

ПРОСТАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОРОТКИХ ГАЗОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

В. А. Батулин, вед. науч. сотр.; А.Ю.Карпенко, мл. науч. сотр.;

С. В. Колинко, гл. инженер

Институт прикладной физики НАН Украины, г.Сумы

ВВЕДЕНИЕ

При различных исследованиях широкое применение находят сверхзвуковые нестационарные газовые потоки. Так, в частности, принцип действия источника нейтральных и ионизированных газовых кластеров, разрабатываемого в институте прикладной физики НАН Украины, основан на генерации затравочных частиц, которые будут служить центрами дальнейшей конденсации нейтралов при очень сильном охлаждении газа. Такое охлаждение происходит при сверхзвуковом расширении газа из сопла. Для этих целей применяется быстродействующий импульсный клапан, с помощью которого получают поток газа, расширяющегося из сопла. К клапану предъявляется ряд требований, таких, как высокая крутизна переднего фронта газовых импульсов; длительность газового импульса $\sim 120-180$ мкс; частота посылки импульсов 1-10 имп./с; стабильность во времени параметров газового импульса. В связи с этим необходим строгий контроль характеристик газовых импульсов, получаемых клапаном.

Существует множество способов детектирования и контроля газовых струй. Так, в работе [1] авторы использовали пироэлектрический детектор газа, изготовленный из плёнки поливинилденфторида (ПВДФ) толщиной 28 мкм и диаметром 3 мм, алюминированной с обеих сторон. Малая постоянная времени детектора обеспечивалась эффективным теплоотводом, находящимся в контакте с задней стороной детектора. Получаемый сигнал регистрировался при помощи цифрового осциллографа. Применение в качестве детектора молекулярного пучка пироэлектрического приёмника описывается и в других работах [2, 3].

Иной способ измерения временных характеристик клапана описан в работе [4]. Авторы регистрировали сигнал флуоресценции струйно–охлаждённых молекул индонола. Они использовали лазер на родамине 6Ж в этаноле, который накачивался излучением второй гармоники АИГ–лазера. Лазер на красителе излучал импульсы наносекундной длительности, которые направляли на пучок охлаждённых молекул с переменной задержкой относительно газового потока, что вызывало флуоресценцию индонола.

Наиболее широкое применение для измерения импульсов давления газа с малой длительностью нашли быстродействующие импульсные манометры с датчиком давления газа в виде специально изготовленных ионизационных преобразователей.

Конструкции таких манометров уже довольно давно встречаются в литературе [5,6] и представляют собой лампу трёхэлектродного типа. Анод и ионный коллектор лампы выполнены в виде прямоугольных пластинок из молибдена размером $2 \times 5 \times 0,1$ мм, расположенных параллельно с зазором в 0,5 мм, а посередине между ними расположена катодная нить из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм. Особенности работы ионизационного манометра такой конструкции в плотных газовых струях описаны в [7]. Использование быстродействующих ионизационных манометров для измерения параметров газовых струй встречается и в других работах [8, 9, 10].

Для улучшения временного разрешения в ионизационном датчике необходимо обеспечить минимальное расстояние между электродами. Так, например, расстояние, равное ~ 1 мм, соответствует временному разрешению ~ 1 мкс.

Ионизационный преобразователь ПМИ-10-2, который выпускается промышленностью и входит в состав вакуумметра ВИТ-3, вполне удовлетворяет условиям быстродействия [11]. Ранее он использовался для детектирования молекулярного пучка [12]. В работе [11] описывается быстродействующий импульсный манометр, использующий этот

преобразователь, для которого авторам пришлось самостоятельно разрабатывать предусилитель, усилитель, стабилизатор тока эмиссии и блоки питания к ним.

В данной работе мы хотели показать более простую методику измерения коротких газовых импульсов при помощи манометра, собранного на основе датчика давления ПМИ-10-2, подвергнувшегося небольшой доработке и стандартно подключенного к вакуумметру ВИТ-3.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

В качестве быстродействующего импульсного манометра нами был использован ионизационный преобразователь ПМИ 10-2, который как было отмечено выше вполне подходит для измерения импульсов длительностью в десятки микросекунд. Для обеспечения прохождения газового потока через зону ионизации датчика его металлический корпус был укорочен на 20 мм. На рис. 1 показана фотография лампы ПМИ- 10-2 с обрезанным корпусом.



Рисунок 1 - Стандартная лампа ПМИ 10-2 с укороченным корпусом

Для измерения ионного тока манометрического преобразователя нами были проведены исследования возможности применения усилителя постоянного тока (УПТ) вакуумметра ВИТ-3. Схема этого усилителя в целом представляет собой трёхкаскадный усилитель постоянного тока, охваченный 100% последовательной обратной связью по напряжению. Первый каскад усилителя является электрометрическим и построен на лампе ЭМ-8. На вход электрометрической лампы посредством переключателя поддиапазонов вакуумметра подключаются резисторы номиналом от 22 кОм до 220 МОм в зависимости от множителя шкалы. Экспериментально установлено, что постоянная времени УПТ сильно зависит от положения переключателя поддиапазонов измерений. На вход усилителя вакуумметра с генератора Г5-63 через резистор в 1 МОм подавался сигнал прямоугольной формы с длительностью импульса 10 мкс. Сигнал с выхода усилителя (контакты 3,4 разъёма «Запись» вакуумметра ВИТ-3) и на входе после резистора регистрировался двухканальным запоминающим осциллографом С 18-14. При этом использовалось два положения переключателя шкалы диапазонов прибора с множителями 10^{-5} и 10^{-6} , которые соответствуют величине входных резисторов 22 кОм и 220 кОм.

Как видно из осциллограмм на рис.2., искажения фронтов сигналов происходят за счёт интегрирования на ёмкости входной цепи усилителя (рис.2.2, рис.2.4), а на выход сигнал передаётся без существенных искажений (рис.2.3, рис.2.5). На поддиапазоне прибора 10^{-5} постоянная времени входных цепей усилителя приблизительно равна 2мкс (см. рис.2). Она определяется сопротивлением и ёмкостью входной цепи, а значит, входная ёмкость $C_{вх} \approx 100\text{пФ}$. При переключении усилителя на другие множители шкалы увеличиваются номиналы входных резисторов. Так как постоянная времени прибора $\tau = R_{вх} \times C_{вх}$, то с каждым переключением она будет возрастать на порядок (см. рис.2.4). Таким образом, видно, что УПТ вакуумметра ВИТ-3 способен удовлетворительно отображать импульсы

длительностью в десятки микросекунд на пределе измерения 10^{-5} , что вполне соответствует условиям эксперимента.

На результаты измерений при помощи быстродействующего импульсного манометра сильно влияет стабильность тока эмиссии датчика. В состав вакуумметра ВИТ-3 входит стабилизатор тока эмиссии катода ионизационного преобразователя.

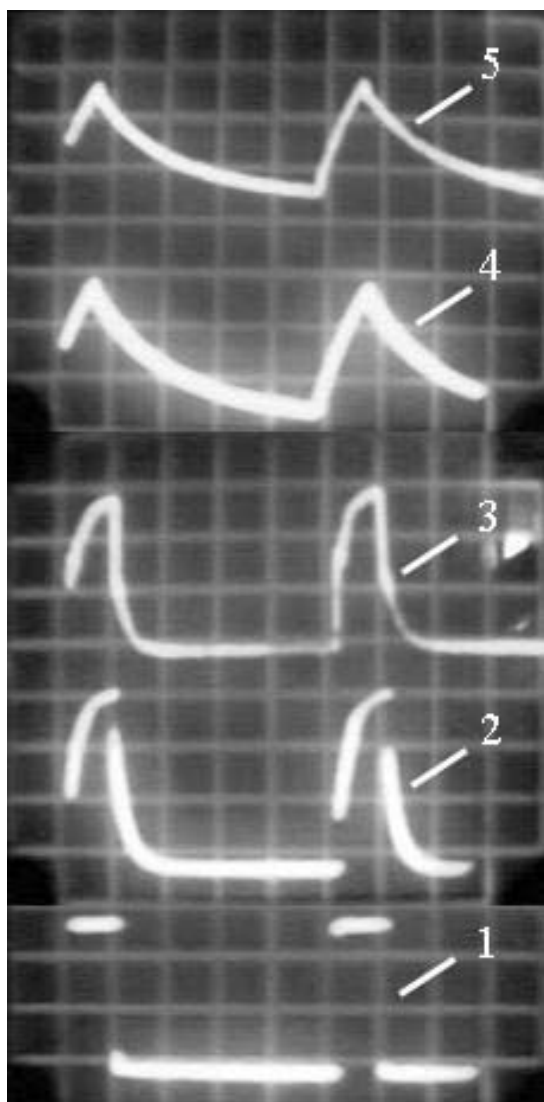


Рисунок 2 - Осциллограммы сигналов, полученные при исследовании характеристик усилителя постоянного тока, вакуумметра ВИТ-3 (масштаб развёртки по времени 10 мкс/деление). 1 – сигнал, подаваемый с генератора импульсов; 2,3-форма сигнала на входе усилителя после резистора 1МОм и на выходе усилителя соответственно (предел переключателя диапазонов 10^{-5}); 4,5-форма сигнала на входе усилителя после резистора 1МОм и на выходе усилителя соответственно (предел переключателя диапазонов 10^{-6})

Схема рассчитана на стабилизацию тока 0,1 мА, для преобразователя ПМИ-10-2 изменение тока эмиссии катода не превышает 2%, что вполне приемлемо для получения стабильных результатов [11].

В качестве источника молекулярного пучка использовался быстродействующий импульсный газовый клапан, применяемый для получения кластерных пучков. Его конструкция на основе ударно-бойкового механизма, характеристики и работа подробно описаны в [13]. Клапан питался от генератора импульсов Г5-63, сигнал которого усиливался схемой на полевых транзисторах. Длительность импульсов питания варьировалась в пределах от 1,5 мкс до 2,5 мкс, а их амплитуда от 100 В до 180 В. Для снятия осциллограмм токовых импульсов обмотка катушки газового клапана подключалась через резистор сопротивлением 0,38 Ом. Эксперимент проводился в вакуумной камере, которая откачивалась до давления 5×10^{-4} Па при помощи диффузионного насоса со скоростью 2500 л/с. В насос был залит полифениловый эфир $C_{20}H_{22}O_4$ с низким давлением насыщенных паров. Сигнал усиленного газового импульса с выхода УПТ вакуумметра и сигнал импульса тока, питающего катушку клапана, регистрировался двухлучевым запоминающим осциллографом С 8-14.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерение коротких газовых импульсов проводилось в условиях, когда газовый клапан был помещен в вакуумную камеру. В качестве газа использовался азот при давлениях до 0,5 МПа. Манометрический датчик располагался на расстоянии 5 мм от выходного отверстия клапана так, чтобы поток газа проходил через область ионизации между анодом и коллектором. Интенсивность газовых импульсов измерялась в режиме одиночных импульсов для того, чтобы нить накала ионизационной лампы успевала вернуться в нормальное состояние после броска тока эмиссии, вызванного импульсом газа. Длительность зарегистрированных газовых импульсов на полувысоте менялась от 30 мкс до 150 мкс и зависела как от величины и длительности импульса тока, питающего катушку, так и от давления на входе в клапан.

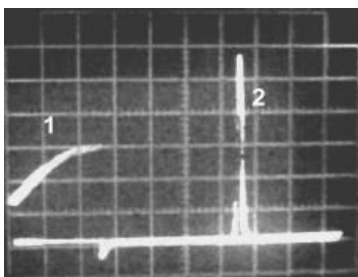


Рисунок 3 - Осциллограмма импульса тока (1), питающего обмотку клапана, при длительности 1,5 мс и амплитуде 110 В и осциллограмма газового импульса (2), зарегистрированного манометром. Давление на входе клапана 0,2 МПа. Масштаб развертки по напряжению 0,5 В/деление, по времени 0,5 мс/деление

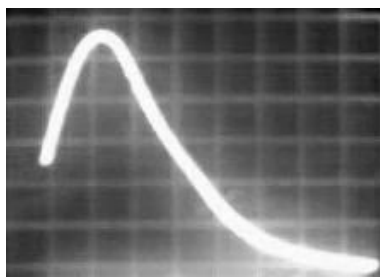


Рисунок 4 - Осциллограмма газового импульса при давлении на входе клапана 0,2 МПа. Масштаб развертки по напряжению 0,5 В/деление, по времени 20 мкс/деление

На рис. 3 показана форма импульса тока длительностью 1,5 мс и осциллограмма газового импульса, зарегистрированного манометром.

А на рис. 4 тот же газовый импульс, но с другим масштабом развёртки осциллографа. Меняя длительность запускающего импульса клапана, а также давление перед клапаном можно варьировать формой газового импульса. Следует отметить, что при регистрации газовых импульсов с высокой интенсивностью возможна погрешность в измерениях, связанная с уменьшением тока эмиссии катода из-за его охлаждения потоком газа [14]. Этот эффект наглядно демонстрирует рис. 5.

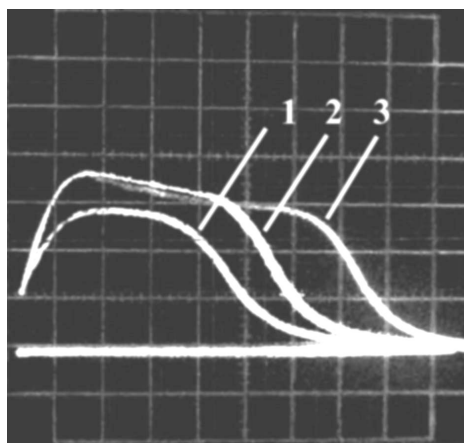


Рисунок 5 - Формы газовых импульсов, полученные при давлении газа 0,5 МПа и разной амплитуде импульсов, питающих клапан: 1 - 140 В, 2 - 160 В, 3 - 180 В

На нем показаны формы газовых импульсов, полученные при давлении газа 0,5 МПа и разной амплитуде импульсов, питающих клапан. Видно, что с увеличением напряжения интенсивность импульсов возрастает слабее и их форма становится более затянутой.

Все результаты опытов были получены в единицах напряжения. Для получения более точной информации в единицах давления либо для измерения концентрации газа необходима градуировка быстроедействующего импульсного манометра.

ВЫВОДЫ

Для измерения характеристик коротких газовых импульсов, получаемых из сверхзвукового сопла в вакууме, вполне пригоден манометрический преобразователь ПМИ-10-2. В качестве усилителя сигнала и стабилизированных источников питания анода и катода можно использовать стандартно подключенный к датчику вакуумметр ВИТ-3. При этом он способен вполне удовлетворительно отображать импульсы тока длительностью от 10 мкс на пределе измерения, равном значению 10^{-5} . Увеличить пространственное разрешение датчика можно путём удаления одного из двух коллекторных электродов, а именно, находящегося между основанием лампы и анодом.

Чувствительность манометра может быть повышена обезгаживанием электродов и увеличением тока эмиссии. Необходимо помнить, что ионизационная лампа позволяет производить корректные измерения только тогда, когда плотность газа в сверхзвуковой струе относительно невелика. Это ограничение может быть связано с такими эффектами, как частичный унос газа из объёма датчика [15], снижения эмиссии катода из-за его остывания в потоке [14], наличием столетовского максимума коллекторного тока и

образованием на электродах лампы скачков уплотнения [6]. Свой вклад в погрешность измерений могут вносить и температурные эффекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Corat E. J., Trava-Airoldi V.J. // Rev. Sci. Instrum., 1990. - V.61, - N3. - P.1068
2. Макаров Г.Н. // ЖЭТФ. - Том123, вып 2. - 2003. - С276.
3. Ambartzumian R. V., Dorozhkin L. M., Makarov G. N., Poretzky A.A, and. Chajanov B. A. // Appl. Phys. - 1980. – V.22. P/409.
4. Мазуренко М.И., Петухов В.В., Поводайло П.А. и др.// ПТЭ. - 2002. - №2. - С.152.
5. Schulz E. J., Phelps A. V. // Rev. Sci. Instr., 1957. - V.28. - P.1051.
6. Димов Г. И. // ЖТФ. -1969. - Т.39, № 4. - С.681.
7. Кузнецов О.С., Репин П.Б., Савченко Р.В., Селявский В.Т. // ПТЭ. - 2001. - №2. - С.140.
8. Джентри, Джайнс // Приборы для научных исследований. - 1978. - №5. - С.31.
9. Proch D., Trickl T. // Rev. Sci. Instrum. 1989. -V.60. - №4. - P.713.
10. Кейзер, Дембинский, Джон // Приб. научн. исслед. 1980. - №4. - С.19.
11. Барашкин С. Т., Сыромятников С. Н., Тютюнник О.И., Породонов Б.Т., Кошелев Ю. М. // ПТЭ. 1989. - №3. - С.173.
12. Зарвин А. Е., Шарфутдинов Р.Г. // Динамика разряженных газов. - Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1976. - С.19.
13. Батурин В.А., Карпенко А.Ю., Литвинов П.А., Пустовойтов С.А., Чемерис И.И. // ПТЭ, 2004. - №1.
14. Хемфис М.Л., Хванг Ч.С. // Приб. научн. исслед. 1984. - №10. - С.142.
15. Физические измерения в газовой динамике и при горении / Под ред. Ю.Ф. Дитякина. - М.: Изд-во ИЛ., 1957.

Поступила в редакцию 8 июля 2004 г.