

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 532.5

А.А. Куликов, И.В. Иванова, И.Н. Дюкова

ЭНЕРГИЯ ДАВЛЕНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЖИДКОЙ ЧАСТИЦЫ

Введение. В настоящее время в лесной и деревообрабатывающей промышленности внедрение объемного гидропривода способствует комплексной механизации лесозаготовительных производств, повышению уровня автоматизации производства, созданию многофункциональных машин и установок, исключению при выполнении некоторых трудоемких и опасных с точки зрения охраны труда производственных операций, повышению выработки на одного рабочего, снижению себестоимости лесопродукции. Особо нужно подчеркнуть, что приводами оснащено большинство вновь создаваемых и наиболее перспективных лесозаготовительных, трелевочных с захватом, сучкорезных и других лесных машин, сортировочно-сплоточных агрегатов, полуавтоматических линий для раскряжевки хлыстов и бревен большой длины, деревообрабатывающих станков с программным управлением и др.

Гидропривод имеет преимущества по сравнению с другими типами приводов там, где требуется создание значительной мощности, быстродействие, позиционная точность рабочих органов, компактность, малая масса, высокая надежность работы и разветвленность привода. В гидроприводе жидкость является энергоносителем, благодаря рабочей жидкости устанавливается связь между насосом и гидродвигателями. Кроме того, рабочая жидкость обеспечивает охлаждение пар трения и отвод от них тепла и продуктов износа, а также смазку подвижных частей элементов гидропривода. При эксплуатации гидроприводов нужно создавать такие условия, при которых рабочая жидкость как можно дольше сохраняла бы свои первоначальные физические свойства.

Уточнение физической модели процессов энергетического взаимодействия частиц в потоке жидкости или газа позволяет повысить точность и наглядность математического описания многих процессов, например, та-

ких, которые встречаются в гидроприводах различных устройств, применяемых в лесной отрасли. Детализация математической модели позволяет на предпроектной стадии определять более точные расчётно-конструктивные характеристики проектируемого оборудования.

Суммарная энергия любого тела, как известно, в общем случае может состоять из внутренней, кинетической и потенциальной энергий. Факт наличия у тела энергии можно установить экспериментальным путём. Например, тело, подвешенное на нити, обладает потенциальной энергией в поле гравитационных сил. Чтобы в этом убедиться, достаточно создать соответствующие условия – перерезать нить. Тело начнёт движение, а результирующая гравитационных сил, приложенных к телу со стороны окружающей среды, будет совершать положительную механическую работу. В результате кинетическая энергия тела будет возрастать. При этом внутренняя энергия может оставаться постоянной. Возможность совершения механической работы с участием тела после создания определённых условий, не связанных с подводом энергии, доказывает тот факт, что тело обладает тем или иным видом энергии.

Цель исследования – установить и доказать наличие дополнительного вида энергии, которым обладает элементарная индивидуальная частица жидкости, находящаяся под давлением.

Материалы и методика исследования. Известно [Сивухин, 2005], что убыль потенциальной энергии тела в поле гравитационных сил, при его перемещении из одного положения в пространстве в другое, измеряется той работой, которую совершают при этом действующие на тело гравитационные силы:

$$\Pi_1 - \Pi_2 = A_{\text{гр}}, \quad (1)$$

где Π_1 и Π_2 – потенциальная энергия тела в начальном и конечном положениях соответственно, Дж; $A_{\text{гр}}$ – работа гравитационных сил, Дж.

Выберем в качестве тела элементарную индивидуальную частицу (ЭИЧ) в объёме жидкости и рассмотрим подробнее отдельные виды её суммарной энергии. Для этого выберем в пространстве, занятом жидкостью, произвольную точку. Вокруг этой точки выделим элементарный индивидуальный объём $d\omega$, м^3 , площадь поверхности которого $d\sigma$, м^2 , а масса dm , кг.

Термодинамическими параметрами, которые характеризуют состояние жидкости в элементарном индивидуальном объёме $d\omega$ являются: p – абсолютное давление, Па; v – удельный объём, $\text{м}^3/\text{кг}$; T – абсолютная температура,

тура, К. Известно, что все указанные термодинамические параметры состояния, а также удельная внутренняя энергия u , Дж/кг, определяются в такой системе координат, в которой ЭИЧ, как целое, покоится. При этом абсолютное давление p равно гидростатическому давлению в той точке жидкости, в которой находится ЭИЧ. Само гидростатическое давление равно, как известно, модулю нормальных напряжений в данной точке покоящейся жидкости [Лойцянский, 1970]. Рассматриваемая жидкость может быть несжимаемой или сжимаемой (газ).

С помощью мысленного эксперимента убедимся в том, что ЭИЧ, находящаяся внутри жидкости под давлением p , обладает, помимо внутренней, кинетической и потенциальной (в поле гравитационных сил) энергий, ещё одним дополнительным видом энергии. Разместим в объёме жидкости вертикальный отводной канал с подвижным поршнем таким образом, чтобы небольшая часть жидкости, включающая ЭИЧ, оказалась в отводном канале непосредственно под поршнем. С помощью некоторого устройства создадим возможность для того, чтобы внешнее давление над поршнем в отводном канале могло плавно уменьшаться. После этого начнём достаточно медленно снижать внешнее давление над поршнем от начального значения, равного гидростатическому давлению в точке, где вначале находилась рассматриваемая ЭИЧ. В результате этого поршень и находящаяся под ним жидкость начнут подниматься по отводному каналу вертикально вверх. В результате такого подъёма главный вектор поверхностных сил, действующих на поверхность $d\sigma$ со стороны остальной жидкости, будет совершать положительную работу, так как известно, что в неподвижной жидкости он по модулю равен силе тяжести ЭИЧ, но направлен в противоположную сторону [Лойцянский, 1970].

Процесс подъёма ЭИЧ может проходить достаточно медленно, в результате чего у ЭИЧ будет изменяться только потенциальная энергия в поле силы тяжести, а ни кинетическая, ни внутренняя энергии изменяться не будут. Последнее объясняется тем, что расширение ЭИЧ, в случае сжимаемой жидкости, имеющей, например, свойства идеального газа, вызванное снижением абсолютного давления p при подъёме, в медленном процессе может быть практически изотермическим. В таком постоянстве внутренней энергии просматривается аналогия с телом, падающим в поле гравитационных сил. После перерезания нити, на которой подвешено тело, самопроизвольно совершается работа гравитационными силами, действующими на тело со стороны окружающей среды, в результате чего возрастает кинетическая энергия тела, а внутренняя остаётся постоянной.

Убыль энергии, связанной с давлением, которой обладает ЭИЧ в объёме жидкости, определяется величиной работы, совершённой силами, действующими на ЭИЧ со стороны окружающей среды. Величина этой работы зависит от высоты подъёма ЭИЧ в отводном канале. Высота подъёма, в частности, будет тем больше, чем глубже расположена ЭИЧ в слое жидкости. Например, чем глубже ЭИЧ расположена в покоящейся жидкости, то есть чем больше гидростатическое давление, которое равно абсолютному давлению p этой ЭИЧ, тем большая работа может быть совершена при её подъёме, а значит, тем большей энергией ЭИЧ изначально обладает.

Этот вид энергии, которым обладает любая индивидуальная частица внутри жидкости, зависящий от абсолютного давления p , может быть назван баропотенциальной энергией.

По определению убыль баропотенциальной энергии при перемещении индивидуальной жидкой частицы из одного положения в жидкости в другое измеряется той работой, которую совершают при этом поверхностные силы, действующие со стороны окружающей жидкости на поверхность индивидуальной жидкой частицы.

Применяя это определение к ЭИЧ, рассмотренной в мысленном эксперименте, подтверждающем существование баропотенциальной энергии, можем записать:

$$dE_{p1} - dE_{p2} = dL_{\Sigma}, \quad (2)$$

где dE_{p1} и dE_{p2} – значения баропотенциальной энергии ЭИЧ в начале и в конце подъёма по отводному каналу, Дж; dL_{Σ} – суммарная работа, совершённая в ходе подъёма поверхностными силами, действующими на поверхность $d\sigma$ ЭИЧ со стороны остальной жидкости, Дж.

В общем случае работа сжимаемой жидкости dL_{Σ} состоит из двух частей – из положительной работы $dL_{\text{под}}$ главного вектора поверхностных сил при подъёме ЭИЧ по отводному каналу на высоту h , м, и из отрицательной работы $dL_{\text{рас}}$, совершаемой поверхностными силами при увеличении объёма $d\omega$ ЭИЧ, вызванном снижением её абсолютного давления p в ходе подъёма.

В результате этого выражение (2), после введения удельных величин, записывается в виде:

$$e_{p1} \cdot dm - e_{p2} \cdot dm = l_{\Sigma} \cdot dm = (l_{\text{под}} - l_{\text{рас}}) \cdot dm, \quad (3)$$

где e_{p1} и e_{p2} – значения удельной баропотенциальной энергии ЭИЧ в начале и в конце подъёма по отводному каналу на высоту h соответственно, Дж/кг;

l_{Σ} – суммарная удельная работа, совершённая поверхностными силами, действующими на поверхность $d\sigma$ ЭИЧ в ходе подъёма на высоту h , Дж/кг; $l_{\text{под}}$ – положительная удельная работа главного вектора поверхностных сил при подъёме ЭИЧ по отводному каналу на высоту h , Дж/кг; $(-l_{\text{рас}})$ – отрицательная удельная работа, совершаемая поверхностными силами при увеличении объёма $d\omega$ ЭИЧ, вызванном снижением давления в ходе подъёма, Дж/кг.

После деления (3) на dm получаем:

$$e_{p1} - e_{p2} = l_{\text{под}} - l_{\text{рас}}. \quad (4)$$

Примечание. Знак минус у величины $l_{\text{рас}}$ в (4) обусловлен тем, что при расширении объёма $d\omega$ поверхностными силами, действующими на поверхность $d\sigma$ ЭИЧ, совершается отрицательная работа, так как перемещение границы поверхности $d\sigma$ при расширении направлено противоположно напряжениям, характеризующим плотность распределения поверхностных сил, которые приложены к точкам этой поверхности.

Величина $l_{\text{рас}}$ в (4) рассчитывается по известной формуле [Кириллин и др., 2008; Куликов, 2015]:

$$l_{\text{рас}} = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv, \quad (5)$$

где v_1 и v_2 – значения удельных объёмов жидкости в ЭИЧ в начале и конце процесса подъёма, м³/кг; $p(v)$ – зависимость p от v в ходе подъёма, Па.

Построим внутри отводного канала вертикальную ось z с началом отсчёта в точке, где первоначально находилась ЭИЧ. Очевидно, что в этом случае величины v и p будут непрерывными функциями от z $v = v(z)$ и $p = p(z)$. В начале процесса подъёма $z = 0$, а в конце $z = h$. Соответственно, $v_1 = v(0)$ и $v_2 = v(h)$. В результате из (5) получаем:

$$l_{\text{рас}} = \int_{v(0)}^{v(h)} p(v) dv = \int_0^h p(z) \cdot v(z)' \cdot dz, \quad (6)$$

где $v(z)'$ – производная от $v(z)$ по z , м²/кг.

Величина $l_{\text{под}}$ в (4) равна отношению:

$$l_{\text{под}} = \frac{dL_{\text{под}}}{dm}. \quad (7)$$

При подъёме ЭИЧ по вертикальному отводному каналу вдоль оси z направление её перемещения и направление действующего на неё главного

вектора поверхностных сил совпадают. Соответственно, элементарная работа $dL_{\text{под}}$ при подъёме ЭИЧ на высоту h вычисляется по формуле:

$$dL_{\text{под}} = |d\vec{P}| \cdot h, \quad (8)$$

где $|d\vec{P}|$ – модуль главного вектора поверхностных сил, действующих со стороны остальной жидкости на поверхность $d\sigma$ ЭИЧ, Н.

Известно [Лойцянский, 1970], что модуль главного вектора поверхностных сил, приложенных к индивидуальной частице покоящейся жидкости, равен модулю действующей на неё силы тяжести:

$$|d\vec{P}| = |d\vec{F}_T| = g \cdot dm, \quad (9)$$

где $|d\vec{F}_T|$ – модуль силы тяжести ЭИЧ, Н; g – модуль вектора ускорения свободного падения, м/с^2 .

Из (7), с учётом (8) и (9), получаем:

$$L_{\text{под}} = gh. \quad (10)$$

Из основного уравнения гидростатики [Лойцянский, 1970] для рассматриваемого случая получаем:

$$v \cdot dp = v(z) \cdot dp(z) = v(z) \cdot p(z)'_z \cdot dz = -g dz, \quad (11)$$

где $p(z)'_z$ – производная от $p(z)$ по z , Па/м.

После интегрирования (11) в пределах от 0 до h получаем:

$$gh = - \int_0^h v(z) \cdot p(z)'_z \cdot dz. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (7), получаем:

$$L_{\text{под}} = - \int_0^h v(z) \cdot p(z)'_z \cdot dz. \quad (13)$$

Подставляя (6) и (13) в (4), получаем:

$$\begin{aligned} e_p(h) - e_p(0) &= \int_0^h v(z) \cdot p(z)'_z \cdot dz + \int_0^h p(z) \cdot v(z)'_z \cdot dz = \\ &= \int_0^h [v(z) \cdot p(z)]'_z \cdot dz = p(h) \cdot v(h) - p(0) \cdot v(0), \end{aligned} \quad (14)$$

где $e_p(0)$ – значение удельной баропотенциальной энергии в начале процесса (при $z = 0$), $e_p(0) = e_{p1}$, Дж/кг; $e_p(h)$ – значение удельной баропотенциальной энергии в конце процесса (при $z = h$), $e_p(h) = e_{p2}$, Дж/кг.

Из (14) следует, что удельная баропотенциальная энергия жидкости с точностью до константы равна произведению абсолютного давления p на удельный объём v :

$$e_p = p \cdot v + C, \quad (15)$$

где C – неизвестная константа, Дж/кг.

Полагая из очевидных соображений, что при p , равном нулю, значение e_p также будет равно нулю, из (15) получаем:

$$C = 0. \quad (16)$$

В результате окончательная формула для вычисления удельной баропотенциальной энергии жидкости имеет вид:

$$e_p = p \cdot v. \quad (17)$$

Отметим, что и в частном случае несжимаемой жидкости формула (17) для баропотенциальной энергии сохранится, так как $l_{\text{рас}}$ в (4) будет равна нулю, а после интегрирования (13) при $v = \text{const}$ получаем (14).

Результаты исследований. В соответствии с (17) величина e_p однозначно определяется двумя термодинамическими параметрами состояния. Из этого следует, что удельная баропотенциальная энергия e_p является функцией состояния, как, например, и удельная внутренняя энергия.

Выводы. В результате приходим к следующему выводу. Удельная энтальпия жидкости или газа, которая по определению равна сумме удельной внутренней энергии и произведения $(p \cdot v)$, представляет по физическому смыслу сумму двух видов энергии – внутренней и баропотенциальной. Помимо этих двух, термодинамическая система, например, индивидуальная частица в объёме жидкости, может обладать ещё двумя видами энергии – кинетической и потенциальной.

После введения баропотенциальной энергии удобную и наглядную форму приобретает формулировка первого закона термодинамики для открытых термодинамических систем.

Рассмотрим это на примере паровой турбины, работающей в стационарном режиме. На вход турбины поступает перегретый пар с параметрами $p_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}, v_{\text{вх}}$. Для наглядности будем считать, что выходит из турбины тоже перегретый пар с параметрами $p_{\text{вых}}, T_{\text{вых}}, v_{\text{вых}}$. Первый закон термодинамики для рассматриваемого примера, при условии, что эффектами, связанными с трением, можно пренебречь, формулируется следующим образом. В стационарном режиме внутренняя энергия всей паротурбинной

установки не изменяется. Следовательно, суммарное количество поступившей в установку энергии из окружающей среды за некоторый интервал времени должно быть равно суммарному количеству энергии, переданному из неё в окружающую среду за то же время. На входе и выходе турбины с рабочим телом переносится четыре вида энергии: внутренняя $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$; кинетическая $K_{\text{вх}}$ и $K_{\text{вых}}$; потенциальная $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$; баропотенциальная $E_{p \text{ вх}}$ и $E_{p \text{ вых}}$, Дж. В окружающую среду от турбины передаётся техническая работа L_t , Дж.

Таким образом, первый закон термодинамики для открытой термодинамической системы – паровой турбины – записывается в виде равенства:

$$U_{\text{вх}} + K_{\text{вх}} + P_{\text{вх}} + E_{p \text{ вх}} = U_{\text{вых}} + K_{\text{вых}} + P_{\text{вых}} + E_{p \text{ вых}} + L_t. \quad (18)$$

После деления обеих частей равенства (18) на массу рабочего тела, прошедшего через установку за указанное время, из (18) получаем:

$$l_t = (u_{\text{вх}} - u_{\text{вых}}) + (k_{\text{вх}} - k_{\text{вых}}) + (p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}) + (e_{p \text{ вх}} - e_{p \text{ вых}}). \quad (19)$$

где $u_{\text{вх}}$, $u_{\text{вых}}$, $k_{\text{вх}}$, $k_{\text{вых}}$, $p_{\text{вх}}$, $p_{\text{вых}}$, $e_{p \text{ вх}}$, $e_{p \text{ вых}}$ – значения удельных энергий рабочего тела на входе и выходе – внутренней, кинетической, потенциальной, баропотенциальной соответственно, Дж/кг; l_t – удельная техническая работа турбины, Дж/кг.

При применении традиционных допущений о малости отличий на входе и выходе кинетической и потенциальной энергий рабочего тела из (19) получаем известную формулу:

$$l_t = (u_{\text{вх}} + p_{\text{вх}} v_{\text{вх}}) - (u_{\text{вых}} + p_{\text{вых}} v_{\text{вых}}) = h_{\text{вх}} - h_{\text{вых}}, \quad (20)$$

где $h_{\text{вх}}$ и $h_{\text{вых}}$ – значения удельной энтальпии рабочего тела на входе и выходе паровой турбины соответственно, Дж/кг.

Традиционно физический смысл произведения $(p \cdot v)$ связывают с такими понятиями, как «работа проталкивания» или работа, производимая силами давления [Прандтль, 2000; Ландау, 2001; Кириллин и др., 2008]. Такой акцент на понятии «работа» при интерпретации величины $(p \cdot v)$ несколько затеняет её энергетическое содержание, так как любая работа – это всегда характеристика процесса, а удельная энергия – это характеристика состояния.

Более строгое физическое описание процесса энергообмена между частицами, находящимися в потоке жидкости или газа, позволяет в перспективе составлять наглядные энергетические балансы вместо традиционных тепловых балансов для различного оборудования, в том числе применяемого в лесном хозяйстве и при переработке древесины.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. дом МЭИ, 2008. 496 с.

Куликов А.А. Техническая термодинамика. Часть 1. Общие принципы. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 104 с.

Ландау Л.Д. Теоретическая физика. В 10 т. Т.6. Гидродинамика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 736 с.

Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1970. 904 с.

Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотичная динамика», 2000. 576 с.

Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 т. Т. 1. Механика. М.: МФТИ, 2005. 560 с.

References

Kirillin V.A., Sychev V.V., Sheindlin A.E. Technical thermodynamics for universities. 5th ed., reprint. and additional. M.: Publishing house of MEI, 2008. 496 p. (In Russ.)

Kulikov A.A. Technical thermodynamics. Part 1. General principles. St. Petersburg: SPbGLTU, 2015. 104 p. (In Russ.)

Landau L.D. Theoretical physics. In 10 vols. Vol. 6. Hydrodynamics. M.: FIZMATLIT, 2001. 736 p. (In Russ.)

Loitsyansky L.G. Mechanics of liquid and gas. M.: Nauka, 1970. 904 p. (In Russ.)

Prandtl L. Hydroaeromechanics. Izhevsk: SIC «Regular and chaotic dynamics», 2000. 576 p. (In Russ.)

Sivukhin D.V. General course of physics. In 5 vols. Vol.1. Mechanics. M.: MIPT, 2005. 560 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 10.10.2024

Куликов А.А., Иванова И.В., Дюкова И.Н. Энергия давления индивидуальной жидкой частицы // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 278–288. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.278-288

Проанализированы виды энергий, которыми обладает элементарная индивидуальная частица (ЭИЧ) в объёме жидкости, находящаяся под давлением p . Установлено, что помимо внутренней, кинетической и потенциальной (в поле гравитационных сил) энергий, ЭИЧ обладает ещё одним дополнительным видом энергии. Причем, чем глубже ЭИЧ расположена в покоящейся жидкости, то есть чем больше гидростатическое давление, которое равно абсолютному давлению p этой ЭИЧ, тем большая работа может быть совершена при её подъёме, а значит, тем большей энергией ЭИЧ изначально обладает. Этот вид энергии, которым обладает любая индивидуальная частица внутри жидкости, зависящий от абсолютного давления p , назван баропотенциальной энергией. Введение понятия

баропотенциальной энергии позволяет корректно и в удобной форме сформулировать первый закон термодинамики для открытых термодинамических систем.

Ключевые слова: энергия, элементарная индивидуальная частица, гидростатическое давление, баропотенциальная энергия, открытая термодинамическая система, первый закон термодинамики.

Kulikov A.A., Ivanova I.V., Dyukova I.N. The pressure energy of an individual liquid particle. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 278–288 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.278-288

The types of energies possessed by an elementary individual particle (EIP) in a volume of liquid under pressure are analyzed. It has been established that in addition to internal, kinetic and potential energy (in the field of gravitational forces), EIP has another additional type of energy. Moreover, the deeper the EIP is located in a resting liquid, that is, the greater the hydrostatic pressure, which is equal to the absolute pressure p of this EIP, the more work can be done when it rises, which means the more energy the EIP initially possesses. This type of energy possessed by any individual particle inside a liquid, depending on the absolute pressure p , is called baropotential energy. The introduction of the concept of baropotential energy makes it possible to formulate the first law of thermodynamics for open thermodynamic systems correctly and in a convenient form.

Keywords: energy, elementary individual particle, hydrostatic pressure, baropotential energy, open thermodynamic system, the first law of thermodynamics.

КУЛИКОВ Александр Александрович – заведующий кафедрой промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. ORCID: 0009-0009-6113-7397. SPIN-код: 7746-2999. AuthorID: 967857.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: alalkulikov@mail.ru

KULIKOV Aleksandr A. – PhD (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Industrial Energy, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0009-6113-7397. SPIN-code: 7746-2999. Author ID: 967857.

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: alalkulikov@mail.ru

ИВАНОВА Ирена Викторовна – доцент кафедры промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. ORCID: 0009-0009-4068-6741. SPIN-код: 9424-7866. AuthorID: 955471.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: irenalta@mail.ru

IVANOVA Irena V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Industrial Energy, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0009-4068-6741. SPIN-code: 9424-7866. Author ID: 955471.

194021, Institutsky per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: irenalta@mail.ru

ДЮКОВА Ирина Николаевна – старший преподаватель кафедры промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0007-3367-4916. SPIN-код: 1314-2594. AuthorID: 961143.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: i.n.dyukova@mail.ru

DYUKOVA Irina N. – Senior Lecturer of the Department of Industrial Energy, St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0007-3367-4916. SPIN-code: 1314-2594. Author ID: 961143.

194021, Institutsky per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: i.n.dyukova@mail.ru