

УДК 621.311

РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД НОРМИРОВАНИЯ РАСХОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Н. В. ГРУНТОВИЧ

*Учреждение образования «Брянский государственный аграрный университет», Российская Федерация –
ООО «Центр научно-прикладных проблем энергетики»,
г. Гомель, Республика Беларусь*

А. А. КАПАНСКИЙ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

Современная система водоснабжения и водоотведения представляет собой сложный технологический комплекс, для управления энергоэффективностью (ЭЭФ) которого используется механизм нормирования расхода энергоресурсов. Электроэнергия (ЭЭ) является основным видом энергии, необходимым для работы насосных установок, технологических установок очистки питьевой и сточной воды и общезаводского оборудования.

Выделяют четыре основных метода нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР): опытный, отчетно-статистический, расчетно-статистический и расчетно-аналитический.

Основным методом нормирования расхода ЭЭ в системах водоснабжения и водоотведения республики последние десятилетия являлся расчетно-аналитический метод, других альтернатив которому длительное время не было вообще. Изменившиеся условия функционирования систем водоснабжения и водоотведения требуют его развития и адаптации для сложных инженерных комплексов, состоящих из отдельных технологических подсистем и функционирующих в условиях внешних и внутренних воздействий. Расчетно-аналитический метод предусматривает определение норм расхода ЭЭ по статьям расхода на основе прогрессивных показателей энергопотребления и производства продукции. Метод основан на формировании энергетических балансов путем математического описания закономерностей процесса электропотребления [1], [2].

Целью работы является формализация расчетно-аналитического метода нормирования расхода электрической энергии (ЭЭ) в системах водоснабжения и водоотведения при учете сложности их структуры и особенностей функционирования входящих в них подсистем.

Нормирование расхода ЭЭ в системе водоснабжения

Предложена следующая последовательность этапов (алгоритм) работы для разработки норм расхода ЭЭ в системе водоснабжения.

1. *Разработка схемы электропотребления исследуемого объекта.* На данном этапе составляется структурная схема электропотребления с выявлением всех задействованных в технологическом процессе объектов, определяются энергетические потоки между отдельными агрегатами или установками и в целом по производству, выделяются вспомогательные (общепроизводственные) потребители ЭЭ. На данном этапе работы необходимо определить:

- перечень и назначение водозаборов (обеспечение технической и (или) хозяйственно-питьевой водой);
- фактическую (проектную) производительность водозаборов;
- расход воды на собственные нужды водопроводов (промывка фильтров, водоприемных устройств, сети и др.)
- объекты, участвующие в технологическом процессе;
- общепроизводственные и вспомогательные потребители ЭЭ;
- движение энергетических потоков между отдельными агрегатами и установками и в целом по производству (рис. 1).

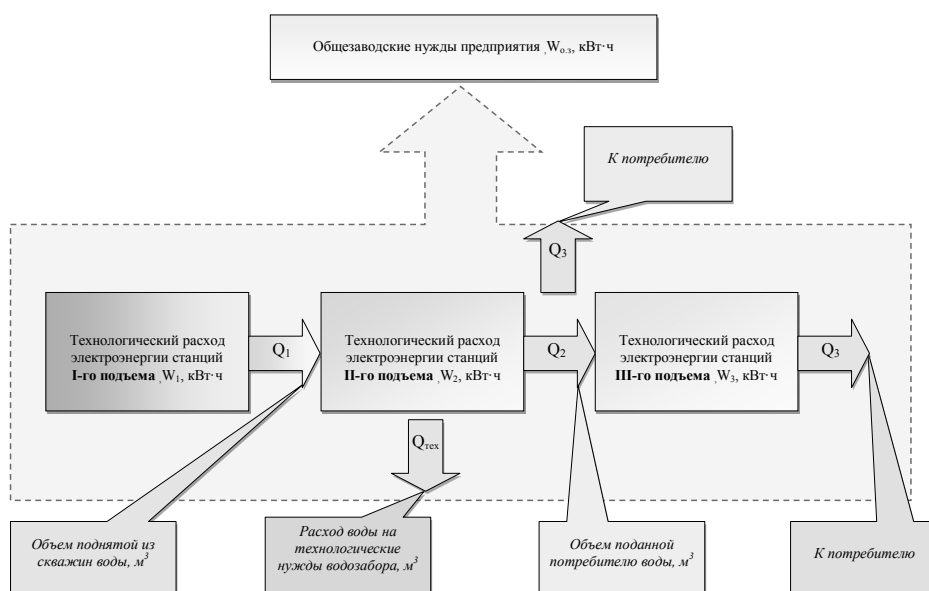


Рис. 1. Структурная схема электропотребления в системе водоснабжения

2. *Сбор исходной информации об исследуемом объекте.* Данный этап включает в себя определение перечня потребителей ЭЭ, их режимы работы, номинальные параметры агрегатов (мощность, КПД, производительность, коэффициент загрузки и др.); производится сбор информации характеристик скважин (глубина, диаметр обсадной трубы, статический и динамический уровень воды, пьезометрические отметки уровней воды в источниках водоснабжения, резервуарах и т. д.).

3. *Сбор информации по статьям расхода ЭЭ исследуемых объектов.* На данном этапе производится обработка данных журналов работы насосных станций I, II и III подъема; определяются суточные (часовые, квартальные, годовые) объемы воды, поднятой из скважин и поданной потребителю; анализируются графики давлений станций второго подъема; производится анализ изменения уровня воды в емкостных резервуарах.

4. *Сбор информации по статьям расходов энергоресурсов.* На основании данных журналов смены (АСКУЭ, счетчиков учета ЭЭ и т. д.) производится сбор информации о потреблении ЭЭ по технологическим объектам или установкам и в целом по производству.

При анализе данных журналов эксплуатации устанавливается несколько режимов работы насосных агрегатов (НА) и, соответственно, время их работы, создаваемое давление и расход воды. Для насосных станций I подъема выделяется 2, 3 режима, для насосных станций II подъема количество режимов будет соответствовать изменению давления в сети в течении суток, для подкачивающих насосных станций (III подъема) при затруднении оценки режимов работы необходимо принять номинальный (проектный) режим. Полученные данные формируются поквартально и за год.

Общий расход ЭЭ ($W_{\text{сум}}$) в системе водоснабжения включает в себя расход ЭЭ W_I на работу НА станций первого подъема, поднимающих воду Q_I из артезианских скважин или иных источников водоснабжения; расход ЭЭ на работу НА станций второго подъема W_{II} и подкачивающих станций третьего подъема W_{III} , работа которых необходима для обеспечения нужд потребителя водой Q_{II} требуемого давления; затраты ЭЭ на общепроизводственные нужды $W_{\text{о.з}}$ и технически неизбежные потери при транспортировке ЭЭ:

$$W_{\text{сум}} = W_I + W_{II} + W_{III} + W_{\text{о.з}}. \quad (1)$$

Расчет потребности в ЭЭ, кВт · ч, каждым НА станций I, II и III подъемов производят путем суммирования расходов ЭЭ каждым агрегатом в отдельности по формуле

$$W_{\{k\}} = 2,72 \cdot 10^{-3} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{ij} H_{ij}}{\eta_{ij}} t_{ij} \right), \quad (2)$$

где Q_{ij} – производительность i -го насоса в j -м режиме работы, м³/ч; H_{ij} – полный напор, развиваемый i -м насосом в j -м режиме работы, м; η_{ij} – коэффициент полезного действия агрегата i -го насоса в j -м режиме работы; t_{ij} – время работы i -го насоса в j -м режиме работы, ч; n – количество НА, шт.; m – количество режимов работы агрегата; j – индекс, обозначающий режим работы НА; i – индекс, обозначающий порядковый номер НА; k – индекс, характеризующий уровень подъема воды (I, II и III).

Проектные данные станции I подъема включают в себя сведения о глубине скважины, диаметре обсадной трубы, статический $H_{\text{ст}}$ и динамический уровень воды $H_{\text{дин}}$, высота установки насоса от дна скважины $H_{\text{нас}}$ и др. Величина полного напора, развиваемого насосом для станции I подъема, складывается из показания манометра $H_{\text{м}}$ и гидравлических потерь в напорном трубопроводе ΔH до динамического уровня воды в скважине [3]:

$$H = H_{\text{м}} + \Delta H + H_{\text{дин}}, \quad (3)$$

где $H_{\text{м}}$ – показания манометра, м; ΔH – гидравлические потери в напорном трубопроводе, м; $H_{\text{дин}}$ – динамический уровень воды в скважине, м.

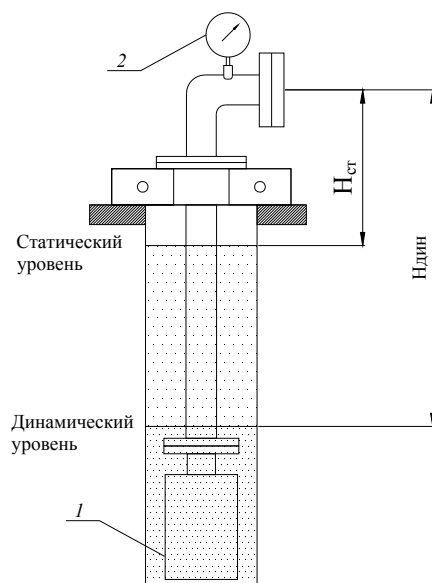


Рис. 2. Пояснение к определению технических параметров скважины:
1 – манометр; 2 – погружной насос

Потери напора, м, в напорном трубопроводе определяются по формуле

$$\Delta H = \lambda \frac{LV^2}{D2g}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения, о. е.; L – длина трубопровода, м; D – внутренний диаметр трубы, м; V – скорость потока жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$.

Коэффициент гидравлического трения зависит от числа Рейнольдса и эквивалента шероховатости трубы:

$$Re = \frac{DV}{\nu}, \quad (5)$$

где ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$.

Полный напор H_A , м, станций II подъема равен манометрическому напору с учетом потерь напора во всасывающем и нагнетательном трубопроводах и определяется по формуле [4]:

$$H = H_m \pm H_b + z + 0,083 \left(\frac{1}{d_{вс}^4} - \frac{1}{d_n^4} \right) Q^2, \quad (6)$$

где H_m – показания манометра, м; H_b – показания вакуумметра, м; z – расстояние между местом установки манометра и вакуумметра по вертикали, м; Q – рабочая подача насоса, $\text{м}^3/\text{с}$; $d_{вс}$ – диаметр всасывающего трубопровода, м; d_n – диаметр напорного трубопровода, м.

При отсутствии показаний вакуумметра в качестве избыточного давления H_b в расчетах необходимо принимать высоту водяного столба от резервуара чистой воды (РЧВ) до насоса (рис. 3).

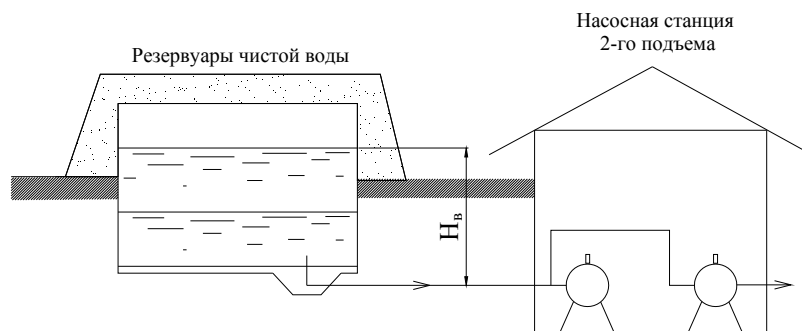


Рис. 3. Пояснение к определению избыточного давления насоса

Коэффициент полезного действия НА принимается по паспортным данным или по данным инструментального анализа. В общем виде КПД агрегата определяется по формуле

$$\eta = \eta_n \eta_{дв} \eta_{п} \eta_{ч.-р.п}, \quad (7)$$

где η_n – гидравлический КПД насоса; $\eta_{дв}$ – КПД привода насоса; $\eta_{п}$ – КПД передачи, $\eta_{ч.-р.п}$ – КПД частотно-регулируемого электропривода.

При отсутствии фактических данных производительности и напора НА, например, при вводе в эксплуатацию новой насосной станции, рекомендуется принимать данные на основании проекта для режимов минимальной, средней и максимальной подачи.

Выделение действующих режимов работы насосных станций необходимо производить на основании данных журналов эксплуатации:

– для станции первого подъема на основании данных «Журнала учета работы скважины»;

– для станции второго подъема на основании данных «Журнала машиниста насосных установок 2-го подъема».

Расчет расхода ЭЭ, кВт · ч, на работу вспомогательного и общепроизводственного оборудования производится по формуле [5]:

$$W = \sum_{i=1}^n k_{и_i} P_{уст_i} T_i, \quad (8)$$

где $k_{и_i}$ – коэффициент использования установленной мощности i -го оборудования, о. е.; $P_{уст_i}$ – установленная мощность i -го оборудования, кВт; T_i – число часов работы оборудования, ч; n – количество оборудования, шт.

Потери ЭЭ, кВт · ч, в силовых трансформаторах определяются по формуле [5]:

$$W_T = \Delta P_{xx} T_B + \Delta P_{к.з} k_3^2 T_p, \quad (9)$$

где ΔP_{xx} – величина потерь мощности холостого хода, определяемая на основе паспортных данных, кВт; $\Delta P_{к.з}$ – величина потерь мощности короткого замыкания, определяемая на основе паспортных данных, кВт; k_3 – коэффициент загрузки трансформатора, определяется как отношение фактической нагрузки трансформатора к его номинальной мощности; T_B – полное число часов включения трансформатора; T_p – число часов работы трансформатора с нагрузкой в рассматриваемом периоде.

Индивидуальная средневзвешенная норма расхода ЭЭ, кВт · ч/тыс. м³, за рассматриваемый промежуток времени для станций k -го подъема (I, II или III), учитывающая режим работы i -го НА, определяется по выражению

$$W_{уд\{k\}} = \frac{W_{\{k\}}}{Q_{\{k\}}} = 2,72 \cdot 10^{-3} \frac{\sum_{i=1}^m \left(\frac{H_{ij}}{\eta_{ij}} Q_{ij} \right)}{\sum_{i=1}^m (Q_{ij})}, \quad (10)$$

где k – индекс, характеризующий уровень подъема воды (I, II и III); $W_{\{k\}}$ – расход ЭЭ насосной станции первого подъема, кВт · ч; $Q_{\{k\}}$ – количество воды, поднятой (поданной) НА, м³.

Удельный расхода ЭЭ (при утверждении в вышестоящей организации – норма расхода ЭЭ), кВт · ч/тыс. м³, в системе водоснабжения в целом определяется по формуле

$$W_{уд} = \frac{W_{сум}}{Q_1} = \frac{2,72 \cdot 10^{-3} \sum_{i=1}^m \left(\frac{Q_{ij} H_{ij}}{\eta_{ij}} t_{ij} \right) + W_{о.з}}{Q_1}, \quad (11)$$

где Q_1 – объем поднятой воды за рассматриваемый отчетный период (месяц, квартал, год), тыс. м³; t_{ij} – время работы i -го насоса в j -м режиме работы за отчетный период (месяц, квартал, год), ч; $W_{о.з}$ – общепроизводственные расходы ЭЭ системы водоснабжения за отчетный период (месяц, квартал, год), кВт · ч.

Нормирование расхода ЭЭ в системе водоотведения

Аналогично системе водоснабжения, алгоритм, описывающий общий порядок действий исполнителя при разработке норм расхода ЭЭ в системе водоотведения, включает в себя этапы.

1. *Разработка схемы электропотребления исследуемого объекта.* На данном этапе работы необходимо определить:

- количество канализационно-насосных станций;
- технологические схемы сооружений (насосных и очистных станций);
- фактическую (проектную) производительность очистных сооружений;
- общезаводских и вспомогательных потребителей ЭЭ;
- движение энергетических потоков между отдельными агрегатами и установками и в целом по производству.

Пример структуры электропотребления в системе водоотведения представлен на рис. 4.

2. *Сбор исходной информации об исследуемом объекте,* которая включает в себя: определение перечня потребителей ЭЭ, режимы работы, номинальные параметры канализационно-насосных агрегатов (мощность, КПД, производительность, коэффициент загрузки и др.); производится сбор информации химического состава сточных

вод (величины снятой биологической потребности в кислороде (БПК) поступающей и очищенной сточной воды и т. д.); анализируются режимы работы воздухоудного оборудования, технические параметры, особенности работы и т. д.

3. *Сбор информации по статьям расхода исследуемых объектов.* На данном этапе производится обработка данных журналов работы канализационно-насосных станций; определяются суточные (часовые, квартальные, годовые) объемы сточных вод, перекаченных НА и т. д.

4. *Сбор информации по статьям расходов энергоресурсов.* Суммарный расход ЭЭ, кВт · ч, в системе водоотведения включает в себя затраты ЭЭ на функционирование:

- вспомогательных структурных подразделений (не связанных с технологическим процессом);
- канализационных НА;
- технологического оборудования очистных сооружений, которые включают в себя затраты ЭЭ на работу:

- 1) компрессорной станции, в состав которой входят воздухоудки, обеспечивающие аэрацию сточных вод;
- 2) насосной станции первичных отстойников;
- 3) илонасосной станции;
- 4) насосной станции иловых площадок 3-й очереди;
- 5) прочее технологическое оборудование.

Определяется по формуле

$$W_{\text{сум}} = W_{\text{к.-н.с}} + W_{\text{очис}} + W_{\text{о.з}}, \quad (12)$$

где $W_{\text{к.-н.с}}$ – расход ЭЭ на работу канализационно-насосных станций, кВт · ч; $W_{\text{очис}}$ – суммарные расходы ЭЭ при работе станции очистных сооружений, кВт · ч; $W_{\text{о.з}}$ – общепроизводственные и вспомогательные расходы предприятия, а также неизбежные потери в электрических сетях и трансформаторах при транспортировке ЭЭ, кВт · ч.

Расход ЭЭ, кВт · ч, привода насоса определяется по формуле:

$$W_{\text{к.-н.с}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_{ij} H_{ij}}{102 \cdot 3600 \eta_{ij}} \gamma t_{ij} \right), \quad (13)$$

где γ – средняя плотность сточных вод за рассматриваемый период, кг/м³.

Удельный расход воздуха при очистке сточных вод в аэротенках определяется отношением расхода кислорода, требующего для обработки 1 м³ воды, к расходу используемого кислорода с 1 м³ подаваемого воздуха по формуле [6]:

$$D = \frac{Z(L_a - L)}{k_1 k_2 n_1 n_2 (C_p - C)}, \quad \text{м}^3/\text{м}^3, \quad (14)$$

где Z – удельный расход кислорода воздуха, мг на 1 мг снятой БПК_{полн}, мг/мг, принимаемый при полной очистке до БПК_{полн} 15–20 мг/л – 1,1, при неполной очистке до БПК_{полн} свыше 20 мг/л – 0,9; L_a – БПК_{полн}, поступающая в аэротенк сточной воды (с учетом снижения БПК при первичном отстаивании), мг/л; L_t – БПК_{полн} очищен-

ных сточных вод, мг/л; k_1 – коэффициент, учитывающий тип аэратора и принимаемый для мелкопузырчатой аэрации в зависимости от соотношения площадей аэрируемой зоны и аэротенка $\left(\frac{f}{F}\right)$, для среднепузырчатой и низконапорной $k_1 = 0,75$; k_2 – коэффициент, зависящий от глубины погружения аэратора h_a ; n_1 – коэффициент, учитывающий температуру сточных вод; n_2 – коэффициент, учитывающий отношение скорости переноса кислорода в иловой смеси к скорости переноса его в чистой воде (для бытовых сточных вод $n_2 = 0,85$; для промышленных сточных вод n_2 следует определять по опытным данным, при отсутствии этих данных допускается $n_2 = 0,7$); C_p – растворимость кислорода воздуха в воде, мг/л; C – средняя концентрация кислорода в аэротенке, мг/л, принимается равным 2 мг/л.

Коэффициент, учитывающий температуру сточных вод, определяется по формуле [6]:

$$n_1 = 1 + 0,02(T_{cp} - 20), \quad (15)$$

где T_{cp} – средняя температура сточной воды за рассматриваемый период, °С;

Растворимость кислорода воздуха в воде, мг/л, определяется по формуле [6]:

$$C_p = C_r \frac{10,3 + 0,5h_a}{10,3}, \quad (16)$$

где C_r – растворимость кислорода воздуха в воде, мг/л; h_a – глубина аэротенка, м.

Мощность компрессора воздуходувки, кВт, определяется по формуле [7]:

$$P = \frac{l_k q}{3600\eta}, \quad (17)$$

где l_k – работа компрессора при сжатии воздуха, кДж/м³; q – расход воздуха, м³/ч; η – КПД компрессора, о. е.

Для политропного процесса работа сжатия определяется по формуле [8], [9]:

$$l_k = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \rho_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \text{ кДж/м}^3, \quad (18)$$

где n – показатель политропы; принимается равным 1,4; p_1 – абсолютное давление всасывания, 101,325 кПа (1 атм.); p_2 – абсолютное давление сжатия компрессора, кПа; v_1 – удельный объем воздуха на всасе, м³/кг; ρ_1 – плотность воздуха на всасе, кг/м³.

Подставляя стандартные значения в формулу (18), работу сжатия компрессора можно записать как:

$$l_k = 354,6 [p_2^{0,29} - 1], \text{ кДж/м}^3, \quad (19)$$

где p_2 – абсолютное давление сжатия компрессора, атм.

Годовой расход ЭЭ воздуходувным агрегатом, кВт · ч/год, определяется по формуле

$$W = \frac{354,6[p_2^{0,29} - 1]DQ}{3600\eta}, \quad (20)$$

где Q – годовой объем очищаемой сточной воды, м³/год; η – КПД воздуходувного агрегата.

Абсолютное давление сжатия компрессора, атм., создаваемое воздуходувным агрегатом, определяется по формуле [6]:

$$p_2 = 1 + h_{тр} + h_m + h_\phi + \frac{H}{10,3}, \quad (21)$$

где $h_{тр}$ – потеря напора в воздуховоде на трение по длине, атм.; h_m – местные потери напора, атм.; h_ϕ – сопротивления в фильтрах, атм.; H – глубина воды в аэротенке (от поверхности до фильтров), м.



Рис. 4. Структурная схема электропотребления в системе водоотведения

Суммарная величина местных сопротивлений и сопротивление на трение в воздуховоде не должны превышать 0,029–0,034 атм., сопротивление через фильтры следует принимать 0,048–0,077 атм.

Коэффициент полезного действия воздуходувного агрегата определяется по формуле

$$\eta = \eta_m \eta_{ад} \eta_{об} \eta_{дв}, \quad (22)$$

где η_m – механический КПД установки, учитывающий потери энергии на трение в подшипниках и др.; принимается равным 0,97–0,99; $\eta_{ад}$ – адиабатический КПД, определяющийся отношением теоретической работы компрессора к действительной; $\eta_{об}$ – КПД, учитывающий утечки воздуха через уплотнения; $\eta_{дв}$ – КПД привода воздуходувки.

Удельный расход ЭЭ, кВт · ч/тыс. м³, в системе водоотведения определяется по формуле

$$W_{уд} = \frac{W_{к.-н.с} + W_{очис} + W_{оз.}}{Q}, \quad \text{кВт} \cdot \text{ч/тыс. м}^3. \quad (23)$$

Заключение

1. Формализован расчетно-аналитический метод нормирования расхода ЭЭ для технологических систем водоснабжения и водоотведения при учете сложности их структуры и особенностей функционирования входящих в них подсистем.

2. Разработанная на основе уточненных формул и алгоритмов методика расчета удельных расходов электроэнергии для систем водоснабжения и водоотведения республики позволит повысить качество нормирования ЭЭ.

Литература

1. Положение по нормированию расхода топлива, тепловой и электрической энергии в народном хозяйстве республики. – Минск, 2002.
2. Токочакова, Н. В. Способы построения расчетно-статистических моделей электропотребления промышленных потребителей / Н. В. Токочакова, Д. Р. Мороз // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2006. – № 2. – С. 37–46.
3. Суреньянец, С. Я. Эксплуатация водозаборов подземных вод / С. Я. Суреньянец, А. П. Иванов. – М. : Стройиздат, 1989. – 80 с. : ил.
4. Кириллов, Д. В. Работа центробежного насоса в трубопроводной сети / Д. В. Кириллов // Параметры насоса. Подача. – 2015. – Режим доступа: <http://www.isuct.ru/dept/chemkiber/piaht/edu/index.php?page=parameters.inc#feed>. – Дата доступа: 07.01.2015.
5. Радкевич, В. Н. Проектирование систем электроснабжения : учеб. пособие / В. Н. Радкевич. – Минск : ПИОН, 2001. – 292 с.
6. Ласков, Ю. М. Примеры расчетов канализационных сооружений : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов, В. И. Калицун. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1987. – 255 с.
7. Канализация : учеб. для вузов / С. В. Яковлев [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1975. – 632 с.
8. Техническая термодинамика : учеб. для вузов / под ред. В. И. Крутова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1981. – 439 с.
9. Насосы, вентиляторы, компрессоры : учеб. для теплоэнергетических специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.

Получено 10.04.2015 г.