

## ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

### Ударно-кавитационный механизм генерации рентгеновского излучения при кавитации быстрой струи воды

А. А. Корнилова<sup>1</sup>, В. И. Высоцкий<sup>3,a</sup>, Н. Н. Сысоев<sup>2,b</sup>, Н. К. Литвин<sup>4</sup>, В. И. Томак<sup>4</sup>,  
А. А. Барзов<sup>4</sup>

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, <sup>1</sup> кафедра физики твердого тела; <sup>2</sup> кафедра молекулярной физики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

*<sup>3</sup>Киевский национальный университет им. Т. Шевченко. Украина, 01033, Киев, ул. Владимирская, д. 64.*

*<sup>4</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.*

*E-mail: <sup>a</sup>vivysotskii@univ.kiev.ua, <sup>b</sup>nn.sysoev@physics.msu.ru*

Статья поступила 29.07.2009, подписана в печать 15.09.2009

Экспериментально и теоретически исследован процесс генерации рентгеновского излучения, формируемого при свободном выходе быстрой струи воды в состоянии кавитации из узкого канала. Впервые обнаружено, что начальный участок струи и выходная часть канала являются источником интенсивного рентгеновского излучения с активностью до 0.1 кюри, генерация которого связана с кавитационными явлениями и последующим возбуждением ударных волн. Частота рентгеновского излучения зависит от состава излучающей поверхности (воды и поверхности стенок канала) и возрастает с увеличением заряда атомов на поверхности. Механизм генерации излучения связан с воздействием ударных волн, образуемых при кавитации, на ближние к области кавитации границы раздела (вода–воздух, вода–металл, металл–воздух, воздух–металл и др.).

**Ключевые слова:** рентгеновское излучение, ударные волны, кавитация, ультразвук, когерентность, радиационные процессы.

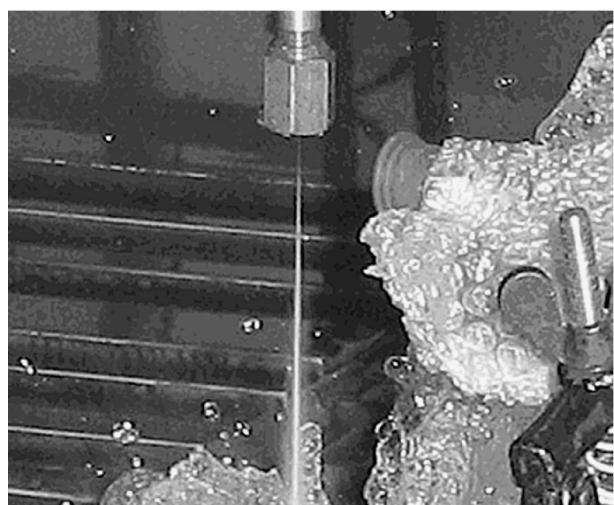
УДК: 539.538. PACS: 47.55.dp 47.55.dr 61.80.Cb.

#### Введение

Хорошо известно, что кавитационные процессы в жидкости могут формировать ударные волны. Процесс взаимодействия этих волн с разными средами рассматривался в цикле работ [1, 2], где были изучены радиационные (оптические [1] и рентгеновские [2]) процессы, сопутствующие режиму кавитации, возникающему в жидкости (машинном масле) при ее выходе под давлением из узкого диэлектрического канала внутрь герметичной кавитационной камеры. В работе [2] было обнаружено, что источником регистрируемого рентгеновского излучения являлась внешняя стенка камеры. Обнаруженный эффект основывался на гипотезе [2] об ударно-кавитационном механизме генерации рентгеновского излучения на внешней поверхности камеры и был связан с «встряхиванием» атомов на внешней поверхности камеры (на границе раздела вещества камеры и окружающего воздуха) при внутреннем отражении от нее ударной волны, возбуждаемой кавитацией. Этот механизм нуждался в экспериментальной проверке, а метод генерации — в оптимизации (в частности за счет использования воды и более высоких давлений). Необходимо было исследовать вопрос об эффективности генерации рентгеновского излучения в режиме максимальной кавитации при предельно высоком давлении струи воды (вплоть до давлений, превышающих  $P \approx 1000$  атм). В настоящей работе представлены предварительные результаты прямого исследования процесса генерации рентгеновского излучения, сопутствующего кавитации

при свободном выходе быстрой струи воды из тонкого канала в атмосферу.

Исследования проводились на промышленной установке, предназначеннной для гидродинамической технологической обработки (резки, сверления) водной струей разных материалов толщиной до нескольких сантиметров (в частности керамики, мрамора, металлов). Параметры струи (рис. 1) определяются интервалом давле-



*Рис. 1. Вид струи кавитирующей воды на выходе из канала при давлении  $P \approx 500$ –600 атм. Справа от струи находится входное окно рентгеновского спектрометра, окруженное системой акусто- и гидроизоляции*

ний (от 200 до 2000 атм) и зависят от характеристик выходного канала, проходящего сквозь стальной шток. Начальный диаметр сверхзвуковой струи воды на выходе из канала можно было регулировать в интервале 0.3–1 мм.

Для оптимизации процесса образования кавитационных пузырьков в струе воды выходной канал внутри штока имел угол расхождения 5–7 градусов. При оптимальных параметрах канала процесс кавитации достигал максимального значения в конце канала и сразу после выхода в свободное пространство (в воздухе). Регистрация рентгеновского излучения осуществлялась как с помощью амплитудного кремниевого спектрометра рентгеновского излучения («1-2-3 X-ray spectrometer», Amptek Inc.), так и при использовании рентгеновских пленок.

### 1. Исследование спектра рентгеновского излучения быстрой струи воды, выходящей под большим давлением из тонкого канала

При исследовании спектра излучения струи воды входное берилиевое окно амплитудного рентгеновского спектрометра располагалось на минимально доступном расстоянии (около 5 мм) от струи и на удалении 2–4 см от выходного отверстия канала в стальном штоке. В экспериментах было обнаружено, что струя воды, выходящая из канала в воздух, генерирует рентгеновское излучение, максимум спектра которого при давлении 600 атм соответствовал энергии около  $E_X \approx 0.9$  кэВ. Длина пробега этого излучения в воздухе не превышает  $\langle L \rangle \approx 6$ –7 мм. При пробном увеличении давления воды до 1000 атм этот максимум сместился от 0.9 до 1.1 кэВ. Этот результат соответствует двум левым спектрам (рис. 2, а).

При удалении детектора от струи интенсивность регистрируемого рентгеновского излучения очень быстро уменьшалась, и на расстоянии более 1.5 см оно

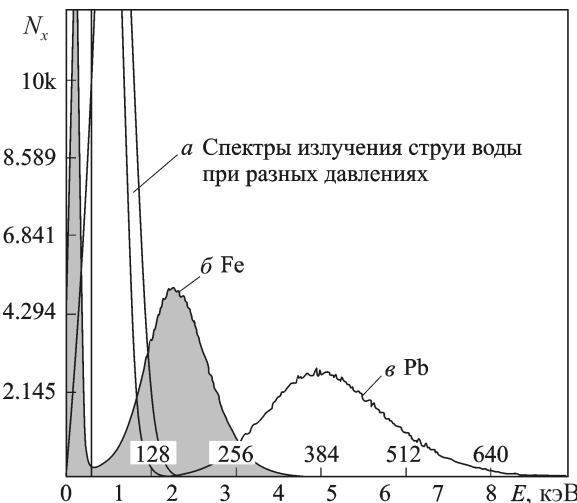


Рис. 2. Спектр рентгеновского излучения: а — выходящей струи свободной воды в режиме кавитации; б — поверхности стального штока с внутренним каналом для кавитирующей воды; в — внешней поверхности штока, на которую был нанесен порошок из свинца.  $N_x$  — число отсчетов в каждом из каналов спектрометра за равное время регистрации каждого из спектров. Крайний левый пик с очень малой энергией в спектре соответствует внутренним шумам спектрометра

не регистрировалось. Физический механизм возбуждения атомов на поверхности струи связан с воздействием на них ударной волны, образуемой при кавитации внутри струи. Он детально рассмотрен в [2] на основе модели импульсного возбуждения атомов при отражении фронта ударной волны от поверхности раздела (в данном случае границы воды и воздуха).

Далее нами были проведены исследования спектра излучения от внешней поверхности стального штока, внутри которого находится расширяющийся канал с быстро текущей кавитирующей водой. Было обнаружено, что внешняя поверхность металлической (стальной) стенки штока, внутри которого находится цилиндрический канал, при том же давлении 600 атм генерировала рентгеновское излучение с максимумом при  $E_X \approx 1.7$ –1.8 кэВ (рис. 2, б).

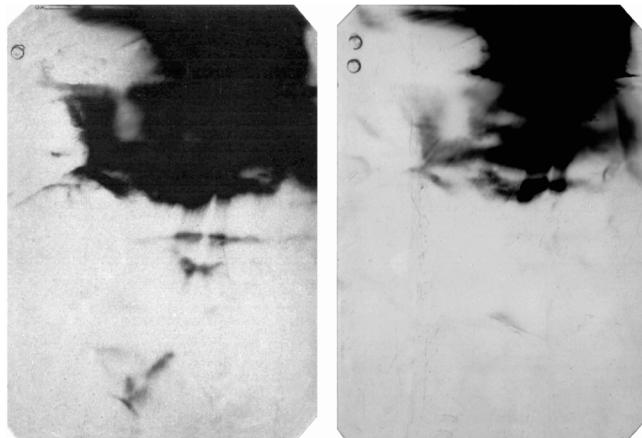
Для изучения влияния атомарного состава поверхности на спектр излучения на поверхность штока был нанесен сплошной слой порошка из мелкодисперсного свинца. При обеспечении надежного акустического контакта этого порошка с поверхностью с помощью специального акустического геля максимум энергии рентгеновского излучения сместился в область спектра  $E_X \approx 4.8$ –5 кэВ (рис. 2, в).

### 3. Регистрация рентгеновского излучения при кавитации на рентгеновские пленки

Независимые исследования процесса генерации рентгеновского излучения при кавитации в объеме струи воды проводились с помощью двух типов рентгеновских пленок — Medical X-Rayscreen CEA A3SE-645-41 (Швеция) и Kodak (Германия), которые оказались одинаково эффективными.

Вначале было проведено исследование излучения, находящегося непосредственно около поверхности струи жидкости и выходного канала. Для этого два листа пленки помещались в общий пакет из светозащитной черной бумаги, который сворачивался в форме цилиндра с радиусом  $R \approx 3$  см и надевался со стороны струи на всю длину штока. При таком расположении деталей расстояние от внешней поверхности штока до пленки было равно примерно  $\Delta R_1 \approx 2.3$  см, а от центра струи воды — около  $\Delta R_2 \approx 3$  см. На рис. 3 представлен вид двух коаксиальных пленок после экспонирования в течение 15 мин при давлении в системе 600 атм и последующего проявления в стандартном проявителе.

Видно, что в области, находящейся около поверхности штока (верхняя часть снимков), существовало очень интенсивное рентгеновское излучение. Общие закономерности пространственного распределения этого излучения идентичны на обеих пленках. Энергию излучения можно оценить, сравнивая более слабое потемнение второй пленки, что связано с поглощением части излучения в объеме первой пленки. Оценки, основанные на анализе степени поглощения рентгеновского излучения в объеме пленки толщиной около 0.15 мм, показывают, что энергия излучения соответствовала области около 2 кэВ, что согласуется с данными спектрометра, представленными на рис. 2. Нижняя часть обеих пленок оказалась практически чистой, что легко объяснить, поскольку длина пробега  $\langle L \rangle \approx 6$ –7 мм



*Рис. 3.* Изображение на двух сложенных без зазора рентгеновских пленках, свернутых в форме цилиндра, расположенных coaxиально с цилиндрическим штоком и установленных так, чтобы по вертикали перекрывать как более широкую часть штока (верхняя темная часть пленки), так и область выхода воды из канала. Левая пленка находилась ближе к штоку, а правая — вплотную (без зазора) за ней

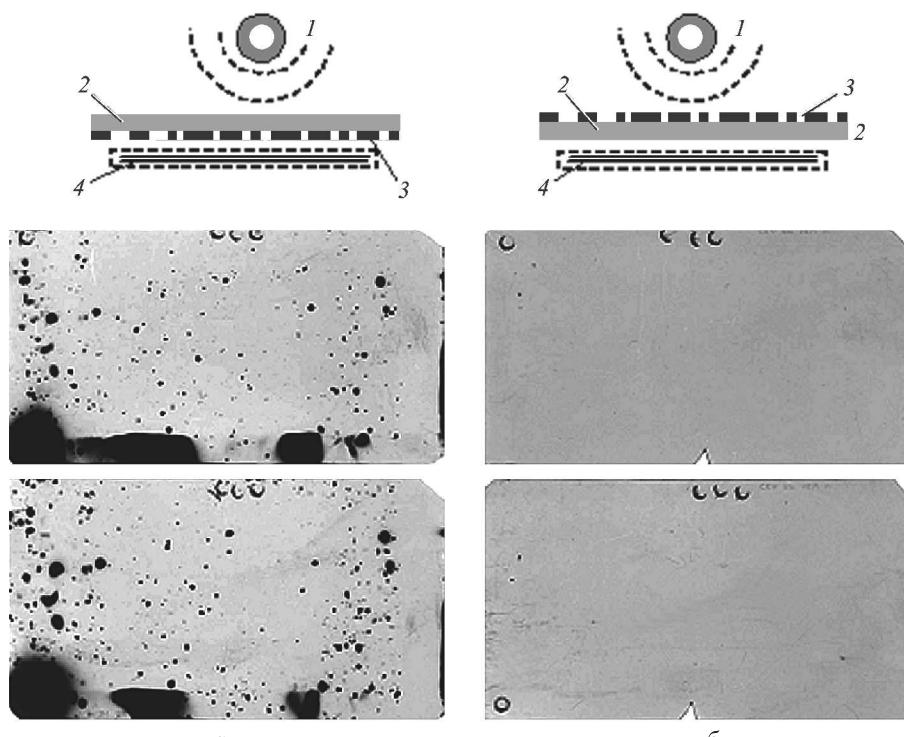
более мягкого излучения с энергией около 1 кэВ от кавитирующей струи воды (см. рис. 2) оказывается намного меньше, чем расстояние от струи до пленки  $\Delta R_2 \approx 3$  см.

В процессе исследований было установлено, что ударные волны, формируемые в результате кавитационных явлений, могут возбуждать рентгеновское излуче-

ние не только на границе той среды, где эти волны образуются за счет кавитационных явлений (в частности на поверхности струи воды), но и далеко за пределами этой области, попадая на границы раздела других сред. Один из многочисленных примеров приведен на рис. 4.

В верхней части этого рисунка приведена схема двух разновидностей эксперимента. На расстоянии 3 см от штока 1 был установлен стальной экран 2 толщиной 3 мм, одна сторона которого была чистой, а другая покрыта слоем краски (многослойной молотковой эмали) 3, в некоторых местах которой были небольшие (около 1 мм) естественные сколы краски с обнажением поверхности металла. Эти сколы символически изображены на рис. 4 белыми пропусками. Тонкая полоска в нижней части этой же покрытой краской стороны экрана была очищена от краски для установки в систему крепления (в прорезь в пенопласте). За экраном на расстоянии 1 см были установлены две сложенные вместе рентгеновские пленки 4, помещенные в общий светозащитный конверт. Размер пленок примерно соответствовал размеру экрана.

Эксперимент проводился при двух положениях экрана — чистой стороной к штоку (рис. 4, а) и чистой стороной к пленкам (рис. 4, б). На рис. 4 под каждой из схем эксперимента приведены результаты проявки двух пленок, экспонированных в течение 30 мин при давлении воды около 600 атм. Верхняя из пленок каждой пары находилась ближе к экрану и частично экранировала нижнюю. Чистое (незасвеченное) состояние пленок, полученных после экспонирования, на рис. 4, б



*Рис. 4.* Схема постановки двух разновидностей эксперимента по формированию рентгеновского излучения от источника кавитации 1 в области за толстым стальным экраном 2, с одной стороны покрытым слоем краски 3. Регистрация осуществлялась на одинаковых парах рентгеновских пленок 4, помещенных в светозащитные конверты и представленных после проявки ниже схемы каждого из экспериментов (верхняя пленка из каждой пары была расположена ближе к экрану). Различие экспериментов состоит в положении экрана: а — чистой стороной к источнику, б — чистой стороной к пленкам

кажется естественным и единственным возможным. Эти пленки после экспонирования и проявки представлены в нижней части того же рисунка. Дело в том, что рентгеновское излучение от штока 1 (на рисунке представлено его сечение с каналом внутри), энергия которого не превышает 2 кэВ, никак не могло попасть на пленки, находящиеся от него на расстоянии 4 см за стальной пластинкой. Это, кстати, подтверждается и тем, что пленки в аналогичном конверте, расположенные симметрично по другую сторону штока на том же расстоянии, в отсутствие экрана после экспонирования возле штока при пропускании воды в режиме кавитации также оказались чистыми (на расстоянии 4 см это излучение практически полностью поглощается в воздухе).

В связи с такой ситуацией появление системы резких пятен на пленках на рис. 4, а кажется на первый взгляд парадоксальным и удивительным. Столь же удивительным было появление сплошной системы темных пятен в нижней части обеих пленок. Все отличие от рис. 4, б состояло в том, что экран был повернут стороной с краской к штоку! Кажется, что рентгеновское излучение никак не могло попасть на эти пленки.

Анализ структуры резких пятен, конфигурация которых полностью совпадает на обеих пленках, показывает, что энергия этого излучения примерно равна 2 кэВ и оно попало на пленки со стороны экрана. Это сразу следует из разницы в яркости регистрируемого облучения на первой и второй (задней) пленке, что связано с поглощением части излучения в первой пленке.

Исходя из такого сопоставления фактов очевидно, что источником регистрируемого малорасходящегося рентгеновского излучения с пространственным распределением в форме дискретно расположенных пятен малого размера является толстый экран.

Можно высказать обоснованное предположение, что под действием ударной акустической волны, действующей на экран со стороны удаленного штока, на обратной (по отношению к источнику кавитации 1) стороне экрана генерируется излучение с энергией около 2 кэВ посредством следующего механизма. Каждая из ударных волн, попадая на экран, возбуждает вторичную когерентную ударную волну в объеме экрана. Эти вторичные волны проходят объем экрана без существенных потерь и, отражаясь от обратной стороны, возбуждают на ней атомы. Распределенное по поверхности возмущение от каждой из волн взаимно когерентно и фазировано. В результате спонтанного распада этих взаимно фазированных возбужденных источников (возбужденных атомов) происходит генерация рентгеновского излучения, характеризуемого значительной поперечной когерентностью. Качественно этот процесс похож на излучение фазированной решетки и на спонтанное оптическое сверхизлучение частично возбужденной квантовой системы [3].

Если передняя и задняя поверхности экрана параллельны, то при падении плоской ударной волны генерируемая рентгеновская волна также будет квазиплоской (за исключением очень слабых краевых эффектов, связанных с дифракцией). Если же начальная ударная волна будет иметь сферическую или другую форму, что отражает геометрию источника конкретной ударной волны, то фронт рентгеновской волны также будет близким

к этим формам. Такая модель совершенно реальна и не противоречит основам рентгеновской оптики.

Если обратная поверхность экрана является атомарно чистой и идеально плоской, то фронт генерируемого рентгеновского излучения повторит фронт ударной волны в области этой поверхности и рентгеновская пленка, находящаяся за экраном, будет иметь квазиоднородное потемнение, величина которого соответствует изменению длины пробега рентгеновских квантов в разных направлениях между экраном и пленками. Однако в эксперименте эта поверхность была покрыта слоем краски, которая а) нарушает граничные условия при отражении ударной волны изнутри от задней поверхности, что ухудшает близость к критерию «импульсного встряхивания» атомов, необходимого для их эффективного возбуждения, и б) вследствие большой толщины сильно поглощает вторичное мягкое излучение, образующееся на границе металла и краски. Лицевая сторона экрана была очищена от краски. И только в тех местах, где слой краски на обратной стороне отсутствовал (случайный скол краски с обнажением металла), происходило формирование вторичных рентгеновских волн. Поскольку размеры этих участков  $D \approx 1$  мм были на много порядков больше длины волны рентгеновского излучения  $\lambda_X \approx 5$  Å, то эти парциальные волны распространялись без учета углового дифракционного расширения  $\Delta\theta \approx \lambda_X/D \approx 10^{-7}$ . При этом угловое положение пятен на пленках определяется на основе геометрической оптики и зависит как от размера сколов, так и от положения конкретного источника ударной волны. Этот же эффект мог быть причиной появления сплошной системы темных пятен вдоль нижней границы пленок. Он был вызван тем, что в этом месте значительная часть экрана была очищена от краски для лучшего механического контакта с системой вертикального крепления экрана.

В случае с перевернутым экраном возбуждаемые ударные волны внутри экрана вследствие большой длины волны гиперзвука будут испытывать значительную дифракцию на неоднородностях поверхности экрана (сколах краски), в результате чего становится невозможным формирование на выходной поверхности малорасходящегося рентгеновского излучения с большой степенью поперечной когерентности. Кроме того, само наличие сравнительно толстого слоя краски сильно затрудняет процесс возбуждения ударной волны внутри металлического экрана. Вследствие этих причин на пленках за экраном будет отсутствовать система резких пятен, а само потемнение пленок окажется несущественным.

Таким образом, есть все основания считать, что система пятен на пленках отражает структуру распределения сколов краски с учетом существования нескольких центров кавитации воды в штоке и подтверждает как наличие ударных волн, так и возможность сложного и многократного преобразования кавитационных явлений, ударных волн и вторичного рентгеновского излучения.

## Заключение

Результаты проведенных экспериментов и выводы, следующие из теоретического анализа [2], показывают,

что интенсивные акустические ударные волны, связанные с кавитационными процессами в струе жидкости, являются источником интенсивного рентгеновского излучения, генерируемого далеко за пределами области кавитации (на границах раздела сред). Частота (энергия) этого излучения зависит от вещества, в котором распространяются и преобразуются ударные волны. В частности, сравнительно мягкое излучение с энергией квантов около 1 кэВ генерируется поверхностью быстрой струи воды в области ее кавитации. Кванты с большей энергией (до 2 кэВ) генерируются поверхностью цилиндрического стального штока, сквозь который выходит канал с жидкостью, а также обратной поверхностью стального экрана в том случае, когда на лицевую поверхность падает интенсивная ударная волна. При акустическом контакте более тяжелых веществ с поверхностью штока энергия квантов увеличивается (при использовании свинцового покрытия энергия рентгеновского излучения возрастила до 5 кэВ).

Оценки, проведенные на основе учета эффективности регистрации излучения рентгеновским детектором, показывают, что полная интенсивность потока рентгеновского излучения в рассматриваемой системе с кавитацией быстрой струи воды при давлении  $P \approx 200\text{--}600$  атм соответствует  $Q \approx 0.1$  кюри. Наличие такого излучения открывает путь к созданию принципиально новых типов генераторов рентгеновского излучения, не требующих источников высокого напряжения для ускорения электронов!

Впервые показано, что интенсивные ударные вол-

ны, которые генерируются в воздухе около поверхности объектов с кавитирующей водой, могут при взаимодействии с удаленными объектами (экранами) генерировать не только вторичную ударную волну, но и вторичную рентгеновскую волну. Эта волна формируется в процессе отражения вторичных ударных волн, образуемых в объеме экранов, от обратной поверхности этих объектов. Из-за очевидной поперечной когерентности ударной волны вторичная рентгеновская волна также может обладать значительной степенью поперечной когерентности. Такие системы не имеют аналогов в физике рентгеновского излучения.

Проведенные нами исследования показали, что система из комбинированных ударно-рентгеновских волн может быть использована для итогового управления рентгеновским излучением и создания систем фокусировки и пространственной монокроматизации рентгеновского излучения (в том числе с использованием комбинированных акусторентгеновских металлических или керамических линз с малым фокусным расстоянием).

### Список литературы

- Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Колдамасов А.И. и др. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2007. № 3. С. 55.
- Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Сысоев Н.Н., Десятков А.В. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед. 2009. № 4. С. 17.
- Высоцкий В.И., Кузьмин Р.Н. Гамма-лазеры. М., 1989.

### Shock-cavitational mechanism of X-ray generation at cavitational of fast water stream

**A. A. Kornilova<sup>1</sup>, V. I. Vysotskii<sup>3,a</sup>, N. N. Sysoev<sup>2,b</sup>, N. K. Litvin<sup>4</sup>, V. I. Tomak<sup>4</sup>, A. A. Barzov<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Department of Solid State Physics; <sup>2</sup>Department of Molecular Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

<sup>3</sup>T. Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv 01033, Ukraine.

<sup>4</sup>N. E. Bauman Moscow State Technical University (MSTU), Moscow 105005, Russia.

E-mail: <sup>a</sup>vivysotskii@univ.kiev.ua, <sup>b</sup>nn.sysoev@physics.msu.ru.

The process of generation of X-ray radiation formed during the free exit of a fast stream of water in the state of cavitation from a narrow channel was investigated both experimentally and theoretically. It was observed for the first time that the initial part of the stream and the outlet of the channel are the sources of intensive X-ray radiation (with an activity of 0.1 Cu), which is connected with the cavitation phenomena and the following excitation of shock waves. Frequency of X-ray radiation depends on the composition of a radiating surface (water or a surface of channel walls) and increases with the increase of surface atom number. The mechanism of radiation generation is connected with the influence of formed at cavitation shock waves on the nearest interface (water-air, water-metal, metal-air, air-metal, etc.).

**Keywords:** X-ray radiation, shock waves, cavitation, ultrasound, coherence, radiation processes.

PACS: 47.55.dp 47.55.dr 61.80.Cb.

Received 29 July 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2010).

### Сведения об авторах

- Корнилова Альбина Александровна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр, директор Инновационного научно-образовательного центра физического ф-та МГУ; тел.: (495) 939-13-13, e-mail: prfnari@mail.ru.
- Высоцкий Владимир Иванович — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой теоретической радиофизики радиофизического ф-та Киевского национального ун-та; тел.: +380(44) 526-05-83, e-mail: vivysotskii@univ.kiev.ua.
- Сысоев Николай Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, зам. декана физического ф-та МГУ; тел.: (495) 939-10-97, e-mail: nn.sysoev@physics.msu.ru.
- Литвин Николай Константинович — канд. техн. наук, нач. лаборатории МГТУ, НИИ специального машиностроения; тел.: (495) 993-98-03, e-mail: logo-start@mail.ru.
- Томак Виктор Иванович — канд. техн. наук, зав. отделом НИИЭМ МГТУ; тел.: (495) 993-96-71, e-mail: mgtu-e14@mail.ru.
- Барзов Александр Александрович — докт. техн. наук, профессор; тел.: (495) 263-65-96, e-mail: cm12@sm.mx.bmstu.ru.