

УДК 621.315.592

Коржуев М.А.<sup>1</sup>, Темяков В.В.<sup>2</sup>



Коржуев М.А.

<sup>1</sup>Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Ленинский просп., 49, Москва, 119991, Россия;

<sup>2</sup>ОАО «Большая Российская Энциклопедия», Покровский б-р, 8, Москва, 109817, Россия



Темяков В.В.

**ИССЛЕДОВАНИЯ РИХМАНА  
И ЛОМОНОСОВА В ОБЛАСТИ  
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСТВА (1745 - 1753)**

*Рассмотрены работы академиков СПб Академии Наук Г.-В. Рихмана и М.В. Ломоносова, (1745 – 1753) по исследованию перекрестных эффектов «тепло ↔ электричество» в газообразных, жидких и твердых диэлектриках. Описанные эффекты сравниваются в работе с термоэлектрическими эффектами (ТЭЭ), наблюдаемыми в других термоэлектрически активных средах (ТЭАС). Показано, что ТЭЭ в диэлектриках отличаются большими действующими напряжениями ( $U$  до  $10^3 - 10^5$  В и более) и малыми токами разрядки ( $I \sim 1 - 10$  мкА), связанными с высоким собственным удельным сопротивлением  $\rho$  образцов. Статья посвящена тысячелетию культурного взаимодействия России и Германии, отмеченному в 2012 г.*

**Ключевые слова:** термоэлектреты, атмосферное электричество, термоэлектричество.

*The works of G.-W. Richmann and M.V. Lomonosov, academicians of Saint-Petersburg Academy of Sciences (1745 – 1753) on studying "heat ↔ electricity" cross effects in the gaseous, liquid and solid dielectrics are considered. These effects are compared to thermoelectric (TE) effects observed in other thermoelectrically active media. It is shown that TE effects in dielectrics feature large operating voltages ( $U$  up to  $10^3 - 10^5$  V or more) and small discharge currents ( $I \sim 1 - 10$   $\mu$ A) due to high intrinsic resistivity  $\rho$  of the samples. The paper is dedicated to the thousandth anniversary of cultural interaction between Russia and Germany commemorated in 2012.*

**Key words:** thermoelectrets, atmospheric electricity, thermoelectricity.

**Введение**

Последовательность открытия основных термоэлектрических эффектов (ТЭЭ) «тепло ↔ электричество» в различных термоэлектрически активных средах (ТЭАС) исследовалась ранее [1-3]. Согласно [3], первые ТЭЭ были обнаружены в диэлектриках, где они имеют наибольшую величину (измеряемые напряжения  $U$  до  $10^2 - 10^3$  В и более).<sup>1</sup> Лишь затем, по мере повышения чувствительности измерительных приборов, ТЭЭ были обнаружены также в металлах (1821) (Т.И. Зеебек (1770 – 1831)), где их величина существенно ограничивается сильным фермиевским вырождением образцов ( $U \sim 10^{-3}$  В). Настоящая работа является продолжением исследований

<sup>1</sup> Некоторые из этих эффектов были известны еще с глубокой древности [3].

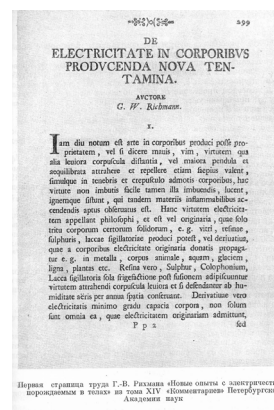
[3]. В работе рассмотрены опыты Г.-В. Рихмана (1711 – 1753) (рис. 1)<sup>2</sup> и М.В. Ломоносова (1711 – 1765) (рис. 2) в области ТЭ, проведенные в СПб Академии Наук в 1745 – 1753 [4-5]. СПб АН (основана в 1724) специализировалась на естественно-научных исследованиях, при этом оба академика работали на стыке учений об электричестве и теплоте. В результате Рихману впервые удалось обнаружить и изучить ряд ТЭЭ в диэлектриках (перенос зарядов пламенем, термоэлектретный в сере и смолах и др.) [4]. Он же совместно с Ломоносовым впервые обнаружил и начал изучать сложные атмосферные ТЭЭ, ответственные за электризацию облаков [4, 5]. Показано, что один из таких атмосферных ТЭЭ мог стать причиной трагической гибели Рихмана (1753).



а)



б)



в)

Рис. 1. Памятник Рихману на родине в Парну (Эстония) (скульптор Э. Куульбуш, 2011) (а), здание Кунсткамеры в СПб (гравюра 1730 – 1740) (б), и первая страница приоритетной публикации Рихмана по термоэлектретам («Комментарии Петербургской АН», Т. 4, 1751) (в) [4].



а)



б)

Рис. 2. Сложный атмосферный ТЭЭ, объясняющий электризацию облаков за счет трения восходящих и нисходящих потоков воздуха (Ломоносов, 1753) (а) [5]. Бюст М.В. Ломоносова. (Скульптор Ф.И. Шубин, 1792). Музей М.В. Ломоносова, Кунсткамера, СПб (б).

<sup>2</sup> Рихман и Зеебек родились в Российской Империи, в семьях остзейских немцев-лютеран [6]. Оба в разное время обучались в бывшей Шведской гимназии им. Густава II Адольфа (Школе № 1) в Ревеле (сейчас Таллинн, Эстония), о чем нам любезно сообщили эстонские краеведы Е. Velmgre и Е. Keerov.

## 1. Работы Рихмана по термоэлектричеству

Академик Рихман вошел в историю физики как изобретатель «электрического указателя» (электрометра) – первого прибора, пригодного для количественных измерений электрического напряжения  $U$  (рис. 3 а) [6]. В основе работы «указателя» лежат законы электростатики. При соединении с источником электричества проводом (а), подвижная нить (е) и неподвижный линейал (с) получали электрические заряды одного знака. В результате нить отклонялась от линейала на угол  $\alpha$ , определяющий меру измеряемой электрической силы ( $U \sim \alpha$ , для малых углов  $\alpha$ ) (рис. 3 а).

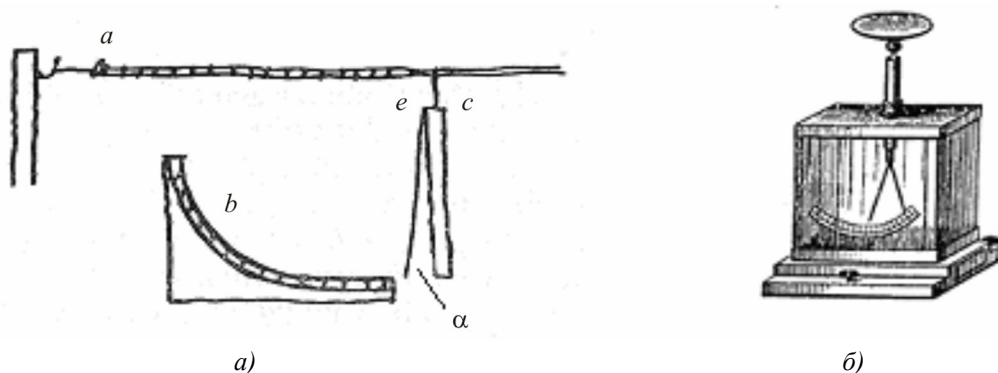


Рис. 3. «Электрический указатель» Рихмана (1745) (с – «линейал» (Fe), а – подводный провод (Fe), е – льняная нить (масса –  $\frac{1}{2}$  аптекарского грана (0.312 г), длина –  $1\frac{1}{2}$  лондонского фута (0.4572 м), б – деревянный квадрант со шкалой) (а) [4] и электрометр Кавалло с защитным корпусом (1799) (б) [6].

В 1745 году Рихман был назначен заведующим Физического кабинета СПб АН, располагавшимся в Кунсткамере вплоть до ее пожара в 1747 (рис. 1 б). Именно там Рихман начал первые в России исследования перекрестных явлений «тепло – электричество» в различных ТЭАС [3, 4]. На начальном этапе исследований Рихман, «...проводя собственные и повторяя чужие опыты над электричеством... встретился со многими новыми явлениями, которых не нашел у своих предшественников» ([4], с. 207). Первый успех Рихмана в исследовании ТЭЭ был достигнут при изучении эффекта переноса электрического заряда пламенем. Ранее этот эффект был описан Гильбертом применительно к случаю переноса заряда между образцами диэлектриков [7]. Рихману удалось этим же методом перенести электрический заряд с диэлектриков (в его терминологии – «electricitas originaria» – «первичных электрических тел» («ПЭТ»)) на металлы («electricitas derivativa» – «вторичные электрические тела» («ВЭТ»)) (проводники)) [4]. Рихман писал: «Июня 30 дня (1746). Через зажженную свечу я отвел электричество ... в стол, из стола в канделябр, из канделябра в пламя, из пламени в железную пластинку...» [4]. Затем Рихман исследовал эффект с помощью своего «указателя»: «...пламя восковой свечи я поднес к железной проволоке СВ (соединенной с источником заряда)... при этом указатель стал показывать меньший градус  $\alpha$ » (рис. 4 а) ([4], с. 268). Сравнивая действие погасшей и горящей свечи на показания «указателя», Рихман установил, что электричество «отводит» не сама свеча, а именно ее пламя ([4], с. 212). При этом перенос электричества наблюдался также, если горящая свеча была достаточно удалена от проволоки. Рихман обнаружил, что продукты сгорания свечи также переносят электрический заряд: «... наэлектризованное тело ...притягивало часть дыма погасшей свечи, а другая часть его поднималась вверх, как обычно» ([4], с. 222).<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Проводящие свойства пламени и заряд частиц дыма определяются ионами и радикалами, образующимися в процессе горения и формирующимися вокруг пламени проводящее гало [8].

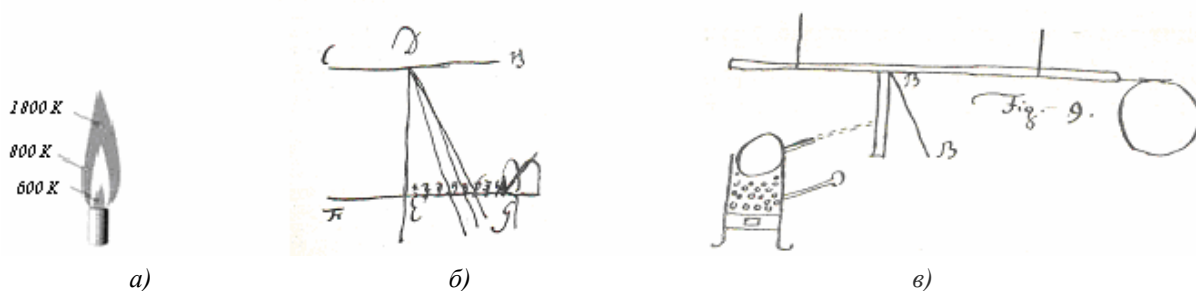


Рис. 4. Схемы опытов Рихманом (оригинальные рисунки) с пламенем свечи (а), электрическим указателем (б) и эолипилей (пародувкой) Герона Александрийского (в) [4].

В то же время, струя водяного пара, полученная от эолипилы (пародувки) Герона и направленная на «электрический указатель», практически не меняла его показаний (рис. 4 в). Отсюда Рихман сделал вывод, что «...для отвода электричества необходимо сплошное ПЭТ. А эти пары (воды) являются корпускулами, которые разделены некими промежутками и не способны образовать сплошное ПЭТ, а также не способны ни отнимать, ни отводить электричество сколько-нибудь ощутительно» ([4], с. 312).

Рихман сделал также ряд важных открытий в области трибоэлектричества. Как известно, перенос зарядов при взаимном трении различных материалов связан с локальным повышением температуры в микрообластях фрикционного контакта ( $\Delta T_{\text{лок}}$  до  $10^3$  К и более) [8]. Рихман обнаружил, что исходная температура  $T_0$  также влияет на процессы электризации образцов трением. Он показал, что диэлектрики, обладающие при комнатной температуре пониженной трибоактивностью по сравнению с янтарем (агаты, яшмы, порфиры, гранит, мрамор и др.), также успешно могут быть наэлектризованы трением. Для этого они «...должны быть горячими и натираться долго». Рихман рекомендовал нагревать также «...до точки возгорания» соответствующие контртела трения (щетину, кожу, пергамент, бумагу, шелк, лен, и т.д.).<sup>4</sup> Наконец, Рихману впервые удалось провести электризацию металлов трением с использованием материала-посредника. Он вставлял в тонкие стеклянные стаканы железные стержни и «...путем легкого поглаживания рукой возбуждал такое электричество, благодаря которому эти стержни испускают искру в случае прикосновения к ним» ([4], с. 285).<sup>5</sup>

Однако наиболее важный результат в области ТЭ был получен Рихманом при изучении термоэлектрического эффекта в сере и смолах (1746) [2].<sup>6</sup> Рихман писал: «Июня 25 дня (1746). Я расплавлял тела, которые после охлаждения и застывания, будучи защищены от влаги воздуха, имеют долго сохраняющееся (например, на протяжении года) электричество (обыкновенная сера, сургуч, смола или канифоль) ...» ([4], с. 244). С помощью своего «указателя» Рихман установил, что сера и смолы могут быть наэлектризованы как путем трения, так и с помощью «плавления – отвердевания», что указывало на сходную природу трибоэлектрического и термоэлектрического эффектов в образцах [4]. Результаты своих опытов Рихман опубликовал в приоритетной статье: «Новые опыты с электричеством, порождаемым в телах» («Комментарии

<sup>4</sup> Эффекты связаны с уменьшением энергии выхода электронов из материалов с ростом температуры [8].

<sup>5</sup> Со времен Гильберта у физиков господствовало мнение, что металлы трением наэлектризовать нельзя [7]. Эффект Рихмана очевидно связан с электризацией стекла и с последующим переносом заряда на металл.

<sup>6</sup> В настоящее время к электретам относят диэлектрики, с удельным сопротивлением  $\rho > 10^{12} - 10^{17}$  Ом·м, которые способны накапливать и сохранять неравновесные электрические заряды от 1 до 10 лет и более [9].



Петербургской АН», Т. 4, 1751) (рис. 2 в) [4].<sup>7</sup> В табл. 1 приведены основные типы различных электретов, известных в настоящее время, и указаны термоэлектреты, обнаруженные Рихманом [9]. Из табл. 1 видно, что Рихман является первооткрывателем монополярного (знак плюс) термоэлектретного эффекта, наблюдаемого в ряде диэлектриков при фазовом переходе «плавление – отвердевание» (табл. 1).<sup>8</sup> Заряжая образцы «электричеством», Рихман затем исследовал возможности сохранения полученных электрических зарядов в различных условиях. Он подробно изучил ускорение процессов утечки зарядов с острых участков образцов, при смачивании образцов водой и в зависимости от влажности воздуха в помещении ([4], с. 645 и 237). По Рихману (1748), «...в деревянном жилище электричество часто держалось 50 минут, прежде чем исчезнуть, тогда как в каменных <помещениях> ... не удалось добиться, чтобы оно держалось и 10 минут. Возможно, что влага, которая держится в каменном жилище, отводит электричество» [4].

Таблица 1

*Основные типы различных электретов в зависимости от метода их получения\**

№	Название	Метод получения	Тип заряда	Примеры	Первооткрыватели
1	Трибоэлектреты	Трение о контртело	Монополь	Янтарь <sup>+</sup> /пряжа <sup>+</sup>  Стекло <sup>+</sup> /шелк <sup>-</sup> Смола <sup>-</sup> /шерсть <sup>+</sup>  Сера <sup>-</sup> /сукно <sup>+</sup>	Фалес Милетский (625 – 545 до н. э.) Дюфе, 1733 -«- Эпинус, 1765.
2	Термоэлектреты	Плавление-отвердевание	Монополь	Сера <sup>+</sup> /чашка <sup>-</sup>	Рихман, 1746 Эпинус, Вильке, 1765
3	Электро-термо-электреты	Также, но в электрических полях	Диполь	Воск	Егучи, 1919
4	Сегнетоэлектреты	Охлаждение ниже $T_c$ (температура Кюри) в электрических полях	Диполь	Сегнетова соль, KDP (дигидрофосфат калия), TGS (триглицинсульфат)	П. и Ж. Кюри, 1880, Ф. Погкельс, 1894

\* Существуют также коронно-, фото-, радио-, хемо-, механо-, био- и др. электреты, электризация которых не связана непосредственно с тепловыми воздействиями на образцы [9].

Согласно современным представлениям, процесс релаксации электрического потенциала заряженных тел в зависимости от времени  $t$  следует экспоненциальному закону

$$U(t) = U_0 \exp(-t / \tau), \quad (1)$$

<sup>7</sup> Иногда открытие термоэлектретов приписывается Эпинусу, или Вилке (1765) [10], которые обнаружили различные знаки зарядов серы (-) и изложницы (+), на что Рихман не обратил в свое время внимания [11].

<sup>8</sup> Эффект связан с образованием в запрещенной зоне серы ( $E_g = 2.6$  эВ) глубоких донорных уровней [9].

где  $U_0$  – исходное значение потенциала,  $\tau = \min(\tau_M, \tau_M^0)$ ,  $\tau_M, \tau_M^0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \rho$  – максвелловское время релаксации для исследуемого материала и окружающей среды,  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\varepsilon_r$  – электрическая постоянная и относительная диэлектрическая проницаемость (статическая),  $\rho$  – удельное электросопротивление материала, или среды [8, 12]. В табл. 2 дано сравнение величин  $\tau_M$  и  $\tau_M^0$ , рассчитанных для различных материалов и сред по современным данным [12] и по данным Рихмана (отмечены знаком \*) [4].

Таблица 2

*Максвелловские времена релаксации зарядов  $\tau_M$  для различных материалов и сред [4, 12]*

Среда	$\varepsilon_r$	$\rho$ , Ом·м	$\tau_M^0$ , с	Материал	$\varepsilon_r$	$\rho$ , Ом·м	$\tau_M$ , с
Воздух сухой	1	$> 10^{15}$	$> 10^4$ $\sim 3 \cdot 10^3$ *)	Сера	3.7	$10^{17}$	$\sim 10^6$ $\sim 10^8$ *)
Воздух естественной ионизации**	1	$10^{14}$	$10^3$ $\sim 6 \cdot 10^2$ *)	Сургуч	$\sim 3$	$10^{16}$	$10^5$
				Масла		$10^{11} - 10^{14}$	$1 - 10^3$
Влажный воздух (100%)	1	$< 10^{13}$	$< 10^2$	Парафин	2.2	$10^{14} - 10^{16}$	$10^3 - 10^5$
Пламя свечи	$\sim 1$	$\sim 10^{11}$	$\sim 1$	Янтарь	2.9	$10^{18}$	$10^7$
Вода дождевая	31	$10^4$	$10^{-6}$	Бумага	2 – 4	$10^{15}$	$\sim 10^4$
Вода морская	31	0.3	$\sim 10^{-11}$	Железо	$\sim 1$ ***	$10^{-7}$	$\sim 10^{-18}$
Земля влажная	$\sim 10$	$10^2$	$\sim 10^{-8}$	Дерево	3.5 – 5	$10^9 - 10^{13}$	$10^{-2} - 10^2$

\*) – данные Рихмана; \*\* – у поверхности Земли; \*\*\* – вклад кристаллической решетки.

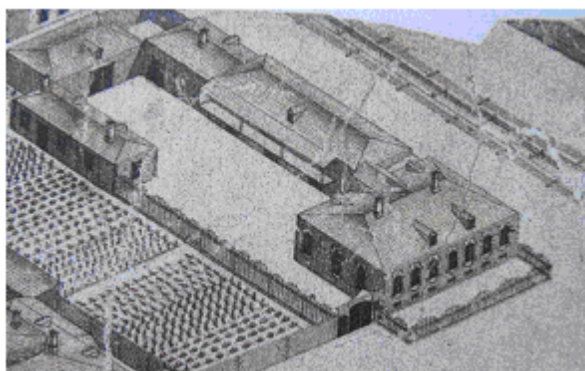
Из табл. 2 видно, что Рихман правильно определил характерные времена утечки зарядов с образцов при различной влажности воздуха в помещении. В частности, из табл. 2 следует, что заряд на термоэлектретах (сера, сургуч и др.) в сухом помещении действительно мог сохраняться у Рихмана до года и более [4]. Из табл. 2 следует также, что пламя свечи снижает удельное сопротивление  $\rho$  воздуха на 3 – 4 порядка, хотя величина  $\rho$  в зоне пламени при этом все еще сохраняет значительную величину, отвечающую «плохим» диэлектрикам (дерево). Из табл. 1 видно также, что трибоэлектрический эффект в металлах в обычных условиях не наблюдается из-за малости  $\tau_M$ . Это, однако, не исключает возможности электризации металлов при ударах [8].<sup>9</sup>

## 2. Атмосферные термоэлектрические эффекты

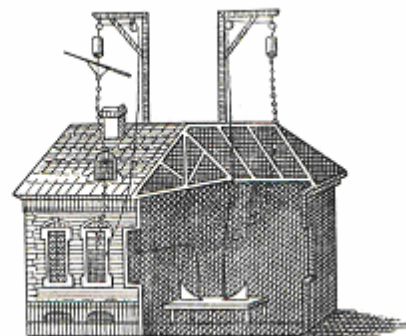
В 1752 в "СПб Ведомостях" появилось первое известие об опытах В. Франклина, доказывавших электрическую природу молний [13]. Рихман тотчас же переключился на исследование атмосферного электричества, приспособив для измерений свой «электрический указатель» (рис. 3 а). Несколько позже к экспериментальным исследованиям атмосферного электричества подключились также академики Ломоносов (теоретические вопросы) и Х.Г. Кратценштейн

<sup>9</sup> Метод электризации ударом предложен Ломоносовым (1753) ([5], с. 278), а затем успешно реализован для металлов акад. В.В. Петровым (1761 – 1834) в его работе «Новые электрические опыты» (1804) [5, 6, 8].

(K.G. Kratzenstein) (1723 – 1795) (создание громоотводов) [4, 14].<sup>10</sup> К этому времени Ломоносов уже имел значительный научный задел по исследуемому вопросу [5, 15, 16]. В 1744 – 1748 он проводил у себя на дому в СПб систематические наблюдения грозных явлений и установил их ТЭ природу (рис. 2 а) [5, 16]. Ломоносов обнаружил, что «...тяжелые громом и молниею тучи по большей части после полудня ...случаются, когда действие солнца в согрениии воздуха всех больше чувствительно» ([5], с. 236). с. 226).<sup>11</sup> Механизм электризации облаков Ломоносов связал с взаимным трением восходящих и нисходящих потоков воздуха при конвекции, вызванной неоднородным нагревом поверхности Земли солнечными лучами (рис. 2 а). Широко известна характеристика атмосферного электричества Ломоносовым как «...электрической силы, которая натуральной теплотой производится...» ([5], с. 226). В качестве других источников электризации атмосферы Ломоносов рассмотрел также тепло земных недр, пожары и даже курение [5]. Экспериментальное изучение атмосферного электричества Рихман и Ломоносов начали с сооружения «громовых машин» – установок для получения электричества из грозных туч по методу Франклина (рис. 5 и 6) [13]. Рихман с конца 1752 имел в своем городском доме (рис. 5 а) две «громовые машины» с «острым» и «тупым» концами стержней (рис. 5 б), которые использовал для сравнительных измерений ([4], с. 653). Ломоносов в 1753 разместил одну свою установку в городской усадьбе (рис. 6 б), другую – «в деревне» (поместье Усть-Рудицы), где он строил свою фабрику художественной мозаики (рис. 6 в) ([5], с. 260).



а)



б)

Рис. 5. Усадьба Рихмана с одноэтажным кирпичным домом «на подвалах» на углу Большой перспективы (правая сторона) и 5 линии ВО СПб (а) [18] и его «громовые машины» (конец 1752) (б) ([4], с. 653) [28].

Все установки были однотипны и состояли из изолированных вертикальных, или наклонных железных стержней, размещенных на крышах домов (рис. 5 б и 6 б), либо на деревьях (рис. 6 в). Стержни играли роль антенн, которые подсоединялись с помощью железных проводов (либо цепей у Рихмана) с «электрическими указателями» (рис. 3 а). Электрическая изоляция проводов осуществлялась шелковой тканью. Рихман разместил «указатели» внутри дома (рис. 5), Ломоносов вел наблюдения на улице (точки с, рис. 6 б и 6 в) (рис. 1).<sup>12</sup> Для улучшения натекания зарядов из атмосферы установки Ломоносова имели на концах стержней «многие

<sup>10</sup> Акад. Х.Г. Кратценштейн (1723 – 1795), медик, физик и механик. После гибели Рихмана (1753) был уволен из Академии по истечении срока контракта (1748 – 1753). Уехал в Копенгаген, где занимался теорией газов и применением электричества в медицине [4, 6].

<sup>11</sup> Согласно современным данным, на электрическую активность атмосферы Земли существенное влияние оказывают также космические лучи [12, 17].

<sup>12</sup> Оба дома Ломоносова были деревянные и отличались повышенной пожароопасностью ([5], с. 260).

металлические иглы» (рис. 6 б и 6 в) ([5], с. 265). Экспериментальные работы Рихмана и Ломоносова с «громовыми машинами» оказались исключительно плодотворными. Рихман определил диапазон изменений показаний «указателя»  $\alpha$  и установил, что в районе СПб «наибольший градус  $\alpha$ , до которого нить поднимается под действием природного электричества был 30-й» ([4], с. 358). Он обнаружил, что для туч, отдаленных от наблюдателя на расстояние  $L > 3$  км, величина  $\alpha$  (то есть нормальная компонента электрического поля  $E_{\perp}$ ) в точке наблюдения убывает по мере увеличения интервала времени между молнией и громом  $L \sim \Delta t$  ([4], с. 358) (кривая 1, рис. 7).<sup>13</sup> В свою очередь, Ломоносов нашел, что первопричиной атмосферного электричества являются не собственно гром и молния, а электрические заряды туч ([4] с. 269). При этом он обнаружил также небольшие отклонения показаний  $\alpha$  «электрического указателя» и при безоблачном небе. По этому поводу Рихман писал: «знаменитейший муж Ломоносов наблюдал, что даже без грома и молнии значительное электричество передается железу, надлежащим образом изолированному.<sup>14</sup> Я же наблюдал, что электричество после молнии и грома сразу уменьшалось» ([4], с. 358).<sup>15</sup>

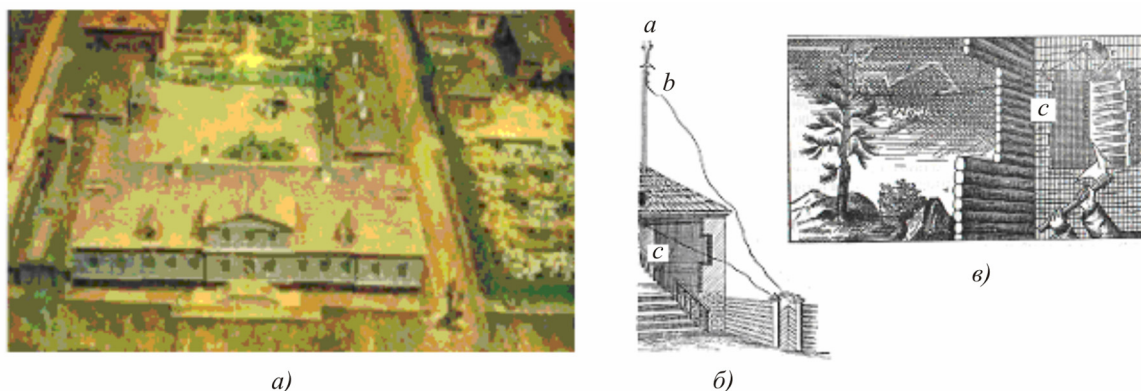


Рис. 6. Усадьба «Бонов дом» на 2-ой линии ВО СПб, где проживал Ломоносов (1741 – 1757) (а) [15] и его «громовые машины» (б) (май 1753) и (в) (июнь 1753) (а – антенна; б – подводный провод; с – место наблюдений. [5, 16]. Третье слева строение на заднем плане рисунка (а) – химическая лаборатория АН.

Используя в качестве прототипа более раннюю работу И.Г. Винклера (1746), Рихман заключил, что физический механизм электризации облаков состоит в трении ПЭТ (твердых частиц,<sup>16</sup> либо водяных паров) с ВЭТ (каплями воды) ([4], с. 640). Ломоносов не обнаружил в воздухе достаточного количества твердых частиц, и в качестве ПЭТ рассмотрел гипотетические эфирные масла, испаряемые животными и растениями. Затем, убедившись и в их отсутствии, в качестве механизма электризации облаков предложил «сражение (соударение) электрических паров и их трение при встречном движении в атмосфере» [5]. Последний механизм с различными вариациями используется для объяснения электризации облаков до настоящего времени [17].

<sup>13</sup> Пересчет  $\Delta t \leftrightarrow L$  и  $\alpha \leftrightarrow E_{\perp}$  был выполнен нами для соотношений –  $\alpha \sim E_{\perp}^{0.5}$  и  $\alpha = 30^{\circ} \sim E_{\perp} = 25$  кВ/м.

<sup>14</sup> Согласно нашим оценкам (рис. 7), чувствительность установки Ломоносова была достаточной ( $\sim 0.5^{\circ}$ ), чтобы при хорошей погоде наблюдать естественное поле Земли  $E_{\perp}^0 \sim 0.14$  кВ/м ( $\downarrow$ ) [12].

<sup>15</sup> Эффект объясняется аннигиляцией положительных и отрицательных зарядов облаков при разрядах [17].

<sup>16</sup> Как было установлено позже, механизм Рихмана объясняет электризацию атмосферы в зоне промышленных выбросов, содержащих твердые частицы [17].



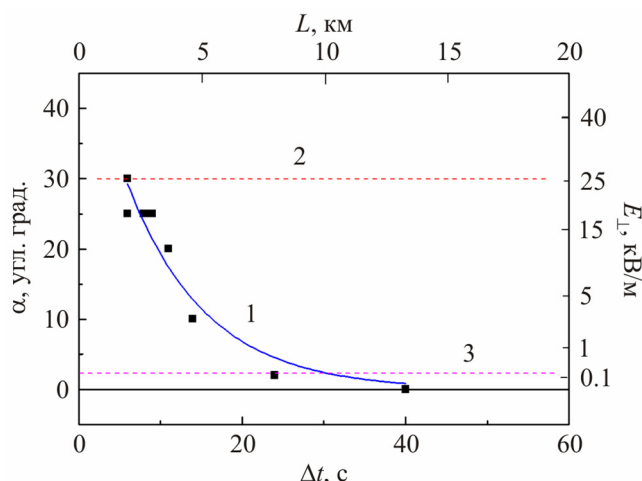


Рис. 7. Зависимость показаний  $\alpha$  «указателя» Рихмана (1) и соответствующие изменения электрического поля  $E_{\perp}$  ( $\downarrow$  или  $\uparrow$ ) от времени задержки сигналов «молния-гром»  $\Delta t$  и расстояния  $L$  до грозового фронта (пересчет наши). 2 –  $\alpha_{max}$  ([4], с. 358); 3 –  $E_{\perp}^0 \sim 0.14$  кВ/м ( $\downarrow$ ) – естественное поле Земли при безоблачном небе.

26 июля 1753 г. Ломоносов и Рихман последний раз вместе присутствовали на заседании в СПб АН, где решался вопрос об их докладах по атмосферному электричеству, назначенным на 5 сентября 1753. Около 12 часов, когда над Петербургом появилась большая грозовая туча, они покинули собрание и отправились, каждый к себе домой, с целью проведения наблюдений. Рихман взял с собой академического гравера И.А. Соколова для создания рисунков для газеты «СПб Ведомости». Войдя в дом и приблизившись к своему прибору на расстояние около фута ( $\sim 30$  см), при еще безоблачном небе, Рихман был поражен разрядом атмосферного электричества (рис. 8 б). От линейки электрометра отделился бело-голубой шар размером с кулак, который коснулся головы ученого и затем взорвался. Соколов, стоявший чуть поодаль, получил несколько искровых разрядов от падающей проволоки, выскочил на улицу и вызвал пожарную охрану. Жена Рихмана, Анна Елизавета Гинце, попыталась сделать мужу искусственное дыхание. Попытки реанимации продолжил Кратценштейн, срочно приехавший на место происшествия, однако и ему не удалось вернуть ученого к жизни. М.В. Ломоносов, также приехавший в дом Рихмана, позже писал фавориту императрицы Елизаветы графу И.И. Шувалову: «... г. профессора Рихмана громом убило в тех же точно обстоятельствах, в которых я был в то же самое время...». Необыкновенная смерть Рихмана вызвала широкий резонанс, как в России, так и за рубежом. Для расследования инцидента была создана академическая комиссия (Х.Г. Кратценштейн, М. Шрейбер, М. Клейнфельд) [4],<sup>17</sup> собственное независимое расследование происшествия провел Ломоносов [4, 5]. Согласно рапорту Кратценштейна (рис. 9 а), петля поражения ученого током проходила от левой части лба Рихмана к его левой пятке с отдельными выходами на груди слева и под ребрами, что, согласно современной статистике, типично для электротравм головы [20]. Кратценштейн установил также места электрических пробоев в доме (рис. 9 б) и назвал основную причину происшествия – нарушение правил техники безопасности – установка не была заземлена (рис. 5).<sup>18</sup>

<sup>17</sup> Сохранилось специальное дело «О смерти проф. Рихмана» № 433 ([4], с. 695).

<sup>18</sup> Рихман умышленно не заземлял линейку, т.к. при этом установка превращалась в громоотвод, а ее чувствительность становилась равной нулю [4].

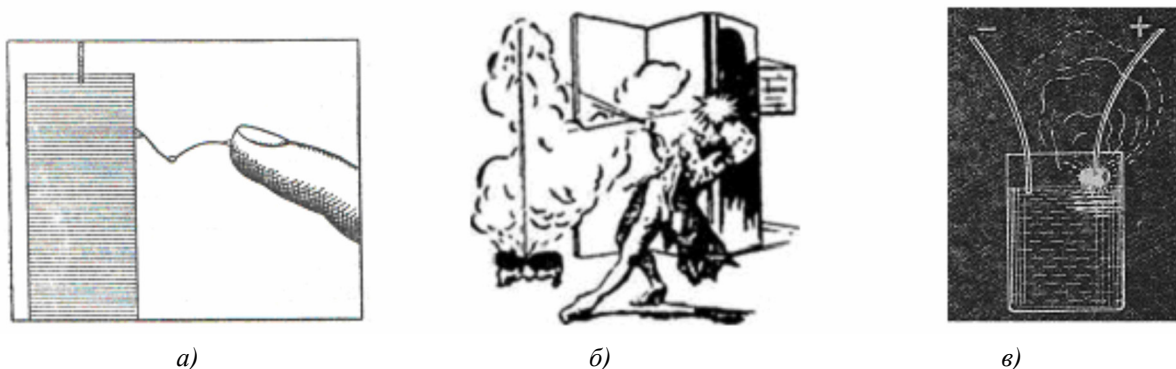


Рис. 8. Электрические разряды: а) – единственный искровой по Ломоносову [5], б), в) – положительные плазменные стримеры (светящиеся шаровые разряды). б) – гибель Рихмана по описанию Соколова [4], в) – опыт Плантэ с жидким электролитом (1883) [8].

По мнению Кратценштейна, молния распространялась не с кровли здания, а «... в дверь «вошел» луч молнии, который пронесло в дом порывом ветра, а затем по проволоке к Рихману, минуя Соколова». <sup>19</sup> Ломоносов не поддержал выводы Кранценштейна и писал, что «молнию извне к стреле блеснувшую, многие сказывали, что видели» ([5], с. 547).

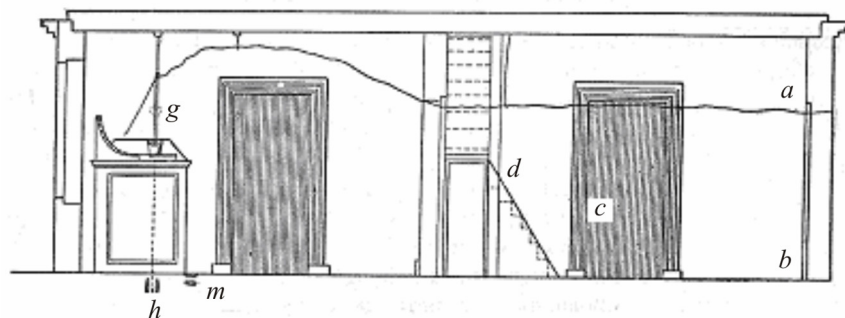


Рис. 9. а) – Академик Х.Г. Кратценштейн (K.G. Kratzenstein) (1723 – 1795) [14], и места электроповреждений в сених дома Рихмана (б) ([5], с. 653). g, h – пробой тела Рихмана, т – ожег Соколова искрами от упавшей проволоки, с – пробой косяка двери в «поварню» и отскочивший в (d) иверень (кусок дерева), а, b – пробой и падение входной двери ([5], с. 653).

Иностранные ученые того времени выдвигали свои собственные версии инцидента. И. Винклер (1753), В. Ватсон (1754) и И.-Ф. Хартман (1764) пришли к заключению, что Рихман был убит не молнией, а наведенным в антенне грозovým электричеством. И-К. Вилке (1759) предположил, что Рихман приблизился к линейалу на опасное расстояние, поскольку не знал, «что некоторые облака могут наводить в антенне положительное, некоторые – отрицательное электричество, причем оно иногда мгновенно меняется» ([4], с. 700). Однако окончательно детали гибели Рихмана остаются невыясненными до настоящего времени [4].

В настоящей работе мы предприняли дополнительное расследование этого инцидента, используя современные данные о поражающих факторах атмосферного электричества [12, 17]. Сопоставляя данные Кранценштейна, Ломоносова [4] и Соколова [5], мы определили положение

<sup>19</sup> На основании рапорта Кранценштейна возникла известная гипотеза о поражении Рихмана шаровой молнией, залетевшей в открытую дверь дома.

грозового фронта в момент инцидента (рис. 10), оценили показания электрометров Ломоносова и Рихмана, а также восстановили последовательность и характер наблюдавшихся электрических разрядов (рис. 11). Согласно (рис. 10), грозовой фронт в момент инцидента был отдален от дома Рихмана на расстояние более 1 км. Поэтому мы также полагали, что ученый был поражен не прямым попаданием молнии в «громовую машину», а разрядом электричества, индуцированного заряженной тучей в антенне [4]. Исходя из совпадения по времени разрядов (2, 3, рис. 11) [4, 5], мы полагали, что периферийная молния вблизи дома Ломоносова (4, рис. 10) стала «спусковым механизмом» разряда в доме Рихмана (рис. 8 в). В свою очередь, разряд был вызван неосторожным приближением ученого к «указателю». Согласно Соколову, Рихман приблизился к «указателю», так как хотел уточнить противоречие в его показании – туча была близка (рис. 10), а малые  $\alpha$  показывали, что «гром еще далеко стоит» (см. рис. 7).<sup>20</sup> Наши оценки показаний электрометра Рихмана (кривая 6, рис. 11) подтверждают эту версию Соколова.<sup>21</sup>

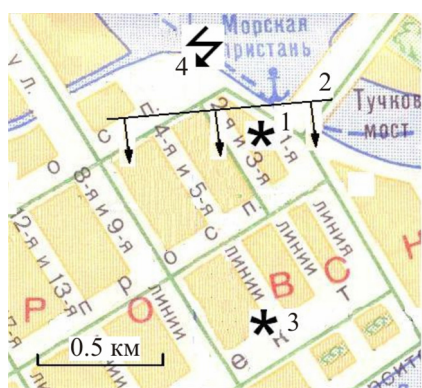


Рис. 10. Положение грозового фронта (2) и направление его движения в момент разряда периферийной молнии (4) при проведении опытов 26 июля 1753. 1 – дом Ломоносова, 3 – дом Рихмана [L].

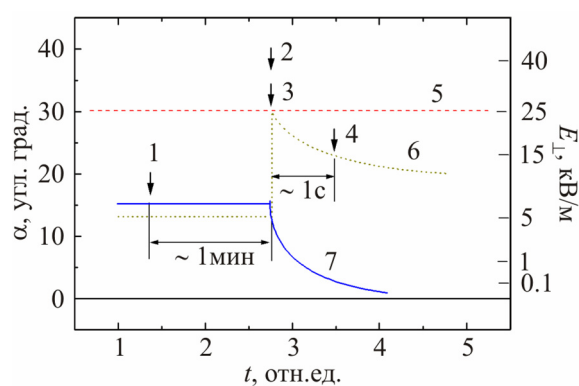


Рис. 11. Показания  $\alpha$  электрометров Ломоносова (7) [5] и Рихмана (6) (наш расчет) в зависимости от времени  $t$  в опытах 26 июля 1753. Разряды: 1 – линеал – рука Ломоносова; 2 – периферийная молния; 3 – линеал – лоб Рихмана; 4 – проволока – Соколов. Характер разрядов: 1, 4 – множественный искровой (кистевой); 2 – молния; 3 – положительный стример.

Предполагаемая электрическая схема поражения Рихмана показана на рис. 12. Оценки параметров схемы (рис. 12) до и в момент воздушного пробоя промежутка «линеал – лоб Рихмана» ( $R_2$ ) приведены в табл. 3. Из характерной формы разряда (шар) и направления его движения от «линеала» ко лбу Рихмана, мы предположили, что при пробое  $R_2$  имело место образование положительного плазменного стримера (рис. 8 б и 8 в) [8]. Это предположение подтверждается длительностью разряда (несколько секунд) и характерным «схлопыванием» шара со взрывом [4, 5]. Отсюда следует, что в момент разряда нижняя кромка тучи, ближайшая к дому Рихмана, была заряжена положительно (+) (рис. 13). Кроме того, концентрация положительных ионов в межэлектродном промежутке  $R_2$  превышала критическое значение  $N_{кр}^+ \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , необходимое для самостоятельного разряда такого типа, при этом энергия пробоя была достаточно велика [8, с. 238]. Величину напряжения  $U_2 \sim 25 \text{ кВ}$  в разрядном

<sup>20</sup> Большинство академиков СПб АН страдали близорукостью, так как много работали при свечах [4, 5].

<sup>21</sup> Рихман ([4], с. 212) и Ломоносов [5] часто использовали разряд «через голову» в научных и в медицинских целях. Рихман в то время страдал «сильнейшей зубной болью» ([4], с. 692), которую мог лечить «электричеством». Однако эта причина инцидента представляется нам менее вероятной.

промежутке  $R_2$  (рис. 12) мы определяли по табличным данным для воздушного пробоя типа «острие – плоскость» (край линейки (+) – лоб Рихмана) (–) для промежутка  $L = 1$  фут (около 30 см) (табл. 3) [12]. Отсюда при высоте шеста  $h = 4$  м и высоте тучи над землей  $H \sim 1$  км имеем  $E_{\perp} \sim 25$  кВ/м ( $\downarrow$ ) (рис. 13), что дает оценку  $U_1 \sim 25$  МВ в момент разряда (табл. 3) [12]. По данным Соколова «... гром был еще не очень близко, но проходом или сеньми шел дым, того же часа блеснула молния, дверь в поварню отворилась и профессор упал на сундук» (рис. 4 б). Отсюда мы заключили, что еще до основного электрического разряда, смертельного для Рихмана, в доме происходила утечка тока от подводящей проволоки в землю.<sup>22</sup> Утечка шла через отсыревшие деревянные части дверей, ведущих в кухню и на улицу ( $c$  и  $ab$ , рис. 9). Величины сопротивлений  $R_i = \rho l/s$  ( $i = 1..6$ ) (табл. 3) (здесь  $\rho$  – удельное сопротивление среды,  $l$  и  $s$  – характерные длины и эффективные сечения проводящих каналов) мы оценивали по данным табл. 2 (для влажного дерева и кирпича полагали  $\rho \sim 10^4$  Ом·м) [12]. При расчетах использовали значения  $l$  (м) =  $10^3$ ; 0.3; 1; 2; 1 и  $s$  (м<sup>2</sup>) =  $10^5$ ; 0.01; 10;  $10^{-2}$ ; 10 (для  $i = 1, 2, 4, 5, 6$ , табл. 3), сопротивление  $R_3 = 10^4$  Ом взяли из [20].

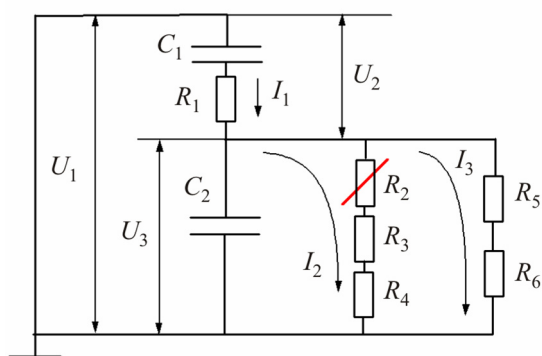


Рис. 12. Схема поражения Рихмана разрядом атмосферного электричества. (Обозначения – см. табл. 1).

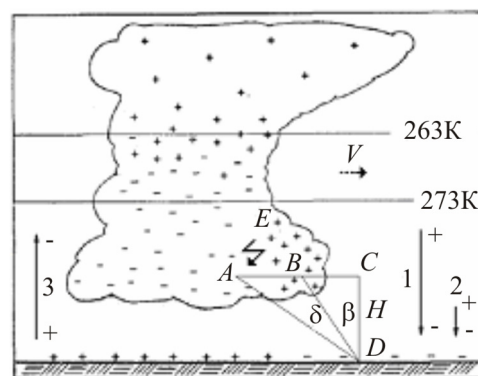


Рис. 13. Схема грозовой тучи и механизм увеличения электрического поля  $E_{\perp}$  вблизи поверхности земли (точка D) при периферийном электрическом разряде AE. Области тучи: 1, 2 – «положительная»; 3 – «отрицательная».  $E_{\perp}$ : 1 – после разряда; 2 – до разряда [17].

В обычных условиях комнатный воздух содержит  $N \sim 10^3$  см<sup>-3</sup> ионов разного знака, воздух на улице перед грозой  $N \sim 10^5$  см<sup>-3</sup>, при этом утечка электричества в землю через влажные стены дома могла повысить число ионов в воздухе до  $N \leq 10^6$  см<sup>-3</sup>. Это согласуется с множественным искровым («кистевым») поражением Соколова [4], однако явно недостаточно для образования положительного плазменного стримера в промежутке  $R_2$  (рис. 11). Согласно [3], образование плазменного стримера в промежутке  $R_2$  (рис. 8 б) могло быть вызвано дыханием ученого как следствие эффекта межфазного разделения зарядов при испарении воды:  $H_2O(ж) \rightarrow K H_2O^{-1}(ж) + H_2O(г) + K p^{+}$ . Эффект сопровождается образованием небольшого количества свободных протонов ( $p^{+}$ ) (здесь  $K \sim 10^{-6}$  – коэффициент распределения).<sup>23</sup> В нормальных условиях давление насыщенного пара воды составляет  $p = 2.3 \cdot 10^3$  Па, концентрация молекул воды в воздухе  $N(H_2O) \sim 6 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>. В результате даже при единичном выдохе ученого

<sup>22</sup> Было обеденное время, в поварне готовили обед, топилась печь, пары воды осаждались на дверях. Впоследствии именно эти участки дверей были разрушены при основном пробое.

<sup>23</sup> Эффект был обнаружен Вольтой (1770), с ним связывается отрицательный заряд поверхности Земли [17].



концентрация свободных протонов в промежутке  $R_2$  могла достичь  $p^+ \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , что достаточно для развития положительного стримера (рис. 8 б) [19]. При этом «спусковым механизмом» пробоя  $R_2$  (рис. 12) послужило резкое увеличение напряжения  $U_3$ , вызванное периферийным грозовым разрядом (4, рис. 10). Такие резкие скачки  $E_{\perp} \sim U_3 \sim \alpha$  являются обычными для близких к наблюдателю секционированных туч [17]. Скачки  $\alpha$  неоднократно наблюдались Рихманом и Ломоносовым для туч с  $L < 3 \text{ км}$  (рис. 7), однако эффект не нашел у авторов надлежащего объяснения [4, 5].<sup>24</sup>

*Таблица 3*

*Параметры схемы поражения Рихмана разрядом атмосферного электричества (рис. 12)*

Параметр	До разряда	При разряде
Напряжение туча-земля, $U_1$ , МВ	$\sim 6$	25
Напряжение туча-антенна $U_2$ , МВ	$\sim 6$	$\sim 25$
Напряжение антенна-земля, $U_3$ , кВ	25	100
Электрическое поле у Земли, $E_{\perp}$ , кВ/м	$\sim 6\downarrow$	$25\downarrow$
Ток атмосфера-земля, $I_1$ , А	$\sim 0.025$	$\sim 2.6$
Ток антенна-земля, $I_2$ , А	$\sim 0$	2.5
Ток утечки (стены дома), $I_3$ , А	$\sim 0.025$	$\sim 0.1$
Сопротивление атмосферы, $R_1$ , кОм	$\sim 10^8 (10^{11}^*)$	$\sim 10^7 (10^7^{**})$
Сопротивление участка пробоя, $R_2$ , Ом	$10^{17}$	$\sim 0$
Сопротивление тела, $R_3$ , Ом	$10^4$	$10^4$
Сопротивление утечки (сырое дерево), $R_5$ , Ом	$10^6$	$10^6$
Сопротивление заземления, $R_4 \sim R_6$ , Ом	$\sim 10^3$	$\sim 10^3$
Выделяющаяся мощность, $W_{R5}$ , Вт	625	$10^3$
Выделяющаяся мощность, $W_{R3}$ , Вт	0	$2.5 \cdot 10^5$

\* – оценка для неионизированного воздуха. \*\* – оценка с учетом аэроионов грозы ( $N \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ ).

Для объяснения роста  $E_{\perp}$  при периферийном разряде (4, рис. 10) мы использовали модель секционированной тучи (рис. 13). Согласно (рис. 13), при разряде между точками  $A$  и  $E$  происходит аннигиляция положительных и отрицательных зарядов в одной из секций тучи. В результате электрическое поле  $E_{\perp}$  в точке наблюдения  $D$  возрастает в  $\delta E_{\perp} = E_{\perp}'/E_{\perp} \sim \cos^2\beta/(\cos^2\beta - \cos^2(\beta + \delta))$  на время  $t \sim 5 - 10 \tau$  (здесь  $\tau \sim 1 - 5 \text{ с}$  – характерное время релаксации тучи) [17]. Оценки проводили в приближении точечных зарядов ( $Q_B = -Q_A$ ) при высоте тучи  $H \sim 1 \text{ км}$ . Углы  $\delta \sim 6^\circ$ ,  $\beta \sim 50^\circ$  (рис. 13) определяли из рис. 10. Получено  $\delta E_{\perp} \sim 4$ , откуда при условии  $\alpha \sim 30^\circ \sim E_{\perp} \sim 25 \text{ кВ/м}$  в момент разряда были рассчитаны параметры схемы (рис. 12), а также показания электрометра Рихмана до разряда (табл. 3 и рис. 11). По формулам для плоского конденсатора и коаксиальной линии соответственно мы оценили электрические емкости тучи  $C_1 = \epsilon_0 \epsilon S/H \sim 10^{-8} \text{ Ф}$  (здесь  $\epsilon \sim 1$  для воздуха,  $S \sim 10^6 \text{ м}^2$  – эффективная площадь тучи) и «грозовой машины»  $C_2 = 4\pi\epsilon_0 \epsilon l/\ln(r_1/r_2) \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$  (здесь  $l \sim 10 \text{ м}$ ,  $r_1 \sim 0.5 \text{ см}$  и  $r_2 \sim 100 \text{ см}$  – длина подводящего провода, его радиус и среднее расстояние провода до стен дома). Затем рассчитали максимальные заряды тучи и «грозовой машины» –  $Q_1 = C_1 U_1 \sim 0.25 \text{ Кл}$  и  $Q_2 = C_2 U_2 \sim 2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$ , и постоянные времени зарядки «громовой машины»

<sup>24</sup>Рихман и Ломоносов не знали, что положительные и отрицательные заряды могут образовываться одновременно, а затем аннигилировать ([5], с. 523). Ломоносов объяснял скачки  $\alpha$  переходом «электрической силы» между облаками при разрядах.

соответственно в момент пробоя –  $\tau_1 = R_1 C_2 \sim 10^{-3}$  с и то же – для неионизированной атмосферы –  $\tau_1' = R_1 C_2 \sim 20$  с. Из полученного соотношения  $\tau_1 \ll \tau_1'$  следует, что атмосфера над домом Рихмана в момент пробоя была сильно ионизована. При этом все разряды в доме (рис. 9 б) определялись энергией заряженной установки  $C_2$ , которая непрерывно «подпитывались» энергией заряженной тучи  $C_1$ , что и определило их общую большую величину.<sup>25</sup> В результате при пробое межэлектродного промежутка ( $R_2 \rightarrow 0$ ) через Рихмана мог проходить поражающий ток  $I$  до  $\sim 2.5$  А, существенно превышающий смертельное значение ( $I_0 = 0.1$  А) (табл. 3) [20]. Бледное тело ученого и многочисленные ожоги ([4], с. 545) подтверждает это предположение<sup>26</sup>.

Таким образом, причиной гибели Рихмана было редкое сочетание различных неблагоприятных факторов.<sup>27</sup> Среди них главные – положительный заряд облака над домом, опасная конфигурация разрядного промежутка типа «острие-плоскость», снижающая напряжение разряда в 3 раза, сырость помещения и одежды, а также два ТЭ эффекта, которые вызвали усиление поражающих факторов атмосферных зарядов. Ими являются повышение проводимости атмосферы вблизи антенны из-за топившейся в доме печи, и главное – высокая концентрация протонов  $p^+ \sim 10^{12}$  см<sup>-3</sup> в промежутке  $R_2$ , вызванная дыханием ученого.<sup>28</sup> Следует отметить, что большинство из этих эффектов Рихман знал, или даже был их первооткрывателем [4]. В частности, Рихман ранее подробно исследовал электрический пробой воздуха при уменьшении разрядного промежутка ([4], с. 233), изучил «стекание зарядов с острия» и «проводящие свойства пламени и дыма», описал эффект «сырого» помещения и др. [4]. Рихман пытался также измерить проводимость водяных паров (опыт с золипилой) (рис. 4 в), однако не смог оценить ее величину из-за низкой чувствительности своего «указателя». Однако, как показано выше, именно малая протонная проводимость водяных паров, выдыхаемых ученым, могла явиться основной причиной его гибели. Соответственно, самым простым способом предотвращения трагедии было бы использование Рихманом электрометра с защитным корпусом (рис. 3 б) [20].<sup>29</sup> В то же время, относительная безопасность Ломоносова и Соколова в подобных же условиях была связана, в первую очередь, с меньшей ионизацией окружающего их воздуха. В результате электрические разряды, которые они также испытали при грозе 26 июля 1753 года, носили относительно безопасный искровой (кистевой) характер.

## Выводы

Рассмотрены работы Рихмана и Ломоносова (1745 – 1753), имеющие отношение к зарождению отечественного ТЭ. Показано, что авторы впервые обнаружили и/или подробно исследовали ряд ТЭЭ (термоэлектретный, ТЭ атмосферный и др.) в различных ТЭАС, относящихся к классу диэлектриков (сера, смолы, воздух, вода и т.п.). Все исследованные ими ТЭЭ имели сходную

<sup>25</sup> Значительное уменьшение  $R_1$  могла вызвать также топившаяся в доме печь (рис. 5 б).

<sup>26</sup> При первичной остановке дыхания тела пострадавших имеют синий цвет, при первичной остановке сердца – красный, при одновременной остановке дыхания и кровообращения – белый ([20], с. 236).

<sup>27</sup> По нашей оценке, вероятность случайного сочетания факторов поражения в инциденте с Рихманом была исключительно мала ( $P < 10^{-7}$  на единичный опыт). Это подтверждается отсутствием новых подобных инцидентов с учеными за последние 260 лет.

<sup>28</sup> Рихман беспрерывно говорил с Соколовым, не снял верхнюю одежду и влажные ботинки, снял только парик, в результате чего оказался у установки еще и с влажной головой [4].

<sup>29</sup> В настоящей работе мы не рассматриваем возможный случай одновременного включения двух «громовых машин» Рихмана. Их последовательное ( $U_3' \sim 2U_3$ ), либо параллельное включение ( $C_2'' \sim 2C_2$ ) могло существенно повысить вероятность электропоражения ученого (рис. 5 б).

физическую природу и были связаны с пространственным разделением и/или переносом неравновесных электрических зарядов в образцах при изменении температуры. В ряде случаев ТЭЭ были дополнительно усилены фазовыми переходами и химическими реакциями («плавление – кристаллизация», «испарение – конденсация», горение и др.), также связанными с изменением температуры. Отличительной чертой ТЭЭ была их дискретность, проявляющаяся в процессах «зарядки» и «разрядки» образцов. В результате, даже при больших  $U$ , ТЭЭ оставались практически безопасными для исследователей за исключением случаев электрического пробоя диэлектриков (инцидент с Рихманом).

### **Литература**

1. Буряк А.А. Очерки развития термоэлектричества / А.А. Буряк, Н.Б. Карпова. – К.: НД, 1988. – 290 с.
2. Анатычук Л.И. К 70-летию со дня рождения / Л.И. Анатычук [ред.: Вихор Л.Н.]. – Черновцы: ИТ НАНУ, 2007. – 728 с.
3. Коржуев М.А. О последовательности открытия основных термоэлектрических явлений / М.А. Коржуев, И.В. Катин // Термоэлектричество. – 2011. – № 3. – С. 83 – 100.
4. Рихман Г.-В. Труды по физике / Г.-В. Рихман. – М.: АН СССР, 1956. – 712 с.
5. Ломоносов М.В. Избранные труды по химии и физике / М.В. Ломоносов. – М.: АН СССР, 1961. – 560 с.
6. Храмов Ю.А. Библиографический справочник / Ю.А. Храмов. – М.: Наука, 1983. – 400 с.
7. Гильберт В. О магните, магнитных телах и большом магните Земле / В. Гильберт. – М.: АН СССР, 1956. – 412 с.
8. Путилов К.А. Курс физики [т. 2] / К.А. Путилов. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 584 с.
9. Электреты / [под ред. Г. Сесслера]. – М.: Мир, 1983. – 478 с.
10. Лауэ М. История физики / М. Лауэ. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 232 с.
11. Эпинус Ф.Т.У. Теория электричества и магнетизма / Ф.Т.У. Эпинус. – М.: АН СССР, 1951. – 564 с.
12. Григорьев И.С. Физические свойства материалов / И.С. Григорьев, Е.З. Мейликов. – М.: Энергия, 1991. – 1232 с.
13. Франклин В. Опыты и наблюдения над электричеством / В. Франклин. – М.: Изд. АН СССР, 1956. – 272 с.
14. Академия наук СССР. Персональный состав (1724 – 1917) [т. 1]. – М.: Наука, 1974. – 480 с.
15. Карпеев Э.П. Краткий энциклопедический словарь / Э.П. Карпеев, Ломоносов. – СПб: Эл.изд, 2007. – 218 с.
16. Морозов А.А. Ломоносов / А.А. Морозов. – М.: Молодая гвардия, 1961. – 322 с.
17. Мучник В.М. Физика грозы / В.М. Мучник. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 352 с.
18. Аксонометрический план Санкт-Петербурга 1765 – 1773 г.г. (План П.де Сент-Илера, И. Соколова, А. Горихвостова и др.). // Под ред. В.С.Соболева. СПб: Крига, 2003. – С. 126.
19. Шавлов А.В. Механизм межфазной электризации при испарении и конденсационном росте льда и воды / А.В. Шавлов // Криосфера Земли – 2008. – Т. 12, № 2. – С. 52 – 59.
20. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. Манойлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.

Поступила в редакцию 24.10.2013.