
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.527.4/.5;534.222.2

ПАРОВОДЯНОЙ ГЕНЕРАТОР КОЛЕБАНИЙ ДАВЛЕНИЯ© 2024 г. Д. А. Жебынев^{1, *}, А. Г. Чукаев¹, С. С. Панин¹, А. М. Фельдман¹¹Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: zdal@nwmtec.ac.ru

Поступила в редакцию 20.12.2023 г.

После доработки 24.03.2024 г.

Принята к публикации 19.04.2024 г.

Приведены результаты экспериментального исследования пароводяного струйного инжектора в режиме генерации нелинейных колебаний давления релаксационного характера. Обнаружены высокочастотные затухающие скачки давления на переднем фронте кривой колебаний. Показано, что при возбуждении колебаний происходит смена режима работы инжектора от сверхзвукового к дозвуковому. Дано объяснение процессу колебаний давления за время совершения цикла. При давлении рабочего пара 8–10 бар получен размах колебаний 5–6 бар на частотах 5–20 Гц.

Ключевые слова: пароводяной инжектор, нелинейные колебания давления, взаимодействие потоков с разными фазами, конденсация струи пара, генерация колебаний давления

DOI: 10.31857/S0235711924040133, **EDN:** OYFIZ5

Пароводяной инжектор относится к пароводяным струйным аппаратам, в которых взаимодействие двух разнофазных потоков сопровождается передачей кинетической энергии от рабочего потока к инжектируемому, в результате чего изменяются состояние и физические свойства вновь образующегося двухфазного потока.

Известно, что при взаимодействии рабочего потока (водяного пара) с инжектируемым (водой) при полной конденсации пара возможно превышение давления образующегося потока над давлением пара, что нашло широкое применение этого эффекта в паровых инжекторах [1–3].

Перемешивание пара с водой используется в теплообменных устройствах для эффективного нагрева воды с очень высоким коэффициентом теплоотдачи [4, 5]. Известны и другие варианты использования таких устройств [2].

В настоящей статье исследуется пароводяной инжектор, в котором процессы при смешении пароводяной смеси, сопровождающиеся скачками давления—конденсации, применены для генерирования нелинейных колебаний давления в выходящем потоке сконденсированной и нагретой воды. Такие колебания давления с высокой амплитудой в горячей воде можно использовать, например, для обработки пластов при добыче сверхвязкой нефти [6].

Исследования процесса возбуждения колебаний проводили на специальном стенде (рис. 1). Работа стенда осуществляется следующим образом: пар из парогенератора 1, пройдя через сопло Лаваля 3, разгоняется до сверхзвуковой скорости и захватывает поступающую воду из водопроводной сети. Образующаяся при этом двухфазная

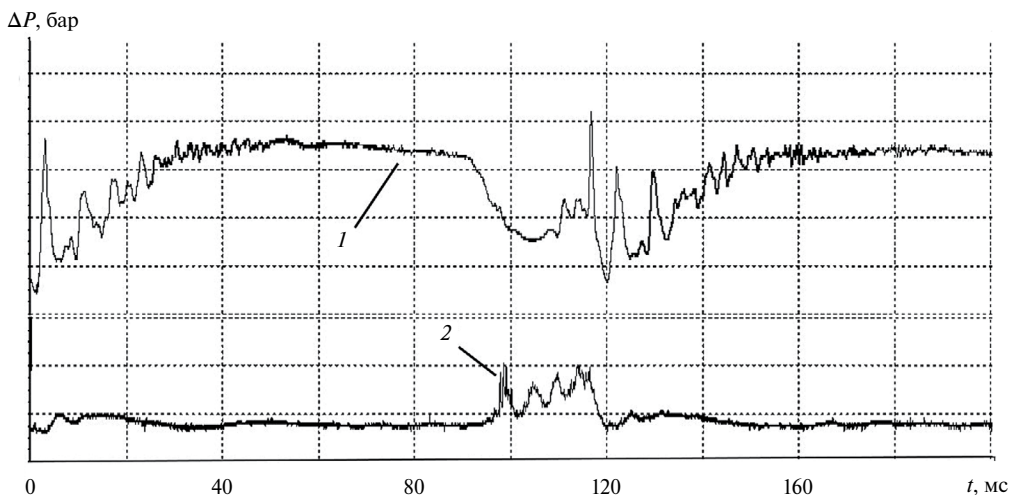


Рис. 2. Характерные особенности колебаний давления ΔP на выходе диффузора 1 и в магистрали воды 2. Цена деления по вертикали 2 бара.

На рис. 2 представлены наиболее характерные фрагменты колебаний давления, возбуждаемых за диффузором, а также колебаний давления в магистрали подачи воды для случая наилучших по устойчивости колебаний.

Полученные осциллограммы отражают общую картину физических процессов, происходящих в пароводяном струйном инжекторе [1].

Восходящая ветка осциллограммы колебаний давления на выходе из диффузора иллюстрирует развитие процесса на начальной его стадии, когда при большой разнице в скоростях смешивающихся потоков размер образующихся капелек очень мал, а профиль скорости смеси неравномерен. При существенной разнице температур потоков (более 120°C), при их соприкосновении, начинает происходить конденсация пара. По мере продвижения воды и пара вдоль камеры смешения и обмена импульсами между ними теряется энергия на смешение, относительная скорость движения фаз снижается, профиль скорости смеси выравнивается и давление возрастает.

Горизонтальный участок осциллограммы соответствует времени перехода структуры потока в камере смешения от мелкокапельной к пузырьковой или пенной. Такой процесс происходит при постоянном давлении, равном давлению насыщения двухфазной среды [1–3, 5].

При движении потока по камере смешения паросодержание его уменьшается (нисходящая ветвь осциллограммы), заканчивается конденсация основной части пара [1], а поскольку сконденсировавшийся пар занимает меньший удельный объем, чем до конденсации, давление в камере падает [5].

Таким путем можно объяснить низкочастотный ход изменения давления в рабочей камере согласно классическим представлениям о работе парового инжектора [1–3].

Однако в случае возбуждения колебаний процессы взаимодействия паровой и жидкой фаз имеют более сложный характер. В камере смешения, когда паровая фаза еще полностью не сконденсировалась, падает местная скорость звука. Под влиянием геометрического, теплового и расходного воздействий скорость потока смеси замедляется и уменьшается до дозвуковой, в результате чего возникает скачок давления, который на осциллограмме регистрируется в виде острого пика.

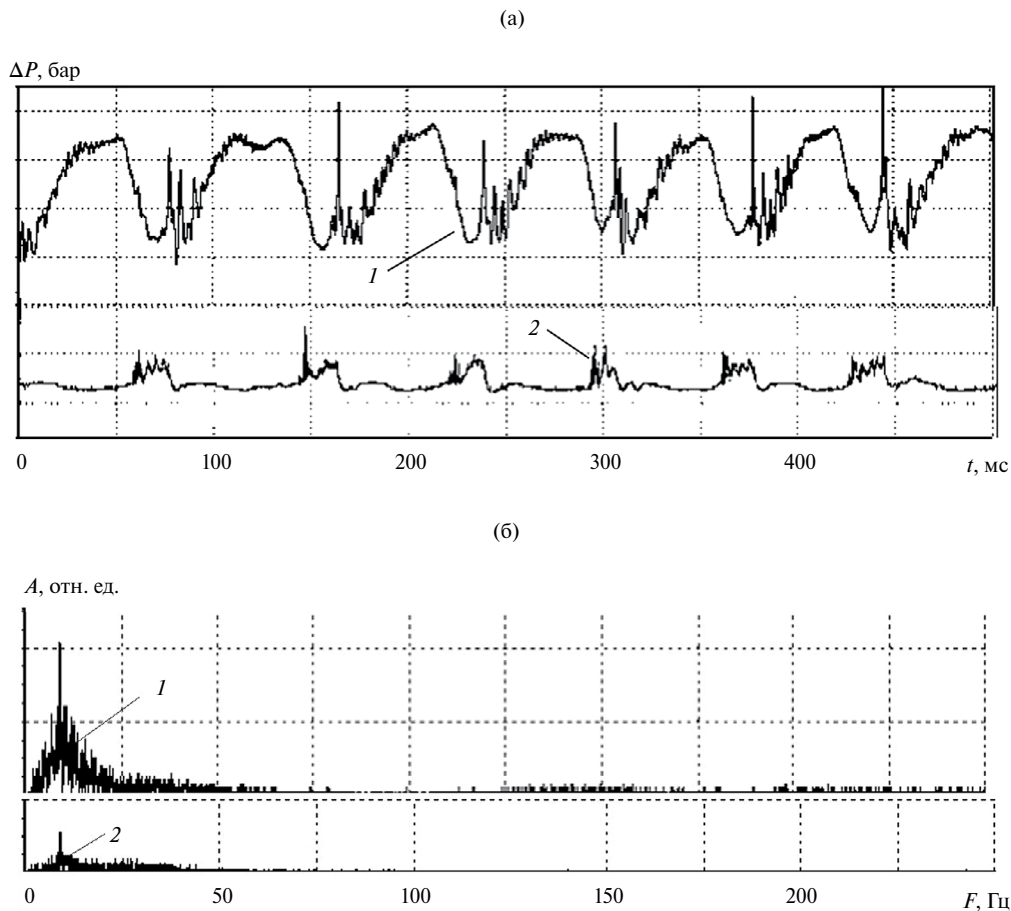


Рис. 3. (а) — Кривые колебаний давления ΔP на выходе устройства 1 и в магистрали воды 2; (б) — их спектры соответственно 1 и 2; A — амплитуда колебаний. Цена деления по вертикали на рис. За составляет 2 бара.

Последующие за ним затухающие пики давления отражают сложный характер процессов взаимодействия фаз в потоке и всего процесса конденсации. Например, процесса схлопывания паровых полостей и скоплений пузырьков.

Увеличение противодавления приводит к смещению скачка давления вверх по потоку и соответственно к увеличению частоты и устойчивости колебаний, связанных с повышением роли обратной связи.

Механизм возбуждения, возникающих при этом колебаний, можно объяснить изменением режима течения двухфазного потока, на что указывают импульсы давления в магистрали подачи воды (рис. 2). Эти импульсы положительные и имеют форму, аналогичную, возникающим на переднем фронте низкочастотных импульсов колебаний давления. По-видимому, этот цуг высокочастотных импульсов представляет собой ударную волну, которая возвращается к соплу и перекрывает подачу воды в камеру смешения и таким образом изменяет режим работы сопла, переводя его в дозвуковой. Это и есть, по существу, проявление обратной связи.

После отражения этой волны сопло вновь возвращается в сверхзвуковой режим работы. При этом поток пара догоняет отраженную ударную волну и взаимодействует

с водой или двухфазной смесью, находящейся в камере смешения, поскольку магистральная вода, как более инерционная среда, отстает от потока пара. Таким образом, при переходе сопла из дозвукового режима в сверхзвуковой возможен прямой контакт пара с водой. В процессе такого контакта также возможно возбуждение коротких импульсов давления согласно данным работы [7], что дополнительно может свидетельствовать о сложном характере процесса возбуждения колебаний в паровом инжекторе.

Двигаясь вниз по течению, отраженная ударная волна, вероятно, проталкивает, скопившуюся в устье камеры смешения жидкость в напорное сопло, завершая период автоколебательного цикла и восстановление исходного состояния системы.

На рис. 3 представлены для наглядности кривые колебаний давления в другом масштабе, а также их спектры.

Из рис. 2 и 3 видно, что кривые имеют релаксационный характер и можно предположить, что в возбуждении колебаний участвуют два процесса: один генерирует релаксационные импульсы низкой частоты, второй — цуг затухающих импульсов высокой частоты, но повторяющихся с той же периодичностью, что и первый. Это свидетельствует о том, что между этими процессами существует взаимосвязь, обусловленная взаимодействием двух потоков разных фаз.

Следует также отметить, что в других комбинациях сопла и камеры смешения были получены колебания, в которых высокочастотные пики были смещены по длине низкочастотных импульсов, что может свидетельствовать об изменениях мест возникновения скачков уплотнения.

В экспериментах, результаты которых представлены на осциллограммах, размах колебаний давления находился в пределах 5–6 бар в диапазоне частот 5–20 Гц при максимальной температуре воды на выходе порядка 95°C.

Выводы. Показана возможность использования пароводяного инжектора в качестве генератора нелинейных колебаний при установленном соотношении площадей критического сечения сопла Лавала и напорного сопла. При этом настройка режима с устойчивыми автомоделными колебаниями осуществляется смещением скачка давления-конденсации вверх по потоку подбором необходимого коэффициента инжекции.

На переднем фронте колебаний давления обнаружены высокочастотные затухающие импульсы колебаний, вероятнее всего, связанные с уменьшением скорости двухфазного потока до местной скорости звука через скачки уплотнения — конденсации.

Полученные осциллограммы колебаний давления отражают основные физические процессы, протекающие в инжекторе. Дальнейшие исследования этих процессов дадут возможность более детального их описания.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергоиздат, 1981. 472 с.
2. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 408 с.
3. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоиздат, 1989. 352 с.
4. Trela M., Kwidziński R., Głuch J., Butrymowicz D. Analysis of application of feed-water injector heaters to steam power plants // Polishmari — time research. 2009. V. S1. P. 64.

5. *Фисенко В.В.* Сверхзвуковой струйно-форсуночный аппарат // Статья НПО “Энергоавтоматика”, 2006. Интернет ресурс: [proema.ru>text/5.htm3](http://proema.ru/text/5.htm3)
6. *Прощекальников Д.В., Кульментьева Е.И., Рамазанов Р.Р., Солодов С.Д., Гурьянов А.И.* Оценка эффективности гидроимпульсного воздействия на призабойную зону скважины // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 22. С. 131.
7. *Алексеев М.В.* Динамика контакта пар-жидкость и пульсации давления при полной конденсации пара в трубе. Автореферат: Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск: Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2004. 20 с.