

**Жан Поль Бизумуремый** , Аспирант, факультет электротехники и автоматизации Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ  
ОЧИСТКИ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ БОЛЬНИЧНОГО ЦЕНТРА  
УНИВЕРСИТЕТА КАМЕНГЕ**

**Аннотация**

Целью данного исследования является разработка автоматизированной системы очистки 1920 фотоэлектрических панелей в больничном центре Университета Каменге с помощью водяного распыления, чтобы компенсировать потери мощности в 27,8 кВт из-за накопления пыли в течение сухого сезона (3 месяца). Материалы и методы включают расчет площади поверхности ( $2463 \text{ м}^2$ ), использование данных о местных осадках (в среднем  $20,11 \text{ л/м}^2$  за два дня) для определения размера резервуара для дождевой воды ( $594,4 \text{ м}^3$ ), а также выбор насоса (0,5 кВт), труб (диаметр 50 мм) и системы управления Arduino с датчиками мощности и солнечного света. Результаты показывают, что общее энергопотребление системы (0,505 кВт) значительно ниже, чем предотвращенные потери (27,8 кВт), и что с крыш больницы можно собрать необходимое количество воды на три месяца ( $594,4 \text{ м}^3$ ). В заключение, автоматизированная очистка распылением обеспечивает чрезвычайно благоприятный энергетический баланс, является простым, экономичным и экологичным техническим решением, при этом работа с рядами панелей ( $24 \times 80$ ) требует 4 часа на полный цикл.

**Annotation**

The objective of this study is to develop an automated water spray cleaning system for 1,920 photovoltaic panels at the Kamenge University Hospital Center to offset 27.8 kW of power loss due to dust accumulation during the dry season (3 months). Materials and methods include calculating the surface area (2,463 m<sup>2</sup>), using local rainfall data (averaging 20.11 L/m<sup>2</sup> over two days) to determine the size of the rainwater tank (594.4 m<sup>3</sup>), and selecting a pump (0.5 kW), pipes (50 mm diameter), and an Arduino control system with power and sunlight sensors. Results indicate that the total system power consumption (0.505 kW) is significantly lower than the avoided losses (27.8 kW), and that the hospital rooftops can collect enough water for three months (594.4 m<sup>3</sup>). In conclusion, automated spray cleaning provides an extremely favourable energy balance, is a simple, economical and environmentally friendly technical solution, while working with rows of panels (24 × 80) requires 4 hours for a complete cycle.

**Ключевые слова:** Очистка распылением, фотоэлектрические панели, эффективная энергосбережение, гидравлическое моделирование, сбор дождевой воды, энергетический баланс, автоматическое управление

**Keywords:** Spray cleaning, photovoltaic panels, energy efficiency, hydraulic modeling, rainwater harvesting, energy balance, automatic control

## **0. Введение**

В данном отчете представлены моделирование и расчет размеров автоматизированной системы распыления воды, предназначенной для очистки 1920 солнечных панелей в университетском больничном центре Каменге, с целью поддержания их выработки энергии в течение сухого сезона (3 месяца), когда накопление пыли приводит к значительному снижению производительности (потеря 27,8 кВт).

Метод распыления был выбран после сравнительного анализа, поскольку он обеспечивает оптимальный баланс между эффективностью (устранение мелкой пыли и минеральных отложений), безопасностью (отсутствие царапин или механической усталости), снижением затрат (автоматизация, отсутствие повторяющихся трудозатрат), устойчивым водопользованием (сбор дождевой воды) и технической простотой (стандартные компоненты).

### **1. Количественная оценка количества воды, необходимой для очистки солнечных панелей.**

Фотоэлектрическая установка в больничном центре Университета Каменге включает 1920 солнечных панелей. Технические характеристики каждой панели подробно описаны в Таблице 1.

**Таблица 1.** Характеристики солнечных панелей

| <b>Номинальные значения</b>                 |         |
|---------------------------------------------|---------|
| Максимальная мощность $P_{\text{мак}}$      | 210 Вт  |
| Максимальное напряжение $V_{\text{мак}}$ :  | 41,3 В  |
| Максимальный ток $I_{\text{мак}}$ :         | 5.09 А  |
| Напряжение холостого хода $V_{\text{хх}}$ : | 50,9 В  |
| Ток короткого замыкания $I_{\text{кз}}$ :   | 5.57 А  |
| Максимально допустимый ток:                 | 15 А    |
| Максимальное напряжение системы:            | 600 В   |
| Номинальная масса:                          | 15,0 КГ |

|                                   |                    |
|-----------------------------------|--------------------|
| Размеры:                          | 1580 X 812 X 35 ММ |
| Коэффициент<br>ветроустойчивости: | 217                |

Площадь поверхности каждой панели составляет:  $s = 1580 \times 0,812 \text{ м}^2$   
 $= 1,28296 \text{ м}^2$  (1).

Таким образом, общая площадь поверхности, покрываемая всеми панелями, составляет:  $S = 1920 \times 1,28296 \text{ м}^2$ .  
 $= 2463,2832 \text{ м}^2$  (2).

Для расчета необходимого количества воды мы используем два ключевых элемента: площадь очищаемой поверхности (Уравнение 2) и данные об осадках в регионе Бужумбура. За 5-летний период среднее количество осадков, наблюдаемое в течение 9 месяцев сезона дождей, составляет:  $r = 3671 \text{ мм} = 3671 \text{ л/м}^2$ .

По экстраполяции среднее количество осадков за два дня (период дождей) оценивается в:  $r = 20,11 \text{ л/м}^2$  (3).

Количество воды, необходимое для очистки всех солнечных панелей в течение 3 сухих месяцев, рассчитывается по формуле:  $Q_e = S \cdot r \cdot n$ .

где:  $S = 2463,2832 \text{ м}^2$  (общая площадь поверхности панелей, уравнение 2);  $r = 20,11 \text{ л/м}^2$  (количество осадков за два дня);  $n = 12$  (частота очистки).

Так :  $Q_e = 2463,2832 \times 20,11 \times 12 = 594439,5018 \text{ л} = 594,4395018 \text{ м}^3$  (4).

## 2. Выбор резервуара для сбора дождевой воды

Для определения идеального объема резервуара для сбора дождевой воды необходимо учитывать несколько ключевых факторов. Площадь поверхности вашей крыши, которая служит коллектором, имеет первостепенное значение. Годовое количество осадков в вашем регионе, то есть среднее количество осадков,

выпадающих каждый год, напрямую влияет на объем собираемой воды. Кроме того, необходимо учитывать коэффициент потерь, который варьируется в зависимости от типа крыши (черепица, сланец и т. д.), для оценки потерь из-за испарения или просачивания. Наконец, ваши потребности в воде, будь то для полива или других целей, определяют размер вашего резервуара [1]. Согласно [2], гибкие резервуары являются экономичной и простой в установке альтернативой, в то время как подземные модели обеспечивают лучшую интеграцию в ландшафт. Поскольку потребности в воде были количественно определены в уравнении (4), представляется оптимальным выбрать подземный резервуар объемом 594,4395018 м<sup>3</sup>.

Это решение особенно важно из-за большого объема, который необходимо хранить, и необходимости сохранения доступного пространства. Кубический корень из (4) дает нам длину каждой стороны цистерны.  $H = \sqrt[3]{594,4395018} \approx 8,5$  м (5).

### **3. Расчет мощности насоса.**

Фотоэлектрическая система больницы Университета Каменге состоит из 24 рядов по 80 солнечных панелей в каждом. Из-за эксплуатационных ограничений очистка всех рядов одновременно невозможна. Поэтому необходимо проводить очистку по рядам, выделяя на каждый ряд 10 минут.

Количество воды, необходимое для очистки одного ряда, выражается формулой:

$$q_e = s \times r \times 80.$$

где:  $s = 1,28296$  м<sup>2</sup> (площадь поверхности одной панели);  $r = 20,11$  л/м<sup>2</sup> (количество воды на м<sup>2</sup>);

#### **Расход воды:**

Согласно [3], Производительность насоса или расход — это объем жидкости, перекачиваемый насосом в единицу времени. Расход обычно измеряется в кубических метрах в час (м<sup>3</sup>/ч) или литрах в секунду (л/с).

В нашем случае  $Q = \frac{q_e}{t} = \frac{(1,28296 \times 20,11 \times 80)}{\frac{10}{60}} = 12384,1563 \text{ л/ч} = 12,384 \text{ м}^3/\text{ч}$  (6).

#### 4. Расчет диаметров труб

Можно аналитически определить диаметры насосных труб, которые наилучшим образом приближаются к тем, которые минимизируют затраты на монтаж, используя формулу Брессе [4]:  $D = K \sqrt[3]{Q}$  (7).

$D$  — диаметр трубы (м);  $K$  — коэффициент, изменяющийся от 0,75 до 1,40;

$Q$  — пиковый расход насоса ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $D = 1 \times \sqrt[3]{\frac{12,384}{3600}} = 0,058 \text{ м}$  (8), при  $K = 1$

Рассчитанный теоретический диаметр ( $D = 58 \text{ мм}$ ) отсутствует в коммерческих стандартах. Единственными близкими стандартизированными значениями являются 50 мм и 63 мм. После сравнительного анализа был выбран диаметр 50 мм, что оправдано экономическими причинами и преимуществом небольшого увеличения давления за счет уменьшения диаметра.

#### Мощность насоса

Согласно [3], расчет мощности насоса — это комплексная задача, в которой необходимо учитывать различные виды мощности и их взаимосвязь. Нас интересует полезная мощность.

#### Полезная мощность

Полезная мощность насоса — это энергия, сообщаемая насосом перекачиваемой жидкости в единицу времени. Она определяется произведением массового расхода жидкости на удельную энергию, которую насос передает жидкости.

Формула для расчета полезной мощности насоса:  $P_{\text{пол}} = \frac{\rho g Q H}{1000}$  (9).

где:  $R_{\text{пол}}$  — полезная мощность насоса, кВт;  $\rho$  — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>;  $Q$  — расход (подача) насоса, м<sup>3</sup>/с;  $H$  — напор насоса, м; 1000 — коэффициент для перевода в киловатты.

Для упрощения расчетов при использовании расхода, измеренного в м<sup>3</sup>/ч, формулу

$$\text{можно записать в виде: } R_{\text{пол}} = \frac{\rho g Q H}{1000} = \frac{\rho g Q H}{3600 \times 1000}.$$

Для воды при нормальных условиях ( $\rho \approx 1000$  кг/м<sup>3</sup>) и с учетом коэффициентов формула полезной мощности упрощается до:  $R_{\text{пол}} = \frac{QH}{367}$  (10).

Где:  $Q$  — расход в м<sup>3</sup>/ч,  $H$  — напор в м.

### **Потребляемая мощность**

Потребляемая мощность насоса — это общее количество энергии, которое насос потребляет от привода (двигателя). Эта мощность больше полезной на величину потерь в насосе. Формула для расчета потребляемой мощности насоса:

$$R_{\text{потр}} = \frac{QH}{367 \times \eta} \quad (11).$$

где:  $R_{\text{потр}}$  — потребляемая мощность насоса, кВт;  $\eta$  — КПД насоса, доли единицы. КПД насоса зависит от модели и технологии. Для предварительного расчета мы часто используем:  $\eta = 0,6$ – $0,8$  для насоса среднего и хорошего качества. В качестве эталонного значения возьмем  $\eta = 0,7$ . Используя уравнение (10), рассчитаем полезную мощность насоса:  $R_{\text{пол}} = \frac{12,384 \times 9,5}{367 \times 0,7} = 0,46$  кВт (12).

На практике рекомендуется добавить запас от 10% до 20%. С запасом +15%  $R_{\text{потр}} = 0,46 \times 1,15 = 0,52$  кВт.

Округляя в меньшую сторону, фактическая мощность насоса составляет:

$$R_{\text{потр}} = 0,5 \text{ кВт}.$$

## **5. Расчет мощности системы очистки**

Наша система очистки включает в себя: насос, контроллер (Arduino), электромагнитный клапан, датчик мощности, датчик освещенности и электрические реле. Датчики и обмотки реле питаются от контроллера, в то время как насос и электромагнитный клапан работают независимо.

**Насос:** Мощность насоса составляет 0,5 кВт, как было рассчитано ранее.

### **Контроллер (Arduino Uno)**

Плата Arduino обычно работает при напряжении 5 В. Максимальный ток на выходе составляет 40 мА [5].

Собственное энергопотребление Arduino составляет:  $P_{\text{контр}} = 5 \times 0,04 = 0,2 \text{ Вт}$ .

### **Датчик солнечной радиации**

Согласно [6], датчики солнечного излучения серии LS01 герметичные IP65 с выходом 4-20мА/0-10В. Поскольку контроллер (Arduino) подает на датчик питание 5 В, мы будем использовать это значение 5 В в качестве рабочего напряжения датчика, сохраняя при этом ток ниже предела 20 мА.  $P_{\text{дат\_рад}} = 5 \times 0,02 = 0,1 \text{ Вт}$ .

### **Датчик мощности**

Датчик тока ACS712 подходит для любых электрических устройств [7]. Датчики ACS712 и ACS713 питаются от +5В и имеют выход по напряжению [8]. Выходной ток изменяется в диапазоне от 1 до 13 мА [9]. Исходя из максимального выходного тока, мощность датчика мощности составляет:  $P_{\text{дат\_мош}} = 5 \times 0,013 = 0,064 \text{ Вт}$ .

### **Электрическое реле**

Реле, специально разработанные для управления платой Arduino, питаются от источника питания 5 В. Их рабочий ток составляет от 15 до 20 Ма [10]. Исходя из максимального рабочего тока, потребляемая мощность реле составляет:



$$P_{\text{Реле}} = 5 \times 0,02 = 0,1 \text{ Вт.}$$

### Электромагнитный клапан

Согласно техническому описанию [11], номинальная мощность электромагнитного клапана диаметром 50 мм составляет 5 Вт. Предположим, что  $P_{\text{элек\_клап}} = 5 \text{ Вт}$

Общая мощность системы:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{потр}} + P_{\text{Контр}} + P_{\text{дат\_рад}} + P_{\text{дат\_мош}} + P_{\text{Реле}} + P_{\text{элек\_клап}} ;$$

$$P_{\text{об}} = (500 + 0,2 + 0,1 + 0,064 + 0,1 + 5) \text{ Вт};$$

$$P_{\text{об}} = 505,464 \text{ Вт} = 0,505464 \text{ кВт.}$$

Экспериментальные результаты показывают, что накопление пыли приводит к потере 27,79 кВт. В отличие от этого, очистка потребляет всего 0,505464 кВт. Этот энергетический баланс демонстрирует явное преимущество: небольшие затраты энергии (0,5 кВт) компенсируют значительные потери (27,8 кВт).

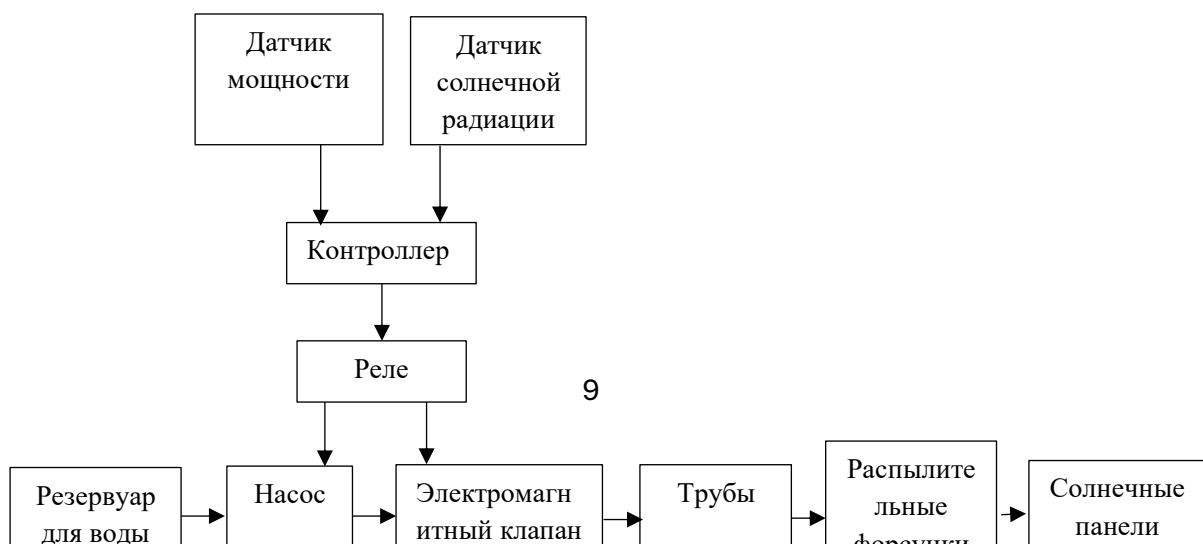
### 6. Расчет энергии, необходимой для очистки

Как упоминалось ранее, процесс очистки организован по рядам, на каждый ряд отводится 10 минут. Поскольку имеется 24 ряда, общая продолжительность цикла очистки составляет 240 минут, что эквивалентно 4 часам.

$$W = P \times t (10) [12].$$

$$W = 0,505464 \times 4 = 2,02 \text{ кВт.}$$

### 7. Блок-схема системы очистки



## **Заключение**

Энергетический анализ показывает чрезвычайно благоприятное соотношение: минимальные затраты энергии (0,5 кВт) компенсируют значительные потери (27,8 кВт). Предложенная система, структурированная на три подсистемы (гидравлика, датчики/мониторинг и управление), гарантирует эффективную, программируемую и автономную очистку.

В конечном итоге, этот проект представляет собой жизнеспособное техническое, экономическое и экологическое решение для поддержания энергоэффективности солнечных панелей в университетской больнице Каменге, одновременно снижая воздействие на окружающую среду и эксплуатационные расходы.

## **Литература**

1. Comment calculer le volume d'une citerne ? URL:

<https://www.citerpack.com/comment-calculer-le-volume-d-une-citerne#:~:text=Cela%20correspond%20%C3%A0%2022%20500,la%20taille%20de%20votre%20cuve> (дата обращения 15.01.2026).

2. Quel volume choisir pour un récupérateur d'eau de pluie ? URL:

<https://www.citerpack.com/quel-volume-choisir-pour-un-recuperateur-d-eau-de-pluie> (дата обращения 15.01.2026).

3. Расчет мощности насоса: полное руководство, формулы и практические примеры. URL: [https://elit-nasos.ru/articles/raschet-moschnosti-nasosa-polnoe-rukovodstvo-formuly-i-prakticheskie-primery?srsltid=AfmBOorVvmg-JS6i\\_Zh6lRzb52ru5xf5mkeYP96qlft0jEO84Kebyx0t](https://elit-nasos.ru/articles/raschet-moschnosti-nasosa-polnoe-rukovodstvo-formuly-i-prakticheskie-primery?srsltid=AfmBOorVvmg-JS6i_Zh6lRzb52ru5xf5mkeYP96qlft0jEO84Kebyx0t) (дата обращения 16.01.2026).
4. A. Hady Arab, M. Benghanem et A. Gharbi. Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque. Rev. Energ. Ren, 2005. Vol. 8. Pp.19 – 26.
5. La carte Arduino Uno. URL: [https://sti.ac-amiens.fr/IMG/pdf/la\\_carte\\_arduino\\_uno\\_-\\_version\\_2016-09.pdf](https://sti.ac-amiens.fr/IMG/pdf/la_carte_arduino_uno_-_version_2016-09.pdf) (дата обращения 16.01.2026).
6. Датчики солнечной радиации серии LS01 герметичные IP65 с выходом 4-20мА / 0-10В. URL: <https://econix.com/files/e1/opisanie-datch-soln-radiacii-ls01-4-20ma-0-10v.pdf> (дата обращения 13.01.2026).
7. Умный измеритель электроэнергии на ESP12 и Arduino. URL: <https://microkontroller.ru/arduino-projects/umnyj-izmeritel-elektroenergii-na-esp12-i-arduino/?ysclid=mkgmp0yddz402948300> (дата обращения 14.01.2026).
8. Датчик тока ACS712. URL: <https://3d-diy.ru/blog/datchik-toka-acs712/?ysclid=mkgmya6jk7288714176> (дата обращения 13.01.2026).
9. Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. URL: <https://www.elmatrix.ru/upload/docs/ACS712-Datasheet.pdf> (дата обращения 14.01.2026).
10. Реле электромеханическое 10А 5В. URL: <https://3d-diy.ru/blog/rele-elektromehanicheskoe-10a-5v/?ysclid=mkgpq1z4bb548030921> (дата обращения 15.01.2026).
11. Électrovanne 50mm Manchon À Coller NC Plastique EPDM 0.5-6bar/7-87psi 24VDC 142 253451. URL: <https://tameson.fr/products/electrovanne-50mm-pvc-24vdc-burkert-0142-253451-253451> (дата обращения 16.01.2026).

12. Примерный расчёт величины потребления электроэнергии при содержание общедомового имущества МКД. URL:  
[https://kt.tmbreg.ru/files/npa/normativ/2017/raschet\\_2017-04-03.pdf?ysclid=mkfr2sjtjj990144514](https://kt.tmbreg.ru/files/npa/normativ/2017/raschet_2017-04-03.pdf?ysclid=mkfr2sjtjj990144514) (дата обращения 16.01.2026).

### **Literature**

1. Comment on the volume calculator for a citer? URL:  
<https://www.citerpack.com/comment-calculer-le-volume-d-une-citerne#:~:text=Cela%20correspond%20%C3%A0%2022%20500,la%20taille%20de%20votre%20cuve> (accessed on 15 January 2026).
2. How to choose the volume for a water heater? URL: <https://www.citerpack.com/quel-volume-choisir-pour-un-recupereur-d-eau-de-pluie> (accessed on 15 January 2026).
3. Pump power calculation: a complete guide, formulas, and practical examples. URL:  
[https://elit-nasos.ru/articles/raschet-moschnosti-nasosa-polnoe-rukovodstvo-formuly-i-prakticheskie-primery?srsltid=AfmBOorVvmg-JS6i\\_Zh6lRzb52ru5xf5mkeYP96qlft0jEO84Kebyx0t](https://elit-nasos.ru/articles/raschet-moschnosti-nasosa-polnoe-rukovodstvo-formuly-i-prakticheskie-primery?srsltid=AfmBOorVvmg-JS6i_Zh6lRzb52ru5xf5mkeYP96qlft0jEO84Kebyx0t) (date of access 01/16/2026).
4. A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi. Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque. Rev. Energ. Ren, 2005. Vol. 8. Pp.19 – 26.
5. La carte Arduino Uno. URL: [https://sti.ac-amiens.fr/IMG/pdf/la\\_carte\\_arduino\\_uno\\_-\\_version\\_2016-09.pdf](https://sti.ac-amiens.fr/IMG/pdf/la_carte_arduino_uno_-_version_2016-09.pdf) (accessed January 16, 2026).
6. LS01 series solar radiation sensors, sealed IP65, with 4-20mA / 0-10V output. URL:  
<https://econix.com/files/e1/opisanie-datch-soln-radiacii-ls01-4-20ma-0-10v.pdf> (accessed January 13, 2026).
7. Smart energy meter based on ESP12 and Arduino. URL:  
<https://microkontroller.ru/arduino-projects/umnyj-izmeritel-elektroenergii-na-esp12-i-arduino/?ysclid=mkgmp0yddz402948300> (accessed January 14, 2026).

8. ACS712 Current Sensor. URL: <https://3d-diy.ru/blog/datchik-toka-ac712/?ysclid=mkgmya6jk7288714176> (accessed January 13, 2026).
9. Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. URL: <https://www.elmatrix.ru/upload/docs/ACS712-Datasheet.pdf> (accessed January 14, 2026).
10. Electromechanical relay 10A 5V. URL: <https://3d-diy.ru/blog/rele-elektromehaničeskoe-10a-5v/?ysclid=mkgpq1z4bb548030921> (accessed January 15, 2026).
11. Electrovanne 50mm Manchon À Coller NC Plastic EPDM 0.5-6bar/7-87psi 24VDC 142 253451. URL: <https://tameson.fr/products/electrovanne-50mm-pvc-24vdc-burkert-0142-253451-253451> (accessed January 16, 2026).
12. Approximate calculation of electricity consumption for the maintenance of common property in an apartment building. URL: [https://kt.tmbreg.ru/files/npa/normativ/2017/raschet\\_2017-04-03.pdf?ysclid=mkfr2sjtjj990144514](https://kt.tmbreg.ru/files/npa/normativ/2017/raschet_2017-04-03.pdf?ysclid=mkfr2sjtjj990144514) (accessed 16.01.2026).