

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ ТРУБЫ ПРИ ВЗРЫВЕ МИКРОПРОВОДНИКА

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
Октябрьский пр., 43-а, г. Николаев, 54018, Украина, dpte@iipr.com.ua*

Введение

В ряде технологий, использующих в качестве источника энергии электрический взрыв микропроводника, применяются полиэтиленовые патроны [1]. Одной из таких технологий является развальцовка труб в решётках теплообменных аппаратов. В этом случае в трубу помещается заполненный водой полиэтиленовый патрон цилиндрической формы, на оси симметрии которого находится микропроводник. После электровзрыва микропроводника формируется заполненная плазмой полость – канал разряда. Полость, интенсивно расширяясь (запасаемая энергия электровзрыва может достигать 40 кДж), генерирует ударную волну, которая воздействует на стенку трубы и деформирует ее. Но интенсивное движение жидкости вдоль оси трубы приводит к быстрому падению давления в жидкости и, следовательно, к снижению качества получаемого соединения. Ограничив осевую скорость расширения воды, например при помощи установки на торцах патрона дополнительных масс, можно увеличить время и, значит, интенсивность и равномерность нагружения трубы.

Некоторые результаты исследования гидродинамики электровзрыва микропроводника в патроне, помещенном в трубу, для модельного закона ввода электрической мощности приведены в статье [2].

В настоящей работе рассматривается гидродинамическая нагрузка на стенку трубы и на закрывающие патрон диски, один из которых неподвижен, а второй перемещается по трубе до неподвижной жёсткой преграды. При этом вводимая в канал разряда электрическая мощность получена по экспериментальным данным (по измеренным зависимостям тока и напряжения в канале разряда от времени).

Постановка задачи

Полагаем, что стенка трубы абсолютно жесткая, как и одно из оснований цилиндрического патрона (разрядной камеры). Диск, закрывающий патрон с другой стороны, - недеформируем и подвижен. На оси симметрии цилиндра находится микропроводник (рис. 1). Заполняющая разрядную камеру жидкость идеальная и сжимаемая, а канал разряда заполнен идеальной низкотемпературной плазмой.

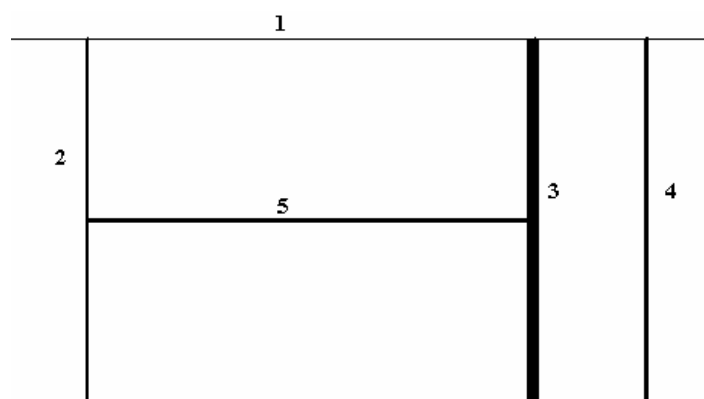


Рис. 1. Схема области исследования: 1 – поверхность трубы; 2 – жесткий неподвижный диск; 3 – жесткий подвижный диск; 4 – преграда; 5 – микропроводник

Математическая постановка задачи. В области жидкости, ограниченной контактной поверхностью плазма-вода и поверхностью цилиндра с абсолютно жесткими боковой поверхностью и одним из оснований и вторым жестким основанием, перемещающимся без трения по закону движе-

ния твердого тела, необходимо решить систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, записанных в цилиндрической системе координат, совместно с уравнением состояния в двучленной форме [3]. На абсолютно жестких поверхностях ставится условие равенства нулю нормальной составляющей вектора скорости жидкости, на подвижном диске скорость жидкости равна скорости движения диска. На контактной поверхности плазма-вода требуется выполнение условия баланса энергии [4]. Подробнее математическая постановка задачи описана в статье [2].

Закон ввода электрической мощности в канал разряда, задаваемый в данной работе, приведен на рис. 2. Длина микропроводника $l = 45$ мм, внутренний радиус трубы $R_k = 8,5$ мм, масса подвижного диска $m = 5$ г, первоначальное удаление его от преграды $\delta = 5$ мм.

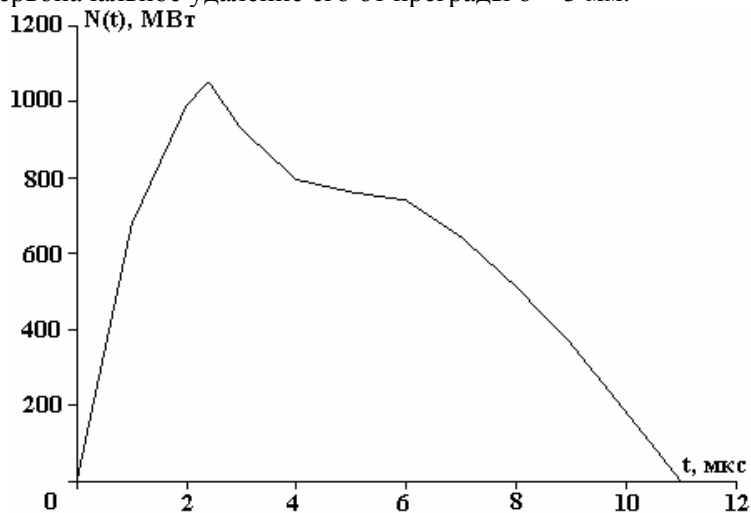


Рис. 2. Вводимая в канал разряда электрическая мощность

Результаты решения задачи

Некоторые результаты решения задачи приведены на рис. 3–5. При построении расчётной сетки начало координат было помещено в центр микропроводника, ось Oz – на его оси симметрии (координата z возрастает слева направо), ось Or совпадает с радиусом цилиндра, проходящим через начало координат.

Расширение появляющегося в результате электрического взрыва микропроводника канала разряда приводит к образованию ударной волны в окружающей канал жидкости и к движению диска. Эта волна вместе с отраженными от поверхностей трубы и диска волнами создают сложную волновую картину. Подвижность одного из дисков приводит к нарушению одномерности течения, что характерно для цилиндрической разрядной камеры с неподвижными основаниями и микропроводником, находящимся на оси симметрии, длина которого равна длине камеры. В момент времени достижения фронтом ударной волны поверхности трубы ($t \approx 5$ мкс) значения давления на боковую поверхность цилиндра вблизи оснований разнятся на 10,5% (рис. 3, кривая 1). Постепенно неоднородность распределения параметров жидкости по осевой координате распространяется по всей разрядной камере (рис. 3, кривые 2, 3).

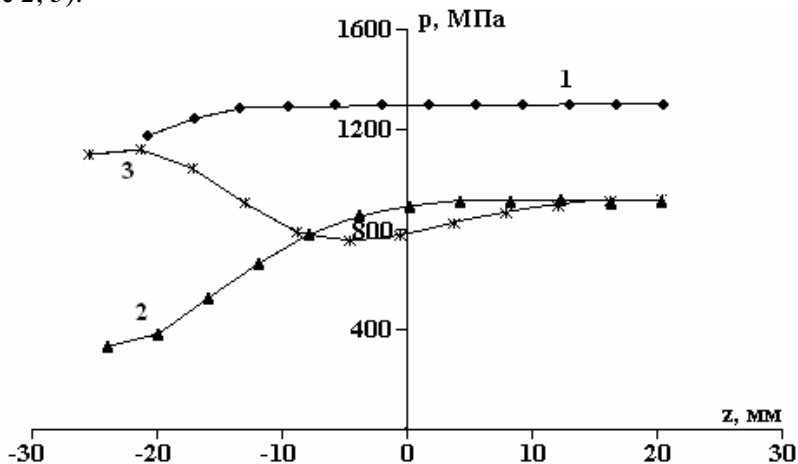


Рис. 3. Распределение давления вдоль поверхности трубы при t , мкс: 1 – 5; 2 – 15; 3 – 25

Радиальные распределения давления на поверхности оснований цилиндра, как и других гидродинамических характеристик, существенно разнятся с момента расширения канала разряда (рис. 4). Распределение давления вдоль неподвижного основания довольно быстро выравнивается, а вдоль подвижного – оставалось неоднородным в течение всего рассматриваемого периода времени (до $t = 50$ мкс).

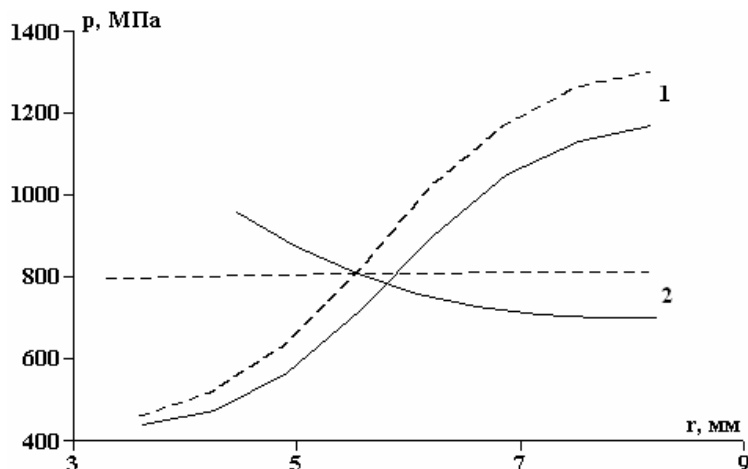


Рис. 4. Распределение давления по радиусу подвижного (сплошные линии) и неподвижного (пунктирные) оснований цилиндра при t , мкс: 1 – 5; 2 – 20

Второй максимум давления в канале разряда больше первого. Он образуется в результате суперпозиции волны давления, генерируемой каналом разряда (ввод энергии еще продолжается) и отраженной от стенки трубы волны (рис. 5, кривая 1). По окончании ввода электрической мощности давление в канале меняется незначительно.

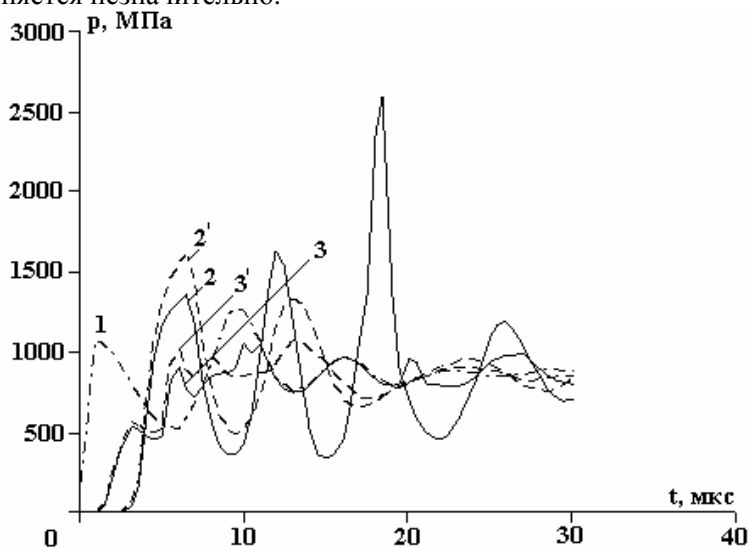


Рис. 5. Давление в канале разряда и в точках на подвижном (сплошные линии) и неподвижном основаниях цилиндра: 1 – давление в канале; 2– 2' – $r = R_k$; 3– 3' – $r = 0,5 \times R_k$

Самое большое значение давления в жидкости достигается вблизи стенки трубы и подвижного диска (рис. 5, кривая 2). Значение первого максимума здесь примерно на 10% меньше, чем в симметричной области около неподвижного основания (рис. 5, кривая 2'). Но последующие максимумы давления у подвижного основания значительно выше. Наибольшее же значение достигается здесь в момент удара диска о преграду, поскольку имеет место суперпозиция двух отраженных волн: от поверхности трубы и диска. Период колебания давления здесь меньше, чем в аналогичной области вблизи неподвижной границы, поскольку выше скорость расширения канала разряда и, следовательно, меньше время пробега волны давления от канала разряда до поверхности трубы. Радиальная координата на подвижном диске достигает величины, превышающей $0,5 \times R_k$, поэтому давление в этой точке на поверхности подвижного диска (рис. 5, кривая 3) равно давлению в канале разряда (рис. 5, кривая 1). Радиальная координата на неподвижном основании цилиндра достигает максимального

значения в момент прихода отражённой от стенки трубы волны давления – и в дальнейшем изменяется несущественно. Но площадь, занимаемая плазмой на обоих основаниях цилиндра, весьма значительна, поскольку объем канала разряда сравним с объемом жидкости (объем патрона равен $10,2 \text{ см}^3$, а объем канала разряда в момент окончания счета – $1,9 \text{ см}^3$). То есть помимо гидродинамического воздействия на диски, особенно на подвижный, существенно влияет плазма.

Заключение

Для получения равномерного гидродинамического нагружения поверхности трубы необходимо ограничить обрабатываемую область неподвижными дополнительными массами.

Регулируя расположение подвижного диска и преграды, можно получить на задаваемых участках поверхности трубы и диска большие значения давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта/ Под. ред. Г.А. Гулого. М., 1977.
2. Барбашова Г.А. Исследование гидродинамических процессов при электрическом разряде в малом объеме жидкости // Электронная обработка материалов. 2008. № 1. С. 35–39.
3. Численное решение многомерных задач газовой динамики/ Под. ред. С.К.Годунова. М., 1976.
4. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрические разряды в воде. М., 1971.

Поступила 26.09.08

Summary

Hydrodynamic processes in the limited area of pipe under electrical explosion of a thin wire are studied. The hydrodynamic loading on the wall of pipe, particularly, considered.
