

# ФИЗИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

---

---

**В.И. ВЫСОЦКИЙ,**

*Доктор физ.-мат. наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
Киевский национальный университет  
им. Т. Шевченко  
Киев, Украина*

**А.А. КОРНИЛОВА,**

*Директор*

**Ю.В. КОРНЕЕВА,**

*Ученая степень, звание, должность*

**Т.Б. КРИТ**

*Ученая степень, звание, должность*

*Московский государственный университет*

*им. М.В. Ломоносова,*

*Москва, Российская Федерация*

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ РАДИАЦИОННЫХ И ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ КАВИТАЦИИ СТРУИ ЖИДКОСТИ 1. АНОМАЛЬНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ГЕНЕРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СТИМУЛИРОВАННОГО ПРОЦЕССОМ КАВИТАЦИИ ЖИДКОСТИ

*Рассмотрены оптические и радиационные (рентгеновские) процессы, которые сопутствуют режиму кавитации при поступательном движении двух типов жидкостей – циркулирующего по замкнутому контуру машинного масла или свободного выхода сверхзвуковой струи воды из узкого канала. Показано, что в определенном интервале давлений при выходе струи машинного масла из диафрагмы возникает интенсивное бело-голубое свечение, свойства которого принципиально отличаются от сонолюминесценции. Обнаружено, что корпус камеры, внутри которой происходит зарождение и эволюция кавитационных пузырьков в объеме циркулирующего масла, а также выходная часть канала и начальный участок струи воды являются источниками интенсивного рентгеновского излучения, генерация которого связана с процессами кавитации и последующим возбуждением ударных волн. Частота (энергия) рентгеновского излучения зависит от типа атомов на излучающей поверхности (для масла – корпус камеры, для струи воды – поверхность струи, для канала – атомы металла на поверхности) и возрастает с увеличением заряда атомов от 1 до 5 кэВ. Полная активность рентгеновского излучения в исследуемой установке в режиме свободного выхода струи превышает 0,1 Кюри. Впервые обнаружено, что воздействие на толстые отдаленные экраны ударных акустических волн, которые формируются в воздухе в результате кавитации струи воды, приводит к генерации квазикогерентного направленного рентгеновского излучения с обратной стороны этих экранов. Пространственные параметры этого излучения зависят от формы и сечения экрана и от пространственных характеристик ударной волны. Предсказана возможность и проведены эксперименты по использованию «классических» твердотельных (стеклянных и металлических) линз для итоговой фокусировки комбинированных акусто-рентгеновских волн. Показано, что такие устройства можно использовать для фокусировки импульсного рентгеновского излучения.*

**Ключевые слова:** кавитация в струе жидкости, ударные волны, генерация рентгеновского излучения.

**V.I.VYSOTSKII,**

*Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor,  
Head of Department  
Kiev National Shevchenko University  
Kiev, Ukraine*

**A.A.KORNILOVA,**

*Ученая степень, звание, должность*

**YU.V. KORNEEVA,**

*Ученая степень, звание, должность*

**T.B. KRIT**

*Ученая степень, звание, должность*

*Lomonosov Moscow State University  
Russian Federation*

## **INVESTIGATION OF ANOMALOUS RADIATION AND HEAT PHENOMENA IN CAVITATION LIQUID JET**

### **1. ANOMALOUS EFFECTS IN THE GENERATION OF X-RAY RADIATION STIMULATED BY LIQUID CAVITATION**

*In the work are discussed the optical and radiation (X-ray) processes, which are accompanied by cavitation mode during the forward movement of the two types of liquids – pumped in a closed loop engine oil or free exit of a supersonic jet of water from a narrow channel. It is shown that in a certain pressure range at the outlet of the jet engine oil from the diaphragm arises intense white-blue light, the properties of which are fundamentally different from sonoluminescence. It has been found that the casing chamber, inside which there is an origin and evolution of cavitation bubbles in the volume of circulating oil, and the output channel portion and the initial portion of the water jet are sources of intense X-ray, the generation of which is associated with cavitation and subsequent excitation of shock waves. Frequency (energy) of X-rays depends on the type of atoms on the emitting surface (for oil - the camera body, for water jet - the atoms on the surface of channel) and increases with increasing charge atoms of 1keV up to 5 keV. The total activity of X-rays in the test installation in free outlet stream exceeds 0,1 Curie. It is found for the first time that the effects of acoustic shock waves on thick remote screens are generated in the air by cavitation jet of water causes the generation of a quasi-coherent X-ray radiation is directed from the back side of the screen. The spatial parameters of this radiation depending on the shape and the cross section of the screen and on the spatial characteristics of the shock wave. Experiments on the use of «classical» solid lens (glass and metal) for the final combined acousto-focus X-ray waves are conducted. It is shown that one can use such a device for focusing a pulsed X-ray radiation.*

**Key words:** cavitation in the liquid jet, shock waves, generation of X-rays.

#### **Введение**

Хорошо известно, что кавитационные явления представляют собой сложную и взаимосогласованную последовательность процессов, связанных с гидродинамикой, механикой, молекулярной физикой и термодинамикой. Единственным оптическим проявлением кавитации считалось явление сонолюминесценции, которое связано с разогревом пространства внутри коллапсирующего микропузырька до температуры  $T \approx 2000 \dots 5000$  К для многопузырьковой и до  $T \approx 10^5$  К для однопузырьковой люминесценции [1]. Последний режим реализуется при аксиально-симметричном синхронизованном ультразвуковом воздействии на жидкость. Это излучение имеет очень малую интенсивность, оно не поляризовано и изотропно. Аналогичное аксиально-симметричное воздействие, приводящее к электронно-ядерному коллапсу твердотельной мишени, реализуется при симметричном

воздействии импульсного сильноточного электронного пучка на мишень [2...4].

В данной работе представлены результаты исследований аномальных оптических, радиационных и температурных эффектов, связанных с кавитацией струи жидкости, вытекающей под давлением из узкого канала. До наших работ [5...8] такие, связанные с кавитацией, эффекты были неизвестны.

Эти исследования проводились в разных режимах возбуждения кавитации с двумя типами жидкостей – машинное масло и вода.

#### **1. Генерация оптического и рентгеновского излучения при кавитации струи вязкой жидкости**

В работах [5, 6] были проведены исследования процессов, которые имели место при движении вязкой жидкости в состоянии кавитации, возникающей в машинном (веретенном) масле при его

выходе под давлением из узкого диэлектрического канала внутрь герметичной рабочей (кавитационной) камеры. Схема используемой экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

Объем машинного масла, циркулирующей по замкнутому контуру, был равен 20 л. Цилиндрическая рабочая камера имела длину 15 см, диаметр 8 см и была изготовлена из плексигласа с толщиной стенок около 3 см. В центре камеры находилась диэлектрическая перегородка, сквозь которую проходила диафрагма с тонким прямолинейным каналом диаметром около 1 мм и длиной 2 см. Конструкция установки позволяла проводить исследования в интервале давлений жидкости от 1 атм до 100 атм в пространстве перед каналом. Исследование режимов кавитации проводилось с помощью средств оптической регистрации пространства перед и после канала при разных давлениях рабочей жидкости.

Поэтапное изменение давления машинного масла приводило к изменению структуры и вида жидкости, выходящей из канала. В исходном состоянии и при небольшом давлении масла ( $P \leq 20 \dots 25$  атм) было достаточно прозрачным и имело темно-коричневый цвет как до диафрагмы, так и после нее. При давлении около 30 атм в объеме масла за выходным отверстием канала начинался процесс начальной турбулентности в виде вихрей, видимых невооруженным глазом. При возрастании давления до 40 атм средний размер турбулентных вихрей становился очень маленьким, в результате чего масло в пространстве за каналом становилось молочно-белым и похожим на густой туман. Этот режим соответствовал началу процесса формирования кавитационных пузырьков в масле. При увеличении давления до 60 атм происходил отрыв жидкости от стенок камеры и формирование направленной малорасходящейся струи, а при  $P > 70 \dots 80$  атм возникало яркое бело-голубое свечение этой струи (рис. 2).

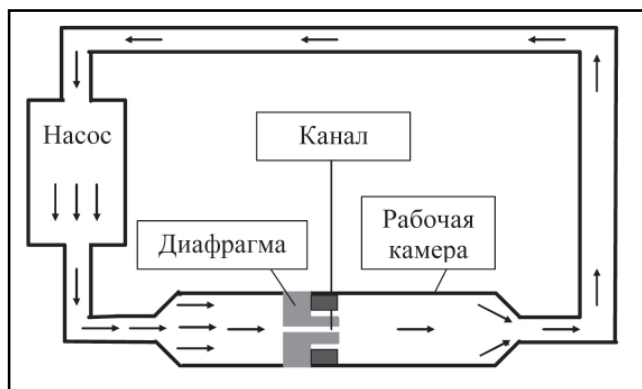


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования радиационных процессов в струе машинного масла в состоянии кавитации

Было обнаружено [5], что это свечение не имело отношения к сонолюминесценции, которая наблюдается, например, при акустическом стимулировании кавитации внешним источником ультразвука (например, [1]). Оно также не было связано с гипотетически возможным механизмом черенковского излучения, которое могло быть вызвано движением заряженных частиц, образуемых и ускоряемых в жидкости за счет появления разделенных электрических зарядов, возникающих на поверхности диэлектрического канала, поляризуемого движущимся машинным маслом. Это обстоятельство было выяснено при попытках изучить влияние сильного внешнего поперечного магнитного поля на характеристики свечения. Даже при напряженности поля  $H = 1000$  Эрстед характер свечения не изменялся.

Для выяснения механизма свечения изучались другие радиационные поля за пределами камеры. Было обнаружено (рис. 3), что поверхность (внешняя стенка) камеры является источником рентгеновского излучения. Основная часть исследований проводилась с использованием амплитудного кремниевого спектрометра рентгеновского излучения X-123 («1-2-3 X-ray spectrometer», Amptek Inc).

Излучение генерировалось только при сравнительно небольшом (в интервале  $P \approx 25 \dots 60$  атм) давлении жидкости, когда струя жидкости касалась внутренней стенки камеры. По мере увеличения давления частота максимума излучения смещалась в более жесткую область, а величина максимума убывала. Оценки, проведенные на основе учета эффективности регистрации излучения рентгеновским детектором, показывают, что полная интенсивность рентгеновского излучения в рассматриваемой системе с кавитацией быстрой струи воды соответствует  $Q \approx 2,5 \cdot 10^9$  квант/с  $\approx 0,1$  Кюри.

При  $P > 65 \dots 70$  атм рентгеновское излучение не регистрировалось. В результате уточняющих исследований было показано, что процесс генерации

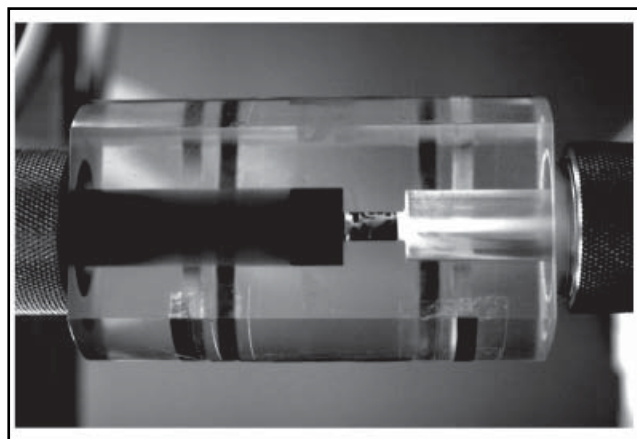


Рис. 2. Свечение направленной струи жидкости с кавитационными пузырьками при давлении  $P \geq 80 \dots 90$  атм

рентгеновского излучения непосредственно не связан с кавитацией струи жидкости, но является ее прямым следствием. Этот процесс связан с «встряхиванием» или ионизацией атомов на внешней поверхности камеры (на границе раздела вещества камеры и окружающего воздуха) при внутреннем отражении очень короткого фронта (длина не более 1 нм) акустической ударной волны, возбуждаемой кавитацией, от внешней поверхности камеры.

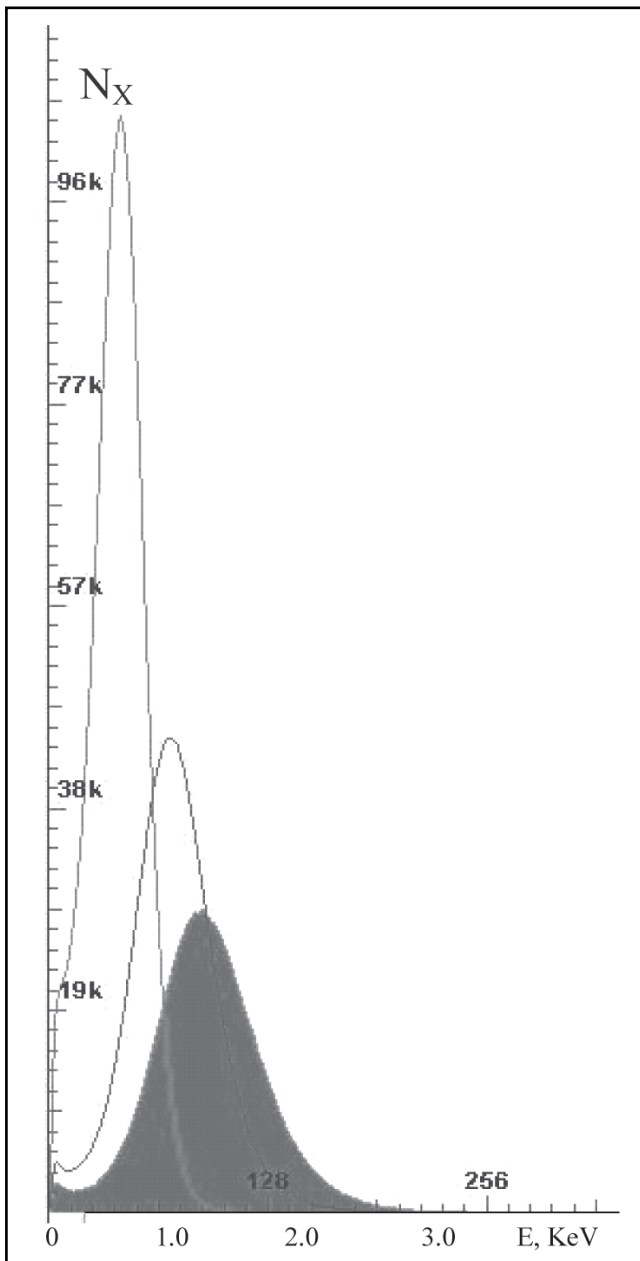


Рис. 3. Изменение спектра рентгеновского излучения, генерируемого поверхностью поверхности кавитационной камеры, при поэтапном увеличении давления масла (слева направо – 20, 40 и 60 атм). Цифры у вертикальной оси соответствуют числу регистрируемых квантов в каждом из каналов спектрометра. Цифры выше горизонтальной оси определяют номер канала спектрометра, соответствующий энергии регистрации.

Такой процесс соответствует известному в квантовой механике методу возбуждения квантовой системы при действии на нее импульсного возмущения и рассчитывается в приближении нестационарной теории возмущений. Детальный расчет сценария такого процесса, который хорошо согласуется с результатами экспериментов, приведен в [6]. В частности, при быстром изменении скорости атома на поверхности (от 0 до  $v$ ) вероятность возбуждения электронного перехода  $100 \rightarrow 210$  описывается выражением

$$W_{100,210} = \left| \int_V \Psi_{100}^*(\vec{r}) \Psi_{210}(\vec{r}) e^{imvz/\hbar} dV \right|^2 = \frac{9}{32} \frac{(v/v_{100})^2}{\left\{ (9/4) + (v/v_{100})^2 \right\}^6}.$$

Здесь  $v_{100} = Ze^2 / \hbar \approx 2,3 \cdot 10^8 Z$  см/с – среднеквадратичной скоростью электрона в состоянии  $\Psi_{100}(\vec{r}, t)$ ;  $a = \hbar^2 / m_e e^2 \approx 5 \cdot 10^{-9}$  см – борковский радиус;  $Z$  – заряд ядра атома.

Учитывая, что скорость движения атомов  $v$  на фронте ударной волны мала по сравнению с  $v_{100}$  находим выражение для вероятности перехода  $100 \rightarrow 210$

$$W_{100,210} \approx 2,2 \cdot 10^{-3} (v/v_{100})^2.$$

Возбужденные атомы быстро распадаются на переходе  $210 \rightarrow 100$  с излучением кванта характеристического излучения с энергией  $\hbar\omega_{210,100} = 3Z^2 m_e e^4 / 8\hbar^2$ . Если принять для оценки экспериментально измеренное значение для скорости ударной волны  $v = 4 \cdot 10^6$  см/с, то получим выражение для вероятности возбуждения  $K_\alpha$  линии излучения при ускорении одного атома  $W_{100,210} \approx 4 \cdot 10^{-12} / Z^2$ . Поверхностная концентрация таких атомов составляет  $n^{-2/3} \approx 3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>, а период повторения ударных волн  $T \approx 1$  мс (рис. 5 и 6). В итоге средняя интенсивность рентгеновского излучения с поверхности камеры составит величину  $J \approx W_{100,210} n^{-2/3} / T \approx 2 \cdot 10^5$  квантов/см<sup>2</sup> с. Аналогичным образом можно оценить вероятность возбуждения других состояний в атомах, находящихся на поверхности камеры.

Кроме возбуждения характеристического спектра процесс отражения ударных волн также приводит к возбуждению плазменных колебаний и отрыву небольшой части атомов с одновременной деформацией электронных состояний. Все эти процессы в итоге формируют квазинепрерывный спектр с энергией, зависящей от типа атомов.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности передачи энергии кавитационных пузырьков из объема струи быстро текущей жидкости,

выходящей из тонкого канала, к внешней поверхности кавитационной камеры посредством формирования в ней ударных волн с последующим возбуждением ее атомов и испусканием рентгеновского излучения. При повышении давления интенсивность возникновения кавитационных пузырьков возрастает, но одновременно происходит сжатие струи жидкости и уменьшается эффективность передачи акустических волн к внутренней стенке камеры. Этот процесс объясняет смещение пика излучения в сторону больших энергий с одновременным уменьшением его амплитуды (рис. 3). При дальнейшем повышении давления струя «отрывается» от стенок камеры, ударные волны в стенках камеры не возбуждаются, а внешнее рентгеновское излучение исчезает. В этом случае ударные волны, возбуждаемые в струе в результате многочисленных актов кавитации, отражаются от внешней поверхности самой струи. Этот процесс приводит к возбуждению атомных и молекулярных переходов в поверхности движущейся струи. Последующее излучение на этих переходах приводит к яркому свечению струи как в оптическом, так и в рентгеновском диапазонах. Рентгеновское излучение струи сложно зарегистрировать в закрытой камере, и оно будет детально рассмотрено ниже для случая свободной струи воды.

Этот механизм излучения не относится к сонолюминесценции и является новым видом свечения при кавитации.

Таким образом, эффект генерации рентгеновского излучения наблюдался только при сравнительно небольшом давлении, когда одновременно выполнялись два условия: а) формирование кавитационных пузырьков в объеме струи жидкости, б) касание пространственно расходящейся струи

кавитирующей жидкости внутренней поверхности стенок камеры. При этом энергия ударных волн от центров кавитации передавалась через жидкость к внешней поверхности камеры, где и возникало излучение. Эта схема представлена на рисунке 4.

Отметим еще одно важное обстоятельство. Процесс формирования кавитационных пузырьков начинался как случайный процесс, аналогичный дробовому шуму, с флуктуационных зародышей в объеме жидкости при резком уменьшении давления (при выходе из канала). При анализе динамики процесса необходимо учитывать обратное влияние ударных волн (фактически – положительную обратную связь) на параметры диафрагмы, формирующей процесс зарождения кавитационных пузырьков. Это влияние быстро переводит процесс формирования кавитационных микропузырьков в режим автогенерации, аналогичный «классическому» генератору Ван-дер-Поля для запуска процесса генерации в электронной лампе с положительной обратной связью. Эта положительная обратная связь символически показана фигурной стрелкой на рисунке 4.

Этот механизм частично был подтвержден при исследовании ударных волн, которые регистрировались акустическим датчиком, расположенным на поверхности камеры (рис. 5) [2] и внутри нее (рис. 6).

Амплитуда этих волн превышала 300...400 А. Под действием этих волн происходит возбуждение и ионизация атомов на внешней поверхности кавитационной камеры, а также частичное разрушение (эрозия) этой поверхности. Эти акустические импульсы были также зарегистрированы внутри камеры с помощью специального «внутреннего» широкополосного датчика, изготовленного из пьезопластики толщиной 0,2 мм (резонансная частота 10 МГц) диаметром 8 мм. Чувствительность

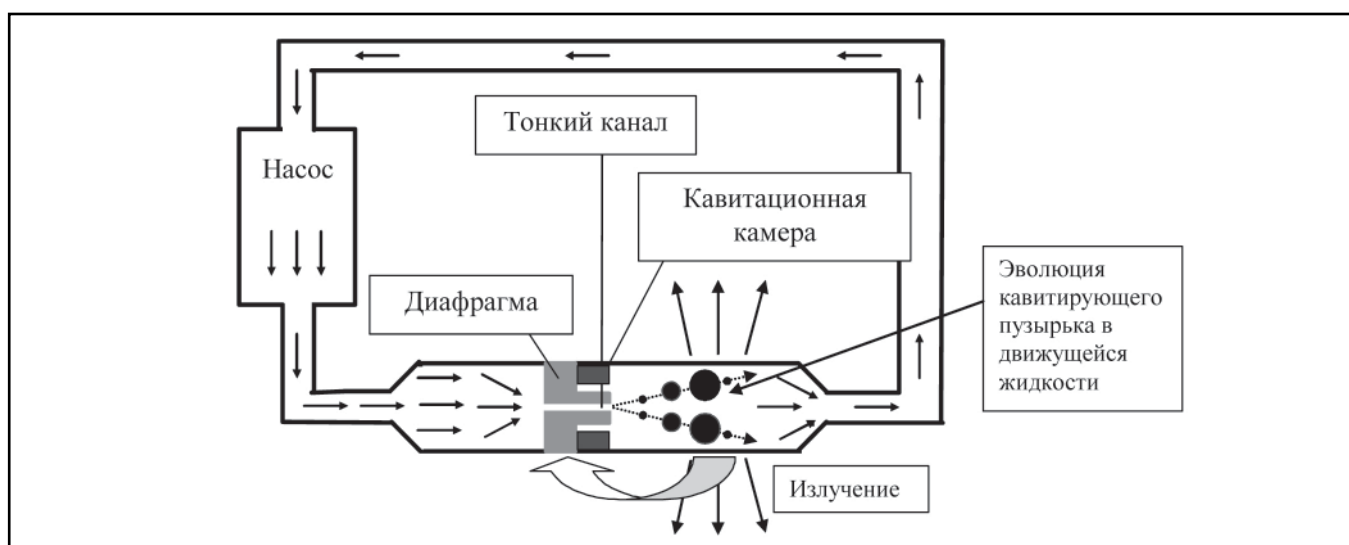


Рис. 4. Схема формирования рентгеновского излучения при кавитации струи жидкости с учетом положительной обратной связи ударных волн (фигурная стрелка) на процесс формирования струи жидкости и последующую кавитацию

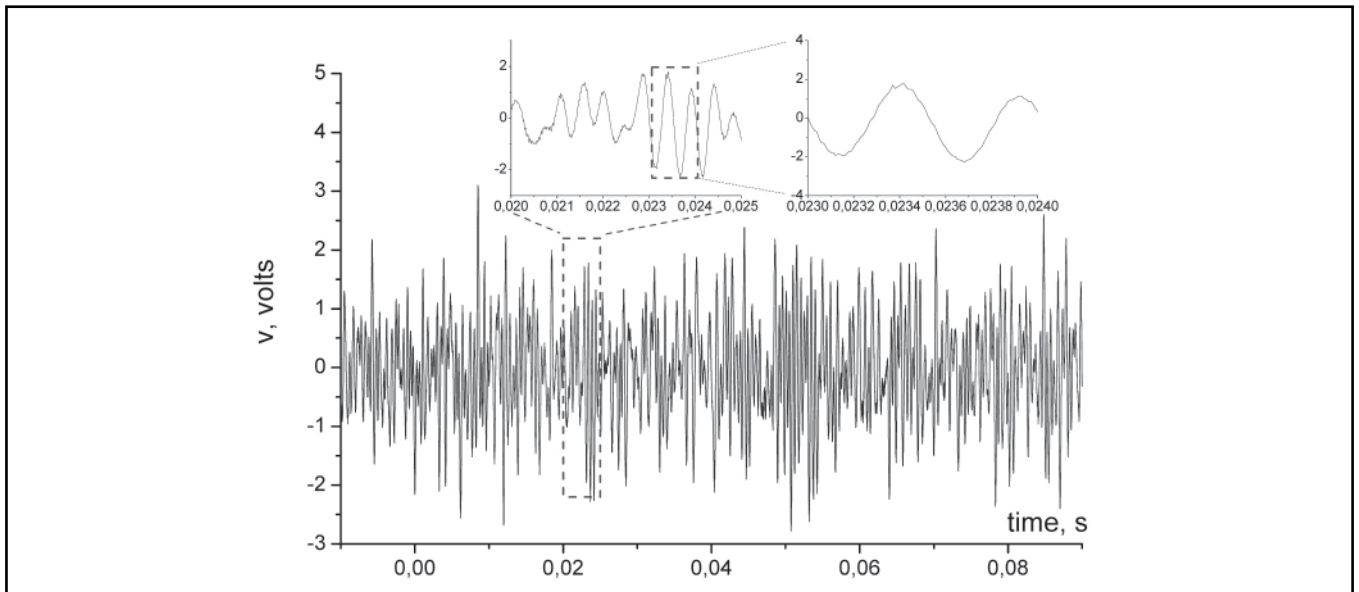


Рис. 5. Спектр акустических импульсов, формируемых кавитирующим машинным маслом при давлении 37 атм на поверхности рабочей камеры

датчика  $\approx 100 \dots 200$  мВ/атм. Давление и температура масла в первой полости (до канала) также контролировались встроенными датчиками

При изменении типа атомов на излучающей поверхности изменяется спектр рентгеновского излучения. На рисунке 7 представлены результаты измерения рентгеновского спектра в случае механического закрепления атомов меди на поверхности камеры специальным акустическим гелем. В этом случае максимум спектра излучения смещается от  $\approx 1$  кэВ (соответствующего оргстеклу) в область более высоких частот (около 3,5 кэВ).

В спектре этого излучения отсутствуют высокочастотные линии характеристического излучения меди, для возбуждения которых нужны более короткие ударные импульсы.

В рамках рассматриваемого сценария механизм свечения струи жидкости (рис. 2) при сравнительно низком давлении масла связан со следующими

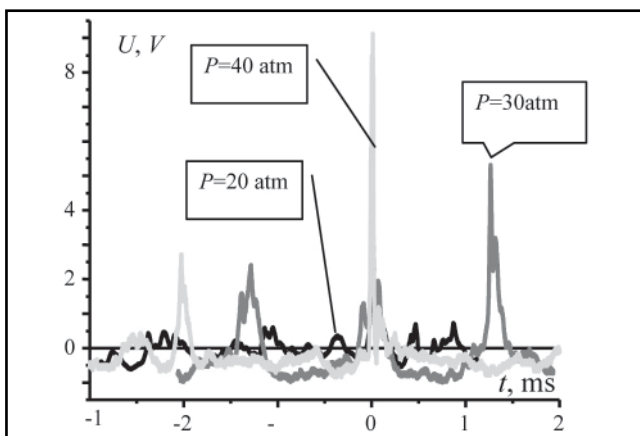


Рис. 6. Акустические ударные волны внутри камеры при разном давлении масла

эффектами. В режиме формирования направленной струи масла в состоянии кавитации, не соприкасающейся с корпусом камеры, ударные волны, связанные с эволюцией кавитационных пузырьков, циркулировали внутри струи. Из-за малого радиуса струи амплитуда этих волн была большой. Взаимодействие этих волн с поверхностью самой струи приводило к возбуждению и ионизации атомов на поверхности и последующему широкополосному излучению. Рентгеновская компонента этого излучения не

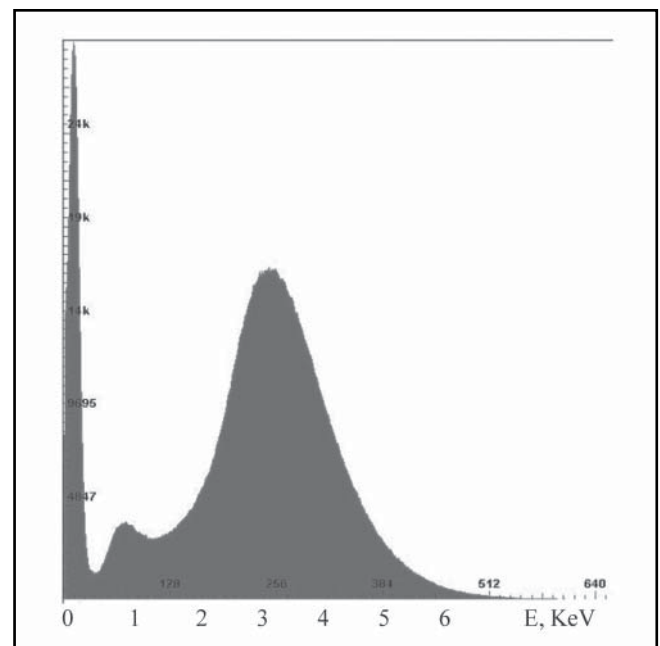


Рис. 7. Спектр рентгеновского излучения, регистрируемого за пределами камеры со струей масла при давлении 37 атм и при наличии порошка меди, механически и акустически связанного с внешней поверхностью камеры

могла выйти за пределы камеры, а оптическая вызывала интенсивное свечение струи.

## 2. Генерация перестраиваемого рентгеновского излучения при кавитации быстрой струи воды, выходящей из металлического канала

Вторая часть исследований [7, 8] связана с оптимизацией процесса генерации рентгеновского излучения. Такая оптимизация предполагала переход к более естественной рабочей среде (воде) и к более фундаментальному изучению процесса генерации в открытом пространстве (в том числе и при использовании больших давлений жидкости).

Часть исследований радиационных процессов, сопутствующих формированию узкой высокоскоростной дозвуковой струи воды, проводилась на установке КМТ, предназначенной для гидродинамической (технологической) обработки разных материалов, включая ее резку. В штатном режиме эта установка обеспечивает высокоточную быструю резку прочных материалов толщиной до 2...4 см при давлении от 250 до 2000 атм. В данной работе режим кавитации на свободной струе воды исследовался в интервале давлений  $P \approx 250 \dots 600$  атм. Начальный диаметр сверхзвуковой струи воды на выходе из канала можно было регулировать в интервале 0,3...1 мм. С повышением давления происходит естественное сжатие струи воды.

Для оптимизации процесса образования кавитационных пузырьков в струе воды выходной канал внутри стального штока начинался от отдаленной внутренней сферической полости, куда вода поступала под большим давлением, и на протяжении 8 см до выхода постепенно расширялся (угол расхождения 5...7 градусов). Заданные размеры формируются с помощью сапфировых втулок с отверстиями заданного малого диаметра. Выходной узел установки с системой формирования высокоскоростной струи воды представлял тонкий канал внутри стального штока с внешним диаметром 14,2 мм (верхняя часть) и 10,6 мм (нижняя часть с наружной резьбой). При таких параметрах завершающая стадия процесса кавитации (быстрое «схлопывание» кавитационных пузырьков) в движущейся струе соответствовала области в конце канала и в пределах нескольких см за пределами канала (сразу после выхода струи в свободное пространство (в воздух)).

При исследовании спектра излучения струи воды входное бериллиевое окно детектора 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 (рис. 8, левые графики). Длина пробега этого излучения в воздухе не превышает  $\langle L \rangle \approx 6 \dots 7$  мм. При увеличении давления воды до 1000 атм этот максимум смещался от 0,9 кэВ до 1,1 кэВ. В процессе экспериментов проводились исследования зависимости спектра излучения от поворота оси детектора на небольшой угол и от расстояния. При удалении детектора от струи или при повороте интенсивность регистрируемого рентгеновского излучения очень быстро уменьшалась и на расстоянии более 1,5 см оно не регистрировалось.

Были также проведены исследования спектра излучения от внешней поверхности стального штока, внутри которого находится расширяющийся канал с быстро текущей водой, содержащей кавитационные пузырьки. Было обнаружено, что внешняя поверхность металлического штока, внутри которого находится цилиндрический канал, при том же давлении 600 атм генерировала рентгеновское излучение с максимумом при  $E_x \approx 1,7 \dots 1,8$  кэВ (рис. 8, график «Fe»). При нанесении на поверхность штока сплошного слоя порошка из мелкодисперсного свинца и обеспечении акустического контакта порошка с этой поверхностью максимум энергии излучения смещался в область  $E_x \approx 4,8 \dots 5$  кэВ (см. рис. 8, график «Pb»).

Для увеличения достоверности регистрации и изучения пространственного распределения генерируемого рентгеновского излучения проводились контрольные исследования с помощью рентгеновских пленок. В экспериментах использовались два типа рентгеновской пленки – Medical X-Ray screen СЕА А3SE-645-41 (Швеция) и Kodak (Германия), результаты на которых оказались одинаковыми.

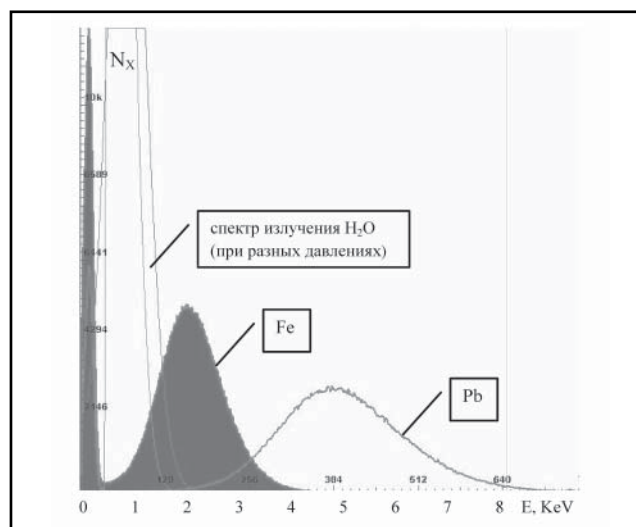


Рис. 8. Совместные спектры рентгеновского излучения воды, поверхности стального штока и свинцового покрытия этой поверхности в режиме кавитации струи воды

Было проведено исследование излучения, генерируемого непосредственно около поверхности струи жидкости и выходного канала. Для этого 2 листа пленки помещались в общий пакет из светозащитной черной бумаги. Пакет сворачивался в форме цилиндра с радиусом  $R \approx 3$  см и надевался со стороны выходного отверстия на всю длину штока. При таком расположении расстояние от внешней поверхности штока до пленки было равно  $\Delta R_1 \approx 2,3$  см, а от центра струи воды – около  $\Delta R_2 \approx 3$  см. На рисунке 9 представлен вид пленок после экспонирования в течение 15 мин при  $P = 600$  атм и проявки.

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 наглядно 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 совпадает с данными спектрометра, представленными на рисунке 9, кривая «Fe»).

Нижняя часть пленок оказалась практически чистой, что легко объяснить, поскольку средняя длина пробега  $\langle L \rangle \approx 6 \dots 7$  мм более мягкого излучения с энергией около 1 кэВ от кавитирующей струи воды оказывается намного меньше, чем расстояние от струи до пленки  $\Delta R \approx 3$  см.

### 3. Комбинированные эффекты при взаимодействии рентгеновских и ударных акустических волн на границах раздела

Еще один цикл проведенных нами исследований был связан с обнаруженными аномалиями взаимного превращения рентгеновских и ударно-акустических волн.

Эксперименты проводились с использованием толстого стального экрана (толщина 3 мм), расположенного на расстоянии  $L = 3$  см от оси металлического штока, внутри которого проходил канал с кавитирующей водой. За экраном на расстоянии 1 см находились 2 пленки в общем светозащитном конверте (рис. 10).

Одна сторона экрана была покрыта краской (молотковой эмалью), в которой имелись отдельные дефекты (скол краски, царапины и др.), а другая была очищена от краски.

Геометрия расположения источника ударной волны, экрана со слоем краски и пары пленок ( $a_1, a_2$ ), расположенных за экраном, представлена на рисунке 10. Две другие пары пленок ( $b_1, b_2$  и  $c_1, c_2$ ) в аналогичном светозащитном конверте были расположены симметрично (рис. 10) по другую сторону канала на таком же расстоянии 3 см и 4 см от оси. На этой фотографии труба в центре показывает место расположения металлического штока, внутри которого проходил канал с кавитирующей водой.

На рисунке 11 представлен вид пленок после экспонирования в течение 30 мин работы установки для двух разновидностей эксперимента (при двух противоположных ориентациях экрана по отношению к пленкам  $a_1, a_2$  и источнику 1) при давлении воды 600 атм и последующей проявке.



Рис. 9. Изображение на последовательно сложенных без зазора рентгеновских пленках, свернутых в форме цилиндра, расположенные коаксиально с цилиндрическим штоком на расстоянии 7 мм и установленные так, чтобы по вертикали перекрывать конец штока (верхняя темная часть пленки) и область выхода воды из канала. Левая пленка находилась ближе к штоку, а правая – вплотную за ней. Положение пленок показано на левом рисунке.



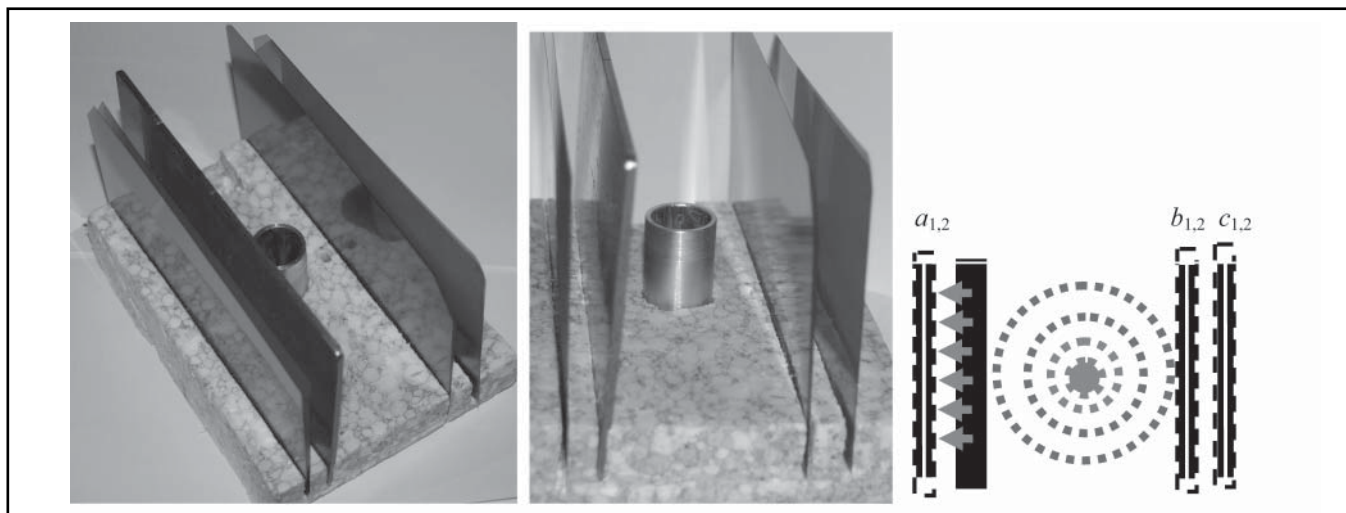


Рис. 10. Схема (правый рисунок) и общий вид эксперимента по «заэкранной» генерации рентгеновского излучения

Эксперимент проводился при ориентации экрана либо чистой, либо окрашенной стороной к источнику 1. Результаты этого эксперимента оказались парадоксальными.

Прежде всего, оказалось, что пленки  $b_{1,2}$ ,  $c_{1,2}$ , расположенные с правой стороны (рис. 10) после экспонирования оказались чистыми. Этот результат был ожидаемым, поскольку длина пробега квантов  $\langle L \rangle$  с энергией 2 кэВ была меньше расстояния от источника рентгеновского излучения до неэкранированных металлом пленок.

Из рисунка 11а следует, что в случае ориентации толстой стальной пластины частично окрашенной стороной к пленкам изображение на обеих пленках ( $a_{1,2}$ ) формировалось в форме отдельных локализованных пятен, положение и конфигурация которых полностью совпадали. Эти пятна были вызваны одним и тем же потоком рентгеновского излучения. Малый размер и резкая граница пятен свидетельствовали о малой угловой расходимости потока рентгеновского излучения.

Разница в яркости регистрируемого облучения на первой и второй (задней) пленке связана с поглощением части излучения в первой пленке. Оценки степени поглощения показывают, что пленки облучались достаточно интенсивным рентгеновским излучением с энергией около 2 кэВ. Это совпадает с параметрами излучения, регистрируемого около поверхности аналогичного по материалу стального штока при ударном воздействии, сопровождающем кавитацию.

С другой стороны, это излучение никак не могло попасть на пленки от штока, поскольку пленки находились за толстым экраном и, кроме того, были установлены на сравнительно большом расстоянии от поверхности штока (около 3,2 см) и от центра канала с водой (около 4 см), которое намного превосходило длину пробега  $\langle L \rangle$  рентгеновских квантов с этой энергией в воздухе. Это убедительно

подтверждалось отсутствием изображения на пленках, симметрично расположенных по другую сторону источника излучения. 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. На этот экран со стороны источника действуют ударные волны (рентгеновское излучение до него не доходит) с высокой степенью поперечной когерентности. Эти волны образуются в воздухе на той же границе раздела металла и воздуха, что и рентгеновские волны. Их природа может быть связанной как с импульсным акустическим воздействием (это будут акустические ударные волны), так и с импульсным тепловым воздействием, при котором будут образовываться тепловые ударные волны. Разница между этими волнами будет рассмотрена во второй части данной статьи.

Взаимодействие этих волн с поверхностью экрана формирует вторичные поперечно когерентные акустические ударные волны внутри экрана. Эти волны проходят объем экрана и отражаясь от обратной стороны, возбуждают на ней атомы. Распределенное по поверхности возмущение от каждой из волн взаимно когерентно и фазировано действием ударной волны. В итоге спонтанного распада этих взаимно фазированных источников происходит генерация рентгеновского излучения, характеризуемого значительной поперечной когерентностью. Качественно этот процесс похож на спонтанное сверхизлучение частично когерентной квантовой системы (см., например, [8]).

Если передняя и задняя поверхности экрана параллельны, то при падении плоской ударной волны генерируемая рентгеновская волна также будет квазиплоской. Этот процесс в символическом виде представлен на рисунке 12.

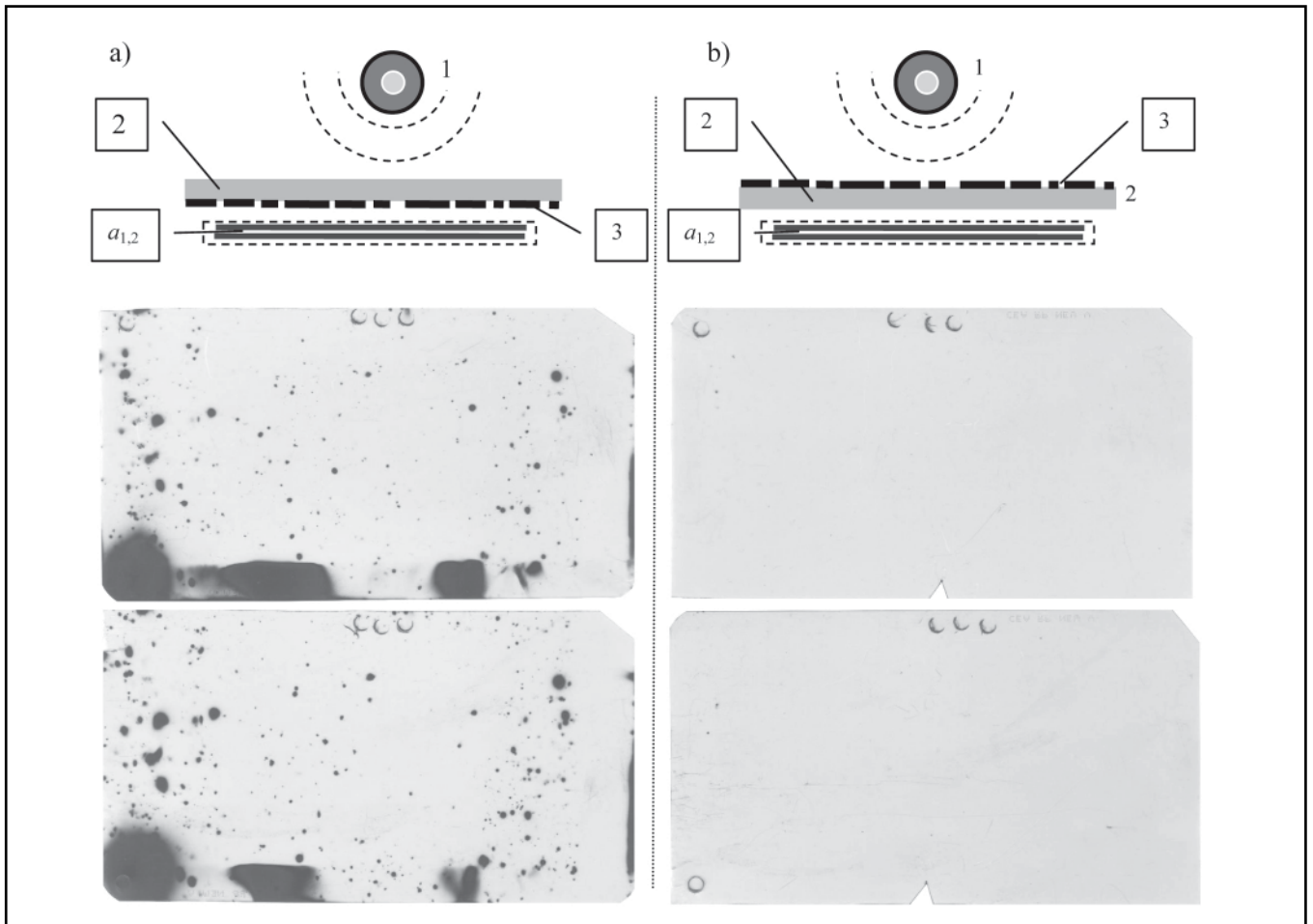


Рис. 11. Действие рентгеновского излучения на пленки  $a_{1,2}$ , расположенные за толстым металлическим экраном 2 с неоднородным слоем краски 3 в случае ориентации частично окрашенной стороны экрана к пленкам 4 (a) и к источнику 1 (b).

Если начальная ударная волна будет иметь сферическую или цилиндрическую форму, что отражает геометрию источника конкретной ударной волны, то рентгеновская волна также будет близка к этим формам. Такая модель не противоречит основам как «обычной», так и рентгеновской оптики.

Если бы обратная поверхность экрана была атомарно чистой и идеально плоской, то фронт генерируемого рентгеновского излучения повторил бы фронт ударной волны в области этой поверхности и пленка, находящаяся за экраном, имела бы квазиоднородное потемнение, величина которого соответствовала бы изменению длины пробега рентгеновских квантов в разных направлениях между экраном и пленками. Однако эта поверхность была покрыта тонким слоем краски, которая: а) нарушала граничные условия при отражении ударной волны изнутри от задней поверхности, что ухудшало близость к критерию «импульсного встряхивания» атомов, необходимого для их эффективного возбуждения; б) сильно поглощала вторичное мягкое излучение, образующееся на границе металла.

Лицевая сторона экрана была очищена от краски. И только в тех местах, где слой краски на

обратной стороне отсутствовал из-за локального отсутствия краски, происходило формирование вторичных рентгеновских волн. Поскольку размеры этих участков  $D$  были на много порядков больше длины волны рентгеновского излучения  $\lambda$ , то эти парциальные волны распространялись без учета углового дифракционного расширения ( $\Delta\theta \approx \lambda/D \ll 1$ ). При этом угловое положение пятен на пленках определяется на основе геометрической оптики. Конфигурация расположения маломерных дефектов окраски на поверхности экрана достаточно хорошо коррелирует с расположением пятен на пленках (с учетом углового фактора и флуктуаций положения центра ударных волн, связанных с кавитационными процессами).

При обратной ориентации экрана (окрашенной стороной в направлении источника) пленки оказались практически чистыми (рис. 11b). Этот результат также понятен и связан с тем, что наличие краски на «внутренней» поверхности приводит к очень малой вероятности возбуждения ударных волн внутри экрана, что приводит к невозможности генерации излучения на «внешней» поверхности.

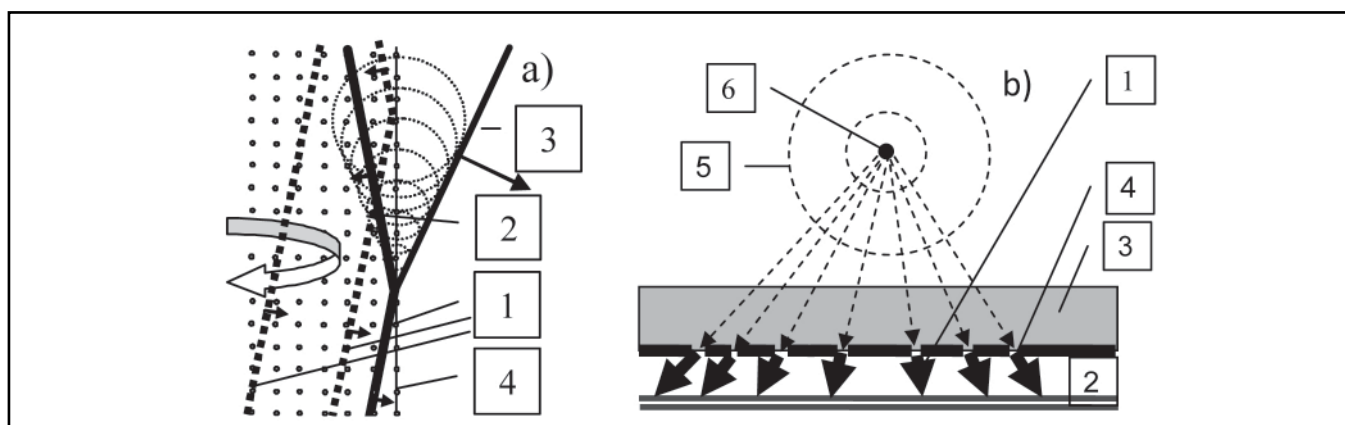


Рис. 12. а) – схема формирования вторичной рентгеновской волны 3, образуемой за счет внутреннего отражения 2 исходной ударной волны 1 от поверхности 4; б) – механизм формирования направленного рентгеновского 1 излучения на фотопленке 2, расположенной за толстым экраном 3, одна сторона которого была покрыта краской, но содержала отдельные чистые участки 4. Источниками излучения являлись ударные волны 5, идущие от поверхности кавитационного устройства 6.

Наличие интенсивных темных пятен на пленках в этой геометрии связано с тем, что нижняя часть поверхности экрана была очищена от краски и ей была придана форма слабосходящегося клина для фиксации в прорезях подставки. В пределах этой области вторичное мягкое излучение свободно испускалось с поверхности металла, что приводило к интенсивному потемнению пленок.

Обнаруженные эффекты свидетельствуют об открытии нового физического явления – возможности существования комбинированного акусто-рентгеновского взаимодействия с многократным преобразованием рентгеновских и акустических ударных волн на последовательно расположенных межфазных границах. Это, в частности, может приводить к формированию комбинированных акусто-рентгеновских линз и других подобных систем для управления и фокусировки рентгеновских волн.

Для проверки реальности такой гипотезы из стали были изготовлены два устройства, форма которых соответствовала плоско-вогнутой и плоско-выпуклой линзам с одной плоской поверхностью и другой выпуклой или вогнутой поверхностью в форме полусферы радиусом  $R \approx 17$  мм. Плоская сторона каждой из таких линз была обращена в сторону источника ударных волн (внешнего дна стакана, изготовленного из вольфрама) и находилась от него на расстоянии  $a \approx 2$  мм.

В данном эксперименте использовалась другая (по сравнению с рассмотренной выше) система формирования свободной сверхзвуковой струи воды (рис. 13). Выходной штوك, внутри которого находился горизонтальный канала с кавитирующей водой, располагался внутри стакана (в его центре). Расстояние от выхода тонкого канала до дна стакана не превышало 2...3 мм. Сверхзвуковая струя воды с кавитационными пузырями выходила из

канала и ударяла во внутреннее дно этого же стакана. Исследования проводились при давлении воды около 260 атм в течение 5 мин для каждой из линз. Рентгеновские пленки с размером меньше диаметра линзы находились в светозащитных пакетах и располагались с зазором 1 мм по отношению к краю линз со стороны сферических поверхностей (см. левую часть рисунка 14).

Результаты исследований представлены на правой части рисунка 14.

Видно, что при использовании плоско-выпуклой металлической линзы на пленке регистрировалось несколько очень темных пятен с резкими границами. Можно сделать предположение, что наличие этих темных пятен в области за плоско-выпуклой металлической линзой является результатом волнового преобразования распределения неоднородного поля ударной волны на поверхности внешней стороны дна вольфрамового стакана, на внутреннюю сторону которого действует сверхзвуковая струя воды. Возможной причиной этих неоднородностей могут быть внутренние или поверхностные дефекты дна, вызванные очень интенсивным воздействием струи воды.

В случае плоско-вогнутой металлической линзы подобные крупные темные пятна отсутствовали. Наличие большого количества мелких пятен на обеих пленках может быть следствием дефектов поверхности, полученных при создании линз.

Теория волнового преобразования изображения в такой акусто-рентгеновской линзе была построена [8] по аналогии с теорией стандартных оптических линз, если считать, что скорости ударных акустических волн  $v_{sw}$  могут быть связаны с помощью эффективного показателя преломления  $n_{sw} = c/v_{sw}$  со скоростью света  $c$  и предположить, что прямой и обратный процессы преобразования ударной

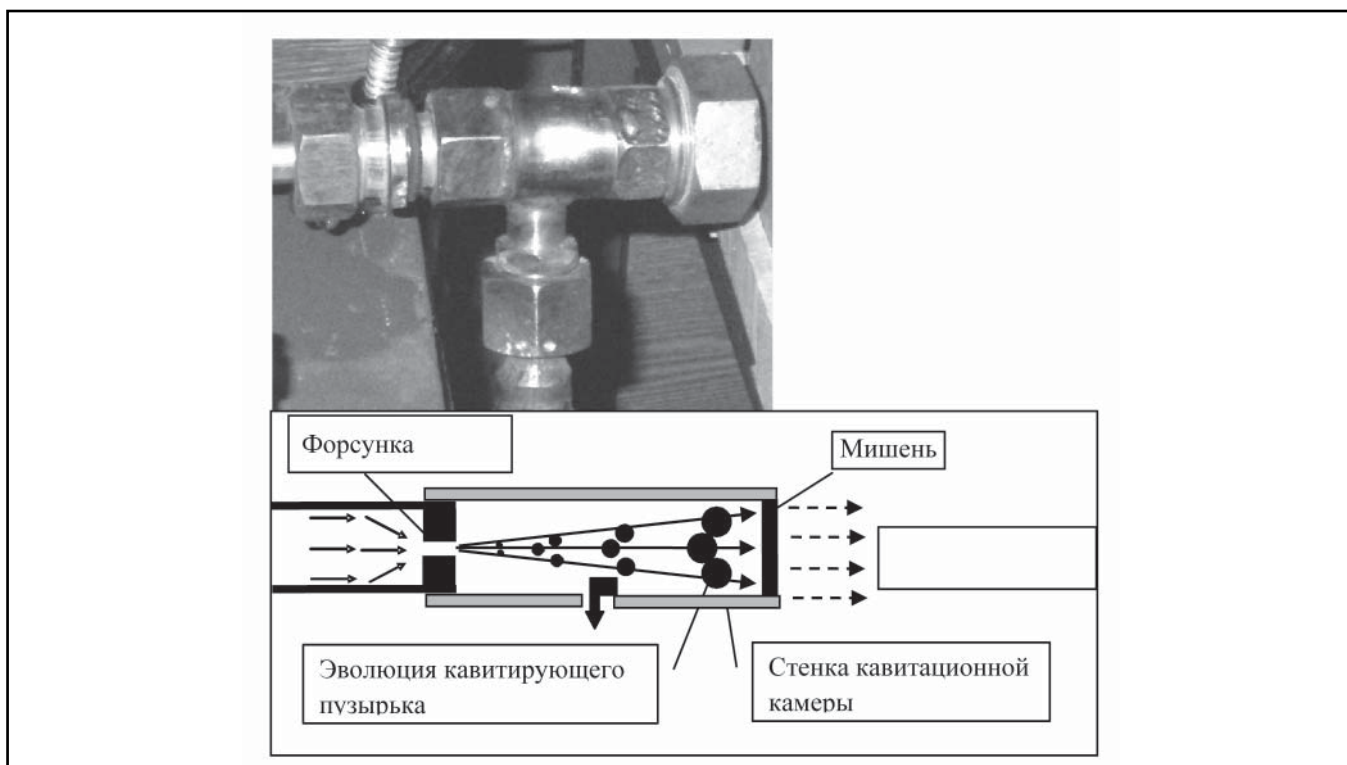


Рис. 13. Общий вид (вверху) и схема (внизу) установки для формирования рентгеновского излучения при кавитации струи воды в закрытой камере

волны в рентгеновскую на каждой из поверхностей не нарушают взаимной когерентности этих волн. Второе условие носит эвристический характер, но оно хорошо согласуется с вышерассмотренными экспериментами и с общими принципами процесса рассеяния рентгеновского излучения.

### Заключение

Полученные результаты позволяют прогнозировать создание ряда принципиально новых систем и приборов для безопасной (не зависящей от наличия

радиоизотопов и источников высокого напряжения) генерации перестраиваемого рентгеновского излучения для задач биотехнологии, микро и нанозлектроники и других отраслей техники с использованием кавитационных явлений. На основе обнаруженных и исследованных эффектов возможно создание короткофокусных рентгеновских линз и систем фокусировки импульсного рентгеновского излучения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barber B.P., Hiller R.A., Löfstedt R., Putterman S.J., Weninger K.R. Defining the unknowns of sonoluminescence. *Phys. Rep.* 1997. Vol. 281. Pp. 65...70.
2. Adamenko S.V., Vysotskii V.I. Evolution of annular self-controlled electron-nucleus collapse in condensed targets. *Foundations of Physics.* 2004. Vol. 34. Pp. 1801...1831.
3. Adamenko S.V., Vysotskii V.I. Mechanism of synthesis of superheavy nuclei via the process of controlled electron-nuclear collapse. *Foundations of Physics Letters.* 2004. Vol. 17. Pp. 203...233.
4. Adamenko S.V., Vysotskii V.I. Neutronization and protonization of nuclei – two possible ways of the evolution of astrophysical objects and the laboratory electron-nucleus collapse. *Foundations of Physics Letters.* 2006. Vol. 19. Pp. 21...36.
5. Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Колдмасов А.И., Hyun Ik Yang, Denis B. McConnell, Десятов А.В. Генерация интенсивного направленного излучения при быстром движении струи жидкости сквозь узкие диэлектрические каналы.

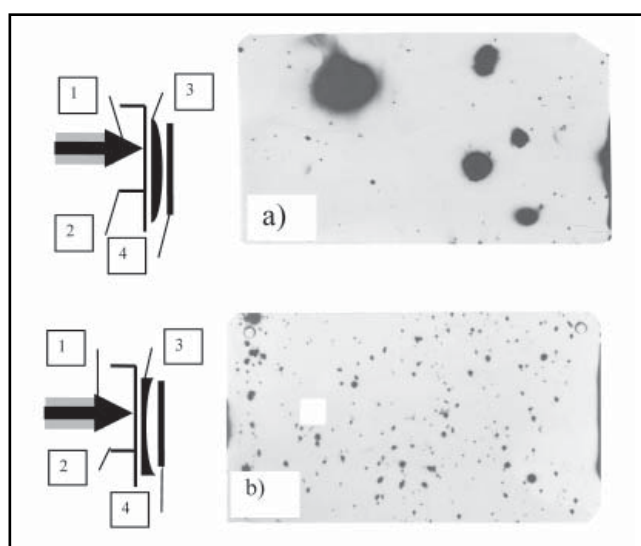


Рис. 14. Фокусирующее и дефокусирующее действие на рентгеновское излучение плосковыпуклой и плосковогнутых стальных линз

*Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед.* 2007. № 3. С. 55...60.

6. Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Сысоев Н.Н., Десятов А.В. Генерация рентгеновского излучения при пузырьковой кавитации быстрой струи жидкости в диэлектрических каналах. *Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед.* 2009. № 4. С. 17...26.
7. Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Сысоев Н.Н., Литвин Н.К., Томак В.И., Барзов А.А. Ударно-кавитационный механизм генерации рентгеновского излучения при кавитации быстрой струи воды. *Вестник МГУ, серия «Физика, астрономия»*. 2010. № 1. С. 46...50.
8. Корнилова А.А., Высоцкий В.И., Сысоев Н.Н., Литвин Н.К., Томак В.И., Барзов А.А. Генерация интенсивного рентгеновского излучения при выходе быстрой струи воды из металлического канала в атмосферу. *Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. исслед.* 2010. № 12. С. 53...63.

## REFERENCES

1. Barber B.P., Hiller R.A., Löfstedt R., Putterman S.J., Weninger K.R. Defining the unknowns of sonoluminescence. *Phys. Rep.* 1997. Vol. 281. Pp. 65...70.
2. Adamenko S.V., Vysotskii V.I. Evolution of annular self-controlled electron-nucleus collapse in condensed targets. *Foundations of Physics.* 2004. Vol. 34. Pp. 1801...1831.
3. Adamenko S.V., Vysotskii V.I. Mechanism of synthesis of superheavy nuclei via the process of controlled electron-nuclear collapse. *Foundations of Physics Letters.* 2004. Vol. 17. Pp. 203...233.
4. Adamenko S.V., Vysotskii V.I. Neutronization and protonization of nuclei – two possible ways of the evolution of astrophysical objects and the laboratory

electron-nucleus collapse. *Foundations of Physics Letters.* 2006. Vol. 19. Pp. 21...36.

5. Kornilova A.A., Vysotskiy V.I., Koldamasov A.I., Hyun Ik Yang, Denis B. McConnell, Desyatov A.V. Generatsiya intensivnogo napravlennoho izlucheniya pri bystrom dvizhenii strui zhidkosti skvoz' uzkie dielektricheskie kanaly [Generation of intense radiation directed at the fast moving jet of liquid through the narrow channels of the dielectric]. *Poverkhnost'. Rentgen., sinkhrotron. i neytron. issled.* [Surface. X-ray., Synchrotron and neutron research]. 2007. № 3. Pp. 55...60.
6. Kornilova A.A., Vysotskiy V.I., Sysoev N.N., Desyatov A.V. Generatsiya rentgenovskogo izlucheniya pri puzyr'kovoy kavitatsii bystroy strui zhidkosti v dielektricheskikh kanalakh [Generation of X-rays at a fast bubble cavitation liquid jet in dielectric channels]. *Poverkhnost'. Rentgen., sinkhrotron. i neytron. issled.* [Surface. X-ray., Synchrotron and neutron research]. 2009. № 4. Pp. 17...26.
7. Kornilova A.A., Vysotskiy V.I., Sysoev N.N., Leetvin N.K., Tomak V.I., Barzov A.A. Udamno-kavitatsionny mekhanizm generatsii rentgenovskogo izlucheniya pri kavitatsii bystroy strui vody [Shock-cavitation mechanism of generation of X-ray cavitation fast jet of water]. *Vestneyk MGU, seriya «Fizika, astronomiya»* [Bulletin of the Moscow State University, a series of «Physics, astronomy»]. 2010. № 1. Pp. 46...50.
8. Kornilova A.A., Vysotskiy V.I., Sysoev N.N., Leetvin N.K., Tomak V.I., Barzov A.A. Generatsiya intensivnogo rentgenovskogo izlucheniya pri vykhode bystroy strui vody iz metallicheskogo kanala v atmosferu [The generation of X-radiation at the output of the fast jet of water from the atmosphere of a metallic channel]. *Poverkhnost'. Rentgen., sinkhrotron. i neytron. issled.* [Surface. X-ray., Synchrotron and neutron research]. 2010. № 12. Pp. 53...63.

---

## Сведения об авторе

**Высоцкий Владимир Иванович**, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедры

E-mail: vivysotskii@gmail.com

Киевский национальный университет им. Т. Шевченко

Адрес Украина

**Корнилова Алла Александровна**, Директор Инновационного центра физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова

E-mail: prfnart@mail.ru

**Корнеева Имя Отчество**, ученая степень, звание, должность

**Крит Имя Отчество**, ученая степень, звание, должность

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

119991, Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 2.

## Information about author

**Vysotskiy Vladimir I.**, Doctor of Phys.-Mat. Sciences, Professor

E-mail: vivysotskii@gmail.com

**Kornilova Alla A.**, Director of the Innovation Centre of the Physics Department of MSU

E-mail: prfnart@mail.ru

**Korneeva Iмя отчество**, ученая степень, звание, должность

**Krit Имя Отчество**, ученая степень, звание, должность

Lomonosov Moscow State University

Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation