

УДК 621.311

**ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ НАСОСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И
ПОТРЕБИТЕЛЯ ТЕПЛОТЫ
PARAMETERIZATION OF PUMPING EQUIPMENT AND HEAT
CONSUMER**

М.И. Феськов, Е.М. Снопков

Научный руководитель – Т.А. Петроваская, старший преподаватель
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь

petrovskaya@bntu.by

M. Feskov, E. Snopkov

Supervisor – T. Petrovskaya, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в статье рассматриваются вопросы параметризации насосного оборудования и потребителей теплоты в промышленных тепловых системах. Рассматриваются ключевые аспекты согласования их рабочих режимов для обеспечения энергоэффективности, надежности и экономичности теплоснабжения. Особое внимание уделено методам расчета и оптимизации гидравлических и тепловых параметров, включая давление, расход и сопротивление системы. Анализируются современные подходы к автоматизированному управлению насосными агрегатами и регулированию тепловых нагрузок в условиях переменного режима эксплуатации.

Abstract: the article discusses the issues of parameterization of pumping equipment and heat consumers in industrial heating systems. The key aspects of coordinating their operating modes to ensure energy efficiency, reliability and cost-effectiveness of heat supply are considered. Special attention is paid to the calculation and optimization methods of hydraulic and thermal parameters, including pressure, flow rate and resistance of the system. Modern approaches to automated control of pumping units and regulation of thermal loads under variable operating conditions are analyzed.

Ключевые слова: промышленная теплоэнергетика, насосное оборудование, сезонные потребители теплоты, постоянные потребители теплоты, тепловая нагрузка, параметризация, гидравлический режим, энергоэффективность, сетевой насос, насос подпитки, параллельная работа насосов, последовательная работа насосов, проектирование и эксплуатация систем теплоснабжения, потери тепла, тепловые сети.

Keywords: industrial heat power engineering, pumping equipment, seasonal heat consumers, permanent heat consumers, heat load, parameterization, hydraulic mode, energy efficiency, mains pump, make-up pump, parallel operation of pumps, sequential operation of pumps, design and operation of heat supply systems, heat loss, heating networks.

Введение

Современная тепловая промышленность сталкивается с возрастающими требованиями к энергоэффективности, надежности и экологической

безопасности теплоснабжающих систем. Одним из ключевых факторов, определяющих их работоспособность, является правильная параметризация насосного оборудования и потребителей теплоты. Оптимизация их взаимодействия требует точного расчета и регулировки таких параметров, как напор, производительность, температурный график и гидравлическое сопротивление. От согласованности их работы зависят не только технико-экономические показатели, но и устойчивость тепловых режимов в промышленных и коммунальных сетях.

Основная часть

Чтобы разобраться в параметризации насосов, разберём сначала с видами тепловых нагрузок и как их рассчитывать. В системах центрального теплоснабжения, теплота расходуется на отопление зданий, нагревание приточного воздуха в установках вентиляции и кондиционирования, горячее водоснабжение, а также на технологические процессы в промышленности.

В системах отопления и вентиляции теплота расходуется, только при сравнительно низких температурах наружного воздуха. Поэтому такие потребители тепловой энергии называются сезонными, а их тепловые нагрузки - сезонными тепловыми нагрузками.

Тепловая энергия в системах горячего водоснабжения и в технологических процессах промышленных предприятий расходуется непрерывно в течение года и не так сильно зависит от температуры наружного воздуха. Поэтому тепловые нагрузки на горячее водоснабжение и технологические нужды считаются круглогодичными тепловыми нагрузками. Только некоторые технологические процессы (к примеру сушка зерна, кормов, древесины и т.д.) связаны с сезонным потреблением тепловой энергии.

Для сезонного теплового потребления характерны следующие особенности:

- тепловые нагрузки сильно зависят от изменения температуры наружного воздуха;
- фактические значения годового расхода теплоты могут сильно отличаться от средних расчётных данных по данному региону в обе стороны, потому что считается по среднему значению температур;
- изменения тепловой нагрузки на отопление в течение суток в основном за счет теплоустойчивости наружных ограждений зданий незначительны;
- расходы теплоты на вентиляцию может отличаться в течение суток, т.к. режимы работы вентиляции зависят от смен на конкретном предприятии.

Как показано на графике ниже, изменение тепловой нагрузки на отопление и вентиляцию в зависимости от температуры наружного воздуха имеет линейную зависимость (рисунок 1).

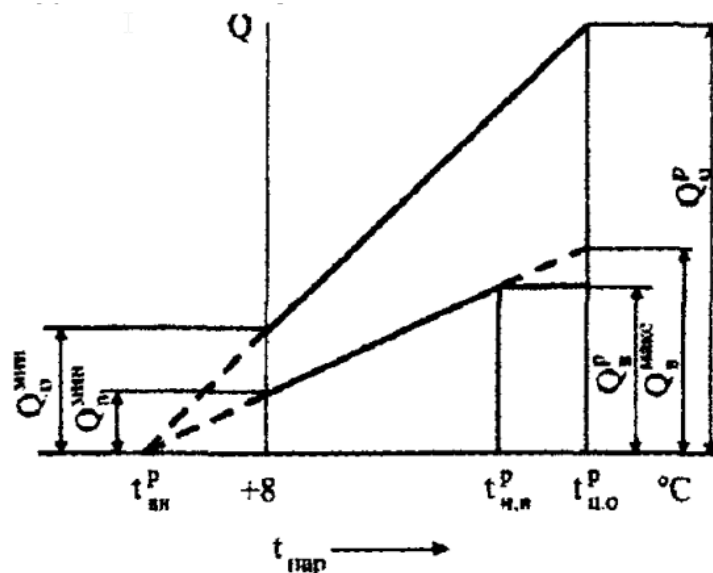


Рисунок 1 – График расхода на отопление Q_0 и вентиляцию Q_v в зависимости от температуры наружного воздуха $t_{нар}$. [4]

Тепловое потребление для горячего водоснабжения в течение года изменяется мало, но отличается большой неравномерностью по часам суток. Летом расход теплоты в системах горячего водоснабжения жилых зданий снижается на 30-35% по сравнению с зимой. Это объясняется тем, что в летнее время температура воды в холодном водопроводе на 10-12°C выше, чем в зимний период.

Удельные нормы технологического потребления теплоты относятся к единице продукции, они непрерывно изменяются в связи с постоянным совершенствованием технологических процессов. Поэтому расходы теплоты на производственные нужды следует определять по материалам технологических проектов или по ведомственным нормам проектирования.

Для отопления жилищного фонда действуют следующие нормы потребления тепловой энергии:

Решение Минского Государственного Исполнительного Комитета об установлении средних нормативов потребления тепловой энергии на отопление и подогрев воды

На основании абзацев второго и третьего части первой пункта 29 Положения о порядке расчетов и внесения платы за жилищно-коммунальные услуги и платы за пользование жилыми помещениями государственного жилищного фонда, а также возмещения расходов на электроэнергию, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 июня 2014 г. № 571, Минский городской исполнительный комитет решил:

- установить средний норматив потребления тепловой энергии на: 1.1. отопление 1 кв. метра общей площади жилых помещений по жилым домам, не оборудованным приборами группового учета расхода тепловой энергии, на отопительный период 2024/2025 года в размере 0,0154 Гкал/1 кв. метр при полном месяце отопления;
- подогрев 1 куб. метра воды по жилым домам, не оборудованным приборами группового учета расхода тепловой энергии, на период с 1

сентября 2024г. по 31 августа 2025 г. в размере 0,0754 Гкал/1 куб. метр.

Настоящее решение вступает в силу после его официального опубликования.

При расчете систем теплоснабжения выделяют два вида тепловых нагрузок: расчетные тепловые нагрузки и отличные от расчетных (фактические). В их сопоставлении возникает необходимость, в частности, при наладке и регулировании систем отопления зданий и тепловых сетей. Расчетные тепловые нагрузки на отопление и вентиляцию зданий зависят от температуры наружного воздуха для данного района, наружного объема зданий и их удельных тепловых характеристик. Под расчетной тепловой нагрузкой на горячее водоснабжение понимают максимальный часовой расход теплоты за сутки наибольшего потребления. Расчетные тепловые нагрузки позволяют определить расход теплоносителя, диаметры теплопроводов тепловых сетей, мощность источника теплоснабжения, расход топлива на выработку тепловой энергии источником теплоснабжения. При наличии проектной документации расчетные тепловые нагрузки и расходы теплоносителя следует принимать по проектным данным. Если же такие данные отсутствуют их следует рассчитывать по формулам далее.

Расчетную потребность теплоты на отопление и вентиляцию зданий определяют по формулам, кДж/ч (ккал/ч):

$$Q_o^p = x_o V (t_{в.н.}^p - t_{н.о.}^p) \quad (1)$$

$$Q_v^p = x_v V (t_{в.н.}^p - t_{н.в.}^p) \quad (2)$$

где x_o , x_v – соответственно удельная тепловая характеристика здания для отопления и вентиляции, кДж/(м³-ч-°С) [(ккал/(м³-ч-°С))];

V – наружный объем зданий; м³;

$t_{в.н.}^p$, – расчетная температура воздуха внутри отапливаемых помещений здания, °С;

$t_{н.в.}^p$ и $t_{н.о.}^p$ – расчетная температура наружного воздуха для отопления и вентиляции для данного района, °С.

Зная тепловую нагрузку для отопления и вентиляции, можно определить общую нагрузку для теплоснабжения здания или группы зданий, кДж/ч (ккал/ч):

$$Q_{о.в.}^p = Q_v^p + Q_o^p \quad (3)$$

где $Q_{о.в.}^p$ – тепловая нагрузка для отопления и вентиляции расчетная, кДж/ч (ккал/ч);

Q_v^p – тепловая нагрузка для вентиляции расчетная, кДж/ч (ккал/ч);

Q_o^p – тепловая нагрузка для отопления расчетная, кДж/ч (ккал/ч).

Текущие сезонные тепловые нагрузки при любых температурах наружного воздуха $t_{нар}$, отличающихся от расчетных, например, для отопления, определяются по формуле:

$$Q = Q_o^p \frac{t_{в.н.}^p - t_{нар}}{t_{в.н.}^p - t_{н.о.}^p} \quad (4)$$

где $t_{в.н.}^p$ – расчетная наружная температура для вентиляции, °С;

$t_{нар}$ – температура наружного воздуха, °С;

$t_{н.о.}^p$ – расчетная наружная температура для отопления, °С.

Зависимость (4) является линейной, и на ее основе легко могут быть построены графики часового расхода теплоты на отопление и вентиляцию, приведенные на рисунке 1, для этого достаточно определить минимальный расход теплоты при температуре наружного воздуха $t_{нар}=+8^{\circ}\text{C}$ (начало отопительного периода) и максимальный, соответственно, при наружных температурах $t_{в.н.}^p$ и $t_{н.о.}^p$. Горизонтальный участок графика нагрузки вентиляции в интервале наружных температур $t_{н.о.}^p \dots t_{в.н.}^p$ соответствует случаю, когда максимальный расход теплоты на вентиляцию определяется по расчетной температуре наружного воздуха для проектирования вентиляции. Недостающая теплота может компенсироваться возвратом части отводимого из помещений наружу теплого воздуха на всас вентиляторов приточных установок, если это допускается по санитарным нормам.[1]

Обычно за расчетную температуру наружного воздуха для проектирования общей обменной вентиляции принимают среднюю температуру наиболее холодного периода, составляющего приблизительно 15% от продолжительности отопительного сезона.

В системах кондиционирования воздуха, а также в системах вентиляции, предназначенных для борьбы с вредными веществами, или при компенсации приточным воздухом вытяжки от местных отсосов расчетную температуру наружного воздуха для проектирования вентиляции принимают равной расчетной температуре наружного воздуха для проектирования отопления.

Для развивающейся жилой и общественной застройки районов городов и населенных пунктов, расчетный расход теплоты на отопление и вентиляцию можно определить следующим образом, кДж/ч (ккал/ч):

- на отопление зданий при $t_{н.о.}^p$.

$$Q_{o(жил.)}^p \sim q \cdot F \quad (5)$$

- на отопление зданий

$$Q_{o(общ.)}^p = 0,25 \cdot Q_{o(жил.)}^p \quad (6)$$

- на вентиляцию зданий

$$Q_{в(общ.)}^p = 0,4 \cdot Q_{o(жил.)}^p \quad (7)$$

где F – общая жилая площадь застройки, м^2 ;

q – удельный расход теплоты на отопление жилого здания, $\text{Вт}/\text{м}^2$ [(ккал/(\text{м}^2\text{ч}))].

Расчетный расход сетевой воды в системе теплоснабжения зданий определяется по формуле, т/ч: [1]

$$G_{o.v.}^p = \frac{Q_{o.v.}^p}{C_B(t_{п.с.}^p - t_{o.с.}^p)} \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

где C_B - теплоемкость воды, кДж/(кг·°C) [ккал/(кг·°C)];

$t_{п.с.}^p$ - расчетная температура сетевой воды на входе в отопительную систему, °C (принимается ($t_{o.с.}^p$ принимается =95°C);

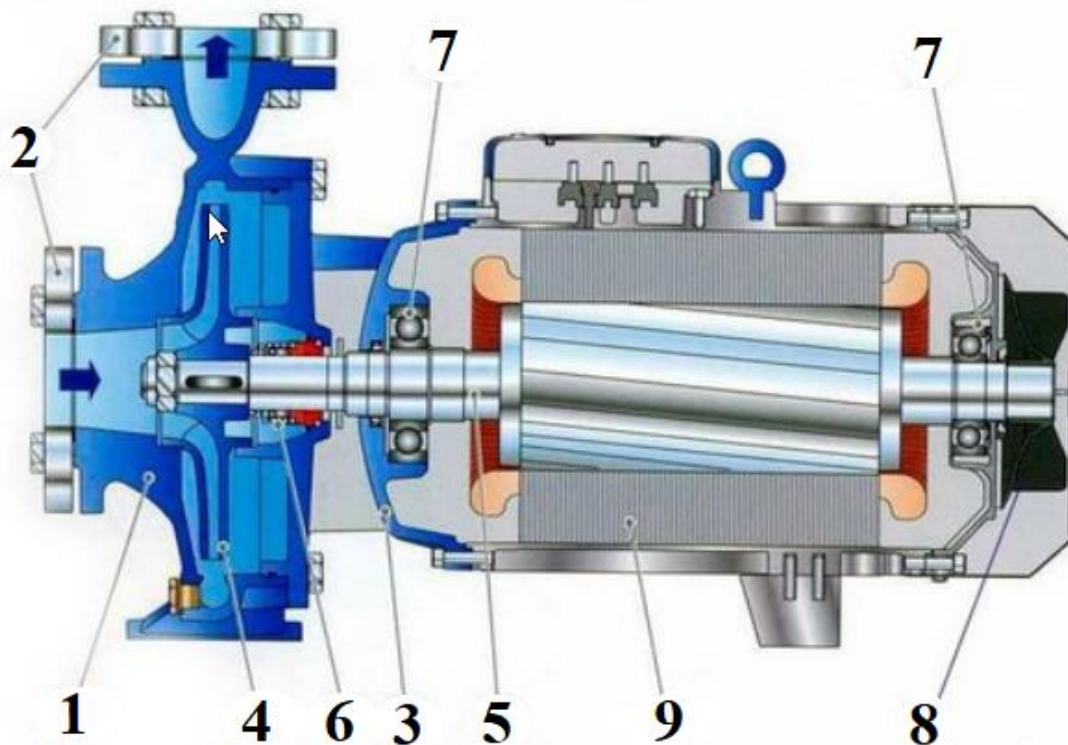
$t_{o.с.}^p$ - расчетная температура сетевой воды после системы отопления здания, °C ($t_{п.с.}^p$ принимается =70°C). [2]

При качественном регулировании по отопительной нагрузке общего отпуска теплоты от источника (при постоянном расходе сетевой воды изменяется ее нагрев) температурный график наружной теплосети и системы отопления здания в зависимости от температуры наружного воздуха может быть рассчитан по формулам, приведенным выше.[4]

По расходу сетевой воды $G_{o.v.}^p$ определяют диаметры трубопроводов и подбираются насосы.

В водяных тепловых сетях насосы используются для создания заданных давлений и подачи необходимого количества воды к потребителям теплоты. В паровых сетях насосами перекачивается конденсат от потребителей к тепловому центру (источнику теплоты). [4]

Схема сетевого центробежного электрического насоса представлена на рисунке 2:



- 1 – корпус насоса; 2 – ответные фланцы трубопроводов; 3 – корпус электродвигателя;
 4 – рабочее колесо; 5 – вал электродвигателя; 6 – уплотнение вала; 7 – подшипники качения;
 8 – крыльчатка охлаждения мотора; 9 – статор.

Рисунок 2 – Схема электрического центробежного насоса

Открытая и закрытая типы систем теплоснабжения:

Открытые системы теплоснабжения характеризуются тем, что водоразбор горячей воды для нужд потребителя происходит непосредственно из теплосети, причем, он может быть как полным, так и частичным. Остающаяся в системе горячая вода продолжает использоваться для отопления или вентиляции.

Расход воды в теплосети при этом способе компенсируется дополнительным количеством воды, которая подается в тепловую сеть. Преимущество открытой системы теплоснабжения заключается в ее экономической выгоде. Во время советского периода почти 50 % всех систем теплоснабжения были открытого типа.

Закрытые системы теплоснабжения – это системы, в которых вода, циркулирующая в трубопроводе, используется только как теплоноситель, и не забирается из теплосистемы для нужд обеспечения горячего водоснабжения. При такой схеме система полностью закрыта от окружающей среды.

Сетевые насосы создают циркуляцию воды в системе теплоснабжения, а подпиточные компенсируют утечки воды и поддерживают необходимый уровень давления в статическом и динамическом режимах. Количество сетевых насосов принимается не менее двух, из которых один резервный. Если для работы сети при различных условиях требуется установка четырех насосов, то резервные насосы не предусматриваются. В закрытых системах теплоснабжения устанавливается не менее двух подпиточных насосов, а в открытых - не менее трех, из которых один является резервным.

Для подбора насоса необходимо знать его производительность и величину напора. Для сетевых насосов производительность определяют по расчетному расходу воды на головном участке тепловой сети и для закрытых систем. При подборе сетевых насосов для открытых систем теплоснабжения расход воды на горячее водоснабжение принимают как среднечасовой, но с коэффициентом 1,2. В летний период производительность сетевых насосов принимают по максимальному часовому расходу воды на горячее водоснабжение.

Производительность подпиточных насосов для закрытых систем теплоснабжения принимают из расчета компенсации утечек в размере 0,75% от объема воды, находящейся в трубопроводах и в непосредственно присоединенных абонентских системах. При подборе подпиточных насосов для закрытых систем рекомендуется также предусмотреть аварийную подпитку необработанной водой в количестве 2% от объема воды, находящейся в трубах наружной сети и в системах отопления и вентиляции.

В открытых системах производительность подпиточных насосов принимают по максимальному расходу горячей воды с учетом компенсации утечек, как и в закрытой системе. Аварийная подпитка не предусматривается.

Объем воды, находящийся в системе теплоснабжения, ориентировочно можно определить по формуле, м³:

$$V = Q(V_c + V_m), [4] \quad (9)$$

где Q – тепловая мощность системы теплоснабжения, МВт;

V_c, V_m – удельные объемы сетевой воды, находящейся в наружных сетях с подогревательными установками и в местных системах, $\text{м}^3/\text{МВт}$.

Для тепловых сетей с подогревательными установками жилых районов $V_c=40+43 \text{ м}^3/\text{МВт}$, промышленных предприятий $V_c=22+30 \text{ м}^3/\text{МВт}$; для систем отопления гражданских зданий $V_m=26 \text{ м}^3/\text{МВт}$, промышленных $V_m=13 \text{ м}^3/\text{МВт}$; для систем горячего водоснабжения $V_m=5,2 \text{ м}^3/\text{МВт}$.

Напор сетевого насоса определяют по формуле, м:

$$H_H = \Delta H_T + \Delta H_n + \Delta H_a + \Delta H_o, \quad (10)$$

где ΔH_T - потери напора в тепловом центре (на источнике), м;

$\Delta H_n, \Delta H_o$ - потери напора в подающем и обратном магистральных трубопроводах, м;

ΔH_a - необходимый напор на вводе конечного абонента, м.

Напор сетевого насоса для летнего периода определяют по формуле, м:

$$H_H^L = H_H (G_L/G)^2 \quad (11)$$

где G_L - расход воды в летнее время, т/ч ;

G - то же в зимний период, т/ч .

Расчетная величина напора подпиточного насоса может быть определена по формуле, м:

$$H_{п.н.} = H_c + \Delta H + z \quad (12)$$

где H_c - статический напор в сети по отношению к оси подпиточного насоса, м;

ΔH - потери напора в трубопроводах подпиточной линии от питательного бака до точки присоединения к тепловой сети, м;

z - разность отметок между осью насоса и нижним уровнем воды в питательном баке, м.

По известным параметрам работы насосов (G и H) с помощью рабочих характеристик подбирают насосы по общепринятой методике.

Желательно, чтобы насосы, прежде всего сетевые, имели регулируемое число

оборотов с помощью частотного электропривода или гидромфты. Увеличивая или уменьшая число оборотов насоса, можно плавно изменять подачу и напор (приводить характеристику насоса, к изменившейся характеристике сети) при одновременном изменении мощности привода.

Расчет измененных характеристик центробежного насоса производят по формуле:

$$\frac{n_{и}}{n} = \frac{G_{и}}{G} = \sqrt{\frac{H_{и}}{H}} = \sqrt[3]{\frac{N_{и}}{N}}, \quad (13)$$

где G, H, N, n - соответственно производительность, напор, мощность и число оборотов насоса до измерения его характеристики.

$G_{и}, H_{и}, N_{и}, n_{и}$ - соответственно производительность, напор, мощность и число оборотов насоса после измерения его характеристики.

Как видно из формулы (1.13), существует квадратная зависимость расхода от напора. Так, например, при увеличении в сети вдвое расхода сетевой воды необходимо увеличить напор в четыре раза. Увеличивая напор в 2 раза, расход можно увеличить в 1,4 раза при уменьшении диаметра трубопроводов 2 раза падение напора возрастет в $2^{5,25}$ или почти в 26 раз.

Это важно знать, поскольку нередко к существующим тепловым сетям присоединяют новых потребителей, и иногда делается это без предварительного гидравлического расчета сетей. Если существующие тепловые сети рассчитаны только для работы имеющихся потребителей теплоты, то дополнительное подключение новых потребителей может нарушить гидравлический режим работы сетей и подключенных к ним систем отопления зданий всего района.

И в заключении найдем необходимую мощность электрического двигателя для привода насоса по формуле, кВт:

$$N_{дв} = 1,1 \frac{G_{н} \cdot H_{н} \cdot 10^3}{\rho \cdot \eta_{н.у.}}, \quad (14)$$

где $G_{н}$ - производительность насоса, кг/с;

$H_{н}$ - напор насоса, МПа;

ρ - плотность жидкости при данной температуре, кг/м³;

$\eta_{н.у.}$ - КПД насосной установки (произведение КПД насоса на КПД двигателя), $\eta_{н.у.} = 0,65-0,75$;

1,1 - коэффициент запаса на пусковой момент двигателя. [4]

Заключение

Параметризация и выбор насосного оборудования напрямую зависит от требуемых параметров системы. Система теплоснабжения может быть, как открытой, так и закрытой, от этого зависит количество и мощность как сетевых, так и подпиточных насосов. Нужно ещё на моменте проектирования закладывать максимальную мощность при проектировании сети теплоснабжения, к примеру, для развивающегося района города, т.к. в будущем подключить сверх расчетных потребителей будет невозможно потому что нарушатся параметры работы всей сети района. Но в то же время нельзя ставить слишком мощные насосы в виду экономической нецелесообразности. Нужно правильно подбирать диаметры сечения теплопровода в зависимости от необходимого давления у потребителя теплоты.

Мы считаем, что для полностью правильной параметризации насосного оборудования необходимо изначально использовать более точные расчетные параметры, так же использовать опыт проектирования подобных систем конкретно в этом регионе, обязательно закладывать прописанный запас по мощности насосного оборудования.

Литература

1. Яковлев, Б. В. Учебное пособие по практическим занятиям и курсовому проектированию для студентов специальности 43.01.04 - Тепловые электрические станции и 43.01.05 - Промышленная теплоэнергетика / Б. В. Яковлев, Ю. Б. Яковлев. – Минск : БНТУ, 2003. – 125 с.
2. Акт об установлении средних нормативов потребления тепловой энергии на отопление и подогрев воды [сайт]. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=R924o0134395> – Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь/. – (дата обращения): 05.05.2025.
3. Системы закрытого и открытого теплоснабжения [сайт]. – URL: <http://tek-spb.org/sistemy-zakrytogo-i-otkrytogo>— (дата обращения): 05.05.2025.
4. Принцип работы водяного насоса: особенности, схема [сайт]. – URL: <https://www.cnp-center.ru/articles/tekhnicheskie-kharakteristiki/printsip-raboty-vodyanogo-nasosa-osobennosti-skHEMA/>. – (дата обращения): 05.05.2025.