

**ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОСТРАЦИОННОГО
И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

УДК 539.1.073.24

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ПРОВОДЯЩИХ СФЕР**

**© 2025 г. Е. Г. Апушкинский, Е. В. Гольдберг*, В. П. Савельев,
А. С. Склярова**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29 лит. Б*

**e-mail: goldberg_ev@spbstu.ru*

Поступила в редакцию 04.12.2025 г.

После доработки 22.12.2025 г.

Принята к публикации 30.01.2026 г.

Представлена конструкция установки, позволяющая провести эксперименты по проверке теории взаимодействия двух заряженных тел. Приведены описание отдельных элементов конструкции и их основные технические характеристики. Даются результаты испытания данной установки и сравнение их с расчетами. Данная конструкция применяется в качестве учебной лабораторной установки, а также может быть использована как прототип для электросепарации твердых смесей или электроочистки газов. Выполнение данной лабораторной работы возможно дистанционно.

1. ВВЕДЕНИЕ

Данная лабораторная установка используется для проведения работ студентами по исследованию явления возникновения силы взаимного притяжения двух заряженных металлических сфер при подаче напряжения на одну из сфер при заземлении второй. Поле изолированной заряженной сферы, как хорошо известно, выглядит так, как показано на рис. 1. Когда мы используем две сферы, то заряд сообщается верхней сфере (рис. 2) путем подключения ее к высоковольтному блоку питания (ВВП). Вторая сфера, находящаяся на весах, расположена на стойке, которая соединена проводом с заземлением на корпусе установки. При подаче напряжения на верхнюю сферу, весы, на которых расположена заземленная сфера, показывают уменьшение веса сферы, что говорит о взаимном притяжении двух сфер.

Возьмем две проводящие сферы, одной из которых сообщим заряд, а другую поместим рядом и заземлим. На заземленной сфере появятся индуцированные заряды противоположных знаков. Они будут притягиваться. Если сферы разнести на расстояние, гораздо большее, чем их

радиусы, то снаружи электрическое поле исходно заряженной сферы не будет отличаться от поля точечного заряда, помещенного в ее центр.

Зарядить сферу можно, например, подключив к ней источник внешнего напряжения. Тогда, зная радиус сферы R , легко получить ее заряд q [1]:

$$q = 4\pi\epsilon_0 R\varphi, \quad (1)$$

где R – радиус сферы, ϵ_0 – электрическая постоянная, φ – потенциал сферы.

В некоторых случаях рассчитать индуцированный на проводнике заряд можно, используя метод изображений, который состоит в подборе фиктивных зарядов вне рассматриваемой области, таких что их совместное с реальными зарядами поле обеспечивает заданные граничные условия (потенциал на границе).

Рис. 1. Поле изолированной заряженной сферы

Рис. 2. Поле заряженной сферы 1 вблизи заземленной сферы 2

Когда источником внешнего электростатического поля служит проводящая сфера 1, заряженная до потенциала $\varphi > 0$, а вторая проводящая сфера 2, расположенная вблизи сферы 1, не заряжена и заземлена (т. е. потенциал на поверхности второй сферы равен нулю), в обеих сферах создается множество зарядов-изображений, точки расположения которых от центров сфер рассчитываются из условия равенства нулю потенциала на поверхности сферы 2 и постоянства потенциала сферы 1. Аналитическое решение задачи взаимодействия данных сфер, расположенных на близком расстоянии, затруднительно и требует применения расчетов численными методами. Детальное рассмотрение этой задачи сделано в работе [2].

2. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ.

На рис. 3 представлена схема экспериментальной установки с обозначением сил, действующих на сферы 1 и 2. На рис. 4 представлен общий вид установки.

Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки

В работе исследуется взаимодействие двух одинаковых проводящих сфер 1 и 2 радиусами 34 мм, толщина стенок 3 мм, материал АМг5. Сфера 1 закреплена вверху на приводе вертикального перемещения 3 и подключена к высоковольтному источнику напряжения 5 изолированным проводом. В установке использован высоковольтный блок питания Teslaman TSM6000i со следующими параметрами:

- максимальное выходное напряжение – 30 кВ,
- максимальная выходная мощность – 30 Вт,
- габаритные размеры (д×ш×в) – 217×141.2×40 мм³,

– масса – 1.8 кг.

Сфера 2 расположена на лабораторных весах 4 и заземлена. Используются электронные весы A&D EK-610I со следующими параметрами:

- НПВ – 600 г,
- дискретность – 0.01 г,
- размер платформы $d = 110$ мм,
- габаритные размеры (д×ш×в) – $190 \times 218 \times 55$ мм³,
- масса весов – 1.1 кг,
- класс точности высокий – II (ГОСТ 53228-08),
- 9 единиц измерения (грамм, карат, фунт, унция и т.д.).

Заряд верхней сферы можно изменять регулировкой подаваемого напряжения от источника 5, а воздействие ее на нижнюю сферу будет зависеть от их взаимного расстояния, изменяемого с помощью привода вертикального перемещения верхней сферы с помощью блока управления 6. В данном блоке для управления шаговым двигателем используется специализированный контроллер, построенный на основе готового промышленного силового драйвера и микроконтроллерной платы управления.

Максимально возможное расстояние между сферами равно 100 мм, а минимальное составляет 12 мм. Погрешности прямых измерений соответствуют погрешностям приборов. Точность воспроизведения результатов прямых измерений при повторении опытов лежит в пределах погрешности измерений.

В целях обеспечения требований техники безопасности сферы весы и привод вертикального перемещения помещены в прозрачный кожух, который перекрывает доступ к элементам установки, когда на них подается высокое напряжение.

В дистанционном варианте работы к лабораторной установке подключается компьютер 7 (см. рис. 4), позволяющий удаленно управлять установкой, и видеокамера для наблюдения за выполнением работы в режиме реального времени. Студентам для выполнения работы в дистанционном режиме потребуются персональные компьютеры с возможностью подключения к онлайн-конференциям. При этом они смогут дистанционно управлять рабочим столом со своего компьютера. Допуск к работе осуществляется через видеоконференцию в режиме управления удаленным рабочим столом. Для записи результатов измерений может использоваться как бумажный, так и электронный протокол (по решению преподавателя). Факт выполнения фиксируется видеозаписью собрания.

Вид рабочего стола персонального компьютера показан на рис. 5. Панели ST, HV и W приводом вертикального перемещения верхней сферы дублируют реальный блок управления 6, источник высоковольтного напряжения 5 и лабораторные весы 4 соответственно. В верхнем

правом углу транслируется работа экспериментальной установки в режиме реального времени. В правом нижнем углу показана схема установки (см. рис. 3).

Рис. 5. Общий вид рабочего стола с запущенной программой управления

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты эксперимента представлены на рис. 6. Опыты были проведены для двух значений напряжения на верхней сфере. Вид экспериментальных зависимостей оказался почти одинаковым.

Рис. 6. Зависимость силы взаимодействия между сферами 1 и 2 от расстояния между центрами сфер при напряжении на сфере 1,

Сравнение экспериментальной кривой взаимодействия двух заряженных сфер с силой взаимодействия между сферами, вычисленной по закону Кулона, приведено на рис. 7. Для более удобного сравнения кривых величины сил и расстояния приведены в безразмерном виде: величины сил, экспериментально полученной и рассчитанной, отнесены к их максимальным значениям, а вместо расстояния между сферами взято его отношение к радиусу сферы.

В связи с тем, что сферы имеют диаметры, которыми нельзя пренебречь при тех расстояниях, на которых анализируются их взаимодействия в данной работе, естественно ожидать отличие кулоновского закона: зависимость силы взаимодействия между сферами от расстояния между этими сферами, что и демонстрируют эксперименты, проводимые на нашей установке (рис. 7). Однако детальный учет распределения заряда по поверхностям этих сфер, который сделан, например, в работе [2], позволяет получить хорошее согласие теории и эксперимента. Тем не менее, если сфера 1 расположена на таком расстоянии от сферы 2, что ее можно считать точечным зарядом ($l \gg R$), то проблема сводится к решению задачи о взаимодействии заземленной сферы с точечным зарядом; эта задача проще, и можно получить аналитическую зависимость из работы [2] и сравнить с экспериментальными результатами, получаемыми на этой установке. Они хорошо коррелируют.

Рис. 7. Зависимость нормированной силы взаимодействия между сферами 1 и 2 от расстояния между центрами сфер, отнесенного к радиусу сферы,

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Конструкции, работающие на аналогичных принципах, но обычно имеющие другие формы заряженных поверхностей, используются в

- электростатических сепараторах для разделения материалов,
- электростатических подвесах для бесконтактного удержания объектов,

- измерительных приборах для определения заряда или напряжения,
- копировальных аппаратах для переноса тонера.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная установка используется в учебной лаборатории физики и математики СПбПУ Петра Великого для самостоятельной работы студентов. Работа рассчитана на 2 академических часа при работе 2 студентов за одной установкой в лаборатории под наблюдением преподавателя. В дистанционном режиме в лаборатории должен находиться лишь сотрудник, включающий и выключающий установку. Снятие показаний с приборов студенты осуществляют, руководствуясь учебным пособием [3], а обработку результатов ведут согласно работе [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.К.* Физика. Электромагнетизм: учеб. пособие. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022.
2. *Саранин В.А.* // УФН. 1999. Т. 169. № 4. С. 453.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0169.199904f.0453>
3. Физика. Электромагнетизм. Практикум: учебное пособие. / Под ред. Е.Г. Апушкинского. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024.
4. Физика. Практическая обработка экспериментальных данных: методические указания. / Составители: Б. Д. Агапьев, С. С. Козловский. СПб.: Изд. Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2012.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Поле изолированной заряженной сферы.

Рис. 2. Поле заряженной сферы 1 вблизи заземленной сферы 2.

Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1, 2 – проводящие сферы, 3 – привод вертикального перемещения, 4 – лабораторные весы, 5 – высоковольтный источник напряжения, 6 – блок управления.

Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки: 1, 2 – проводящие сферы, 3 – привод вертикального перемещения, 4 – лабораторные весы, 5 – высоковольтный источник напряжения, 6 – блок управления, 7 – компьютер.

Рис. 5. Общий вид рабочего стола с запущенной программой управления.

Рис. 6. Зависимость силы взаимодействия между сферами 1 и 2 от расстояния между центрами сфер при напряжении на сфере 1, равном 30 кВ (пустые кружки) и 24.2 кВ (заполненные кружки).

Рис. 7. Зависимость нормированной силы взаимодействия между сферами 1 и 2 от расстояния между центрами сфер, отнесенного к радиусу сферы (заполненные кружки), и теоретическая зависимость нормированной силы Кулона (пустые кружки). Напряжение на сфере равно 30 кВ.

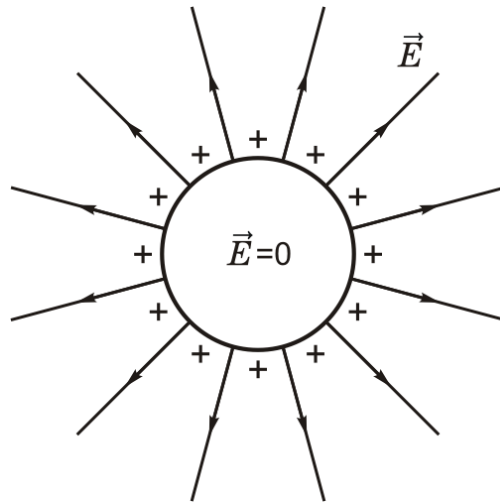


Рис. 1.

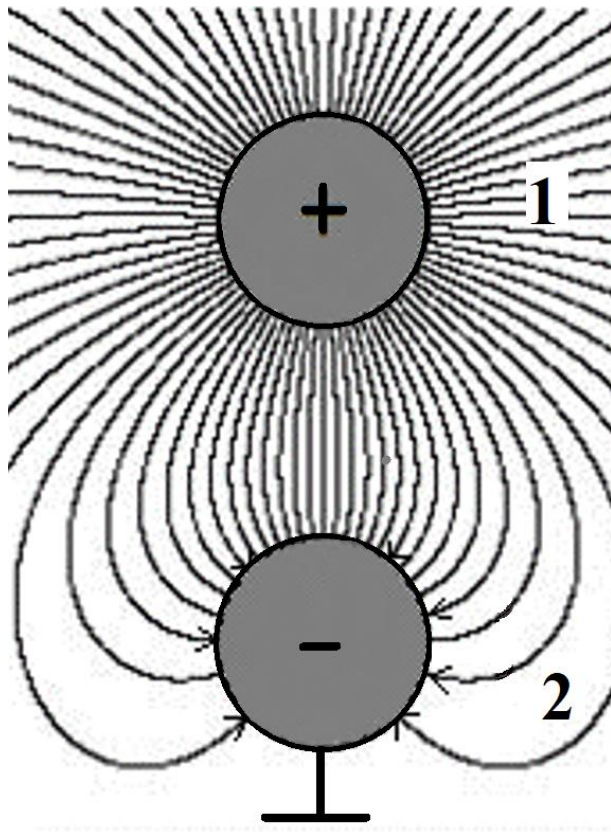


Рис. 2.

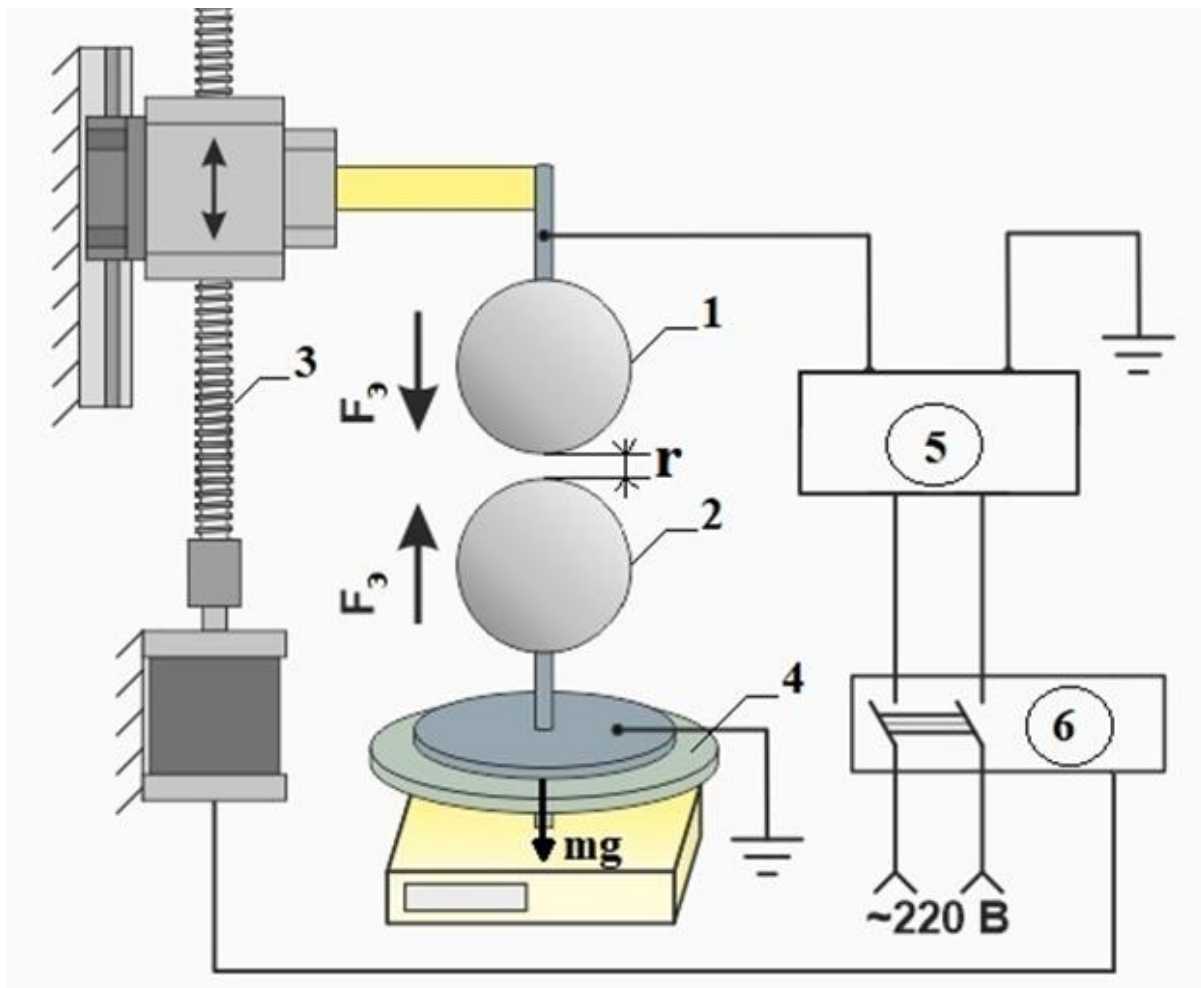


Рис. 3.

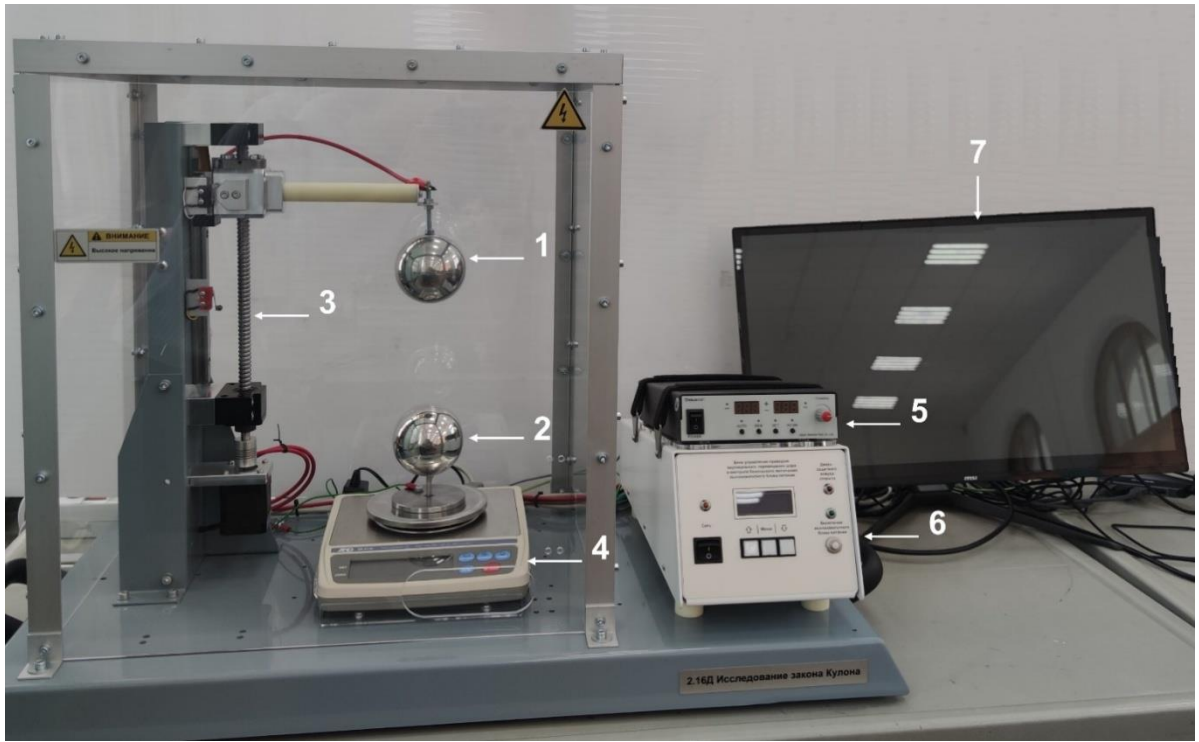


Рис. 4.

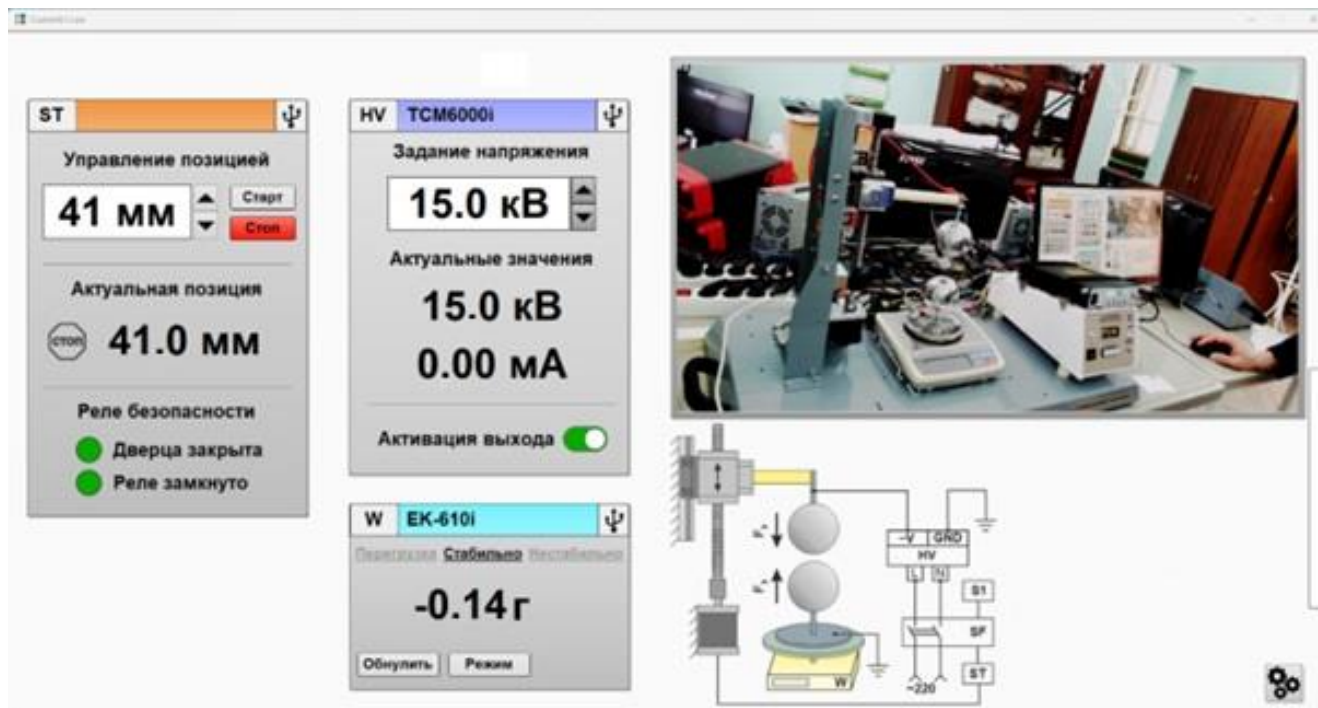


Рис. 5.

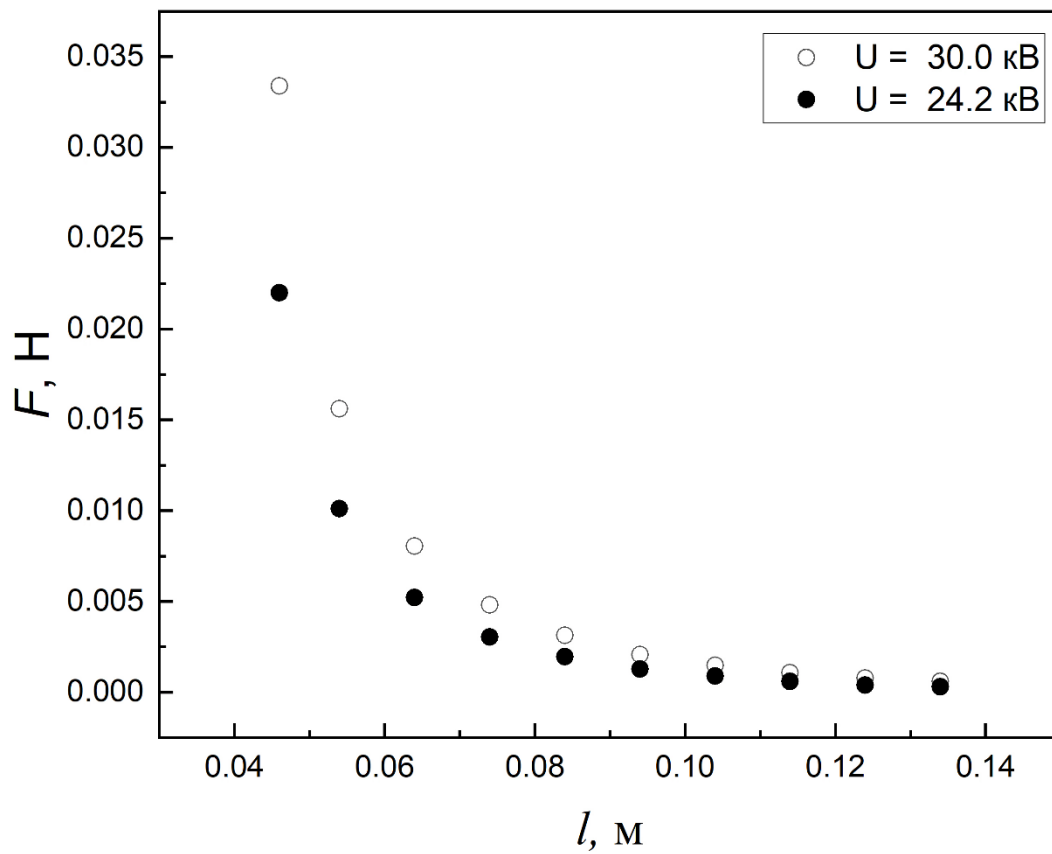


Рис. 6.

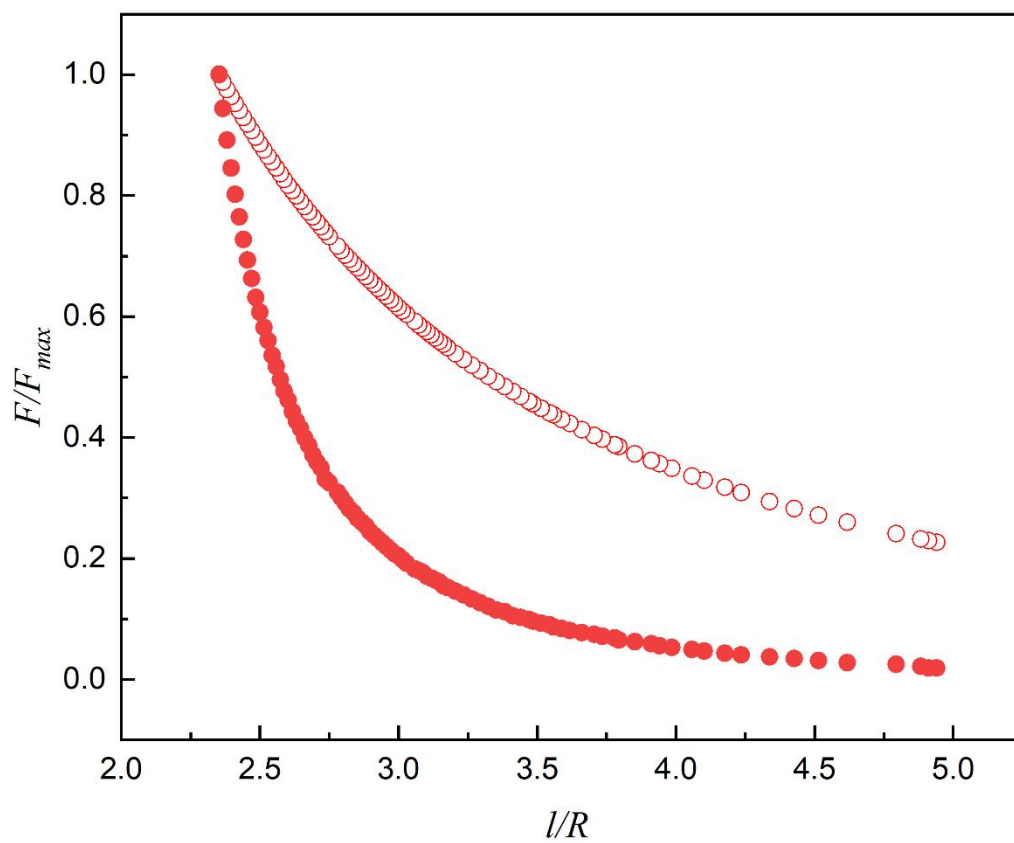


Рис. 7