

УДК 621.315.592.

Коржуєв М.О.<sup>1</sup>, Темяков В.В.<sup>2</sup>



Коржуєв М.О

<sup>1</sup>Інститут металургії й матеріалознавства  
ім. О.О. Байкова РАН, просп. Ленінський, 49,  
Москва, 119991, Росія;

<sup>2</sup>ВАТ «Велика Російська Енциклопедія»,  
Покровський б – р, 8, Москва, 109817, Росія



Темяков В.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ РІХМАНА Й  
ЛОМОНОСОВА В ОБЛАСТІ ТЕРМОЕЛЕКТРИКИ  
(1745 – 1753)

*Розглянуто праці академіків СПб Академії Наук Г.-В. Ріхмана й М.В. Ломоносова (1745- 1753 р.) з дослідження перехресних ефектів «тепло ↔ електрика» у газоподібних, рідких і твердих діелектриках. Описані ефекти порівнюються в роботі з термоелектричними ефектами (ТЕЕ), спостережуваними в інших термоелектрично-активних середовищах (ТЕАС). Показано, що ТЕЕ в діелектриках відрізняються більшими діючими напругами ( $U$  до  $10^3$ -  $10^5$  В й більше) і малими струмами розряду ( $I \sim 1$ - $10$  мкА), пов'язаними з високим власним питомим опором  $\rho$  зразків. Стаття присвячена тисячоріччю культурної взаємодії Росії й Німеччини, відзначеному 2012 р.*

**Ключові слова:** термоелектрети, атмосферна електрика, термоелектрика.

*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.

## Вступ

Послідовність відкриття основних термоелектричних ефектів (ТЕЕ) «тепло ↔ електрика» в різних термоелектрично – активних середовищах (ТЕАС) досліджувалася раніше [1-3]. Згідно з [3], перші ТЕЕ були виявлені в діелектриках, де вони мають найбільшу величину (вимірювані напруги  $U$  до  $10^2$  -  $10^3$  В й більші).<sup>1</sup> Лише потім, у міру підвищення чутливості вимірювальних приладів, ТЕЕ було виявлено також у металах (1821) (Т.І. Зеєбек (1770 - 1831 р.)), де їх величина суттєво обмежується сильним фермієвським виродженням зразків ( $U \sim 10^{-3}$  В). Ця праця – продовження досліджень [3]. У ній розглянуто досліді Г.–В. Ріхмана (1711 – 1753 р.) (рис.1)<sup>2</sup> і М.В. Ломоносова (1711 – 1765 р.) (рис. 2) в області ТЕ, проведені в СПб Академії Наук в 1754 – 1753 р. [4-5] СПб АН

<sup>1</sup> Деякі з цих ефектів були відомі ще з глибокої давнини [3].

<sup>2</sup> Ріхман і Зеєбек народилися в Російській Імперії, в родинях остзейських німців- лютеран [6]. Обидва в різний час навчалися в колишній Шведській гімназії ім. Густава II Адольфа (школі №1) в Ревелі (зараз Таллін, Естонія), про що нам люб'язно повідомили естонські краєзнавці Е. Velmre і Е. Keerov.

(заснована в 1724 р.) спеціалізувалася на природничо - наукових дослідженнях, при цьому обидва академіки працювали на стику вчень про електрику й теплоту. В результаті Ріхману вперше вдалося виявити й вивчити ряд ТЕЕ в діелектриках (перенесення зарядів полум'ям, термоелектретний ефект в сірці й смолах і ін.) [4]. Він же разом з Ломоносовим вперше виявив і почав вивчати складні атмосферні ТЕЕ, «відповідальні» за електризацію хмар [4, 5]. Показано, що один з таких атмосферних ТЕЕ міг стати причиною трагічної загибелі Ріхмана (1753 р.).

### Роботи Ріхмана з термоелектрики

Академік Ріхман увійшов в історію фізики як винахідник «електричного покажчика» (електрометра) – першого приладу, придатного для кількісних вимірів електричної напруги  $U$  (рис.3а) [6]. В основі роботи «покажчика» лежать закони електростатики. При з'єднанні з джерелом електрики провідником (2) рухлива нитка (3) і нерухомий лінеал (1) одержували електричні заряди одного знака. У результаті нитка відхилялася від лінеала на кут  $\alpha$ , що визначає величину вимірюваної електричної сили ( $U \sim \alpha$ , для малих кутів  $\alpha$ ) (рис.3а).

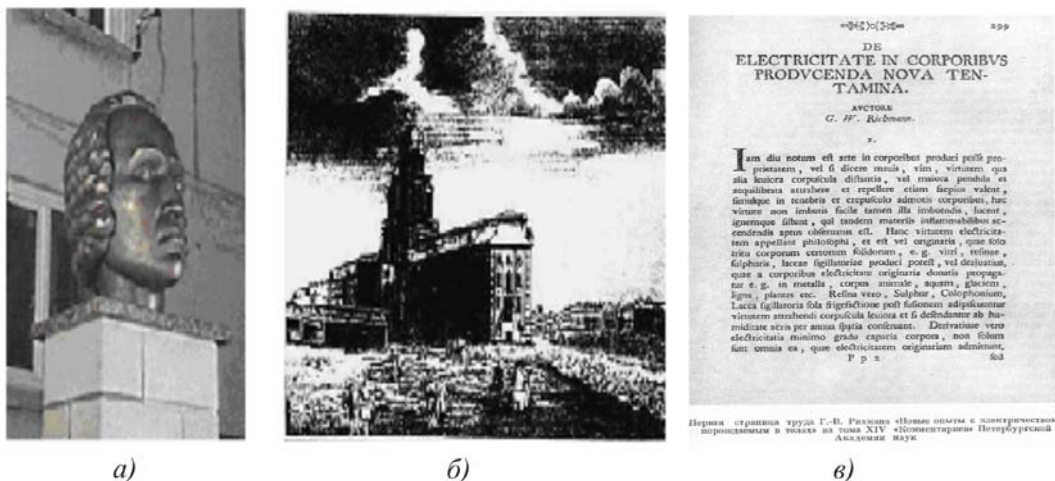


Рис. 1. Пам'ятник Ріхману на батьківщині в Пярну (Естонія) (скульптор Э. Куульбуш, 2011) (а), будівля Кунсткамери в СПб (гравюра 1730- 1740) (б) і перша сторінка пріоритетної публікації Ріхмана з термоелектретів («Коментарі Петербурзької АН», Т.4, 1751) (в) [4].

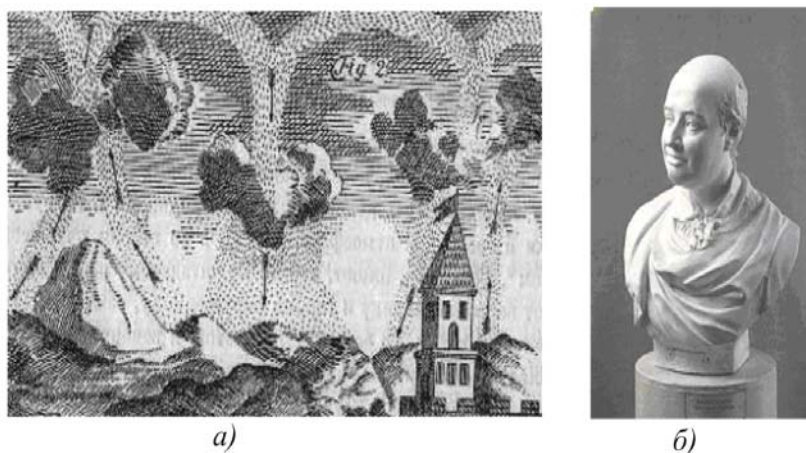


Рис. 2. Складний атмосферний ТЕЕ, що пояснює електризацію хмар за рахунок тертя висхідних і нисхідних потоків повітря (Ломоносов, 1753 р.) (а) [5]. Бюст М.В. Ломоносова. (Скульптор Ф. І. Шубін, 1792 р.). Музей М. В. Ломоносова, Кунсткамера, СПб (б).

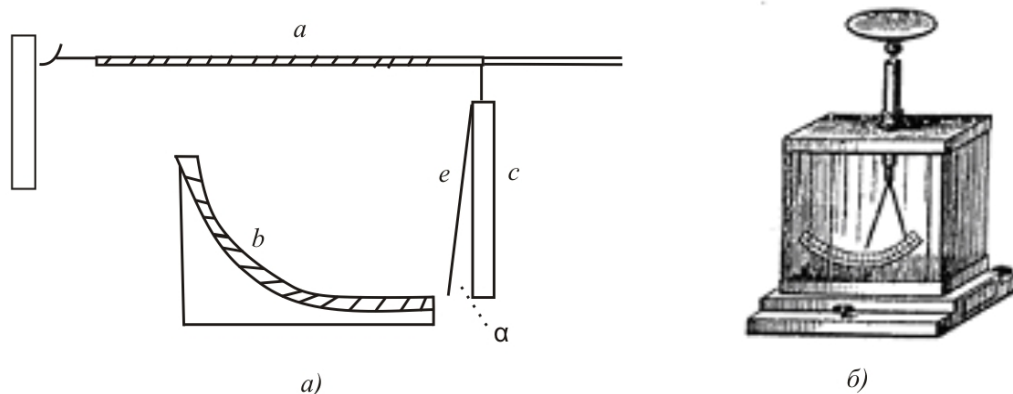


Рис. 3. «Електричний показчик» Ріхмана (1745 р.) (с – «лінеал» (Fe), а – підвідний провідник (Fe), е – льняна нитка (маса – ½ аптекарського грана (0.312 г), довжина – 1½ лондонського фута (0.4572 м), b – дерев'яний квадрант зі шкалою) (а) [4] і електрометр Кавалло з захисним корпусом (1799 р.) (б) [6]

В 1745 р. Ріхмана було призначено завідуючим Фізичного кабінету СПб АН, що розташовувався в Кунтскамері аж до її пожежі в 1747 р. (рис.16). Саме там Ріхман почав перші в Росії дослідження перехресних явищ «тепло-електрика» у різних ТЕАС [3, 4]. На початковому етапі досліджень Ріхман, «...проводячи власні й повторюючи чужі досліди над електрикою...», зіткнувся з багатьма новими явищами, яких не знайшов у своїх попередників» ([4], с. 207). Перший успіх Ріхмана в дослідженні ТЕЕ був досягнутий в процесі вивчення ефекту перенесення електричного заряду полум'ям. Раніше цей ефект був описаний Гільбертом стосовно випадку переносу заряду між зразками діелектриків [7]. Ріхману вдалося цим же методом перенести електричний заряд з діелектриків (у його термінології – «electricitas originaria» – «первинних електричних тіл» («ПЕТ»)) на метали («electricitas derivativa» - «вторинні електричні тіла» («ВЕТ»)) (провідники)) [4]. Ріхман писав: «Червня 30 дня (1746). Через запалену свічу я відвів електрику ... у стіл, зі стола в канделябр, з канделябра в полум'я, з полум'я в залізну платівку...» [4]. Потім Ріхман досліджував ефект за допомогою свого «показчика»: «...полум'я воскової свічі я підніс до залізного дроту СВ (з'єданого з джерелом заряду)... при цьому показчик став показувати менший градус  $\alpha$ » (рис.4а) ([4], с. 268). Порівнюючи дію погаслої й палаючої свічі на показання «показчика», Ріхман установив, що електрику «відводить» не сама свіча, а саме її полум'я ([4], с. 212). При цьому перенесення електрики спостерігалось також, якщо палаюча свіча була досить віддалена від дроту. Ріхман виявив, що продукти згоряння свічі також переносять електричний заряд: «... наелектризоване тіло ... притягало частину диму погаслої свічі, а інша частина його піднімалася вгору, як звичайно» ([4], с. 222).<sup>3</sup>

У той же час струмись водної пари, отриманої від еоліпили (пародувки) Герона, й спрямований на «електричний показчик», практично не міняв його показів (рис.4в). Звідси Ріхман зробив висновок, що «... для відведення електрики необхідно суцільне ПЕТ. А ці пари (води) є корпускулами, які розділені якимись проміжками й не здатні утворювати суцільне ПЕТ, а також не здатні ні віднімати, ні відводити електрику скільки-небудь відчутно» ([4], с. 312).

Ріхман зробив також низку важливих відкриттів в області трибоелектрики. Як відомо, перенесення зарядів під час взаємного тертя різних матеріалів пов'язане з локальним підвищенням температури в мікрообластях фрикційного контакту ( $\Delta T_{\text{лок}}$  до  $10^3$  К і більше) [8]. Ріхман виявив, що вихідна температура  $T_0$  також впливає на процеси електризації зразків тертям. Він показав, що діелектрики, котрі володіють за кімнатної температури зниженою трибоактивністю в порівнянні з

<sup>3</sup>Провідникові властивості полум'я і заряд часток диму визначаються йонами й радикалами, що утворюються в процесі горіння і формують навколо полум'я провідникове гало [8].

бурштином (агати, яшми, порфірати, граніт, мрамур і ін.), також успішно можуть бути наелектризовані тертям.

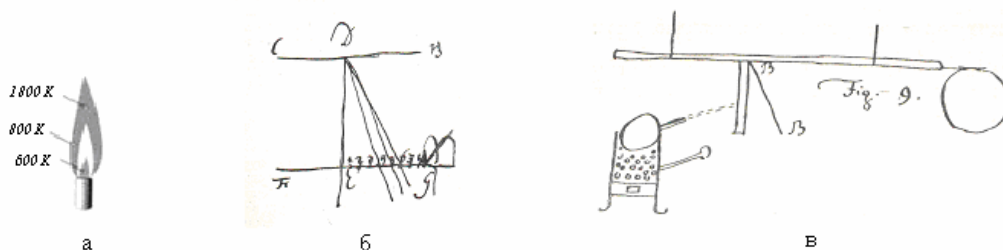


Рис. 4. Схеми дослідів (оригінальні рисунки Ріхмана) з полум'ям свічі (а), електричним покажчиком (б) і еоліпілою (пародувкою) Герона Александрійського (в) [4].

Для цього вони «... повинні бути гарячими й натиратися довго». Ріхман рекомендував нагрівати також «... до точки загоряння» відповідні контр-тіла тертя (щетину, шкіру, пергамент, папір, шовк, льон, і т.д.).<sup>4</sup> Нарешті Ріхману вперше вдалося здійснити електризацію металів тертям з використанням матеріалу-посередника. Він вставляв у тонкі скляні склянки залізні стрижні й «... шляхом легкого погладжування рукою збуджував таку електрику, завдяки якій ці стрижні випускають іскру у випадку дотику до них» ([4], с. 285).<sup>5</sup>

Однак найбільш важливий результат в області ТЕ був отриманий Ріхманом під час вивчення термоелектретного ефекту в сірці й смолах (1746) [2].<sup>6</sup> Ріхман писав: «Червня 25 дня (1746). Я розплавляв тіла, які після охолодження й застигання, будучи захищені від вологи повітря, мають електрику, що довго зберігається (наприклад, упродовж року), (звичайна сірка, сургуч, смола або каніфоль) ...» ([4], с. 244). За допомогою свого «покажчика» Ріхман встановив, що сірка й смоли можуть бути наелектризовані як шляхом тертя, так і за допомогою «плавлення-твердження», що вказувало на подібну природу трибоелектричного й термоелектричного ефектів у зразках [4]. Результати своїх дослідів Ріхман опублікував у пріоритетній статті: «Нові досліди з електрикою, породжуваною в тілах» («Коментарі Петербурзької АН», Т.4, 1751) (рис.1в) [4].<sup>7</sup> В табл.1 наведено основні типи різних електретів, відомих у наш час, і зазначені термоелектрети, виявлені Ріхманом [9]. З табл.1 видно, що Ріхман є першовідкривачем монопольного (знак плюс) термоелектретного ефекту, спостережуваного в низці діелектриків за фазового переходу «плавлення – тужавіння» (табл.1).<sup>8</sup> Заряджаючи зразки «електрикою», Ріхман потім досліджував можливості збереження отриманих електричних зарядів у різних умовах. Він докладно вивчив прискорення процесів витоку зарядів з гострих ділянок зразків, при змочуванні зразків водою й залежно від вологості повітря в приміщенні ([4], с.645 і 237). По Ріхману (1748), «...у дерев'янім житлі електрика часто трималася 50 хвилин, перш ніж зникнути, тоді як у кам'яних «приміщеннях» ... не вдалося добитися, щоб вона трималася 10 хвилин. Можливо, що волога, яка наявна в кам'янім житлі, відводить електрику» [4].

<sup>4</sup> Ефекти пов'язані зі зменшенням енергії виходу електронів з матеріалів з ростом температури [8].

<sup>5</sup> З часів Гільберта у фізиків панувала думка, що метали тертям наелектризувати неможливо [7]. Ефект Ріхмана очевидно пов'язаний з електризацією скла і з послідовним переносом заряду на метал.

<sup>6</sup> У наш час до електретів відносять діелектрики з питомим опором  $\rho > 10^{12} - 10^{17}$  Ом.м, котрі здатні накопичувати й зберігати нерівноважні електричні заряди від 1 до 10 років і більше [9].

<sup>7</sup> Іноді відкриття термоелектретів приписується Епінусу, або Вілке (1765) [10], які знайшли різні знаки зарядів сірки (-) і чашки (+), на що Ріхман не звернув свого часу увагу [11].

<sup>8</sup> Ефект пов'язаний з утворенням в забороненій зоні сірки ( $E_g = 2.6$  eV) глибоких донорних рівнів [9].

*Таблиця 1*

*Основні типи різних електретів залежно від методу їх одержання \**

№	Назва	Метод одержання	Тип заряду	Приклади	Першовідкривачі
1	Трибоелектреїти	Тертя з контр-тілами	Монополь	Бурштин <sup>-</sup> /пряжа <sup>+</sup> Скло <sup>+</sup> /шовк <sup>-</sup> Смола <sup>-</sup> /вовна <sup>+</sup> Сірка <sup>-</sup> /сукно <sup>+</sup>	Фалес Мілетський (625 – 545 до н.е.) Дюфе, 1733 -«- Епінус, 1765.
2	Термоелектреїти	Плавлення-тужавіння	Монополь	Сірка <sup>+</sup> /чашка <sup>-</sup>	Ріхман, 1746 Епінус, Вільке, 1765
3	Електро - термо - електрети	Також, але в електричних полях	Диполь	Віск	Сгучі, 1919
4	Сегнетоелектрети	Охолодження нижче $T_c$ (температура Кюрі) в електричних полях	Диполь	Сегнетова сіль, KDP (дигідрофосфат калію), TGS(тригліцин-сульфата)	П. і Ж. Кюрі, 1880, Ф. Погкельс, 1894

\* Існують також коронно-, фото-, радіо-, хемо-, механо-, біо- і ін. електрети, електризація яких не пов'язана безпосередньо з тепловими впливами на зразки [9].

Згідно із сучасними уявленнями, процес релаксації електричного потенціалу заряджених тіл залежно від часу  $t$  діє за експоненціальним законом

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

де  $U_0$  – вихідне значення потенціалу,  $\tau = \min(\tau_M, \tau_M^0)$ ,  $\tau_M, \tau_M^0 = \epsilon_r \epsilon_0 \rho$  -маквеллівський час релаксації для досліджуваного матеріалу й навколишнього середовища,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\epsilon_r$  - електрична постійна й відносна діелектрична проникність (статична),  $\rho$  - питомий електроопір матеріалу або середовища [8, 12]. У табл. 2 дано порівняння величин  $\tau_M$  і  $\tau_M^0$ , розрахованих для різних матеріалів і середовищ за сучасними даними [12] і за даними Ріхмана (позначені знаком \*) [4].

*Таблиця 2*

*Маквеллівські часи релаксації зарядів  $\tau_M$  для різних матеріалів і середовищ [4, 12]*

Середовище	$\epsilon_r$	$\rho$ , Омм	$\tau_M^0$ , с	Матеріал	$\epsilon_r$	$\rho$ , Омм	$\tau_M$ , с
Повітря сухе	1	$>10^{15}$	$>10^4$ $\sim 3 \cdot 10^3$ *)	Сірка	3.7	$10^{17}$	$\sim 10^6$ $\sim 10^8$ *)
Повітря природної іонізації**	1	$10^{14}$	$10^3$ $\sim 6 \cdot 10^2$ *)	Сургуч	$\sim 3$	$10^{16}$	$10^5$
				Масла		$10^{11}-10^{14}$	$1-10^3$
Вологе повітря (100%)	1	$< 10^{13}$	$< 10^2$	Парафін	2.2	$10^{14}-10^{16}$	$10^3-10^5$
Полум'я свічі	$\sim 1$	$\sim 10^{11}$	$\sim 1$	Бурштин	2.9	$10^{18}$	$10^7$
Вода дощова	31	$10^4$	$10^{-6}$	Папір	2-4	$10^{15}$	$\sim 10^4$
Вода морська	31	0.3	$\sim 10^{-11}$	Залізо	$\sim 1$ ***	$10^{-7}$	$\sim 10^{-18}$
Земля волога	$\sim 10$	$10^2$	$\sim 10^{-8}$	Дерево	3.5-5	$10^9-10^{13}$	$10^2-10^2$

<sup>\*)</sup> – дані Ріхмана; <sup>\*\*</sup>- біля поверхні Землі; <sup>\*\*\*</sup>- внесок кристалічної ґратки.

З табл.2 видно, що Ріхман правильно визначив характерні часи витоку зарядів зі зразків за різної вологості повітря в приміщенні. Зокрема з табл. 2 випливає, що заряд на термоелектретах (сірка, сургуч і ін.) у сухім приміщенні справді міг зберігатися у Ріхмана до року й більше [4]. З табл.2 випливає також, що полум'я свічі знижує питомий опір  $\rho$  повітря на 3-4 порядки, хоча величина  $\rho$  у зоні полум'я при цьому усе ще зберігає значну величину, що відповідає «поганим» діелектрикам (дерево). З табл.1 видно також, що трибоелектричний ефект у металах у звичайних умовах не спостерігається через малість  $\tau_m$ . Це, однак, не виключає можливості електризації металів за ударів [8].<sup>9</sup>

### **Атмосферні термоелектричні ефекти**

1752 р. в «СПб Ведомостях» з'явилася перша звістка про досліди В. Франкліна, що доводили електричну природу блискавок [13]. Ріхман негайно ж перейшов на дослідження атмосферної електрики, пристосувавши для вимірів свій «електричний покажчик» (рис. 3а). Трохи пізніше до експериментальних досліджень атмосферної електрики підключилися також академіки Ломоносов (теоретичні питання) і Х.Г. Кратценштейн (K.G. Kratzenstein) (1723- 1795) (створення громовідводів) [4, 14].<sup>10</sup> До цього часу Ломоносов уже мав значний науковий доробок з досліджуваного питання [5, 15, 16]. В 1744- 1748 р. він робив у себе вдома в СПб систематичні спостереження грозових явищ і встановив їх ТЕ природу (рис.2а) [5, 16]. Ломоносов виявив, що «... важкі громом і блискавкою хмари по більшій частині по полудню ...трапляються, коли дія сонця в нагріванні повітря все більш чутлива» ([5], с.236). с.226).<sup>11</sup> Механізм електризації хмар Ломоносов пов'язав із взаємним тертям висхідних і нисхідних потоків повітря при конвекції, викликану неоднорідним нагріванням поверхні Землі сонячними променями (рис. 2а). Широко відома характеристика атмосферної електрики Ломоносовим як «... електричної сили, яка натуральною теплою проводиться...» ([5], с.226). Як інші джерела електризації атмосфери Ломоносов розглянув також тепло земних надр, пожежі й навіть паління [5]. Експериментальне вивчення атмосферної електрики Ріхман і Ломоносов почали зі спорудження «громових машин» – установок для одержання електрики із грозових хмар за методом Франкліна (рис. 5 і 6) [13]. Ріхман з кінця 1752 р. мав у своєму міському будинку (рис.5а) дві «громові машини» з «гострим» і «тупим» кінцями стрижнів (рис. 5б), які використовував для порівняльних вимірів ([4], с.653). Ломоносов 1753 р. розмістив одну свою установку в міській садибі (рис.6б), іншу - «у селі» (масток Усть-Рудіци), де він будував свою фабрику художньої мозаїки (рис.6в) ([5], с.260).

Усі установки були однотипні й склалися з ізольованих вертикальних або похилих залізних стрижнів, розміщених на дахах будинків (рис.5б і 6б) або на деревах (рис.6в). Стрижні відігравали роль антен, які приєднували за допомогою залізних дротів (або ланцюгів у Ріхмана) з «електричними покажчиками» (рис.3а). Електрична ізоляція дротів здійснювалася шовковою тканиною. Ріхман розмістив «покажчики» усередині будинку (рис.5), Ломоносов вів

---

<sup>9</sup>Метод електризації ударом запропонований Ломоносовим (1753 р.) ([5], с.278), а потім успішно реалізований для металів акад. В.В. Петровим (1761-1834 р.) в його роботі «Нові електричні дослідження» (1804 р.) [5, 6, 8].

<sup>10</sup>Акад. Х.Г.Кратценштейн (1723—1795), медик, фізик і механік. Після загибелі Ріхмана (1753 р.) був звільнений з Академії по завершенню терміну контракту (1748-1753 р.). Поїхав у Копенгаген, де займався теорією газів та використанням електрики в медицині [4, 6].

<sup>11</sup>Згідно з сучасними даними, на електричну активність атмосфери Землі суттєво впливають також космічні промені [12, 17].

спостереження на вулиці (точки с, рис.6б і 6в) (рис.1).<sup>12</sup> Для поліпшення нагікання зарядів з атмосфери установки Ломоносова мали на кінцях стрижнів «багато металевих голок» (рис. 6б і 6в) ([5], с.265).

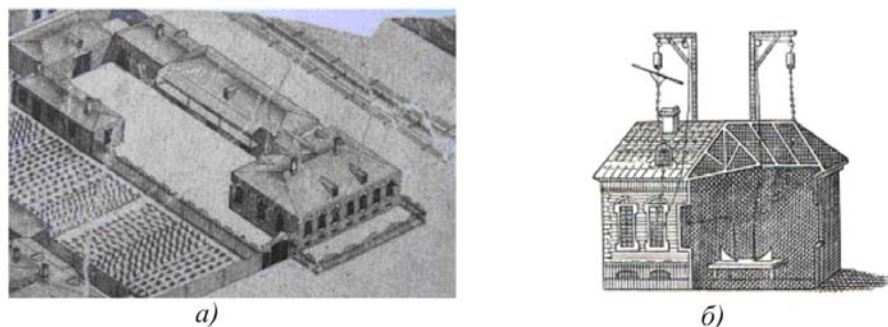


Рис. 5. Садиба Ріхмана з одноповерховим цегляним будинком «на підвалах» на розі Большой перспективи (права сторона) й 5 лінії ВО СПб (а) [18] та його «гromові машини» (кінець 1752 р.) (б) ([4], с.653) [28].

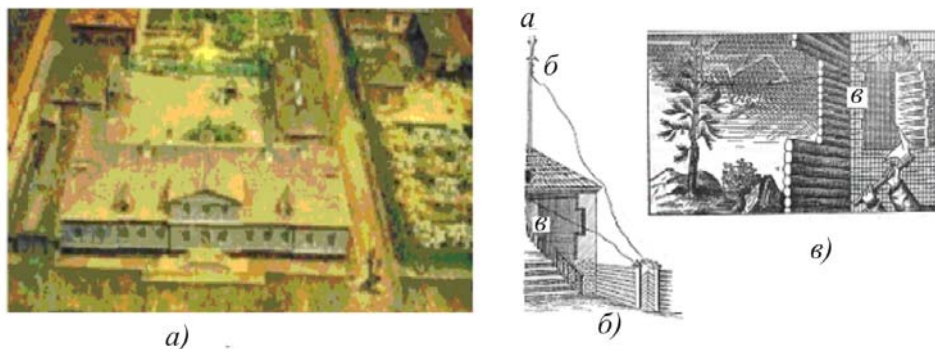


Рис. 6. Садиба «Бонів дїм» на 2-й лінії ВО СПб, де мешкав Ломоносов (1741 – 1757 р.) (а) [15] і його «гromові машини» (б) (травень 1753 р) і (в) (червень 1753 р.) (а – антена; б- підвідний провідник; місце спостережень. [5, 16]. Третя зліва будова на задньому плані рисунка (а) - хїмічна лабораторія АН.

Експериментальні роботи Ріхмана й Ломоносова з «гromовими машинами» виявилися винятково плідними. Ріхман визначив діапазон змін показань «показчика»  $\alpha$  і встановив, що в районі СПб «найбільший градус  $\alpha$ , до якого нитка піднімається під дією природної електрики був 30-й» ([4], с.358). Він виявив, що для хмар, віддалених від спостерігача на відстань  $L > 3$  км, величина  $\alpha$  ( тобто нормальна компонента електричного поля  $E_{\perp}$ ) у точці спостереження спадає в міру збільшення інтервалу часу між блискавкою й громом  $L \sim \Delta t$  ([4], с. 358) (крива 1, рис.7).<sup>13</sup> У свою чергу, Ломоносов знайшов, що першопричиною атмосферної електрики є не властиво грїм і блискавка, а електричні заряди хмар ([4] с. 269). При цьому він виявив також невеликі відхилення показань  $\alpha$  «електричного показчика» і за безхмарного неба. Із цього приводу Ріхман писав: «славнозвісний чоловік Ломоносов спостерігав, що навіть без грому й блискавки значна електрика передається залїзу, належним чином ізольованому.<sup>14</sup> Я ж спостерігав, що електрика після блискавки й грому відразу зменшувалася» ([4], с.358).<sup>15</sup>

<sup>12</sup>Обидва будинки Ломоносова були дерев'яними і відрізнялися підвищеною пожежонебезпечністю ([5], с.260).

<sup>13</sup>Перерахунок  $\Delta t \leftrightarrow L$  і  $\alpha \leftrightarrow E_{\perp}$  був виконаний нами для співвідношень -  $\alpha \sim E_{\perp}^{0.5}$  і  $\alpha = 30^{\circ} \sim E_{\perp} = 25$  кВ/ м.

<sup>14</sup>Згідно з нашими оцінками (рис.7), чутливість установки Ломоносова була достатньою ( $\sim 0.5^{\circ}$ ), щоб за доброї погоди спостерігати природне поле Землі  $E_{\perp}^0 \sim 0.14$  кВ/ м ( $\downarrow$ ) [12].

<sup>15</sup>Ефект пояснюється анігіляцією позитивних і від'ємних зарядів хмар під час розрядів [17].

Використовуючи прототип більш ранню роботу І.Г. Вінклера (1746 р.), Ріхман установив, що фізичний механізм електризації хмар полягає в терті ПЕТ (твердих часток<sup>16</sup> або водяної пари) з ВЕТ (краплями води) ([4], с.640). Ломоносов не виявив у повітрі достатньої кількості твердих часток, і ПЕТ розглянув гіпотетичні ефірні масла, що випаровуються тваринами й рослинами.

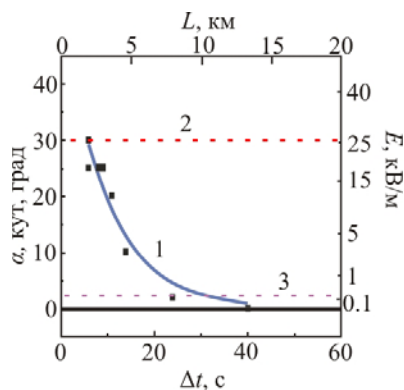


Рис. 7. Залежність показів  $\alpha$  «показчика» Ріхмана (1) і відповідних змін електричного поля  $E_{\perp}$  (↓ або ↑) від часу затримки сигналів «блискавка-грим»  $\Delta t$  і відстані  $L$  до грозового фронту (перерахунок наш). 2 –  $\alpha_{\max}$  [4], с. 358); 3 –  $E_{\perp}^0 \sim 0.14$  кВ/м (↓) – природне поле Землі за безхмарного неба.

атмосферної електрики (рис.8б). Від лінеала електрометра відділилася біло- блакитна куля розміром з кулак, яка торкнулася голови вченого й потім вибухнула. Соколов, що стояв трохи віддалік, одержав кілька іскрових розрядів від падаючого дроту, вискочив на вулицю й викликав пожежну охорону. Дружина Ріхмана, Ганна Єлизавета Гінце, спробувала зробити чоловікові штучне дихання. Спроби реанімації продовжив Кранценштейн, що терміново приїхав на місце події, однак і йому не вдалося повернути вченого до життя. М.В. Ломоносов, що також приїхав у будинок Ріхмана, пізніше писав фаворитові імператриці Єлизавети графові І.І. Шувалову: «... професора Ріхмана громом убило в тих же точно обставинах, у яких я був у той же саме час...». Незвичайна смерть Ріхмана викликала широкий резонанс, як у Росії, так і за кордоном. Для розслідування інциденту було створено академічну комісію (Х.Г. Кратценштейн, М. Шрейбер, М. Клейнфельд) [4],<sup>17</sup> власне незалежне розслідування події провів Ломоносов [4, 5]. Згідно з рапортом Кратценштейна (рис.9а), петля враження вченого струмом проходила від лівої частини чола Ріхмана до його лівої п'яти з окремими виходами на груди ліворуч і під ребрами, що, за сучасною статистикою, типово для електротравм голови [20]. Кратценштейн установив також місця електричних пробоїв у будинку (рис.9б) і назвав основну причину події – порушення правил техніки безпеки (установка не була заземлена) (рис.5).<sup>18</sup>

<sup>16</sup>Як було встановлено пізніше, механізм Ріхмана пояснює електризацію атмосфери в зоні промислових викидів, що містять тверді частки [17].

<sup>17</sup>Збереглась спеціальна справа «Про смерть проф. Ріхмана» №433 ([4], с.695).

<sup>18</sup>Ріхман навмисно не заземляв лінеал, оскільки при цьому установка перетворювалась у громовідвід, а її чутливість ставала рівною нулю [4].



На думку Кратценштейна, блискавка поширювалася не з покрівлі будинку, а «...у двері «увійшов» промінь блискавки, який пронесло в будинок поривом вітру, а потім по дроту до Ріхмана, минаючи Соколова». <sup>19</sup> Ломоносов не підтримав висновки Кранценштейна й писав, що «блискавку ззовні до стріли, що блиснула, багато казали, що бачили» ([5], с.547).

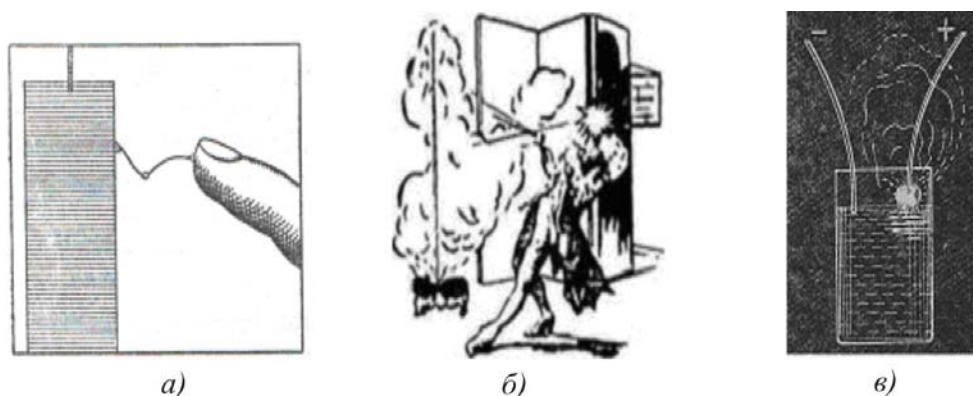


Рис. 8. Електричні розряди: а – одиничний іскровий за Ломоносовим [5], б, в – позитивні плазмові стримери (кульові розряди які світяться) б – загибель Ріхмана за описом Соколова [4], в – дослід Планте з рідким електролітом (1883 р.) [8].

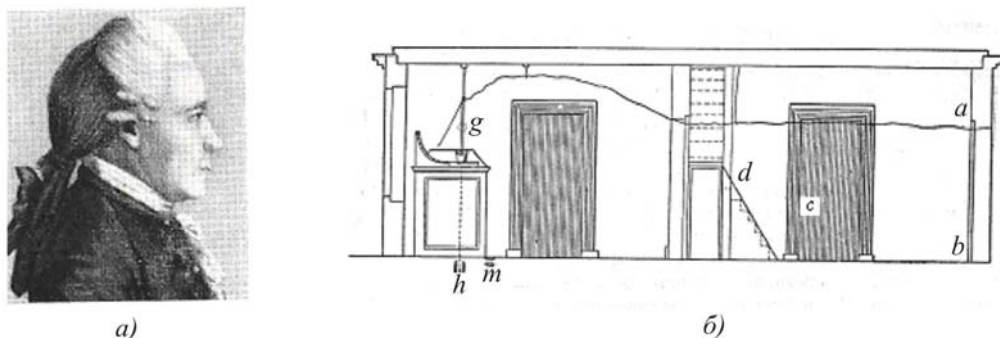


Рис. 9. а - Академік Х.Г. Кратценштейн (K.G. Kratzenstein) (1723- 1795 р.) [14] (а) і місця електропошкоджень в сінях будинка Ріхмана (б) ([5], с.653). g – h – пробій тіла Ріхмана, т- опік Соколова іскрами від дроту, що впав; с – пробій косяка дверей в «поварню» й відскочив в (d) іверень (кусок дерева), а – b – пробій і падіння вхідних дверей ([5], с.653),

Іноземні вчені того часу висували свої власні версії інциденту. І. Вінклер (1753), В. Ватсон (1754 р.) і І.-Ф. Хартман (1764р.) дійшли висновку, що Ріхман був убитий не блискавкою, а наведеною в антені грозовою електрикою. І-К. Вілке (1759 р.) припустив, що Ріхман наблизився до лінеалу на небезпечну відстань, оскільки не знав, «що деякі хмари можуть наводити в антені позитивну, деякі – негативну електрику, причому вона іноді миттєво змінюється» ([4], с.700). Однак остаточно деталі загибелі Ріхмана залишаються нез'ясованими дотепер [4].

У нашій роботі ми почали додаткове розслідування цього інциденту, використовуючи сучасні дані про вражаючі фактори атмосферної електрики [12, 17]. Зіставляючи дані Кранценштейна, Ломоносова [4] і Соколова [5], ми визначили положення грозового фронту в

<sup>19</sup>На основі рапорту Кранценштейна виникла відома гіпотеза про враження Ріхмана кулевою блискавкою, що залетіла в відкриті двері будинку.

момент інциденту (рис.10), оцінили покази електрометрів Ломоносова і Ріхмана, а також відновили послідовність і характер спостережуваних електричних розрядів (рис.11). Згідно з (рис.10), грозовий фронт в момент інциденту був віддалений від будинку Ріхмана на відстань більше 1 км. Тому ми також вважали, що вчений був уражений не прямим влученням блискавки в «гromову машину», а розрядом електрики, індукованої зарядженою хмарою в антені [4]. Виходячи зі збігу за часом розрядів (2, 3, рис.11) [4, 5], ми вважали, що периферійна блискавка поблизу будинку Ломоносова (4, рис.10) стала «спусковим механізмом» розряду в будинку Ріхмана (рис.8в). У свою чергу, розряд був викликаний необережним наближенням ученого до «покажчика». На думку Соколова, Ріхман наблизився до «покажчика», тому що прагнув уточнити його суперечливі покази: хмара була близька (рис.10), а малі  $\alpha$  показували, що «грим ще далеко стоїть» (див. рис.7).<sup>20</sup> Наші оцінки показів електрометра Ріхмана (крива 6, рис.11) підтверджують цю версію Соколова.<sup>21</sup>



Рис. 10. Положення грозового фронту (2) і напрямок його руху в момент розряду периферійної блискавки (4) під час проведення дослідів 26 червня 1753 р.. 1 – будинок Ломоносова, 3 – будинок Ріхмана.

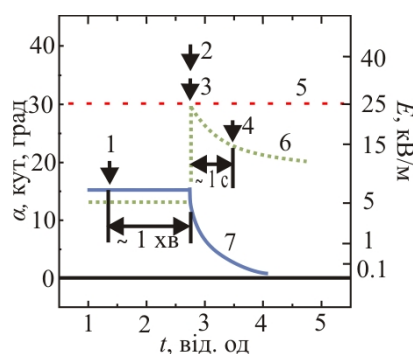


Рис. 11. Показання  $\alpha$  електрометрів Ломоносова (7) [5] і Ріхмана (6) (наш розрахунок) залежно від часу  $t$  в дослідів 26 червня 1753 р.. Розряди: 1 – лінеал - рука Ломоносова; 2 – периферійна блискавка; 3 – лінеал - лоб Ріхмана; 4 – дрiт – Соколов. Характер розрядів: 1, 4 – множинний іскровий (кистьовий); 2 – блискавка; 3 – позитивний стрімер.

Передбачувана електрична схема враження Ріхмана показана на рис. 12. Оцінки параметрів схеми (рис.12) до й у момент повітряного пробію проміжку «лінеал – чоло Ріхмана» ( $R_2$ ) наведено в табл.3. З характерної форми розряду (куля) і напрямку його руху від «лінеала» до чола Ріхмана ми припустили, що в момент пробію  $R_2$  було утворення позитивного плазмового стрімера (рис.8б і 8в) [8]. Це припущення підтверджується тривалістю розряду ( кілька секунд) і характерним «схлопуванням» кулі з вибухом [4, 5]. Звідси випливає, що в момент розряду нижня крайка хмари, найближча до будинку Ріхмана, була заряджена позитивно (+) (рис.13). Крім того, концентрація позитивних іонів у міжелектродному проміжку  $R_2$  перевищувала критичне значення  $N_{кр}^+ \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , необхідне для самостійного розряду такого типу, при цьому енергія пробію була надто велика [8, с.238]. Величину напруги  $U_2 \sim 25 \text{ кВ}$  у розрядному проміжку  $R_2$  (рис.12) ми визначали за табличними даними для повітряного пробію типу «вістря – площина» (край лінійки (+) – чоло Ріхмана (-)) для проміжку  $L = 1 \text{ фут}$  (близько 30 см) (табл.3) [12]. Звідси за висоти тичини  $h = 4 \text{ м}$  і

<sup>20</sup> Більшість академиків СПб АН страждали близорукістю, оскільки багато працювали при свічах [4,5].

<sup>21</sup> Ріхман ([4], с.212) і Ломоносов [5] часто використовували розряд «через голову» в наукових і в медичних цілях. Ріхман в той час страждав «сильним зубним болем» ([4], с.692), котрий міг лікувати «електрикою». Однак ця причина інциденту видається нам менш ймовірною.

висоті хмари над землею  $H \sim 1$  км маємо  $E_{\perp} \sim 25$  кВ/м ( $\downarrow$ ) (рис.13), що дає оцінку  $U_1 \sim 25$  МВ у момент розряду (табл.3) [12]. За даними Соколова, «... грім був ще не дуже близько, але проходом або сіньми йшов дим, того ж часу блиснула блискавка, двері в куховарню відчинилися й професор упав на скринню» (рис. 4б). Звідси ми припустили, що ще до основного електричного розряду, смертельного для Ріхмана, у будинку відбувався витік струму від дроту, що підводить, у землю.<sup>22</sup> Витік ішов через відволожені дерев'яні частини дверей, що ведуть у кухню й на вулицю (с і ab, рис.9). Величини опорів  $R_i = \rho/l$  ( $i=1..6$ ) (табл.3) (тут  $\rho$  - питомий опір середовища,  $l$  і  $s$ - характерні довжини й ефективні перетини провідних каналів) ми оцінювали за даними табл.2 ( для вологого дерева й цегли вважали  $\rho \sim 10^4$  Ом·м) [12]. У розрахунках використовували значення  $l$  (м)=  $10^3$ ; 0.3; 1; 2; 1 і  $s$  (м<sup>2</sup>)=  $10^5$ ; 0.01; 10;  $10^{-2}$ ; 10 (для  $i=1, 2, 4, 5, 6$ , табл.3), опір  $R_3= 10^4$  Ом брали з [20].

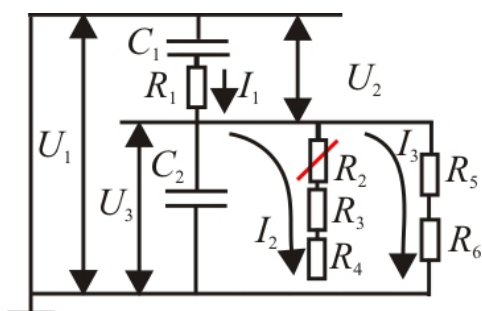


Рис. 12. Схема враження Ріхмана розрядом атмосферної електрики. (Позначення – див. табл. 1).

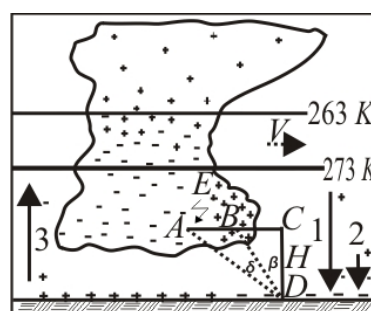


Рис. 13. Схема грозової хмари і механізм збільшення електричного поля  $E_{\perp}$  поблизу поверхні землі (точка D) за периферійного електричного розряду AE. Области хмари: 1, 2- «позитивна»; 3- «від'ємна».  $E_{\perp}$ : 1 – після розряду; 2 – до розряду [17].

Таблиця 3

Параметри схеми враження Ріхмана розрядом атмосферної електрики (рис.12)

Параметр	До розряду	При розряді
Напруга хмара- земля, $U_1$ , МВ	~6	25
Напруга хмара- антена $U_2$ , МВ	~6	~25
Напруга антена- земля, $U_3$ , кВ	25	100
Електричне поле в Землі, $E_{\perp}$ , кВ/м	~6 $\downarrow$	25 $\downarrow$
Струм атмосфера- земля, $I_1$ , А	~0.025	~ 2.6
Струм антена- земля, $I_2$ , А	~ 0	2.5
Струм витоку (стіни будинку), $I_3$ , А	~0.025	~ 0.1
Опір атмосфери, $R_1$ , кОм	~ $10^8$ ( $10^{11}$ *)	~ $10^7$ ( $10^{7**}$ )
Опір ділянки пробую, $R_2$ , Ом	$10^{17}$	~ 0
Опір тіла, $R_3$ , Ом	$10^4$	$10^4$
Опір витоку (сире дерево), $R_5$ , Ом	$10^6$	$10^6$
Опір заземлення, $R_4 \sim R_6$ , Ом	~ $10^3$	~ $10^3$
потужність, що виділяється, $W_{R5}$ , Вт	625	$10^3$
потужність, що виділяється, $W_{R3}$ , Вт	0	$2.5 \cdot 10^5$

\*- оцінка для неіонізованого повітря. \*\*- оцінка з врахуванням аероіонів грози ( $N \sim 10^5$  см<sup>-3</sup>).

<sup>22</sup>Був обідній час, в поварні готували обід, топилась піч, пара води осаджувалась на дверях. Внаслідок саме цього ділянки дверей були зруйновані за основного пробую.

У звичайних умовах кімнатне повітря містить  $N \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$  іонів різного знака, повітря на вулиці перед грозою  $N \sim 10^5 \text{ см}^{-3}$ , при цьому витік електрики в землю через вологі стіни будинку міг підвищити число іонів у повітрі до  $N \leq 10^6 \text{ см}^{-3}$ . Це узгоджується із множинним іскровим («кистьовим») враженням Соколова [4], однак явно недостатньо для утворення позитивного плазмового стримера в проміжку  $R_2$  (рис.11). Згідно з [3], утворення плазмового стримера в проміжку  $R_2$  (рис.8б) могло бути викликане подихом ученого як наслідок ефекту міжфазного поділу зарядів з випаровуванням води:  $H_2O(p) \rightarrow K \cdot H_2O^{-1}(p) + H_2O(g) + K \cdot p^+$ . Ефект супроводжується створенням невеликої кількості вільних протонів ( $p^+$ ) (тут  $K \sim 10^{-6}$ – коефіцієнт розподілу).<sup>23</sup> У нормальних умовах тиск насиченої пари води становить  $p=2.3 \cdot 10^3$  Па, концентрація молекул води в повітрі  $N(H_2O) \sim 6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . У результаті навіть з одиничним видом вченого концентрація вільних протонів у проміжку  $R_2$  могла досягти  $p^+ \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , що досить для розвитку позитивного стримера (рис.8б) [19]. При цьому «спусковим механізмом» пробою  $R_2$  (рис.12) послужило різке збільшення напруги  $U_3$ , викликане периферійним грозовим розрядом (4, рис.10). Такі різкі стрибки  $E_{\perp} \sim U_3 \sim \alpha$  є звичайними для близьких до спостерігача секціонованих хмар [17]. Стрибки  $\alpha$  неодноразово спостерігалися Ріхманом і Ломоносовим для хмар з  $L < 3$  км (рис.7), однак ефект не знайшов у авторів належного пояснення [4, 5].<sup>24</sup>

Для пояснення росту  $E_{\perp}$  за периферійного розряду (4, рис.10) ми використовували модель секціонованої хмари (рис.13). Згідно з (рис.13), під час розряду між точками  $A$  і  $E$  відбувається анігіляція позитивних і негативних зарядів в одній із секцій хмари. У результаті електричне поле  $E_{\perp}$  у точці спостереження  $D$  зростає в  $\delta E_{\perp} = E_{\perp}' / E_{\perp} \sim \cos^2 \beta / (\cos^2 \beta - \cos^2(\beta + \delta))$  на час  $t \sim 5-10 \tau$  (тут  $\tau \sim 1-5$  с – характерний час релаксації хмари) [17]. Оцінки здійснювали в наближенні точкових зарядів ( $Q_B = -Q_A$ ) за висоти хмари  $H \sim 1$  км. Кути  $\delta \sim 6^\circ$ ,  $\beta \sim 50^\circ$  (рис.13) визначали з рис.10. Отримано  $\delta E_{\perp} \sim 4$ , звідки за умови  $\alpha \sim 30^\circ \sim E_{\perp} \sim 25$  кВ/м у момент розряду були розраховані параметри схеми (рис.12), а також покази електрометра Ріхмана до розряду (табл.3 і рис.11). За формулами для плоского конденсатора й коаксіальної лінії відповідно ми оцінили електричні ємності хмари  $C_1 = \epsilon_0 \epsilon S / H \sim 10^{-8}$  Ф (тут  $\epsilon \sim 1$  для повітря,  $S \sim 10^6 \text{ м}^2$  – ефективна площа хмари) і «грової машини»  $C_2 = 4\pi \epsilon_0 \epsilon l / \ln(r_1/r_2) \sim 2 \cdot 10^{-10}$  Ф (тут  $l \sim 10$  м,  $r_1 \sim 0.5$  см і  $r_2 \sim 100$  см – довжина підведеного провідника, його радіус і середня відстань провідника до стін будинку). Потім розраховали максимальні заряди хмари й «грової машини» –  $Q_1 = C_1 U_1 \sim 0.25$  Кл і  $Q_2 = C_2 U_2 \sim 2 \cdot 10^{-5}$  Кл, і постійні часу зарядки «грової машини» відповідно в момент пробою –  $\tau_1 = R_1 C_2 \sim 10^3$  с і те ж – для неіонізованої атмосфери –  $\tau_1' = R_1 C_2 \sim 20$  с. З отриманого співвідношення  $\tau_1 \ll \tau_1'$  випливає, що атмосфера над будинком Ріхмана в момент пробою була сильно йонізована. При цьому всі розряди в будинку (рис.9б) визначалися енергією зарядженої установки  $C_2$ , яка безупинно «підживлювалася» енергією зарядженої хмари  $C_1$ , що й визначило їхню загальну більшу величину.<sup>25</sup> У результаті при пробі міжелектродного проміжку ( $R_2 \rightarrow 0$ ) через Ріхмана міг проходити вражаючий струм  $I$  до  $\sim 2.5$  А, що суттєво перевищує смертельне значення ( $I_0 = 0.1$  А) (табл.3) [20]. Бліде тіло вченого й численні опіки ([4], с.545) підтверджують це припущення.<sup>26</sup>

<sup>23</sup>Ефект було знайдено Вольтом (1770 р.), з ним пов'язується від'ємний заряд поверхні Землі [17].

<sup>24</sup>Ріхман і Ломоносов не знали, що позитивні й від'ємні заряди можуть утворюватися одночасно, а потім анігілювати ([5], с.523). Ломоносов пояснив стрибки  $\alpha$  переходом «електричної сили» між хмарами під час розрядів.

<sup>25</sup>Значне зменшення  $R_1$  могла викликати також піч, що топилась у будинку (рис.5б).

<sup>26</sup>З первинною зупинкою дихання тіла постраждалих мають синій колір, з первинною зупинкою серця – червоний, з одночасною зупинкою дихання й кровообігу – білий ([20], с.236).

Таким чином, причиною загибелі Ріхмана була рідкісна комбінація різних несприятливих факторів.<sup>27</sup> Серед них головні – позитивний заряд хмари над будинком, небезпечна конфігурація розрядного проміжку типу «вістря- площа», що знижує напругу розряду втричі, вогкість приміщення й одягу, а також два ТЕ ефекти, які викликали посилення вражаючих факторів атмосферних зарядів. Ними є підвищення провідності атмосфери поблизу антени через піч, що топилася в будинку, і головне – висока концентрація протонів  $p^+ \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$  у проміжку  $R_2$ , викликана подихом ученого.<sup>28</sup> Слід зазначити, що більшість із цих ефектів Ріхман знав або навіть був їхнім першовідкривачем [4]. Зокрема Ріхман раніше докладно досліджував електричний пробій повітря зі зменшенням розрядного проміжку ([4], с.233), вивчив «стіканне зарядів з вістря» і «провідні властивості полум'я й диму», описав ефект «сирого» приміщення й ін. [4]. Ріхман намагався також виміряти провідність водяної пари (дослід з еоліпилою) (рис.4в), однак не зміг оцінити її величину через низьку чутливість свого «показчика». Однак, як показано вище, саме мала протонна провідність водяної пари, видихуваної ученим, могла з'явитися основною причиною його загибелі. Відповідно, найпростішим способом запобігання трагедії було б використання Ріхманом електрометра із захисним корпусом (рис.3б) [20].<sup>29</sup> У той же час, відносна безпека Ломоносова й Соколова в подібних умовах була пов'язана у першу чергу з меншою іонізацією навколишнього повітря. У результаті електричні розряди, які вони також випробували у грозу 26 липня 1753 р., мали відносно безпечний іскровий (кистьовий) характер.

## Висновки

Розглянуті роботи Ріхмана й Ломоносова (1745 – 1753 р.), що мають відношення до зародження вітчизняної ТЕ. Показано, що автори вперше виявили й/або докладно досліджували ряд ТЕЕ (термоелектретний, ТЕ атмосферний і ін.) у різних ТЕАС діелектриків, що належить до класу (сірка, смоли, повітря, вода й т.п.). Усі досліджені ними ТЕЕ мали подібну фізичну природу й були пов'язані із просторовим поділом і / або перенесенням нерівноважних електричних зарядів у зразках при зміні температури. У ряді випадків ТЕЕ були додатково посилені фазовими переходами й хімічними реакціями («плавлення-кристалізація», «випаровування-конденсація», горіння й ін.), також пов'язаними зі зміною температури. Відмітною рисою ТЕЕ була їхня дискретність, що проявляється в процесах «зарядки» і «розрядки» зразків. У результаті, навіть при більших  $U$ , ТЕЕ залишалися практично безпечними для дослідників за винятком випадків електричного пробою діелектриків (інцидент із Ріхманом).

## Література

1. Буряк А.А. Очерки развития термоэлектричества. / А.А. Буряк, Н.Б. Карпова // К.: НД.1988. – 290 с.

---

<sup>27</sup>За нашою оцінкою, ймовірність випадкового поєднання факторів враження в інциденті з Ріхманом була виключно мала ( $P < 10^{-7}$  на одиничний дослід). Це підтверджується відсутністю нових подібних інцидентів із вченими за останні 260 років.

<sup>28</sup>Ріхман безперервно розмовляв з Соколовим, не зняв верхній одяг й вологе взуття, зняв тільки парик, в результаті чого з'явився біля установки ще й з вологою головою [4].

<sup>29</sup>У нашій роботі ми не розглядали можливий випадок одночасного включення двох «громових машин» Ріхмана. Їх послідовне ( $U_3 \sim 2U_3$ ) або паралельне включення ( $C_2'' \sim 2 C_2$ ) могло суттєво підвищити ймовірність електровраження вченого (рис. 5б).

2. Анатичук Л.И. К 70-летию со дня рождения. Ред.: Вихор Л.Н., Черновцы: ИТ НАНУ.2007. – 728 с.
3. Коржуєв М.А. Про послідовність відкриття основних термоелектричних явищ / М.А. Коржуєв, І.В. Катін // Термоелектрика. – 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. Физики. Библиографический справочник. / Ю.А. Храмов // М.: Наука. 1983. – 400 с.
7. Гильберт В. О магните, магнитных телах и большом магните Земле. / В.О. Гильберт // М.: АН СССР, 1956. – 412 с.
8. Путилов К.А. Курс физики. / К.А. Путилов // М.: ГИФМЛ. Т.2. 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. 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, М. Ломоносов // СПб: Эл.изд., 2007. – 218 с.
16. Морозов А.А. Ломоносов М.: Молодая гвардия. / А.А. Морозов, // 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, Криосфера Земли. / А.В. Шавлов // 2008. – Т.12. – № 2. – С. 52- 59.
20. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. / В.Е. Манойлов // Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.

Надійшла до редакції 24.10.2013