

УДК 621.385.833

ОСОБЕННОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ДВИЖЕНИЯ В ВОДЕ И АТМОСФЕРЕ ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Б. Н. Васичев

Московский Государственный институт электроники и математики
(Технический университет), Москва, Россия

А. М. Филачев, Е. Е. Чернова-Столярова

ГП Научно-исследовательский институт электронной и ионной оптики, Москва, Россия

Обсуждена проблема возможности создания условий движения пучков частиц высокой плотности и твердых тел в воде, газе и плазме со сверхзвуковой скоростью без возбуждения ударных волн. На основе литературных данных, а также экспериментальных и теоретических исследований авторов показана возможность самофокусировки пучков заряженных частиц и снижения лобового сопротивления на большом расстоянии. Рассмотрены условия и возможные пути реализации систем, обеспечивающих безударное сверхзвуковое движение как твердых тел, так и пучков заряженных и нейтральных частиц высокой плотности.

Развитие теоретических основ и техники формирования пучков заряженных частиц с высокой плотностью заряда и энергией позволяет на современном этапе исследовать проблему перемещения в пространстве на значительные расстояния пучков заряженных и нейтральных частиц и возникающие при этом

явления, использовать для транспортировки по этим каналам твердых тел со сверхзвуковыми скоростями при меньших затратах энергии.

Рассмотрим принципиальную возможность создания перед головной частью движущегося тела или плотного сгустка частиц канала с повышенным значением температуры и пониженной плотностью с помощью поглощения энергии пучка ускоренных заряженных частиц, например, электронов, а также формирование канала такого энерговыделения в среде: в воздухе, диэлектрической и проводящей жидкостях.

СОЗДАНИЕ КАНАЛА С МЕНЬШЕЙ ПЛОТНОСТЬЮ СРЕДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ПУЧКОВОГО ОРУЖИЯ

Движение заряженных частиц в атмосфере связано с частым столкновением с молекулами воздуха. При этом часть кинетической энергии в каждом столкновении тратится на нагревание атмосферы. Для процесса характерны:

потеря частицами энергии при нагревании воздуха в непосредственной близости к пучку и потеря энергии на ионизацию большого числа атомов;

появление большого количества положительно заряженных частиц на оси пучка, что приводит к самофокусировке последнего;

собственное магнитное поле, генерируемое движущимися электронами пучка, также стремится преодолеть силы отталкивания среди частиц. В вакууме это явление приводит обычно к распаду заряженного пучка, а в воздушной среде это явление выражается в стремлении удержать электронный пучок заключенным в устойчивый канал.

Из экспериментов известно, что длинные пучки подвержены так называемым магнитодинамическим неустойчивостям типа колец и петель, в виде последовательности шаров. Установлено, что некоторые из этих неустойчивостей стремятся увеличиваться до полного разрушения пучка. Распад более сильно выражен у положительно заряженного пучка. Все эти явления в сильной мере связаны с кинетической энергией частиц пучка.

Решением задачи уменьшения потерь количества частиц и энергии пучком могло бы быть уменьшение числа столкновений частиц с атомами среды посредством заключения их в канал с уменьшенной плотностью на всем пути следования — от ускорителя до мишени, т. е. проделывание откачанного канала в среде, через который пучок мог бы перемещаться с минимальным рассеянием и минимальными потерями энергии. Из этого следует, что локальное и быстрое разогревание среды (атмосферы или воды) в канале некоторого диаметра должно привести к резкому расширению канала и снижению плотности атомов. При таком условии частицы пучка могут продвигаться без потерь или этими потерями в конечном счете можно пренебречь. Значит, должен формироваться канал с горячим газом (плазмой), в котором пучок будет совершать движение с большой скоростью и при этом не будут возникать ударные волны и сопротивления среды движущемуся пучку.

Электронный пучок с энергией 1 ГэВ, движущийся почти со скоростью света, при токе пучка 3 кА, диаметре на выходе ускорителя 2 см и длительности импульса 0,1 мкс будет иметь длину порядка 30 м. Общая энергия, переносимая электронами одного импульса, равна 500 тыс. Дж. Потери энергии при столкновениях таких высокоэнергетичных электронов с атомами воздуха будут составлять ~ 2000 эВ на каждый сантиметр пути. Сюда следует добавить потери на излучение, которые составляют 20 тыс. эВ на 1 см. Известно, что диаграмма направленности излучения таких пучков сильно вытянута в направлении движения пучка. Поэтому такой импульс будет переносить энергию со скоростью 3 млн. Вт на 1 см³ посредством ионизации и примерно в 10 раз больше — посредством излучения энергии в направлении движения.

Эта энергия расходуется на нагревание воздуха в зоне облучения. Молекулы разогретого воздуха двигаются по радиусу от траектории пучка. Горячий воздух, оставляемый сзади импульса, будет действовать как канал, через который

следующий импульс распространяется с меньшими потерями энергии и с меньшим рассеянием, о чем свидетельствуют экспериментальные данные. Воздух внутри канала может быть нагрет до 3000 К, если затратить энергию в 1,05 млн. Дж на весь канал, длиной 1000 м и диаметром 2 см. Поскольку каждый импульс содержал бы энергию в 500 тыс. Дж, то только последовательность из многих импульсов смогла бы обеспечить плотность воздуха внутри канала, в 10 раз меньшую, чем при атмосферном давлении. Электроны с энергией в 1 ГэВ теряли бы не более 20 % энергии, а радиус пучка увеличился бы не более чем в три раза в конце пути длиной в 1000 м.

Все эти результаты идеализированного вычисления сделаны в предположении, что вся энергия, переносимая импульсами пучка, выделяется только внутри канала, что на самом деле не так. Не учтены и нелинейные эффекты, которые могут иметь место в каналах с такими токами.

При анализе эффекта транспортирования электронного пучка в атмосфере возникает много вопросов, ответы на которые можно получить только экспериментально. Тем не менее эти предварительные расчеты указывают на реальность рассматриваемого процесса. На это же указывают и существующие многие экспериментальные данные, из которых следует, что пучок электронов относительно низкой энергии (порядка 5—10 МэВ) хорошо распространяется на несколько метров в канале, где плотность остаточного газа в 1000 и даже только в 100 раз меньше плотности атмосферного воздуха.

Из приведенного анализа следует, что электронный пучок в несколько килоампер в виде последовательности импульсов длительностью в 0,1 мкс и частотой в 1000 имп/с может транспортироваться на расстояние до 1000 м с допустимыми в ряде случаев потерями энергии. Очевидно, что увеличение расстояния распространения пучка до 10 тыс. м принципиально возможно.

Из короткого анализа следует, что современная физика и техника стоят на пороге новых разработок оборудования, способного транспортировать большие потоки энергии через каналы в атмосфере. Они могут использоваться для передачи энергии из ближнего космоса на земные рекуператоры энергии или в военных целях для поражения быстро движущихся объектов нападения [1].

Известно, что при электронно-лучевой обработке электронный пучок может проплавать материал на глубину, значительно превышающую величину максимального пробега электронов.

В [2] показано, что в условиях, максимально приближенных к условиям электронно-лучевой обработки (использовались длительности импульсов такие, что агрегатное состояние вещества не изменялось), сохраняются закономерности проникновения электронов в твердое тело. Следовательно, глубинное проплавление материала при электронно-лучевой обработке связано с изменением агрегатного состояния вещества.

В связи с этим были проведены экспериментальные исследования воздействия интенсивных электронных пучков на жидкость [3].

В качестве исследуемой жидкости была использована кремний-органическая жидкость $[(C_2H_5)_2SiO_2]_x$ плотностью $0,98 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ с низкой плотностью паров ($10^{-6}\div 10^{-8}$) и интенсивной люминесценцией при воздействии электронного пучка. Явление люминесценции и дало возможность разработать методику оптических исследований взаимодействия интенсивного электронного пучка с диэлектрической жидкостью.

Исследования проводились на электронно-лучевой установке "ЭЛУРО" с ускоряющим напряжением до 100 кэВ, током пучка 2—15 мА, длительностью импульсов 100 мкс — 1,2 мс, числом импульсов 1—4000 с частотой следования от 1 до 600 Гц. Наблюдение процесса взаимодействия электронного пучка с жидкостью проводилось под углом 90° к направлению движения электронного пучка через боковое окно вакуумной камеры с помощью скоростного фоторегистратора (СФР), с длительностью экспозиции одного кадра 30 мкс, кинокамеры "Конвас" с длительностью экспозиции 25 мс и фотоаппарата (рис. 1).

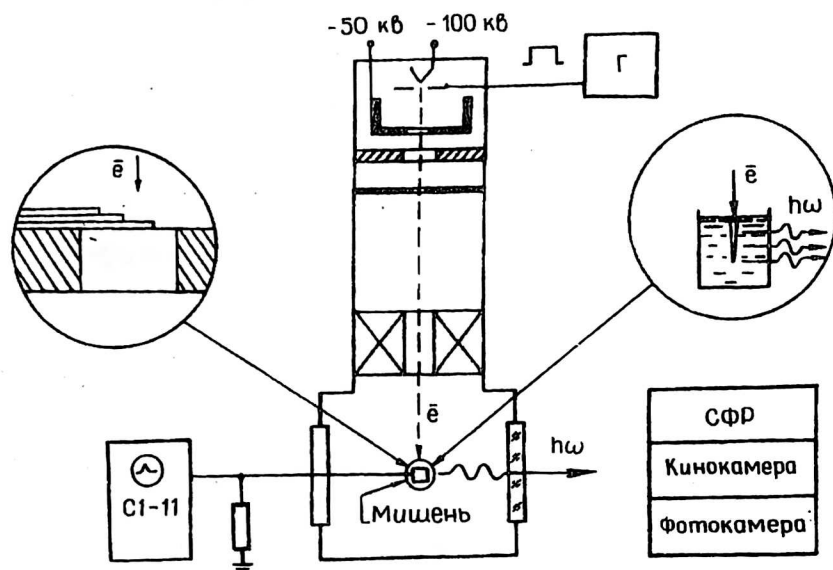


Рис. 1. Схема проведения экспериментов по воздействию электронного пучка на жидкость

Обнаружена четкая повторяемость процесса проникновения пучка в жидкость от импульса к импульсу, если частота следования импульсов была такова, что релаксационные процессы в жидкости успевали затухнуть. Это дало возможность зафиксировать процесс развития канала во времени путем последовательного наложения 300—400 изображений процесса на один кадр, так как засветка пленки при развертке одного импульса очень мала.

На рис. 2, б представлена фотография процесса образования канала при воздействии одиночного импульса электронного пучка, снятая с помощью СФР. Энергия электронов при этом составляла 100 кэВ, ток пучка был равен 10 мА, длительность импульса 800 мкс, время экспонирования одного кадра составляло 30 мкс. На фотографии видно, что люминесцирует только та область жидкости, которая в данный момент подвергается воздействию электронного пучка. Глубина области свечения составляет менее 1 мм.

Перемещение от импульса к импульсу светящейся области вглубь жидкости говорит об испарении жидкости и образовании канала, заполненного парами масла.

Измерение углубления канала от кадра к кадру позволяет определить среднюю скорость углубления канала за время, равное времени экспозиции одного кадра (30 мкс).

На рис. 2, а приведен график скорости углубления канала во времени. Видно, что в начале процесса скорость составляет 100 м с^{-1} , а затем резко падает и стабилизируется на уровне 10 м с^{-1} . Можно предположить, что в начале процесса, протекающего вблизи поверхности жидкости, происходит интенсивная откачка паров масла, и энергия электронного пучка целиком расходуется на нагрев и испарение. По мере углубления канала откачка паров затрудняется и вследствие этого происходит значительное рассеяние энергии в парах масла. Поскольку через некоторое время после начала процесса скорость углубления канала устанавливается постоянной, можно предположить, что наступает равновесие между процессами образования паров и их истечением. Оценка скорости истечения паров из канала определяется по времени испарения элементарного объема $\Delta t = R_{\text{max}}/V$, где R_{max} — максимальный пробег электронов в жидкости (при $E = 100 \text{ кэВ}$ максимальный пробег равен 140 мкс), V — установившаяся скорость углубления канала:

$V_{\text{пара}} = h/\Delta t = 10^5 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ (h — глубина канала, которая в данных измерениях составляла 0,5—1 см).

При этом на дно канала действует сила отдачи $F = \Delta m V_{\text{пара}}/\Delta t$,

где Δm — масса жидкости, соответствующая объему, испаряющемуся за время Δt :

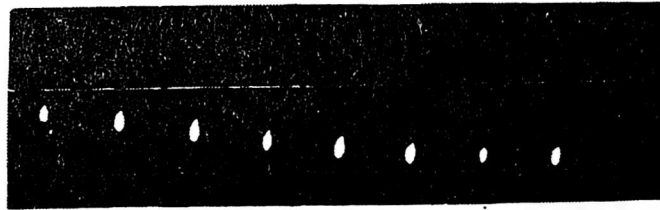
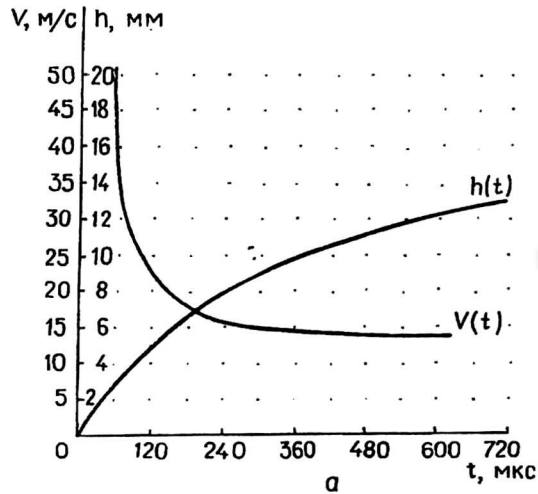
$$\Delta m = \rho \pi r^2 R_{\text{max}} = 10^{-6} \text{ г},$$

где ρ — плотность;

R_{max} — максимальный пробег;

r — радиус пучка, равный радиусу канала.

Для пучка электронов диаметром $d = 2r = 100 \text{ мкм}$, энергией 100 кэВ и $R_{\text{max}} = 100 \text{ мкм}$ получаем $F = 10^4 \text{ дин}$, что соответствует давлению на дно канала $p = F/\pi r^2 = 100 \text{ атм}$.



30 60 180 300 420 540 660 690 720
 t , мкс
 б

Рис. 2. График скорости углубления канала во времени (а) и фотография процесса образования канала при воздействии одиночного импульса электронного пучка, снятая с помощью СФР (б)

Экспериментальное исследование давления на дно канала при воздействии электронного пучка на жидкость проводилось с помощью пьезодатчика из керамики ЦТС (цирконат-титанат свинца). Калибровку датчика производили на ударной трубе высокого давления с использованием расчетных газодинамических соотношений, связывающих давление на фронте ударной волны с ее скоростью. Чувствительность датчика составляла 0,55 В/атм.

Схема эксперимента показана на рис. 3. Кювета для жидкости была сделана из латуни. Для визуального наблюдения канала одна из боковых стенок выполнена из оргстекла. Датчик давления помещался в жидкость вертикально через

отверстие в дне кюветы. Электронный пучок падал перпендикулярно поверхности жидкости и торцевой поверхности датчика. Электрический сигнал с датчика по коаксиальному кабелю поступал на вход осциллографа. По данным эксперимента проведена оценка давления, которое на расстоянии $r = 100$ мкм от дна канал составил около 60 атм, что совпадает с оценкой давления, полученной экспериментальным путем.

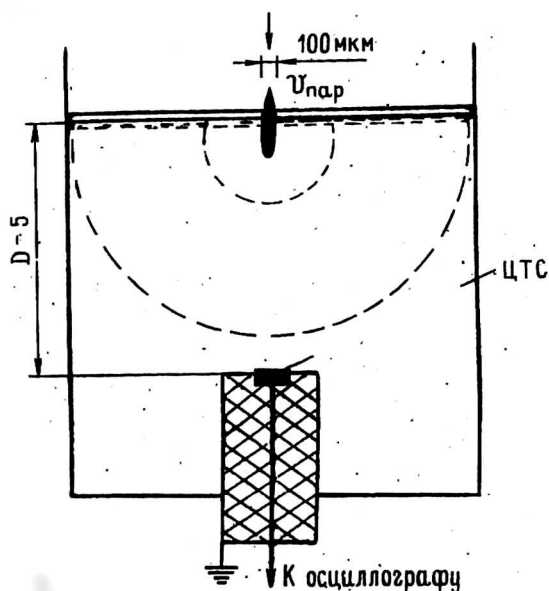


Рис. 3. Схема экспериментального измерения давления

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА НА ДЛИНУ КАНАЛА

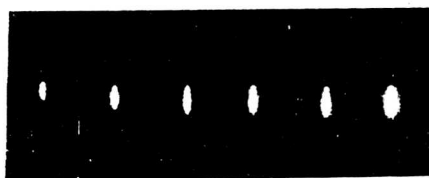
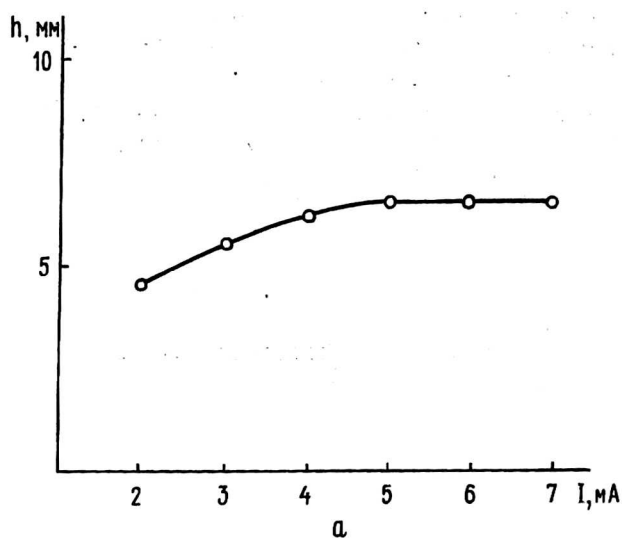
Влияние параметров пучка на форму и глубину канала определяли по изменению люминесцирующей области масла при воздействии одиночного импульса электронного пучка. Процесс образования канала регистрировался фотоаппаратом, который помещали перед окном вакуумной камеры. Во время действия импульса затвор фотоаппарата был открыт для фиксирования полной картины процесса.

На рис. 4, а, б приведена зависимость глубины канала от тока электронного пучка. Из рисунка видно, что изменение тока электронного пучка незначительно влияет на глубину канала.

На рис. 5, а, б показана зависимость глубины канала от изменения ускоряющего напряжения. Видно, что одновременно с увеличением глубины канала при возрастании ускоряющего напряжения существенно увеличивается интенсивность люминесценции.

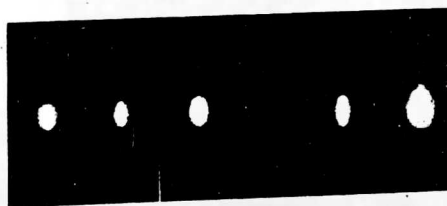
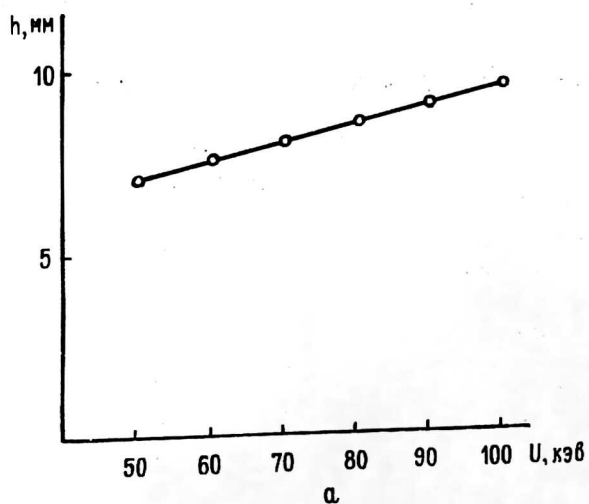
На рис. 6 показано люминесцентное свечение масла при изменении длительности импульса от 100 до 800 мкс.

На рис. 7 приведены зависимости глубины канала от длительности импульса при разных значениях энергии электронов (40 и 100 кэВ, ток пучка составлял 6 мА). Видно, что с увеличением длительности импульса глубина канала сначала растет неравномерно. В начале процесса рост глубины канала зависит от энергии пучка — чем выше энергия электронов, тем больше скорость углубления канала, определяемая наклоном кривых к оси абсцисс. Но через некоторое время скорость углубления канала уменьшается и устанавливается постоянной независимо от энергии пучка.



б

Рис. 4. Зависимость глубины канала от тока электронного пучка:
 $I = 2-7$ мА; $U = 50$ кэВ; $\tau = 300$ мкс (а) и фотография образования канала (б)



б

Рис. 5. Зависимость глубины канала от ускоряющего напряжения:
 $U = 50-100$ кэВ; $I = 6$ мА; $\tau = 300$ мкс (а) и фотография образования канала (б)

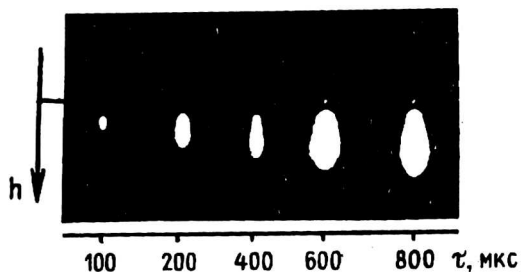


Рис. 6. Зависимость глубины канала от длительности импульса

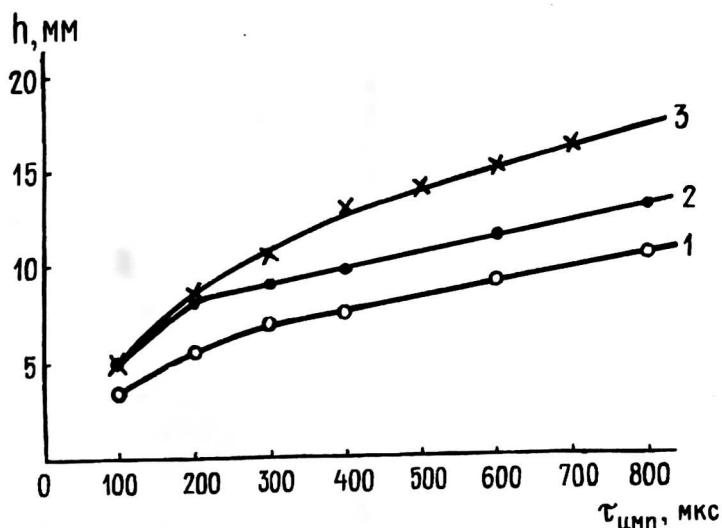


Рис. 7. Зависимость глубины канала от длительности импульса:
 1 — $U = 40$ кВ, $I = 6$ мА; 2 — $U = 100$ кВ, $I = 6$ мА, одиночный импульс;
 3 — $U = 100$ кВ, $I = 6$ мА, серия импульсов

На рис. 8 показано образование канала при воздействии серии импульсов, когда частота следования последних возрастает. Видно, что при увеличении частоты постепенно все импульсы серии проходят вглубь жидкости, высвечивая каждый определенную область масла, причем области свечения разделены темными промежутками. Состояние, когда все импульсы серии проходит вглубь жидкости, и области свечения разделены темными промежутками, будем называть “разрешением” импульсов, а частоту, при которой два первых импульса разрешены, — критической частотой. $f_{\text{крит}} = 45-50$ Гц, тогда время жизни канала для двух импульсов будет $t = 1/f_{\text{крит}}$. Для $n > 2$ $f > f_{\text{крит}} (n-1)$.

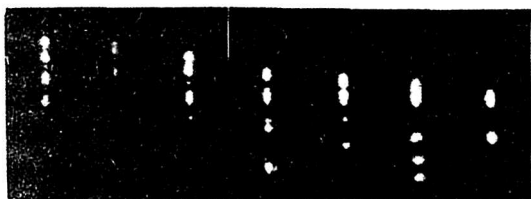


Рис. 8. Образование канала при воздействии серии импульсов при увеличении частоты их следования (число импульсов $n = 4$, частота 20—250 Гц)

Рассмотрим кривые 2 и 3 на рис. 7. Кривая 2 представляет собой зависимость глубины канала от длительности импульса ($U = 100$ кВ, $I = 6$ мА). На кривой 3 при тех же параметрах пучка используется серия импульсов длительностью 100 мкс, так что каждой точке кривой 2 соответствует точка на кривой 3 с той же суммарной длительностью, т. е. точки кривой 3 сняты в импульсном режиме, а соответствующие им точки кривой 2 — в непрерывном. Видно, что в импульсном режиме глубина канала оказывается больше, чем в соответствующем по длительности воздействия одного длинного импульса. Причем скорость углубления канала подчиняется той же закономерности, что и в режиме длинного импульса. Таким образом, серия коротких импульсов при одной и той же затрате мощности дает более глубокое проникновение электронного пучка в жидкость, чем в случае равного по длительности одиночного импульса.

РАЗВИТИЕ КАНАЛА В ЖИДКОСТИ ПОСЛЕ ОКОНЧАНИЯ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

После окончания действия электронного пучка в жидкости происходят процессы релаксационного типа (время экспозиции 25 мс) при $U = 45$ кВ, токе пучка 2—10 мА, длительности импульсов 0,1—1 мс, числе импульсов 1—4000 с частотой следования 1—600 Гц.

Исследовалось развитие канала при воздействии одного, двух и трех импульсов. Для наблюдения за процессом релаксации жидкость подсвечивалась с помощью помещенной в камеру лампочки.

Серия выборочных кинокадров, демонстрирующих процесс развития канала в полость, и схлопывание полости с выбрасыванием жидкости над поверхностью показаны на рис. 9.

- 1-й кадр — образование канала при воздействии электронного пучка;
- 2-й кадр — расширение канала в полость;
- 3-й кадр — полость достигла максимального размера и начала подниматься вверх;



0,80 35 50 75 100 125 t, мс

Рис. 9. Процесс развития канала после окончания действия электронного пучка (длительность каждого кадра 25 мс)

4-й кадр — полость схлопывается с выбрасыванием жидкости над поверхностью;

5-й и 6-й кадры — релаксационные колебания поверхности до полного затухания.

Из рис. 9 видно, что канал не только расширяется, но и увеличивается по глубине до момента установления равновесного состояния, потом глубина канала начинает уменьшаться. Отсюда становится понятным образование темных промежутков между импульсами в случае их разрешения, и обретает более точный смысл понятие “критическая частота” — частота следования импульсов должна быть такой, чтобы каждый последующий импульс приходил на дно канала, когда полость достигала своего максимального значения.

На рис. 10, а, б приведены кадры, демонстрирующие развитие процесса при двух и трех импульсах.

На фотографиях видно образование канала, свободного для прохождения следующего импульса на дно полости, образованной первым импульсом, и расширение полости сначала до максимального размера, а затем ее постепенное схлопывание. После того как второй импульс пришел на дно полости, образованной первым импульсом, полости от первого и второго импульсов развиваются самостоятельно.



Рис. 10. Развитие процесса образования канала и полости при двух (а) и трех (б) импульсах:

$$U = 45 \text{ кВ}; I = 3 \text{ мА}; \tau_n = 2 = 600 \text{ мкс}, f_n = 2 = 70 \text{ Гц}, \tau_n = 3 = 400 \text{ мкс}, f_n = 3 = 150 \text{ Гц}$$

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ КАНАЛА В ПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Описанные ранее эксперименты по воздействию электронного пучка на диэлектрическую жидкость показали, что в жидкости образуется канал, свободный для прохождения электронов, при этом не рассматривался вопрос о том, что канал может существовать за счет сил электростатического отталкивания. Поэтому для общности проведены исследования образования и развития канала в проводящей жидкости, где накопление заряда невозможно. В качестве проводящей жидкости была выбрана ртуть.

Эксперимент ставился таким образом, чтобы ртуть располагалась между слоями масла. Это дало возможность наблюдать образование канала под воздействием электронного пучка сначала в масле, затем в ртути, а затем электронный пучок снова выходил в масло.

Схема эксперимента показана на рис. 11. Ртуть в сосуде из оргстекла помещалась между слоями масла. Электронный пучок проходил через масло, ртуть, прожигал отверстие в сосуде со ртутью и снова выходил в масло. При этом можно было наблюдать свечение масла над ртутью и под слоем ртути. Под ртутью наблюдались два импульса, разделенные между собой темными промежутками. Это говорит о наличии в обеих жидкостях свободного канала, через который проходили последующие импульсы электронного пучка.

На рис. 11 также схематически показан процесс образования канала в слоях масла и ртути для $n = 6$ импульсов электронного пучка равной длительности.

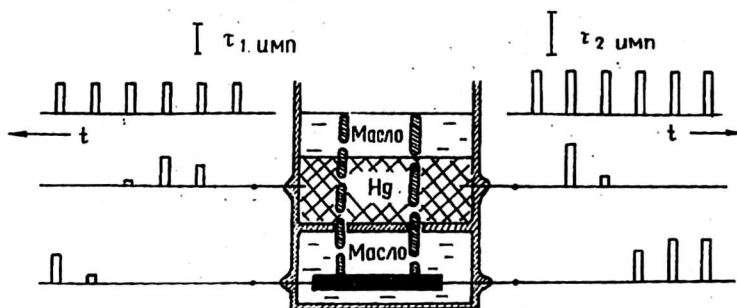


Рис. 11. Схема процесса образования канала в слоях масла и ртути для $n = 6$ имп.; $\tau_1 < \tau_2$

Для измерения времени, затрачиваемого на прохождение электронным пучком слоя ртути, использовались два электрода. Один из них помещался в ртуть, и с его помощью определяли долю мощности электронного пучка, теряемую в ртути. В качестве второго электрода служила толстая пластинка, расположенная у дна кюветы, на которую замыкался прошедший через ртуть электронный пучок. Сигналы с электродом поступали на вход двухлучевого осциллографа и фотографировались на пленку. Определялись число импульсов электронного пучка, необходимое для образования канала в слое ртути, и доля мощности электронного пучка, теряемая при прохождении через уже образовавшийся канал.

На рис. 12 показана серия четырех импульсов электронов с энергией 100 кэВ, током пучка 10 мА, длительностью импульсов 800 мкс и частотой следования 400 Гц. Из рисунка видно, что уже третий и четвертый импульсы проходят через слой ртути толщиной 8 мм и попадают на второй электрод. Таким образом, слой ртути 8 мм проходит два импульса электронов. Средняя скорость образования канала в ртути составляет около 5 м/с, т. е. по порядку величины она совпадает со средней скоростью образования канала в масле. Долю мощности электронного пучка, рассеиваемую при прохождении через уже существующий канал, определяем как отношение амплитуды сигнала, прошедшего через канал на электрод, к амплитуде сигнала тока, полностью поглощенного в ртути. Оказалось, что в канале теряется около 40 % мощности электронного пучка.

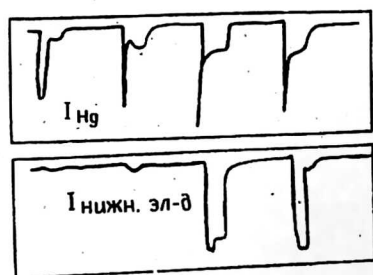


Рис. 12. Осциллограмма серии четырех импульсов электронов

В результате проведенных исследований вырисовывается следующая картина взаимодействия электронного пучка с жидкостью. Электроны пучка, попадая на поверхность жидкости, отдают свою энергию в элементарном объеме, размер которого определяется диаметром электронного пучка и величиной максимального пробега электронов данной энергии в исследуемой жидкости. Происходит постепенное испарение жидкости, и образуется канал. Вследствие низкого давления

камере установки, в которую помещена кювета с жидкостью, у поверхности жидкости пары мгновенно откачиваются, не влияя на электроны пучка, т. е. не происходит рассеяния энергии электронов пучка в парах испаряющегося материала. При этом практически вся энергия электронов пучка тратится на нагрев и испарение, вследствие чего и скорость углубления канала достаточно велика — 100 м/с. По мере углубления канала плотность паров возрастает и, соответственно, увеличиваются потери и рассеяние мощности пучка в парах. Это приводит к резкому снижению скорости углубления канала до величины 10 м/с. Пары жидкости выходят из канала со скоростями около 10^5 см/с, создавая давление на дно канала порядка 100 атм. Большой перепад давлений внутри канала и над поверхностью жидкости вызывает после окончания действия импульса электронов расширение канала до образования полости и последующее схлопывание этой полости.

Образование полости приводит к тому, что, используя серию импульсов с определенной частотой следования, можно получать канал более глубокий, чем при воздействии одиночного импульса с длительностью, равной сумме длительностей импульсов в серии.

ПРОБЛЕМА ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ПУЧКОВ ЧАСТИЦ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ СО СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТЬЮ В ВОДЕ И АТМОСФЕРЕ БЕЗ ОБРАЗОВАНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Летя со скоростью звука, тело преодолевает 1 км пути примерно за 3 с. Увеличением скорости это время может существенно сократиться. Однако главным препятствием при этом является ударная волна, возникающая перед движущимся телом.

Известно, что при сверхзвуковом передвижении твердого тела лобовое сопротивление в основном возникает из-за того, что в носовой области движущегося тела происходит непрерывный сдвиг молекул или атомов среды и их ускорение в направлении движения. Возникает ускорение все новых масс той среды, в которой происходит движение. Благодаря локальному уплотнению среды формируются ударные волны.

Устранение условий возникновения ударных волн позволит на порядок снизить лобовое сопротивление и, как следствие этого, снизить суммарные затраты энергии на сверхзвуковое движение в среде.

Локальное изменение скорости звука, например в газе, позволяет обеспечить дозвуковой режим обтекания при высокоскоростном (сверхзвуковой и гиперзвуковой скорости) перемещении тел. Это подтверждается экспериментами [4], где лазерная струя вдувалась в атмосферу со скоростью до 1000 м/с на оси симметрии. При этом радиальные профили скорости и температуры были таковы, что течение было дозвуковым, и ударные волны не возникали. В другом эксперименте [5] был организован нагрев пристеночной области газового потока высокочастотным разрядом. В этом эксперименте также наблюдалось "исчезновение" ударной волны в области резкого расширения обтекаемого тела. Однако этот метод нагревания среды не мог обеспечить при сверхзвуковых скоростях "исчезновение" головной ударной волны. Лучшим вариантом решения задачи является создание канала с уменьшенной плотностью на всем пути следования наряда до мишени, т. е. следовало бы проделать канал в среде с пониженной плотностью, через который движущееся тело могло бы перемещаться с минимальными потерями энергии. Все сказанное в равной степени можно отнести и к движению тел или пучков в жидкой среде.

Один из путей ликвидации условий возникновения ударных волн — снижение плотности среды в области головной части движущегося тела (аппарата). Скорость звука в этой части среды меньше, чем в покоящейся части среды, и значения числа Маха также малы, а следовательно, и сильные скачки уплотнения не могут формироваться. Следовательно, если перед лобовой частью движущегося

со сверхзвуковой скоростью тела (аппарата) с помощью пучка заряженных частиц создать (с борта аппарата) канал с меньшей плотностью атомов, то, очевидно, возможно решить задачу движения твердого тела в плотных слоях среды, не встречая противодействия ударной волны.

Л и т е р а т у р а

1. John Parmentola. Kosta Tsipis. Particle-beam weapons//Scientific American, 1979. V. 240, № 4. P. 38—49.
2. В л а с о в А. Н., К а б а н о в А. Н. и др. // Физ. и хим. обработки материалов, 1971. № 3. С. 20.
3. Ч е р н о в а - С т о л я р о в а Е. Е. Взаимодействие интенсивных электронных пучков с веществом: Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. М., 1972.
4. Е р ш о в А. П., Р о з а н о в В. В., С ы с о е в Н. Н., Т и м о ф е е в И. Б., Ч у в а ш е в С. Н., Ш и б о к о в В. М. Истекающие в атмосферу дозвуковые плазменные струи, образуемые капиллярным разрядом // Препринт физического ф-та МГУ, 1994. № 8. С. 1—26.
5. А л е к с а н д р о в А. Ф., Т и м о ф е е в И. Б., Ч у в а ш е в С. Н. Безударное сверхзвуковое движение в атмосфере: принципиальная возможность и практическая реализация//Прикладная физика. 1996. № 3. С. 112.

PARTICULARITIES OF SUPERSONIC MOTION IN WATER AND ATMOSPHERE OF BUNCHES OF CHARGED PARTICLES AND SOLID BODIES

B. N. Vasichev

Moscow Institute for Electronics and Mathematics (Technical University), Moscow, Russia

A. M. Filachev, E. E. Chernova-Stoljarova

Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

The problem of possibility of making the conditions of moving the beams of particles of high density and solid bodies in water, gas and plasma with the supersonic velocity without excitement of shock waves is discussed. On the base of literary data, as well as experimental and basic researches of authors is shown possibility an self-focusing of beams of charging particles and reducing an frontal resistance on the greater distance. The conditions and possible ways to realization the systems, ensuring unaccented supersonic moving solid bodies both a hards tel, and bunches charged and neutral particles of high density are considered.