

03;04;12

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

© В.П.Белошеев

Всероссийский научный центр "ГОИ им.С.И.Вавилова",  
199034 Санкт-Петербург, Россия  
(Поступило в Редакцию 8 июня 1995 г.)

### Введение

В ряде работ [1,2] проводились исследования эффективности искрового разряда в объеме воды для ее обеззараживания с инактивацией микроорганизмов УФ излучением и ударной волной. Однако несмотря на то что эффективность достигнутая в лабораторных условиях, оказалась вполне сопоставимой с эффективностью применяемых для этой цели ртутных ламп, промышленного применения этот способ не нашел. В частности, это связано с необходимостью применения для пробоя разрядного промежутка в воде высокого напряжения и практически точечным выделением значительной энергии  $\approx 100$  Дж/см<sup>3</sup>. Последнее приводит к большой неравномерности обработки воды, что снижает эффективность при практическом применении такого способа.

Указанных недостатков можно избежать, формируя искровой разряд по поверхности воды (ИРПВ), имеющий такие же бактерицидные факторы, но необходимая для этого напряженность поля составляет 1-2 кВ/см, а величина удельного энерговклада снизу ничем не ограничена, что при модульной конструкции устройства позволяет достаточно равномерно обрабатывать сколь угодно большую поверхность воды, обеспечивая тем самым и нужную производительность установки [3].

На первый взгляд ИРПВ ничем не отличается от разряда по поверхности любого диэлектрика, каковым является и вода, но наличие заметной проводимости даже у дистиллированной воды привносит в этот процесс некоторые особенности. Так, традиционная схема с разрядными электродами, касающимися диэлектрика (воды в данном случае), не позволяет сформировать ИРПВ при  $E < 10$  кВ/см и скорости нарастания напряжения  $< 5 \cdot 10^{10}$  В/с, поскольку объемная проводимость воды, снижая крутизну волны напряжения, исключает развитие

стримеров по поверхности воды. Для предотвращения этого в разрядной цепи кроме разрядника необходим еще и воздушный промежуток между анодом и поверхностью воды, хотя это и нежелательно, так как он уменьшает долю излучения, попадающего в воду. Все это указывает на необходимость выяснения особенностей формирования ИРПВ, в том числе и для оптимизации схемного решения устройства по обеззараживанию воды. В данной работе проведены исследования формирования ИРПВ, пригодного по параметрам для решения этой задачи.

### Условия экспериментов

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1,а. Она включает в себя источник постоянного напряжения 2–10 кВ 1, генератор поджигающих импульсов напряжения с амплитудой 20 кВ 2, осциллограф для регистрации разрядного тока 3, стеклянный сосуд с водой 4 и разрядную цепь, состоящую из накопительного конденсатора емкостью 0.1 мкФ, индуктивности 0.2 мкГн, шунта для измерения тока 5, разрядных электродов 6, 7 и поджигающего электрода 8 управляемого разрядника. Его анодом служит анод разрядного промежутка 7, а катодом — поверхность воды, в данном случае он выполняет и функцию разделительного воздушного промежутка. Цилиндрический катод 6 из нержавеющей стали  $\varnothing$  0.4 см погружался в воду на глубину 0.1–0.5 см. Медный анод 7 в виде пластинок треугольной на конце, располагался на высоте 0.2 см от поверхности воды. Длину разрядного промежутка  $d$  можно было менять в пределах 1–3 см. Эксперименты проводились с дистиллированной, водопроводной водой и 1–3%-ным раствором хлористого натрия в дистиллированной воде. Их электропроводность была соответственно  $10^{-5}$ – $10^{-6}$ ,  $10^{-4}$ – $10^{-5}$ ,  $1$ – $3 \cdot 10^{-2}$  Ом $^{-1}$  · см $^{-1}$  [4]. И поскольку электропроводность раствора соли была наиболее определенной и ее можно было легко регулировать, то основные эксперименты проводились с раствором соли, а его толщина варьировалась в пределах 0.2–1 см.

### Результаты экспериментов

В экспериментах при различном начальном напряжении на конденсаторе  $U_0$  регистрировались осциллограммы тока и визуально наблюдался характер разряда на поверхности воды. При этом было установлено, что величина напряжения самопробоя  $U_{сп}$  разрядного проме-

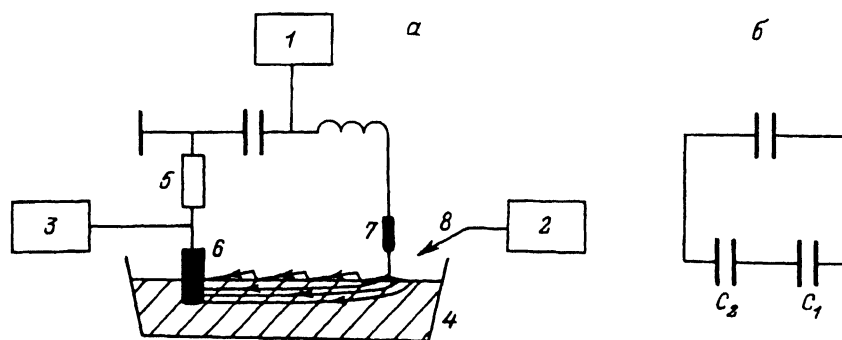


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

жутка слабо зависит от его длины в пределах 1–3 см и электропроводности воды и в основном определяется величиной воздушного промежутка между анодом и водой. При его длине 0.2 см для дистиллированной воды  $U_{\text{сп}} = 8\text{--}9$  кВ добавка в нее соли снижала  $U_{\text{сп}}$  до 4–5 кВ, а в случае водопроводной воды  $U_{\text{сп}} = 5\text{--}6$  кВ. Примерно также зависела от этих параметров и величина минимального  $U_0$ , при котором пробивался промежуток после подачи поджигающего импульса; для раствора соли она имела значение 2–3 кВ. Качественно схожим для любой электропроводности воды был и процесс развития ИРПВ, поэтому дальнейшее изложение относится к экспериментам с раствором соли.

Характерный вид осциллограмм разрядного тока при  $U_0 = 0.7\text{--}0.8 U_{\text{сп}}$  представлен на рис. 2. Если ИРПВ имел место, то в зависимости от времени задержки пробоя после включения поджига осциллограмма имела вид рис. 2, а–в. При малых задержках разряд имел колебательный характер с периодом 3 мкс и максимальной амплитудой тока до 1000 А, а при больших задержках — аperiodический (рис. 2, в). Если ИРПВ не возникал, то осциллограмма имела вид рис. 2, г.

Общими для всех осциллограмм были пичок тока на переднем фронте и одинаковый при данном  $U_0$  наклон линейной части. Ее линейность зависела от сопротивления слоя раствора и достигалась подбором концентрации соли в воде. Другой существенной чертой формирования ИРПВ было то, что при любом фиксированном значении  $U_0$  в диапазоне от минимального пробивного до напряжения, близкого к  $U_{\text{сп}}$ , время задержки пробоя изменялось случайным образом в диапазоне от 0.2–1 до 7–25 мкс. Причем значение минимального предела задержки определялось близостью  $U_0$  к  $U_{\text{сп}}$ , а максимального — концентрацией соли и толщиной слоя раствора, т.е. сопротивлением раствора в разрядном промежутке. Осциллограммы позволяли определять время задержки с точностью 0.1 мкс.

На основе совокупности 1700 разрядов было построено распределение относительных частот времен задержки с частотным интервалом 0.2 мкс (рис. 3). Его характерной особенностью является наличие кроме основного еще трех максимумов с интервалом около 1 мкс.

В отсутствие ИРПВ, когда пробивался только воздушный промежуток анод–вода, на поверхности воды, под анодом, наблюдалось диффузно светящееся пятно размером  $0.3 \times 0.4$  см, вытянутое вдоль промежутка. Из пятна в сторону катода развивались 1–4 стримера длиной, приблизительно обратно пропорциональной их числу. В случае сантиметрового промежутка одиночный стример имел длину 0.8 см. Иногда, при максимальной задержке, можно было наблюдать пробой промежутка по его каналу, тогда осциллограмма имела вид рис. 2, в.

Для выяснения механизма спрямления разрядного тока до пробоя или при его отсутствии были проделаны дополнительные эксперименты. В одном случае на поверхности воды, под анодом, размещался кружок медной фольги  $\varnothing 0.4$  см и толщиной 0.2 см. При этом форма разрядного тока была близка к экспоненциальной (рис. 4, а), а стримеры на поверхности воды не наблюдались. В другом случае поверхность воды покрывалась лавсановой пленкой с отверстием для катода и отверстием диаметром 0.4 см под анодом. При этом опять спад разрядного тока имел практически экспоненциальный характер и также не было стримеров.

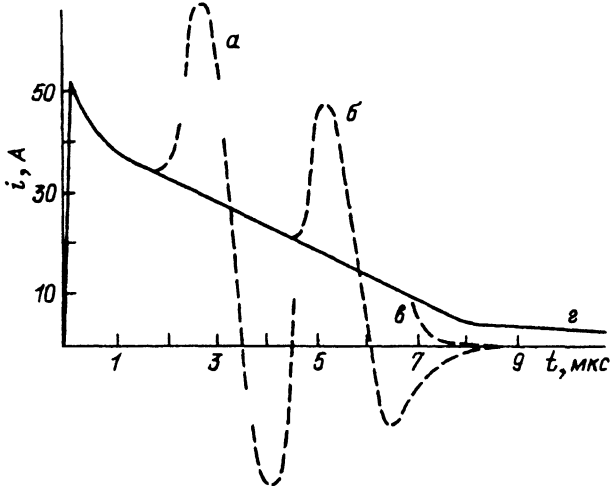


Рис. 2. Осциллограммы тока.

Начальное напряжение 3.3 кВ, длина разрядного промежутка 1 см; а-в — ИРПВ с задержкой соответственно 2, 4, 7 мкс; в — ИРПВ не сформировался.

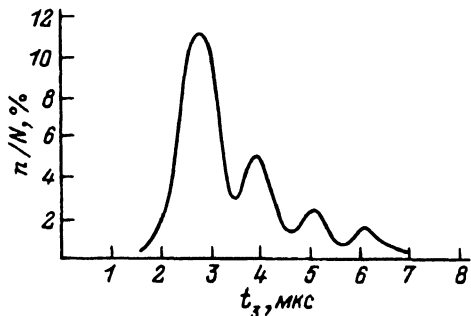


Рис. 3. Распределение относительных частот времен задержек ИРПВ.

Начальное напряжение 3.3 кВ, длина разрядного промежутка 1 см, число разрядов  $N = 1700$ ,  $\pi$  — число разрядов в частотном интервале 0.2 мкс.

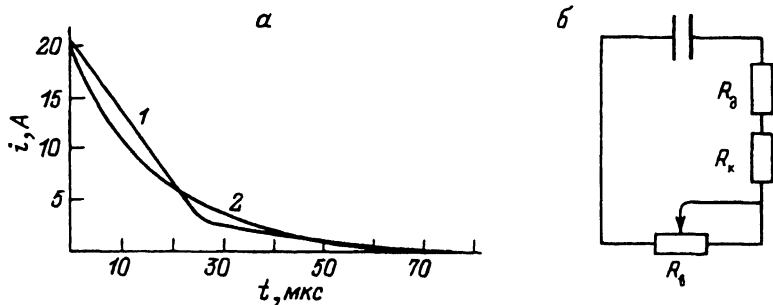


Рис. 4. Осциллограммы тока (а) и эквивалентная схема разрядного промежутка в случае 4, а, 1(б).

Начальное напряжение 3.3 кВ, длина разрядного промежутка 2 см; 1 — стримеры на поверхности воды, 2 — на поверхности воды лавсановая пленка или медная фольга под анодом.

а) Процесс формирования ИРПВ. С учетом особой природы воды (наличие у нее высокой диэлектрической проницаемости и заметной проводимости) в начальный момент, до развития разряда, эквивалентная схема разрядного промежутка аналогична схеме промежутка барьерного разряда (БР) [5,6]. Она состоит из последовательно включенных емкостей воздушного промежутка анод-вода  $C_1$  и емкости  $C_2 > C_1$  слоя воды, выполняющего роль диэлектрического барьера (рис. 1,б). Основная доля начального напряжения приложена к промежутку анод-вода, с его пробоя, после подачи поджигающего импульса, и начинается формирование ИРПВ. С появлением проводимости в промежутке анод-вода потенциал анода переносится на поверхность воды, эквивалентная емкость разрядного промежутка возрастает до емкости слоя воды и происходит ее заряд. Этой фазе разряда на осциллограмме тока соответствуют передний фронт и пичок тока, имеющий емкостной характер. Заканчивается эта фаза образованием светящегося пятна на поверхности воды и дугового канала в промежутке анод-вода. В дальнейшем через воду, имеющую омическую ионную проводимость, начинает протекать ток  $i_0 = U_0/R_0$ , где  $R_0$  — суммарное сопротивление разрядной цепи, основную долю которого составляет сопротивление слоя воды. А из светящегося пятна под анодом по поверхности воды развиваются стримеры. Таким образом, двойственная природа воды в данном случае позволяет в начальной фазе облегчить пробой воздушного промежутка анод-вода, установиться в нем дуговому разряду и затем благодаря объемной проводимости воды и ее контакту через дугу с анодом обеспечить “скользящий” механизм распространения стримеров по ее поверхности [7].

Протекание тока через воду приводит к разряду конденсатора, т. е. к снижению напряжения на нем и разрядном промежутке. Поэтому формирование ИРПВ в дальнейшем окажется возможным, если один из стримеров перекроет промежуток быстрее, чем напряжение на нем упадет ниже необходимого для поддержания дугового разряда. В данных условиях величина этого минимального напряжения составляла  $U = i \cdot R_0 = 600-800$  В, а время максимальной задержки  $\approx 7$  мкс (рис. 2).

б) Р а с п р е д е л е н и е в р е м е н и з а д е р ж к и И Р П В. Увеличение времени задержки при снижении напряжения на разрядном промежутке вполне понятно, но только этим нельзя объяснить ни столь большого случайного разброса времени задержки, ни тем более структуры в его распределении.

Для уточнения механизма формирования ИРПВ и природы структуры в распределении времени задержки пробоя привлечем результаты исследования БР в [6]. В этой работе на основании экспериментов с использованием протяженных одномерных электродов и сантиметрового разрядного промежутка установлено, что в начальной фазе БР в воздушном промежутке с естественным случайным разбросом начинало формироваться до 20 стримеров на сантиметре длины электродов. Возникновение стримера в некоторой точке диэлектрика изменяло в ней потенциал. Разность потенциалов в соседних точках вызывала развитие по диэлектрику скользящего разряда, приводившего к конкуренции между стримерами. В ходе этой конкуренции стримеры, возникшие позже, подавлялись, поэтому число стримеров, перекрывающих

промежуток, сокращалось в 10–20 раз и определялось соотношением скоростей скользящего разряда по диэлектрику и стримеров в воздушном промежутке, а также разбросом их возникновения.

Подобный “эффект подавления одного канала другим” наблюдался и в работе [7], где использовалось развитие параллельных каналов по диэлектрику, но фактор естественного случайного разброса при возникновении каналов как основа для конкуренции между ними и подавления каналов, возникших позже, там не рассматривался.

Несомненно, что и в данном случае, когда процессы происходили на поверхности диэлектрика (воды), в ходе развития стримеров от границы светящегося пятна имели место и разброс в их возникновении и подобная же конкуренция. Причем если все стримеры возникали несинхронно, то первый из них выделялся очень быстро, а в случае достаточно синхронного возникновения они долго развивались все вместе.

Очевидно, что характер конкуренции в ходе развития стримеров определяется и локальной напряженностью поля вдоль промежутка. Она максимальна у анода светящегося пятна и у катода, поэтому вблизи него конкуренция вновь обострится и перекрывает промежуток всегда один стример.

Как известно, в общем случае скорость движения стримера зависит от потенциала его головки, а он, составляя долю потенциала анода, определяется проводимостью канала стримера, т. е. перенесенным по нему зарядом. С их ростом возрастает и потенциал головки стримера [8]. Поэтому чем больше было синхронно развивавшихся стримеров, тем меньший заряд протекал по каналу каждого из них, тем с меньшей скоростью распространялись стримеры. Это и определяло обратно пропорциональную связь между числом наблюдаемых стримеров и их длиной в эксперименте.

Кроме того, чем раньше в ходе конкуренции выделялся лидирующий стример, тем с большей скоростью он распространялся и тем меньше было время задержки пробоя. Этому случаю соответствует первый максимум в распределении со средним временем задержки 3 мкс (рис. 3). В случае двух синхронных стримеров, развивавшихся вместе и поэтому с меньшей скоростью, среднее время задержки увеличивалось до 4 мкс, и т. д.

Таким образом, случайный характер распределения моментов времени возникновения стримеров определяет характер конкуренции между ними и число совместно развивавшихся стримеров. С числом таких синхронных стримеров и связано кратное приращение среднего времени задержки, т. е. число максимумов, а вероятность возникновения такого количества синхронных стримеров определяет амплитуду максимумов распределения.

в) **С п р я м л е н и е т о к а.** В отсутствие ИРПВ характерная величина сопротивления сантиметрового разрядного промежутка с раствором соли в воде  $\approx 100$  Ом. При постоянстве этого сопротивления разряд емкости 0.1 мкФ, заряженной до  $U_0 = 3$  кВ, имел бы экспоненциальный характер с начальным током  $i_0 = 30$  А и закончился бы за время  $3-4RC = 3-4 \cdot 10^{-5}$  с. Такими и были с учетом двухсантиметровой длины разрядного промежутка разряды, когда на поверхности воды размещались круглая медная пластинка под анодом или лавсановая пленка с отверстием такого же диаметра (рис. 4,а). А отсутствие в

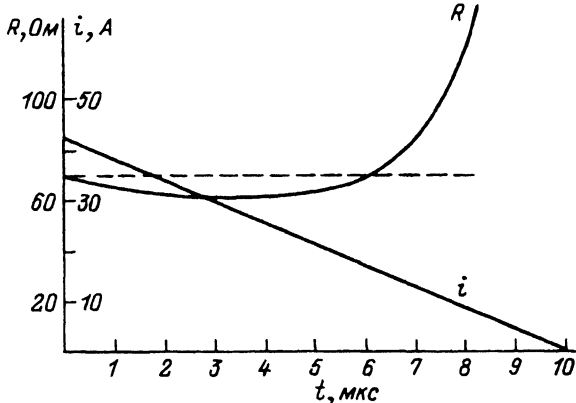


Рис. 5. Расчетная зависимость сопротивления разрядного промежутка при линейно падающем токе.

этих случаях стримеров позволяет сделать предположение, что спрямление тока разряда до пробоя связано как раз с их развитием в разрядном промежутке по поверхности воды.

Действительно, из общих соображений спрямление тока в разрядной цепи может иметь место только при изменении ее сопротивления в ходе самого разряда. В данном случае это сопротивление складывалось из сопротивления плазмы дугового канала в промежутке анод-вода  $R_d$ , сопротивления слоя воды в разрядном промежутке  $R_v$  и контактного сопротивления между дуговым каналом и поверхностью воды  $R_k$  (рис. 4, б). По оценке при максимальном токе  $R_d < 10$  Ом и с падением тока оно должно монотонно возрастать,  $R_v$  однозначно связано с электропроводностью и размерами слоя воды, а  $R_k$  определяется площадью плазмы на поверхности воды, т. е. суммарной площадью светящегося пятна под анодом и каналов стримеров. Светящееся пятно достигает максимальных размеров за 200–300 нс, обеспечивая  $R_0$  и соответственно  $i_0$  (рис. 2), затем, с падением напряжения, может только сокращаться, увеличивая сопротивление  $R_k$ . Площадь же каналов стримеров в ходе разряда вначале растет, уменьшая  $R_k$ , и только с их распадом, уже при значительном снижении напряжения, площадь сокращается, увеличивая  $R_k$ . Кроме того, каналы стримеров шунтируют часть слоя воды, также уменьшая его сопротивление. Следовательно, с изменением длины каналов стримеров в ходе разряда будет меняться общее сопротивление промежутка (рис. 4, б).

Поэтому в первые микросекунды разряда за счет уменьшения общего сопротивления в разрядной цепи в сравнении с  $R_0$  амплитуда тока будет больше экспоненциальной (рис. 4, а). Однако это ускорит снижение напряжения на конденсаторе, что с некоторого момента времени приведет уже к росту общего сопротивления цепи и амплитуда тока станет меньше экспоненциальной.

Таким образом, в процессе разряда за счет нелинейной связи между напряжением на промежутке и развитием стримеров по поверхности воды, изменяющих общее сопротивление в цепи, стабилизируется скорость спада тока, т. е. имеет место обратная связь по току через общее сопротивление в разрядной цепи.

Такой механизм спрямления разрядного тока до пробоя подтверждается и характером зависимости сопротивления разрядной RC-цепи

от времени  $R(t)$  (рис. 5), полученной из решения дифференциального уравнения для такой цепи при линейно падающем токе. Исходя из того что для  $RC$ -цепи имеет место уравнение

$$U_C + RC \frac{dU_C}{dt} = 0$$

и

$$U_C + U_R = 0, \quad U_R = iR,$$

получим уравнение

$$i \frac{dR}{dt} + R \frac{di}{dt} = -\frac{i}{C}.$$

Его решение при

$$i = i_0 \left( 1 - \frac{t}{\tau} \right)$$

имеет вид

$$R(t) = \frac{\tau}{\tau - t} \left( R_0 - \frac{t}{C} + \frac{t^2}{2C\tau} \right),$$

где  $\tau$  — время уменьшения тока до нуля.

Из него следует, что сопротивление разрядной цепи вначале уменьшается (рис. 4, а), а затем оно возрастает, уменьшая разрядный ток. В эксперименте это и соответствовало фазе развития стримеров, т.е. увеличению площади контакта плазмы с водой, а затем распаду каналов стримеров, сокращению площади контакта и увеличению сопротивления разрядного промежутка. Скорость падения тока поддерживалась таким образом постоянной до 7 мкс, когда плазма каналов стримеров распалась и пробой промежутка в дальнейшем становился уже невозможным. В последующее время ток в разрядной цепи определялся остаточной проводимостью воздушного промежутка и проводимостью воды.

Проведенные эксперименты и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Формирование ИРПВ имеет стримерный характер и это объединяет его с разрядами, развивающимися в длинных промежутках при низкой напряженности поля. В этом плане исследование ИРПВ может облегчить получение информации о механизме развития крупномасштабных разрядов.

2. Конкуренция между стримерами является существенным фактором в процессе формирования ИРПВ, что с учетом наличия ее и в барьерном разряде указывает на универсальность этого элемента и необходимость его учета при моделировании предпробойной стадии разрядов.

3. Использование в этих экспериментах воды как диэлектрика, но с повышенной проводимостью дало возможность снизить напряженность поля в разрядном промежутке, чтобы затянуть по времени конкуренцию, облегчив ее наблюдение, но все же сохранив и пробойные условия.

4. Спрявление тока в предпробойной стадии ИРПВ связано с возникновением нелинейной обратной связи между падением напряжения на разрядном промежутке и сопротивлением промежутка в ходе развития стримеров по поверхности воды.



5. В плане использования ИРПВ как источника света, в том числе и для обеззараживания воды, стала ясной необходимость расположения обоих разрядных электродов над водой, чтобы исключить потери накопленной энергии в предпробойной стадии.

6. Вместе с тем схема разрядного промежутка с катодом в воде позволяет, подбирая проводимость воды и начальные условия разряда, управлять формой разрядного тока, что может представить интерес для практического использования.

Автор благодарит С.Г. Пржибельского за стимулирующее участие в работе.

#### Список литературы

- [1] *Рязанов Н.Д., Переважкина Е.П.* // Электрон. обраб. матер. 1984. Т. 116. № 2. С. 43–45.
  - [2] *Потапченко Н.Г., Савлук О.С.* // Химия и технология воды. 1991. Т. 13. № 12. С. 1117–1126.
  - [3] *Белошеев В.П.* Патент РФ. № 5042935 от 14.05.52.
  - [4] *Кэй Д., Лэби Т.* Справочник физика-экспериментатора. М., 1949. С. 208.
  - [5] *Филлипов Ю.В., Емельянов Ю.М., Семюгин И.А.* Современные проблемы физической химии. М., 1968. Т. 2. С. 43.
  - [6] *Белошеев В.П.* ПМТФ. 1981. № 2. С. 43–48.
  - [7] *Андреев С.И., Зобов Е.А., Сидоров А.И.* // ПМТФ. 1978. № 3. С. 38–44.
  - [8] *Юман М.* Молния. М.: Мир, 1972. С. 279.
-