

## ГИБРИДНОЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ ЖИЛЫХ ПОСЕЛЕНИЙ В РФ

**В.П. Галкин<sup>1</sup>, А.А. Горяев<sup>2</sup>, Н.Б. Баланцева<sup>2</sup>, О.А. Калиничева<sup>2</sup>,  
А.А. Калинина<sup>1</sup>, А.В. Сиротов<sup>1</sup>, Я.В. Тарлаков<sup>1</sup>, М.С. Усачев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

<sup>2</sup>ФГАОВУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», 163002, г. Архангельск, Наб. Северной Двины, д. 17

vgalkin@mgul.ac.ru

Рассмотрен пример использования возобновляемых источников энергии в условиях населенного пункта Архангельской обл., типичного для средней полосы России. Проанализирована возможность использования энергии ветра и солнца для обеспечения электроэнергией бытовых потребителей на примере одного дома жилой площадью 60 м<sup>2</sup>. Приведены расчеты и определены параметры ветроустановки, солнечных батарей и аккумуляторов, исходя из обеспечения электроэнергией от ветроустановки и аккумулятора, поскольку в несолнечное время и безветренные дни, как правило, работает солнечная батарея. На основе проведенных расчетов определены параметры и выбран инвертор для предложенной системы электрообеспечения.

**Ключевые слова:** возобновляемая энергетика, дизель-генератор, электроснабжение, электротехника, возобновляемые источники энергии, ветроустановка, солнечная батарея, аккумуляторы

**Ссылка для цитирования:** Галкин В.П., Горяев А.А., Баланцева Н.Б., Калиничева О.А., Калинина А.А., Сиротов А.В., Тарлаков Я.В., Усачев М.С. Гибридное энергообеспечение жилых поселений в РФ // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 100–108. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-100-108

Большее половины территории России, на которой проживает около 20 млн чел., не обеспечены централизованным электроснабжением. Эту функцию в различных районах страны выполняют многочисленные дизель-генераторы. Для их работы необходимы постоянные поставки дизельного топлива, что иногда связано с некоторыми сложностями. В северные районы, на острова, а также в удаленные районы РФ доставка дизельного топлива осуществляется водным транспортом в период навигации, а это значительно повышает стоимость топлива, которое необходимо доставлять сразу на весь межнавигационный период. Поэтому в перечисленных районах устанавливаются высокие тарифы на электроэнергию. К тому же практически половина российских населенных пунктов до сих пор не газифицирована, прежде всего, в связи с бескрайними просторами страны. В негазифицированных районах наиболее экономичным решением представляется гибридное энергообеспечение с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1, 2]. В РФ отмечается около 120 тыс. жилых поселений с количеством населения менее 200 чел. Энергетика для таких поселений, как правило, небольшой мощности, а обеспечение электро- и теплоснабжение от централизованных сетей требует строительства новых электрических, тепловых и газовых сетей большой протяженности, что достаточно затратно. Так, на прокладку электрических сетей затраты могут составить не менее 800...1000 тыс. руб./км, газовых — до 350 тыс. руб./км. Потери энергии в электрических сетях составляют от 20 до 30 %, в тепло-

вых — до 60 %, а плата за подключение — более 50 тыс. руб./кВт [3, 4]. Кроме того, повышение тарифов на углеводородное сырье, их ограниченный объем, проблемы экологии, в частности загрязнение окружающей среды, ухудшают условия жизни населения.

### Цель работы

Цель работы — расчет гибридного энергообеспечения на основе совместного использования ВИЭ и традиционных источников, а также определение параметров и выбор инвертора для предложенной системы электрообеспечения.

Анализ литературных источников [1–4] показал, что ВИЭ рационально внедрять в населенных пунктах со среднегодовой скоростью ветра не ниже 5 м/с, среднемесячной солнечной инсоляцией в весенне-летний период 100...150 кВт·ч/м<sup>2</sup>, которые расположены вдоль берегов рек со скоростью течения воды 3 м/с и более. Кроме того, в этих поселениях должна быть возможность использования тепловых насосов для отопления помещений и горячего водоснабжения. В сельской местности, как правило, используют печное отопление, а в качестве топлива — дрова, популярны бани, где топливом также являются дрова. Для ежедневного нагревания воды в быту можно установить электрический водонагреватель емкостью 50...100 дм<sup>3</sup>. Электричество, кроме того, необходимо для питания бытовых электроприборов. Выбор схемы электроснабжения для таких случаев должен осуществлять муниципалитет и непосредственно жителями поселений. Если среднегодовая скорость ветра в

приземном слое атмосферы составляет 6...7 м/с, основой электроснабжения могут быть ветроустановки. При среднегодовой солнечной инсоляции 1100 кВт·ч/м<sup>2</sup> и выше основными могут быть солнечные модули. При быстром течении вод в реках используется малая гидроэнергетика. При необходимости отопления помещений и горячего водоснабжения применяют тепловые насосы или электродкотлы. Таким образом, комбинируя ВИЭ, можно сократить доставку дизельного топлива и угля на 80...100 %.

**Материалы и методы исследования**

Рассмотрим типичный пример для средней полосы России. Населенный пункт расположен на 62° с. ш. в Архангельской обл. Среднегодовая скорость ветра в приземном слое атмосферы на высоте флюгера 14 м составляет 4,4 м/с, на высоте 20 м — 4,8 м/с. Среднегодовая солнечная инсоляция 982 кВт·ч/м<sup>2</sup>. Дома деревянные бревенчатые, утепленные. Жилая площадь одного дома — 60 м<sup>2</sup>, высота потолков — 2,7 м. Объем помещений — 162 м<sup>3</sup>. Для отопления 10 м<sup>2</sup> × 2,7 м = 27 м<sup>3</sup> требуется 0,9 кВт, а всего 162 : 27 × 0,9 = 5,4 кВт. Отопительный период — 7 мес. Среднемесячные температуры в мае и сентябре — +8 °С. Возможные бытовые электроприборы в одном доме приведены в табл. 1.

Итого в сутки без отопления для имеющегося бытового электрооборудования требуется 8,5 кВт·ч электроэнергии. С отоплением в течение 7 мес. суточная потребность в электроэнергии возрастает до 13,9 кВт·ч. В пиковые часы — с 6.00 и с 18.00 одновременно могут быть включены такие приборы, как холодильник (мощность 0,16 кВт), электрочайник, микроволновая печь и электромясорубка по очереди (1,5 кВт), лампы накаливания (0,1 кВт), водяной насос (0,2 кВт), электроплитка (1 кВт), телевизор (0,2 кВт). Всего потребуется примерно 3,2 кВт мощности. Однако если учесть замену печного вида отопления на другой дополнительно понадобится источник энергии мощностью 5,4 кВт или следует предусмотреть тепловой насос.

**Результаты и обсуждение**

В первую очередь рассмотрим возможность использования энергии ветра и солнца для обеспечения бытовых электроприборов без отопления (рис. 1).

Удельная мощность ветрового потока определяется по формуле [3]

$$N_o = 1,17SV^3_{cp}, \text{ Вт} \tag{1}$$

где *S* — площадь поперечного сечения ветрового потока, 1 м<sup>2</sup>;

*V*<sub>cp</sub> — среднемесячная скорость ветра, м/с.

Годовая удельная энергия ветрового потока *W*<sub>уд.п</sub> (энергия, протекающая за 1 год через 1 м<sup>2</sup> поперечного сечения обитаемой площади) зависит от повторяемости скоростей ветра, т. е. какую долю годового времени *t<sub>i</sub>* ветер дул со скоростью *v<sub>i</sub>*

$$W_{уд.п} = \frac{1}{2} \rho T \sum_{i=1}^k t_i v_i^3, \tag{2}$$

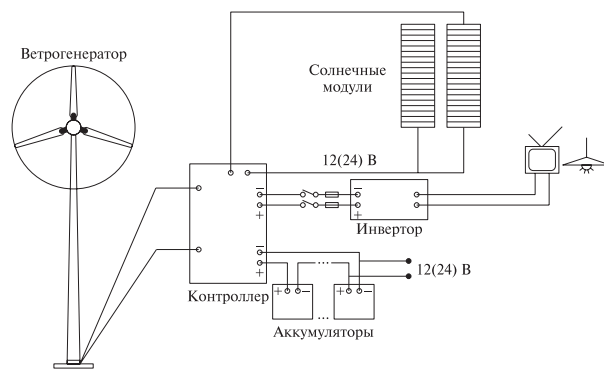
где *k* — число градаций ветра;

*T* — число часов в году, 8760 ч.

Т а б л и ц а 1

**Электробытовые приборы в одном доме**  
**Household appliances in a house**

| Наименование                        | Количество | Установленная мощность, кВт | Продолжительность работы, ч./неделя | Потребление энергии в неделю, кВт·ч |
|-------------------------------------|------------|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Холодильник                         | 1          | 0,16                        | 13,44                               | 2,15                                |
| Стиральная машина                   | 1          | 2,0                         | 4,0                                 | 8,0                                 |
| Утюг                                | 1          | 1,0                         | 2,0                                 | 2,0                                 |
| Электрочайник                       | 1          | 1,5                         | 1,1                                 | 1,65                                |
| Микроволновая печь                  | 1          | 1,5                         | 1,1                                 | 1,65                                |
| Энергосберегающие лампы             | 10         | 0,1                         | 2,8                                 | 0,28                                |
| Настольная лампа                    | 1          | 0,01                        | 0,14                                | 0,0014                              |
| Водонагреватель 100 дм <sup>3</sup> | 1          | 2,0                         | 14                                  | 28                                  |
| Водяной насос                       | 1          | 0,2                         | 1,4                                 | 2,8                                 |
| Электромясорубка                    | 1          | 1,0                         | 0,56                                | 0,56                                |
| Электроплитка                       | 1          | 1,0                         | 7                                   | 7,0                                 |
| Телевизор                           | 1          | 0,2                         | 28                                  | 5,6                                 |
| Компьютер                           | 1          | 0,16                        | 14                                  | 2,24                                |
| Итого                               | —          | 10,83                       |                                     | 59,44                               |



**Рис. 1.** Автономное энергообеспечение солнечной батареи и ветроустановки (с аккумуляторами)

**Fig. 1.** Autonomous power supply of solar cell and wind turbine (with batteries)

Т а б л и ц а 2

## Метеорологические данные [1] и расчет мощности ветроустановки

## Meteorological data [1] and wind turbine calculation

| Наименование   | Месяц года |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Год   |
|--|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | I          | II    | III   | IV    | V     | VI    | VII   | VIII  | IX    | X     | XI    | XII   |       |
| Средняя месячная и годовая температура атмосферного воздуха, °С  | -12,4      | -11,7 | -7,1  | 1,2   | 8,2   | 13,6  | 16,5  | 13,7  | 8,2   | 1,6   | -4,4  | -9,9  | 1,3   |
| Средняя месячная и годовая скорость ветра на высоте флюгера 14 м, м/с  | 4,5        | 4,8   | 4,6   | 4,5   | 4,6   | 4,1   | 3,6   | 3,4   | 4,0   | 4,7   | 5,1   | 4,9   | 4,4   |
| Удельная мощность ветрового потока на высоте 14 м, $S = 1 \text{ м}^2$ , Вт/м <sup>2</sup>   | 107        | 129   | 114   | 107   | 114   | 81    | 55    | 46    | 75    | 121   | 155   | 138   | 100   |
| Удельная мощность ветроустановки на высоте 14 м, $\varepsilon = 0,35$ , $S = 1 \text{ м}^2$ , $\eta = 0,85$ , Вт/м <sup>2</sup>                            | 32         | 39    | 34    | 32    | 34    | 24    | 16    | 14    | 22    | 36    | 46    | 41    | 30    |
| Скорость ветра на высоте 20 м, м/с   | 4,9        | 5,2   | 5,0   | 4,9   | 5,0   | 4,4   | 3,9   | 3,7   | 4,3   | 5,1   | 5,5   | 5,3   | 4,8   |
| Удельная мощность ветрового потока на высоте 20 м, $S = 1 \text{ м}^2$ , Вт/м <sup>2</sup>   | 137        | 164   | 146   | 137   | 146   | 99    | 69    | 59    | 93    | 155   | 194   | 174   | 131   |
| Удельная мощность ветроустановки на высоте 20 м, $S = 1 \text{ м}^2$ , $\varepsilon = 0,35$ , Вт/м <sup>2</sup>  | 48         | 57    | 51    | 48    | 51    | 35    | 24    | 21    | 33    | 54    | 68    | 61    | 46    |
| Месячная потребность в электроэнергии, кВт·ч   | 264        | 238   | 264   | 255   | 264   | 255   | 264   | 264   | 255   | 264   | 255   | 264   | 3106  |
| Количество штительных дней, %/дни  | 1/0,3      | 2/0,5 | 2/0,6 | 3/2,7 | 2/1,7 | 1/0,3 | 2/0,6 | 3/2,8 | 3/2,7 | 2/0,6 | 1/0,3 | 2/0,6 | 2/7,3 |
| Продолжительность дня, ч.  | 6          | 8,85  | 11,4  | 14,4  | 17,7  | 19,6  | 18,3  | 15,6  | 12,7  | 9,8   | 6,9   | 5,3   | 12,2  |
| Скорость ветра, м/с  | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |       |
| Среднемесячная удельная энергия ветрового потока $W$ , при среднегодовой скорости ветра 4,8 м/с на высоте 20 м, (Вт·ч)/(м <sup>2</sup> ·год), (см. рис. 3) | 0,048      | 0,56  | 3,9   | 9,4   | 20,6  | 32,4  | 37,7  | 36,4  | 35    | 18    | 9,3   | 8,6   |       |

Зная среднегодовую скорость ветра, его вертикальный профиль и повторяемость скорости ветра, можно дать энергетическую характеристику ветрового потока в любом районе.

Удельная мощность ветроустановки изолированного потребителя ( $N_{п}^{в.у}$ ) определяется по формуле

$$N_{п}^{в.у} = 1,17SV^3_{ср}\varepsilon\eta_{в.у} \text{ Вт}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент мощности, 0,35;

$\eta_{в.у}$  — КПД ветроустановки, 0,85.

Расчет приведен в табл. 2.

Ветроустановки, изготавливаемые промышленностью, рассчитываются на номинальную скорость ветра (8...12,5 м/с). Удельная номинальная мощность определяется для того, чтобы подобрать марку ветроустановки, которые изготавливаются промышленностью.

При среднегодовой скорости ветра на уровне флюгера 14 м — 4,4 м/с удельная мощность ветроустановки равна 30 Вт/м<sup>2</sup>. При расчетной скорости ветра 8 м/с удельная ее мощность равна 180 Вт/м<sup>2</sup>, а при расчетной скорости ветра 10 м/с — 349 Вт/м<sup>2</sup>.

На рис. 2, 3 представлено, как формируется годовая сумма удельной энергии ветра (площадь под кривой  $W_{уд}$ ) при среднемесячной скорости ветра. Вследствие кубической зависимости мощности от скорости ветра наибольший вклад дают не наиболее часто наблюдаемые и даже не средние скорости ветра, а скорости, превышающие последние в 1,6–1,8 раза.

При скорости ветра от 0 до 3 м/с ветроустановка не вырабатывает электроэнергию (табл. 3), поэтому она работает не круглый год. При среднегодовой скорости 4,4 м/с время работы ветроустановки составит  $8760 \cdot 0,793 = 6947$  ч (290 дней). При среднегодовой скорости 4,8 м/с на высоте 20 м время ее работы составит  $8760 \cdot 0,859 \approx 7353$  ч (313,5 дней). Годовая потребность в электроэнергии  $E_r = 3106$  кВт·ч. Количество электроэнергии, выработанное ветроустановкой в течение года (при  $V_r = 4,4$  м/с), определяется по формуле

$$E_{в.у} = \frac{E_r \cdot \tau}{365} = \frac{3106 \cdot 290}{365} = 2462 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Средняя развиваемая мощность ветроустановки ( $N_{в.у}$ ) рассчитывается следующим образом

$$N_{в.у} = \frac{E_r}{24 \cdot 290 \cdot \eta_{в.у}} = \frac{2462}{24 \cdot 290 \cdot 0,85} = 0,42 \text{ кВт}.$$

Требуемая мощность воздушного потока ( $N_0$ ) составит

$$N_0 = \frac{N_{в.у}}{\varepsilon} = \frac{0,42}{0,35} = 1,2 \text{ кВт}.$$

Определяем радиус  $R$  ветроколеса ( $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^3$ )

$$R = \sqrt{\frac{N_0}{1,17 \cdot 3,14 \cdot 4,4^3}} = \sqrt{\frac{1200}{313}} = 1,96 \text{ м}; D \approx 4 \text{ м}.$$

Определяем ометаемую площадь ветроколеса  $S_{вк}$

$$S_{вк} = 0,785 \cdot D^2 = 12,6 \text{ м}^2.$$

Мощность установленной ветроустановки ( $N_{уст}$ ) при расчетной скорости ветра  $V_{рас} = 10$  м/с

$$N_{уст} = 0,5 \rho \eta_{в.у} S_{вк} \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 0,5 \cdot 1,225 \cdot 0,35 \cdot 0,85 \cdot 12,6 = 2,3 \text{ кВт}.$$

При расчетной скорости ветра 12 м/с  $N_{уст} = 4$  кВт.

Покупать ветроустановку следует с учетом расчетной скорости ветра.

Рассмотрим расчет и подбор системы солнечной батареи. Выработка энергии солнечной батареей рассчитывается (см. табл. 2) по формуле

$$E_{с.б} = \frac{E_{инс} \cdot P_{с.б} \cdot \eta}{P_{инс}}, \quad (4)$$

где  $E_{с.б}$  — выработка энергии солнечной батареей, кВт·ч;

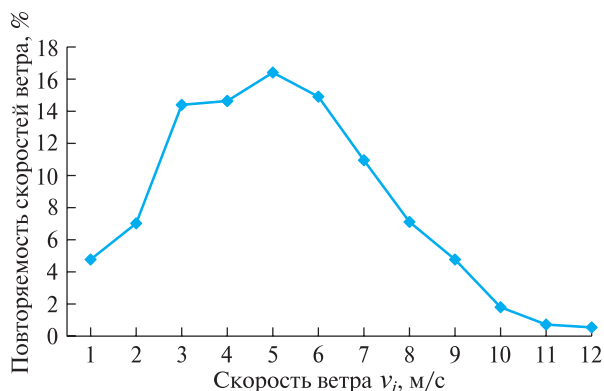


Рис. 2. Повторяемость скорости ветра при высоте ветроколеса 20 м

Fig. 2. Repetition of wind speed at 20 m wind wheel height

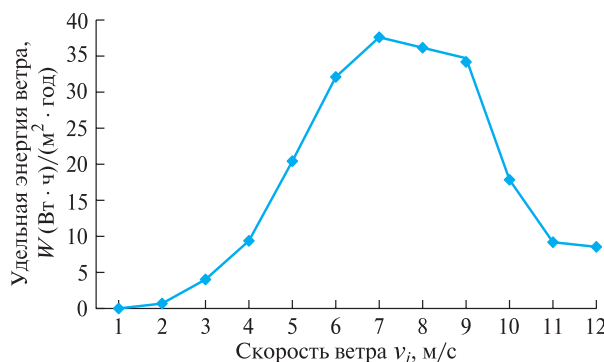


Рис. 3. Распределение годовой удельной энергии ветра на высоте 20 м.

Fig. 3. Distribution of annual specific wind energy at 20 m height

Т а б л и ц а 3

**Повторяемость скорости ветра (по Поморцеву М.М.), %**

**Repetition of wind speed (by Pomortsev M.M.), %**

| Скорость ветра, м/с | Среднегодовая скорость ветра, м/с |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | 1                                 | 2    | 3    | 4    | 4,4  | 4,8  | 5,2  | 5,5  | 5,7  |
| 0                   | 25,4                              | 10,0 | 5,7  | 3,5  | 2,9  | 2,3  | 1,8  | 1,5  | 1,3  |
| 1                   | 41,0                              | 23,0 | 11,8 | 7,2  | 6,0  | 4,8  | 4,5  | 3,9  | 2,1  |
| 2                   | 25,1                              | 29,6 | 19,4 | 12,2 | 11,2 | 7,0  | 6,3  | 6,3  | 3,9  |
| 3                   | 7,5                               | 23   | 22,7 | 16,5 | 14,5 | 14,5 | 10,2 | 9,8  | 9,0  |
| 4                   | 1,0                               | 10,0 | 19,5 | 18,5 | 17,1 | 14,7 | 14,2 | 13,0 | 12,2 |
| 5                   |                                   | 3,8  | 12,0 | 16,5 | 16,5 | 16,5 | 16,0 | 15,2 | 13,0 |
| 6                   |                                   | 0,6  | 6,0  | 12,2 | 13,4 | 15,0 | 15   | 15,0 | 15   |
| 7                   |                                   |      | 2,2  | 7,2  | 8,2  | 11,0 | 12,4 | 13,0 | 13,3 |
| 8                   |                                   |      | 0,7  | 3,6  | 5,4  | 7,1  | 8,7  | 9,7  | 9,0  |
| 9                   |                                   |      |      | 1,7  | 2,7  | 4,8  | 5,1  | 6,2  | 6,9  |
| 10                  |                                   |      |      | 0,6  | 1,2  | 1,8  | 2,6  | 3,5  | 6,0  |
| 11                  |                                   |      |      | 0,3  | 0,5  | 0,7  | 1,3  | 1,9  | 2,9  |
| 12                  |                                   |      |      |      |      | 0,5  | 0,6  | 1,1  | 1,3  |
| 13                  |                                   |      |      |      |      |      |      |      | 0,3  |

$E_{\text{инс}}$  — месячная инсоляция квадратного метра, кВт·ч/м<sup>2</sup>;

$P_{\text{с.б}}$  — номинальная мощность солнечной батареи, заявленная потребителем, кВт;

$\eta$  — КПД передачи электроэнергии по проводам, контроллера и инвертора, равный 0,8;

$P_{\text{инс}}$  — максимальная мощность инсоляции с 1 м<sup>2</sup> земной поверхности — 1 кВт (см. табл. 2).

Номинальная мощность солнечной батареи, требуемая для обеспечения необходимой месячной выработки электроэнергии рассчитывается по формуле

$$P_{\text{с.б}} = \frac{P_{\text{инс}} \cdot E_{\text{с.б}}}{E_{\text{инс}} \cdot \eta}, \text{ кВт.} \quad (5)$$

В несолнечное время суток (в среднем это 12 ч) с апреля по сентябрь электроэнергией должны обеспечивать аккумуляторы и ветроустановка. Кроме того, важно предусмотреть обеспечение электроснабжением на один штилевой день в период с апреля по сентябрь, т. е. 8,5 (кВт·ч)/сут.

Исходя из перечня бытовых электроприборов (см. табл. 1), определяем основные параметры инвертора для системы. Во-первых, поскольку в списке бытовых электроприборов есть устройства, имеющие в своем составе двигатели: холодильник, стиральная машина и т. д., необходим инвертор, имеющий на выходе синусоидальную форму напряжения. Во-вторых, входное напряжение инвертора должно соответствовать выбранному напряжению — не ниже 24 В в целях уменьшения токовой нагрузки на провода. Мощность инвертора принимается на 20 % больше максимальной среднечасовой нагрузки потребления. Выбираем мощность инвертера для дома с учетом потерь:  $3,3 \text{ кВт} \cdot 1,2 = 3,96 \text{ кВт}$  [5–11].

Выбираем инвертор мощностью 4 кВт, напряжением 24 В.

При расчете аккумуляторных батарей учитываются следующие особенности:

- разряжение аккумуляторов на большую «глубину разряда» приводит их в негодность, значительно сокращается срок службы;

- ориентироваться следует на 20-, 30 %-ю глубину разряда, а также на свинцово-кислотные аккумуляторы, поскольку они дешевле по сравнению с современными аналогами;

- исходя из безопасности при эксплуатации, рекомендуется использовать герметизированные аккумуляторы — не герметизированные при работе выделяют вредные для дыхания человека и взрывоопасные газы, а для их установки необходимо выбирать хорошо проветриваемое помещение;

- по эксплуатационным характеристикам для автономной системы наиболее подходят необслуживаемые гелевые аккумуляторы (GEL), хотя они не являются самыми дешевыми;

- важен уровень температуры окружающей среды для расчета необходимой емкости аккумуляторов, особенно если приходится их эксплуатировать в холодное время года, пониженная температура окружающей среды снижает емкость аккумулятора, т. е. его энергоемкость.

Кроме того, в ходе расчета важно знать некоторые тонкости.

В частности, количество штилевых последовательных дней следует принять за 1. При этом питание может быть только от солнечной, аккумуляторной батареи или дизельной электростанции. В безветренный день, как правило, работает солнечная батарея. В штилевые дни или часы, а их количество в году — 175 ч. (только в августе и сентябре), можно уменьшить количество аккумуляторов и как можно меньше включать электроприборы.

Если в штилевой день пасмурный, то емкость аккумуляторной батареи будет составлять

$$\frac{8500 \text{ Вт} \cdot \text{ч}}{12 \text{ В}} = 708 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Введем глубину разряда для аккумуляторной батареи — 30 %:

$$\frac{708 \text{ А} \cdot \text{ч}}{0,3} = 2360 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Считаем, что аккумуляторная батарея находится в помещении с положительной температурой.

Номинальная емкость выбранного аккумулятора — 200 А·ч, напряжение — 12 В.

Число аккумуляторов, соединенных параллельно:

$$\frac{2360 \text{ А} \cdot \text{ч}}{200 \text{ А} \cdot \text{ч}} = 11,8 \approx 12 \text{ шт.}$$

Число аккумуляторов, соединенных последовательно:

$$\frac{24 \text{ В}}{12 \text{ В}} = 2 \text{ шт.}$$

Общее количество аккумуляторов:

$$12 \cdot 2 = 24 \text{ шт.}$$

Если установить аккумуляторы напряжением 24 В, то их количество уменьшится в 2 раза.

Рассчитаем количество фотоэлектрических модулей. Выбираем монокристаллический солнечный модуль мощностью 200 Вт, напряжением 24 В. Для расчета энергии солнечной батареи необходимо прежде всего определить солнечную инсоляцию региона, в котором будет эксплуатироваться система [12, 13] (табл. 4).

1. Суточная потребность в электроэнергии составляет 8500 Вт·ч.

Т а б л и ц а 4

**Суммарная инсоляция и выработка электроэнергии солнечной батареей,  
кВт·ч/м<sup>2</sup> при наклоне площадки 45°**

**Total insolation and power generation by solar panel, kWh/ m<sup>2</sup>at the 45° inclination**

| Показатель  | Месяц года |     |     |       |     |     |     |      |     |     |     |     | Год  |
|---|------------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
|   | I          | II  | III | IV    | V   | VI  | VII | VIII | IX  | X   | XI  | XII |      |
| Суммарная месячная инсоляция при наклоне площадки 45°, кВт·ч/м <sup>2</sup>                               | 16,4       | 41  | 112 | 127,5 | 142 | 150 | 156 | 117  | 72  | 34  | 12  | 3,3 | 982  |
| Месячная потребность электроэнергии, кВт·ч  | 264        | 238 | 264 | 255   | 264 | 255 | 264 | 264  | 255 | 264 | 255 | 264 | 3106 |
| Месячная выработка электроэнергии ветроустановкой при S = 12,6 м <sup>2</sup> , на высоте h = 14 м, кВт·ч | 297        | 326 | 317 | 287   | 317 | 218 | 152 | 128  | 202 | 338 | 419 | 384 | 3385 |
| Месячная выработка электроэнергии солнечной батареей мощностью 2,6 кВт, при η = 0,8, кВт·ч                | 34         | 85  | 233 | 265   | 295 | 312 | 324 | 243  | 149 | 71  | 25  | 7   | 2043 |
| Месячная выработка электроэнергии солнечной батареей мощностью 2,0 кВт, при η = 0,8, кВт·ч                | 26         | 66  | 179 | 204   | 227 | 240 | 250 | 187  | 115 | 54  | 19  | 5   | 1572 |
| Совместная выработка электроэнергии солнечной батареей мощностью 2 кВт и ветроустановкой, кВт·ч           | 323        | 392 | 496 | 491   | 544 | 458 | 402 | 315  | 317 | 409 | 438 | 391 | 4957 |

2. Потери на заряд-разряд составляют не более 20 %, их важно учесть

$$8500 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \cdot 1,2 = 10\,200 \text{ Вт} \cdot \text{ч}.$$

3. Среднее количество пиковых часов в апреле составляет 4,2.

4. Требуемая мощность солнечной батареи

$$\frac{10\,200 \text{ Вт} \cdot \text{ч/сут}}{4,2 \text{ ч}} = 2429 \text{ Вт}.$$

5. Пиковая мощность фотоэлектрического модуля в точке максимальной мощности — 200 Вт, напряжение 24 В.

6. Число модулей, соединенных параллельно

$$\frac{2429 \text{ Вт}}{200 \text{ Вт}} = 12,14 \text{ шт}.$$

7. Увеличиваем до ближайшего целого числа — 13 шт.

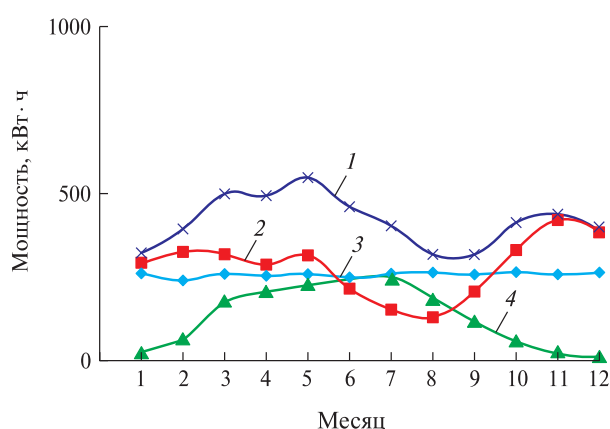
8. Число модулей соединенных последовательно

$$\frac{24 \text{ В}}{24 \text{ В}} = 1 \text{ шт}.$$

9. Общее количество модулей — 13 шт.

По данным табл. 4 получаем графики выработки электроэнергии солнечной батареей и ветроустановкой в течение года (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что установленная мощность ветроустановки не обеспечивает электро-



**Рис. 4.** Выработка электроэнергии солнечной батареей и ветроустановкой в течение года: 1 — совместная выработка электроэнергии солнечной батареей и ветроустановкой мощностью 2 кВт; 2 — выработка электроэнергии ветроустановкой; 3 — месячная потребность в электроэнергии; 4 — выработка электроэнергии солнечной батареей мощностью 2 кВт

**Fig. 4.** Power generation of solar panels and wind turbines during the year: 1 — joint power generation solar panels and wind turbine capacity of 2 kW; 2 — energy production by wind turbine; 3 — monthly demand for electricity; 4 — power generation solar panels of 2 kW

энергией потребителя с мая по сентябрь, поэтому источником электроэнергии должен стать другой объект. При совместной работе ветроустановки и солнечной батареи мощность солнечной батареи можно уменьшить с 2,6 кВт до 2,0 кВт. В этом

случае ветроустановка и солнечная батарея обеспечат потребителя круглогодично, а также дает возможность установить вместо 13 солнечных батарей 10 шт. [14–20].

## Выводы

1. Использование гибридного энергообеспечения на основе возобновляемых источников энергии и традиционных источников является перспективным и экономически выгодным направлением обеспечения электроэнергией в условиях жилых поселений с количеством населения менее 200 чел.

2. Учитывая сезонные колебания климата рассматриваемых районов эффективным считается комплексное использование различных возобновляемых источников электроэнергии в частности солнечной и ветровой.

3. Проведенные расчеты позволили определить, что для обеспечения электроэнергией одного дома необходимы следующие объекты:

- ветроустановка с горизонтальной или вертикальной осью мощностью 2,3 кВт (с расчетной скоростью ветра 10 м/с) или 4 кВт (с расчетной скоростью ветра 12 м/с), высотой мачты не ниже 14 м, диаметром ветроколеса 4,0...4,5 м;

- фотоэлектрические монокристаллические модули в количестве 10 шт. (при мощности 200 Вт, напряжении 24 В), вместо них можно установить солнечную электростанцию мощностью 2,0...2,5 кВт;

- инвертор мощностью 4 кВт, напряжением 24 В, преобразующий постоянный ток в переменный напряжением 220 В, частотой 50 Гц;

- контроллер МРРТ (Maximum Power Point Tracking), мощностью 4 кВт, гибридный;

- аккумуляторы гелевые необслуживаемые емкостью 200 А·ч (напряжением 12 В — 24 шт., напряжением 24 В — 12 шт.);

- кабель и провод.

## Список литературы

- [1] Агроклиматический справочник по Архангельской области. Л.: Гидрометиздат, 1961. 220с.
- [2] Горяев А.А., Петухов С.В., Баланцева Н.Б. Энергообеспечение в Арктической зоне Архангельской области и Ненецкого автономного округа (НАО) // I Российская науч.-практ. конф. «Природопользование в Арктике: современное состояние и перспективы развития», Якутск, 22–25 сентября 2015 г. Якутск: СВФУ, 2015. С. 191–200.
- [3] Березкин М.Ю., Синюгин О.А. География инноваций и возобновляемая энергетика мира // Малая энергетика, 2011. № 1–2. С. 3–5
- [4] Шеповалова О.В. Использование возобновляемых источников энергии в комплексных системах энергообеспечения сельских зданий // Ползуновский вестник, 2011. № 21. С. 175–180.
- [5] Кольниченко Г.И., Сиротов А.В., Тарлаков Я.В. Исследование и обоснование эксплуатационных характеристик дизель-генератора, работающего на дизельном топливе с биодобавками // Сборник трудов III Международной конф. «Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий» (АПЭЭТ-2014), Екатеринбург, 17–20 марта 2014 г. Екатеринбург: УРФУ, 2014. С. 230–232.
- [6] BP Statistical Review of World Energy, 2016. URL: <http://www.bp.com/statisticalreview> (дата обращения 10.04.2020)
- [7] Lattimore B., Smith C.T., Titus B.D., Stupak I., Egnell G. Environmental factors in woodfuel production: Opportunities, risks, and criteria and indicators for sustainable practices // Biomass and Bioenergy, 2009, no. 33(10), pp. 1321–1342.
- [8] Малоизвестное оборудование для производства электроэнергии. 2016. URL: <http://nnhpe.spbstu.ru/maloizvestnoe-oborudovanie-dlya-proizvodstva-elektroenergii/> (дата обращения 15.06.2019).
- [9] Обзор электроэнергетической отрасли России, 2018. URL: <https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-power-market-russia-2018/%24FILE/EY-power-market-russia-2018.pdf> (дата обращения 10.04.2020).
- [10] Токарев Г.Г. Газогенераторные автомобили. М.: ГНТ Изд-во машиностроительной литературы, 1955. 207 с.
- [11] Обзор современных ПТУ малой мощности (до 1000 кВт). Санкт-Петербург: ООО НТЦ «МТТ», 2015. 41 с. URL: <http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/02/Obzor-PTU-maloy-moshchnosti.pdf> (дата обращения 05.08.2019)
- [12] Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. СПб.: Изд-во политехнического ун-та, 2016. 424 с.
- [13] Васильев И.А., Люминарская Е.С., Селиванов К.В. Гибридная энергетика как способ электрификации географически изолированных потребителей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2018. № 4–2 (330). С. 154–161.
- [14] Васильев И.А., Люминарская Е.С., Селиванов К.В. Автономная система энергоснабжения с микропроцессорным управлением // Электроника и электрооборудование транспорта, 2019. № 2. С. 21–26.
- [15] Селиванов К.В. Анализ способов малого распределенного электроснабжения // International research journal, 2017. № 01 (55). Ч. 4. С. 107–110.
- [16] Князева Г.А. Биоэнерготехнологии: новые направления развития регионального лесного сектора // Социально-экономические, политические и исторические аспекты развития северных и арктических регионов России: Материалы Всерос. науч. конф. (с междунар. участием). Сыктывкар, 17–18 октября 2018 г. Сыктывкар: Коми Республиканская Академия государственной службы и управления, 2018. С. 20–25.
- [17] Langholtz M.H.; Stokes B.J.; Eaton L.M. 2016 Billion-ton report: Advancing domestic resources for a thriving bioeconomy, Volume I: Economic availability of feedstock. U.S. Department of Energy. ORNL/TM-2016/160. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 411p. DOI: 10.2172/1271651.
- [18] Попель О.С., Фортов В.Е. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 168 с.
- [19] Nivala M., Anttila P., Laitila J., Salminen O., Flyktman M. A GIS-based methodology to estimate the regional balance of potential and demand of forest chips // J. of Geographic Information Systems, 2016, no. 8, 633–662.
- [20] Goerndt M.E., D'Amato A., Kabrick J. Chapter 4: Wood Energy and Forest Management // Wood Energy in Developed Economies / Ed F.X. Aguilar. London, UK: Earthscan Publishing, 2014, pp. 93–127.

## Сведения об авторах

**Галкин Владимир Павлович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [vgalkin@mgul.ac.ru](mailto:vgalkin@mgul.ac.ru)

**Горяев Аркадий Алексеевич** — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», [ark16111936@gmail.com](mailto:ark16111936@gmail.com)

**Баланцева Наталья Борисовна** — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

**Калиничева Оксана Александровна** — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

**Сиротов Александр Владиславович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [siroto@mgul.ac.ru](mailto:siroto@mgul.ac.ru)

**Калинина Алена Анатольевна** — вед. инженер МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [kalinina@mgul.ac.ru](mailto:kalinina@mgul.ac.ru)

**Тарлаков Яков Викторович** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [tarlakov@mgul.ac.ru](mailto:tarlakov@mgul.ac.ru)

**Усачев Максим Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [usachev@mgul.ac.ru](mailto:usachev@mgul.ac.ru)

Поступила в редакцию 26.05.2020.

Принята к публикации 16.11.2020.

## HYBRID POWER SUPPLY OF RESIDENTIAL SETTLEMENTS IN RUSSIAN FEDERATION

V.P. Galkin<sup>1</sup>, A.A. Gorjaev<sup>2</sup>, N.B. Balantseva<sup>2</sup>, O.A. Kalinicheva<sup>2</sup>,  
A.A. Kalinina<sup>1</sup>, A.V. Siroto<sup>1</sup>, Y.V. Tarlakov<sup>1</sup>, M.S. Usachev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

[vgalkin@mgul.ac.ru](mailto:vgalkin@mgul.ac.ru)

An example of using renewable energy sources in the conditions of a locality in the Arkhangelsk region, typical for the Central part of Russia, is considered. The possibility of using wind and solar energy to provide electricity to domestic consumers is analyzed on the example of one house with a living area of 60 sq. m. Calculations are made and parameters of the wind farm, solar panels and accumulators are determined based on the provision of electricity from the wind farm and battery, since in non-Sunny times and windless days, as a rule, the solar battery operates. Based on the calculations, the parameters were determined and an inverter was selected for the proposed power supply system.

**Keywords:** renewable power generation, diesel generator, power supply, electrical engineering, renewable energy sources, wind turbine, solar panel, batteries

**Suggested citation:** Galkin V.P., Gorjaev A.A., Balantseva N.B., Kalinicheva O.A., Kalinina A.A., Siroto A.V., Tarlakov Y.V., Usachev M.S. *Gibridnoe энергообеспечение жилых поселений в РФ* [Hybrid power supply of residential settlements in Russian Federation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 100–108. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-100-108

## References

- [1] *Agroklimaticheskiy spravochnik po Arkhangel'skoy oblasti* [Agro-climatic guide to the Arkhangelsk region]: Leningrad: Gidrometizdat, 1961, 220 p.
- [2] Goryaev A.A., Petukhov S.V., Balantseva N.B. *Energoobespechenie v Arkticheskoy zone Arkhangel'skoy oblasti i Nenetskogo avtonomnogo okruga (NAO)* [Power supply in the Arctic zone of the Arkhangelsk region and the Nenets Autonomous Okrug (NAO)]. I Rossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Prirodopol'zovanie v Arktike: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya» [I Russian scientific and practical conference «Environmental management in the Arctic: current state and development prospects»], Yakutsk, 22–25 September 2015. Yakutsk: NEFU, 2015, pp. 191–200.
- [3] Berezkin M.Yu., Sinyugin O.A. *Geografiya innovatsiy i vozobnovlyаемая энергетика mira* [Geography of Innovations and Renewable Energy of the World]. *Malaya energetika* [Small Energy], 2011, no. 1–2, pp. 3–5.
- [4] Shepvalova O.V. *Ispol'zovanie vozobnovlyаемых источников energii v kompleksnykh sistemakh энергообеспечения sel'skikh zdaniy* [The use of renewable energy sources in integrated energy supply systems for rural buildings]. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Bulletin], 2011, no. 21, pp. 175–180.



- [5] Kol'nichenko G.I., SirotoV A.V., Tarlakov Ya.V. *Issledovanie i obosnovanie ekspluatatsionnykh kharakteristik dizel'-generatora, rabotayushchego na dizel'nom toplive s biodobavkami* [Research and justification of the performance characteristics of a diesel generator operating on diesel fuel with bioadditives]. *Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy konferentsii «Aktual'nye problemy energosberegayushchikh elektrotekhnologii» (APEET-2014)* [Proceedings of the III International Conference APEET-2014]. Ekaterinburg: URFU, 2014, pp. 230–232.
- [6] BP Statistical Review of World Energy, 2016. Available at: <http://www.bp.com/statisticalreview> (дата обращения 10.04.2020).
- [7] Lattimore B., Smith C.T., Titus B.D., Stupak I., Egnell G. Environmental factors in woodfuel production: Opportunities, risks, and criteria and indicators for sustainable practices // *Biomass and Bioenergy*, 2009, no. 33(10), pp. 1321–1342.
- [8] *Maloizvestnoe oborudovanie dlya proizvodstva elektroenergii* [Little-known equipment for the production of electricity], 2016. Available at: <http://nnhpe.spbstu.ru/maloizvestnoe-oborudovanie-dlya-proizvodstva-elektroenergii/> (accessed 15.06.2019).
- [9] *Obzor elektroenergeticheskoy otrasli Rossii* [Overview of the Russian electric power industry], 2018 Available at: <https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-power-market-russia-2018/%24FILE/EY-power-market-russia-2018.pdf> (accessed 10.04.2020).
- [10] Tokarev G.G. *Gazogeneratornye avtomobili* [Gas generating cars]. Moscow: GNT Publishing house of engineering literature, 1955, 207 p.
- [11] *Obzor sovremennykh PTU maloy moshchnosti (do 1000 kVt)* [A review of modern low-power vocational schools (up to 1000 kW)]. St. Petersburg: NTTs MTT LLC, 2015. 41 p. Available at: <http://nnhpe.spbstu.ru/wp-content/uploads/2015/02/Obzor-PTU-maloy-moshchnosti.pdf> (accessed 05.08.2019)
- [12] Elistratov V.V. *Vozobnovlyаемая энергетика* [Renewable energy]. St. Petersburg: Politekhnikeskiiy un-t [Polytechnic University], 2016, 442 p.
- [13] Vasil'ev I.A., Lyuminarskaya E.S., Selivanov K.V. *Gibridnaya энергетика kak sposob elektrifikatsii geograficheski izolirovannykh potrebiteley* [Hybrid energy as a way of electrifying geographically isolated consumers]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2018, no. 4–2 (330), pp. 154–161.
- [14] Vasil'ev I.A., Lyuminarskaya E.S., Selivanov K.V. *Avtonomnaya sistema energosnabzheniya s mikroprotsessornym upravleniem* [Autonomous power saving system with microprocessor control]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport] 2019, no. 2, pp. 21–26.
- [15] Selivanov K.V. *Analiz sposobov malogo raspredelenogo elektrosnabzheniya* [Analysis of small distributed power supply methods]. *International research journal*, 2017, no. 01 (55), part 4, pp. 107–110.
- [16] Knyazeva G.A. *Bioenergotekhnologii: novye napravleniya razvitiya regional'nogo lesnogo sektora* [Bioenergy technologies: new directions for the development of the regional forestry sector]. *Sotsial'no-ekonomicheskie, politicheskie i istoricheskie aspekty razvitiya severnykh i arkticheskikh regionov Rossii: Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Socio-economic, political and historical aspects of the development of the northern and Arctic regions of Russia: Materials of the All-Russian Scientific Conference (with international participation)]. Syktyvkar, October 17–18, 2018. Syktyvkar: Komi Republican Academy of Public Service and Management, 2018, pp. 20–25.
- [17] Langholtz M.H.; Stokes B.J.; Eaton L.M. 2016. 2016 Billion-ton report: Advancing domestic resources for a thriving bioeconomy, Volume 1: Economic availability of feedstock. U.S. Department of Energy. ORNL/TM-2016/160. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. 411p. DOI: 10.2172/1271651.
- [18] Popel' O.S., Fortov V.E. *Energetika v sovremennoy mire* [Energy in the modern world]. Dolgoprudny: Intellect, 2011, 168 p.
- [19] Nivala M., Anttila P., Laitila J., Salminen O., Flyktman M. A GIS-based methodology to estimate the regional balance of potential and demand of forest chips // *J. of Geographic Information Systems*, 2016, no. 8, 633–662.
- [20] Goerndt M.E., D'Amato A., Kabrick J. Chapter 4: Wood Energy and Forest Management // *Wood Energy in Developed Economies* / Ed F.X. Aguilar. London, UK: Earthscan Publishing, 2014, pp. 93–127.

## Authors' information

**Galkin Vladimir Pavlovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [vgalkin@mgul.ac.ru](mailto:vgalkin@mgul.ac.ru)

**Goryaev Arkadiy Alekseevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, [ark16111936@gmail.com](mailto:ark16111936@gmail.com)

**Balantseva Natal'ya Borisovna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

**Kalinicheva Oksana Aleksandrovna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

**SirotoV Aleksandr Vladislavovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [sirotoV@mgul.ac.ru](mailto:sirotoV@mgul.ac.ru)

**Kalinina Alena Anatol'evna** — Leading Engineer of the BMSTU (Mytishchi branch), [kalinina@mgul.ac.ru](mailto:kalinina@mgul.ac.ru)

**Tarlakov Yakov Viktorovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [tarlakov@mgul.ac.ru](mailto:tarlakov@mgul.ac.ru)

**Usachev Maksim Sergeevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), [usachev@mgul.ac.ru](mailto:usachev@mgul.ac.ru)

Received 26.05.2020.

Accepted for publication 16.11.2020.