стороны магнитного поля через давление:

$$F = \frac{BH_{\text{в}}}{2} S$$

Где  $S$  – площадь сечения якоря

Из второго закона Ньютона выражаем  $x''(t)$ :

$$x''(t) = \frac{\mu_0 I^2 N^2}{2\rho L_{\text{як}} \left[ d_{\text{в}} + \frac{l_{\text{ж}}}{\mu} \right]^2}$$

Где  $\rho$  – плотность железа (8000 г/см<sup>3</sup>),  $L_{\text{як}}$  – длина якоря (2см)

С учетом того что при движении якоря воздушный зазор меняется, выражение преобразуется до:

$$x'' = \frac{\mu_0 I^2 N^2}{2\rho L_{\text{як}} \left[ d_0 + \frac{l_{\text{ж}}}{\mu} - x(t) \right]^2}$$

Решая данное уравнение в MathCad, получаем быстродействие клапана равное 1,6 мс

Это приближенная оценка возможного быстродействия, поскольку не учитывается сопротивление возвратной пружины и приведены условные возможные значения параметров, различные для разных марок клапанов и их блоков питания, а также не учтен фронт нарастания тока в катушке клапана. Эта оценка близка к реальному значению для самых быстрых типов серийных клапанов. В [2] описана конструкция клапана разработки ИЯФ с рекордным быстродействием  $\sim 0,1-0,3$  мс.

Управление напуском газа соленоидальным клапаном осуществляется двумя способами: изменением давления газа на входе в клапан или изменением диаметра микродиафрагмы на выходе. Это недостаточно удобно в эксперименте, поэтому там, где не требуется высокое быстродействие, удобнее использовать контроллер расхода газа.

## 2.2 Контроллер расхода газа

Данный регулятор расхода газа (рис. 2.2.1) состоит из управляющей электронной платы, сенсора и клапана.

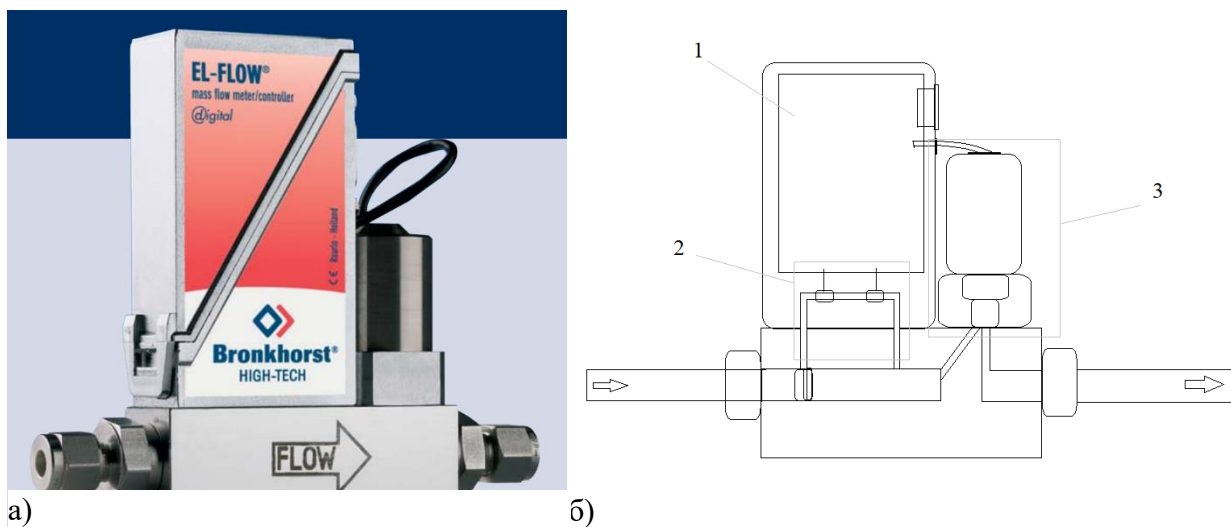


Рис. 2.2.1. Контроллер расхода газа:

а) фото;

б) схема: 1- электронная плата; 2 – сенсор, 3 – клапан

### Электронная плата

Управляющая электронная плата имеет микроконтроллер, который, будучи подсоединенным к сенсору и клапану, способен измерять и автоматически регулировать массовый расход газа через прибор.

У платы присутствует как аналоговое подключение, так и цифровое.

### Сенсор

Состоит из тонкой капиллярной трубки и двух терморезистивных элементов, являющихся нагревателями.

### Клапан

Под корпусом клапана расположена катушка, внутри которой установлен подвижный сердечник. Заостренный конец сердечника в отсутствие тока закрывает выходное отверстие клапана, что делает клапан нормально-закрытым.

### Принцип работы

В прибор поступает поток газа. Он проходит через специальный делитель потока газа. Малая отделенная часть потока проходит через сенсор и

нагревается, получая тепло от термоэлементов. Разность температур, измеренных на обоих концах сенсора, по закону сохранения энергии, прямо пропорциональна массовому расходу газа. Делитель потока газа устроен таким образом, что расход газа в капиллярной трубке пропорционален общему расходу газа сквозь весь прибор.

Полученный с сенсора сигнал сверяется с установленным значением расхода газа на плате, и, при несоответствии этих значений, на катушку клапана подается ток, что приводит в движение сердечник, который поднимается и тем самым регулирует площадь выходного отверстия клапана. За короткое время управляющая плата регулирует подаваемый на катушку ток таким образом, чтобы полученное значение расхода газа соответствовало с заданным.

### **2.3 Сравнение способов управления потоком газа**

Соленоидальные клапаны обеспечивают высокое быстродействие около 1 – 3 мс, просты в использовании и производстве, дешевые. Однако не обеспечивают измерения и контроля величины потока газа во время импульса.

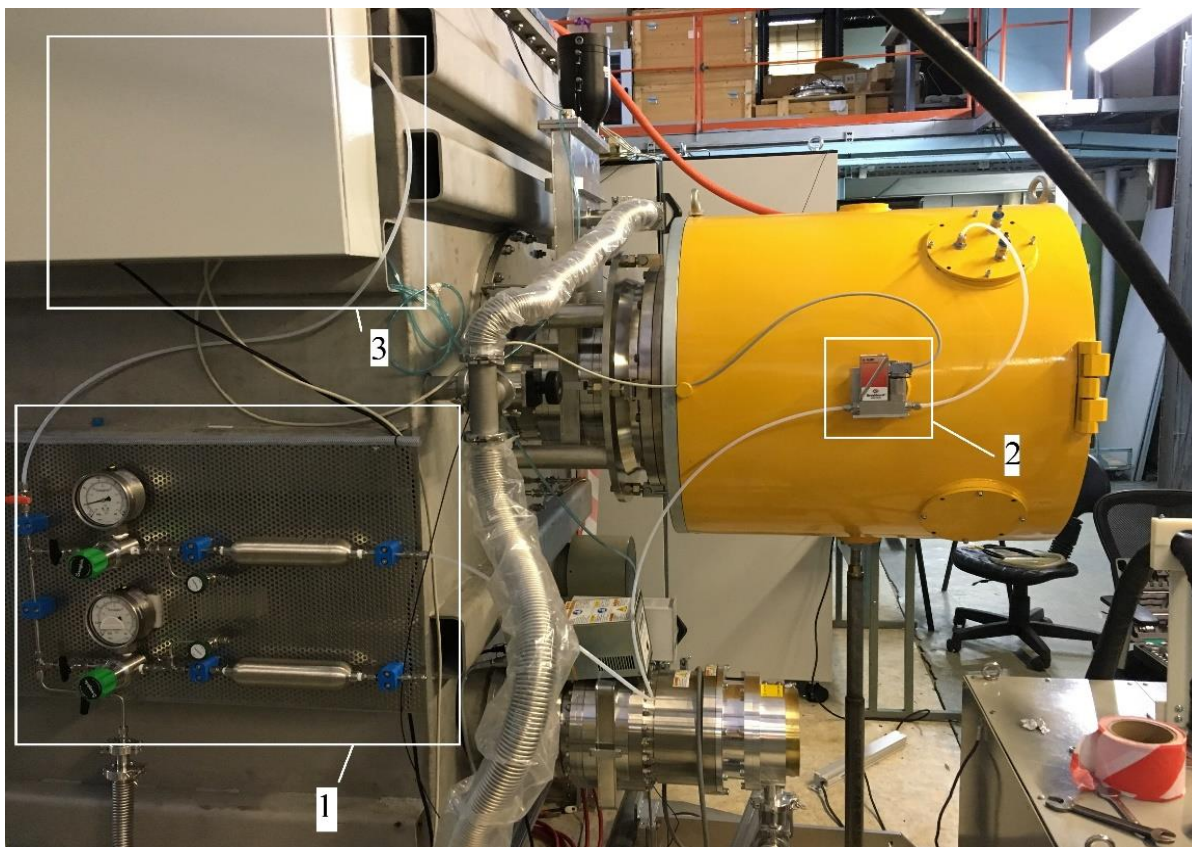
Быстродействие контроллеров расхода газа в разы ниже (порядка 0,1с), они дорогие и сложны по строению. Однако дают возможность измерять поток и дистанционно менять уставку потока или делать процесс программируемым. В последнем случае можно обеспечивать изменение потока газа отслеживая по обратной связи ход эксперимента, что особенно важно в современных, длинноимпульсных и даже стационарных установках УТС.

## **3. Эксперимент**

### **3.1 Описание установки**

Измерения проводились на системе подачи водорода в ВЧ-разрядный источник плазмы атомарного инжектора. (рис 3.1.1, 3.1.2)





3.1.1. Система подачи газа: 1 - источник потока газа; 2 - контроллер расхода газа; 3 - подключение к компьютеру, регулирующему контроллер

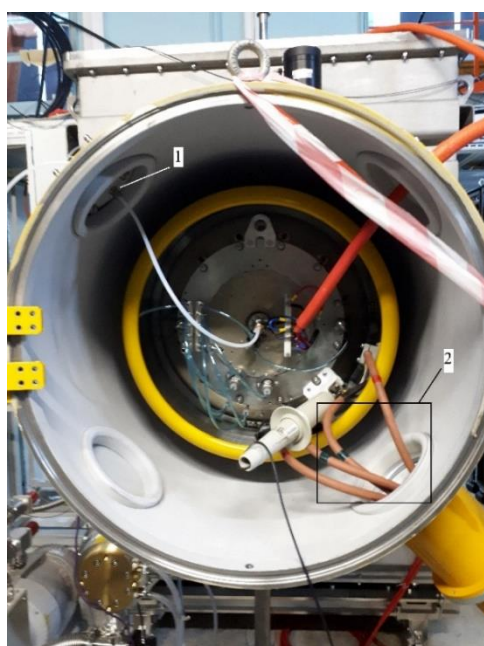


Рис. 3.1.2. Система подачи газа: 1 – пластиковая трубка с газом обеспечивает электроизоляцию на 80 кВ; 2 – фидер подачи мощного ВЧ-сигнала питания разряда в источнике плазмы

Газ подается на контроллер расхода газа и после него попадает в источник плазмы инжектора.

Атомарный инжектор – устройство формирующее пучок быстрых нейтральных частиц с высокой энергией в плазму для создания плазмы с термоядерными параметрами[3]. В инжектор поступает поток газа (водорода), который ионизуется в мощном разряде. Созданная плазма попадает на электрод (сетчатую пластину), на который подается высокое ускоряющее напряжение. Формируются пучки положительных ионов, которые ускоряются в электрическом поле между первой пластиной с высоким

напряжением и последующей пластиной, с поданным на нее низким напряжением. После этого ионы попадают в облако газа, где при обмене электронами, обратно нейтрализуются. Нейтральные частицы, в отличие от ионов, способны попасть в вакуумную камеру токамака сквозь магнитные поля, и передать плазме свою энергию.

## 3.2 Измерения

С помощью специальной программы FlowPlot можно регулировать поток газа контроллером расхода газа.

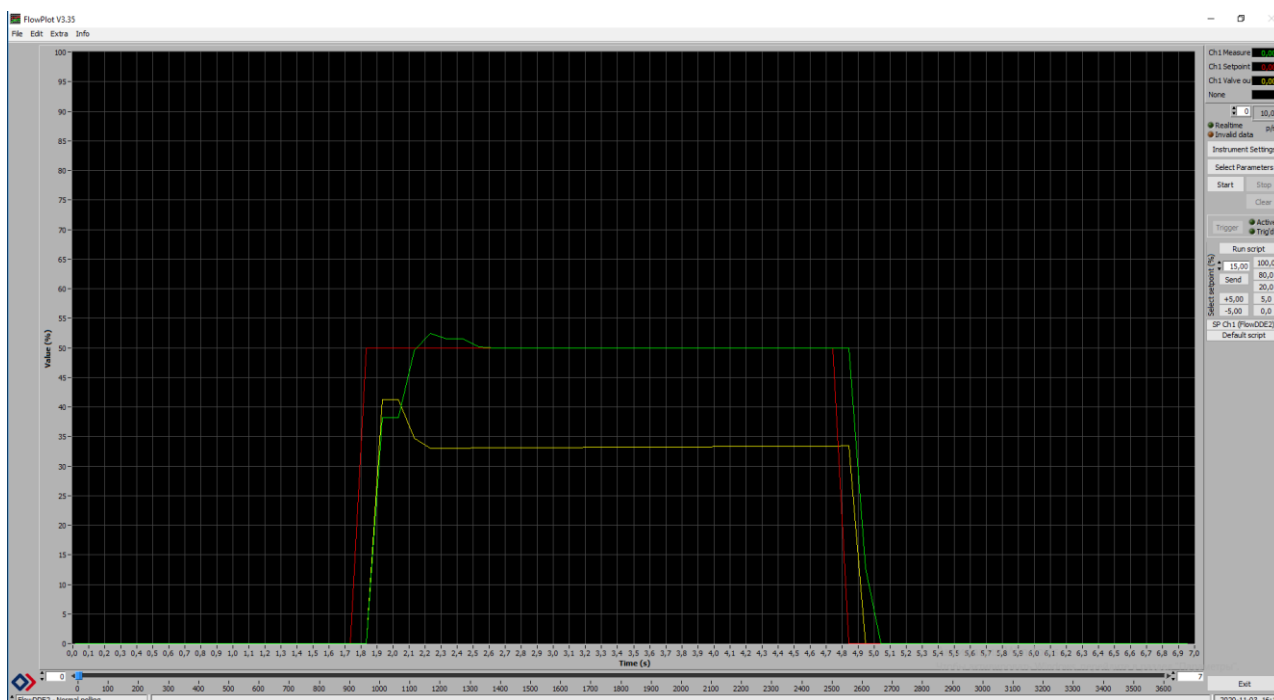


Рис. 3.2.1. Интерфейс программы. Графики по цветам: красный график – установленное пользователем значение расхода газа в процентах от поступающего в прибор; зеленый – измеренное значение расхода газа на выходе клапана; желтый – ток, подаваемый на катушку клапана.

Как видно по графикам, для того чтобы расход газа стал равен заданному значению, необходимо некоторое время. По этому времени определяем быстродействие прибора.

$$t_6 = t_2 - t_1$$

$t_6$  – быстродействие;  $t_1$  – время начала действия прибора;  $t_2$  – время, при котором расход газа достигает уставки

По графику  $t_1 = 1,83$  с;  $t_2 = 2,62$  с

Быстродействие равно 0,79 с

Также в некоторых случаях расход газа не достигает заданного пользователем программы значения (рис 3.2.2.). Такое возможно при низком, т.е. недостаточном давлении на входе в прибор.



Рис. 3.2.2.

Найдем время, за которое поток газа стал стабилен.

$$t_{62} = t_3 - t_1$$

$t_3$  – время, при котором поток газа стабилизируется

По графику,  $t_1 = 2,02$  с;  $t_3 = 2,84$  с.

Быстродействие равно 0,84с.

Также в программе возможно изменение некоторых параметров, влияющих на быстродействие прибора (рис 3.2.3), например первый параметр – быстрота

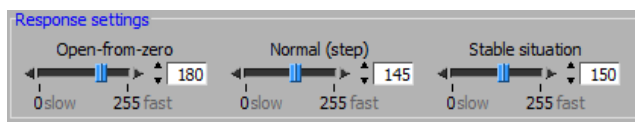


Рис. 3.2.3. панель настроек

открывания клапана прибора: при его увеличении прибор будет работать быстрее, однако будут

происходить большие скачки и колебания расхода газа до того как он достигнет значения уставки. Второй параметр отвечает за то, как часто прибор будет сверяться со значением уставки. И третий параметр отвечает за скорость стабилизации прибора на нужном значении.

#### **4. Заключение**

В ходе выполнения работы были изучены приборы, предназначенные для управления импульсным потоком газа: соленоидальный клапан и контроллер расхода газа. Были разобраны их устройство и принцип работы, а также произведено сравнение между ними. Теоретически рассчитано быстродействие соленоидального клапана. Произведены измерения и экспериментально найдено быстродействие контроллера расхода газа.

#### **5. Список литературы**

1. Яковлев В. И. Классическая электродинамика: Часть 1 // Электричество и магнетизм // Изд. 2-е, испр. и доп. / М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016. 228 с.
2. Деревянкин Г., Дудников В., Журавлев П. Электромагнитный затвор для импульсного напуска газа. // ПТЭ— 1983— N.5.—С.168.
3. Семашко Н. Н., Владимиров А. Н., Кузнецов В. В. и др. Инжекторы быстрых атомов водорода / М.: Энергоиздат, 1981. 5 с.