

Оптимизация работы насосов и вентиляторов

А.В. Кинсфатор, технический директор ООО «Гекомс»

Введение

Потребление электроэнергии в России составляет более 1000 миллиардов киловатт-часов в год. Порядка 70% расходуется на электропривод. Из них до 60% расходуется на вентиляторы и насосы. Большая часть вентиляторов и насосов работает в неоптимальных с точки зрения расходования ресурсов режимах. В среднем потребление энергии в этом случае можно сократить на треть. Таким образом, потенциал для экономии может составить более 60 миллиардов киловатт-часов в год. Учитывая, что стоимость электроэнергии составляет от 1 до 6 рублей в зависимости от ценовой категории, уровня напряжения и максимальной мощности, можно оценить экономию на электроэнергии только на насосах и вентиляторах на уровне 100 – 200 млрд. рублей в год в масштабах России.



Рисунок 1. Производство электроэнергии в РФ

Неоптимальность режима работы заключается в том, что мощность вентиляторов и насосов превышает необходимую. Иногда насосы не отключаются даже тогда, когда они по сути дела не нужны. Например, давление и производительность насоса при проектировании были рассчитаны с запасом. Запас может находиться в пределах от 20 до 200 и более процентов. Часто при изменении расхода рабочего тела двигатель работает на максимальной мощности, а для поддержания нормального давления используют заслонки и т.п. Для некоторых видов насосов, особенно мощностью более мегаватта, запуск и останов прямым пуском значительно снижает их ресурс, поэтому их просто не отключают. Возможны другие ситуации неоптимального режима работы приводов.

Одним из способов оптимизации режима работы насосов и вентиляторов является изменение скорости вращения рабочего колеса. Существует много способов изменения скорости вращения: использование редукторов с переменным передаточным отношением, использование гидромуфт, изменение частоты вращения привода. При проектировании установки с учётом всех её особенностей может быть обоснован любой из этих вариантов. Однако при модернизации существующих установок, наиболее актуальным является изменение частоты вращения привода. В этом случае механическая часть не затрагивается.

Наиболее распространённым видом электроприводов является двигатели переменного тока. В большинстве случаев, это трёхфазный асинхронный двигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором.

Основные преимущества двигателя переменного тока:

- Простота изготовления;
- Дешевизна;
- Высокая надёжность;
- Низкие эксплуатационные затраты;
- Возможность прямого включения в электрическую сеть.

Плата за достоинства – недостатки:

- Небольшой пусковой момент;
- Значительный пусковой ток;
- Низкий коэффициент мощности (для маломощных двигателей);
- Фиксированная скорость вращения (в номинальном режиме);
- Сильная (квадратичная) зависимость момента от напряжения сети.

Для преодоления недостатков были разработаны различные модификации двигателей переменного тока:

- Двигатели с фазным ротором;
- Двигатели с изменяемым количеством полюсов;
- И т.п.

Однако все улучшения приводят к усложнению конструкции двигателя, снижению КПД и удорожанию.

Скорость вращения ротора двигателя переменного тока можно менять с помощью:

- Изменения частоты питающего напряжения;
- Переключения полюсов в двигателях соответствующей конструкции;
- Изменения силы питающего тока (в очень узких пределах);
- Используя специфически двигатели, например Штаге-Рихтера.

В широких пределах регулируется скорость двигателей постоянного тока, но они редко используются из-за дороговизны изготовления и обслуживания.

На сегодня, развитие электронных преобразователей сделало наиболее экономически эффективным способом регулирования частоты вращения ротора двигателя использование преобразователей частоты питающего напряжения (ПЧ). Особенно когда речь идёт о регулировании частоты вращения в уже существующей установке.

Основные преимущества ПЧ:

- Регулирование частоты вращения в широких пределах - от нуля до предела механической стойкости установки;
- Возможность плавного старта и останова двигателя;
- Уменьшение ударных токовых нагрузок во время старта и останова двигателя;
- Простое включение в контур автоматического регулирования;
- Высокий коэффициент мощности.

Недостатки:

- Высокая стоимость;
- Потери энергии 2-10%;
- Наличие большого количества гармонических составляющих как в токе двигателя, так и в потребляемом от сети токе;
- Излучение электромагнитных помех;
- Необходимость поддержания температурного режима.

Исходя из наличия недостатков, само по себе использование ПЧ не гарантирует положительного экономического эффекта. Мало того, бездумное использование ПЧ может принести убытки.

Факторы влияющие на экономический эффект

Наиболее очевидный экономический эффект при использовании ПЧ может быть достигнут за счёт экономии электроэнергии. Но не стоит так же забывать о других факторах экономии:

- Плавный старт позволяет снизить механические пусковые нагрузки. Это прямой выход на уменьшение износа и увеличение срока службы оборудования;
- Плавный старт и останов насосов позволит устранить гидроудары в системе;
- Более низкая частота вращения двигателя приводит к увеличению ресурса установки. Снижается шумность;
- Отсутствие 4-8 кратной токовой перегрузки по току при старте позволяет снизить установленную (максимальную) мощность, упростить систему защиты от перегрузок и короткого замыкания;
- Включение насоса в контур автоматического регулирования позволит поддерживать заданные параметры давления расхода и др. без участия оператора или дистанционно;
- Точное поддержание давления в системе позволит снизить максимальное давление в трубопроводах, а значит, и уменьшить вероятность их разрывов. Снижение давления даёт дополнительную экономию энергии и снижение потерь на утечки;

Все эти факторы сильно зависят от конкретной насосной или вентиляторной установки. Экономический эффект должен рассчитываться индивидуально для каждой установки.

Замена электрических двигателей на новые, с более высоким КПД, может принести положительный экономический эффект. Даже при изменении КПД на 1-2 процента замена может окупиться за несколько лет. Особенно актуально проводить расчёты энергосбережения при установке новых двигателей.

Приближенный расчёт экономии энергии можно выполнить зная параметры электрического двигателя, насоса и требуемые выходные параметры: давление, расход. Расчёт экономического эффекта от других факторов затруднён, так как зависит от конкретной насосной или вентиляторной установки. Но эффект от прочих факторов в некоторых может превысить эффект от экономии энергии.

Иногда, в случае ошибок при проектировании, или внесении изменений в систему после проектирования, рабочая точка насоса может оказаться так

далеко от оптимальной, что экономически целесообразной окажется полная замена насосной установки.

Способы расчёта

Наиболее точные расчёты производительности насоса и давления на выходе и потребляемой мощности можно получить используя характеристические кривые насоса. Однако не всегда они приводятся для разных скоростей вращения ротора. Обычно данные есть для одного или двух значений частоты вращения но, даже имея графики для одной частоты вращения ротора можно пересчитать их для других скоростей вращения.

Во-первых, нужно по необходимой производительности насоса и давлению на выходе определить по графикам насколько далека рабочая точка от точки максимального КПД. Если входные параметры меняются во времени, нужно сделать несколько оценок.

Если рабочая точка всегда находится вблизи точки с максимальным КПД (снижение КПД менее 10%), частотное регулирование не даст экономии электроэнергии. В случае если и другие факторы экономии окажутся незначительными, применение ПЧ принесёт убыток от затрат на приобретение и эксплуатацию.

Но чаще всего параметры производительности рассчитаны с запасом от максимального расхода в системе, а максимальный расход достигается в течение одного-двух часов в сутки. Если посмотреть по характеристическим кривым, то КПД насоса может падать до 20-30% от максимального.

Давление на выходе центробежного насоса или не регулируется вообще или поддерживается с помощью рециркуляции (часть жидкости сбрасывается обратно) или дросселированием (поток регулируется регулируемой заслонкой). В зависимости от способа регулирования рабочая точка насоса по-разному смещается по семейству характеристических кривых. Самые неудачные варианты это отсутствие регулирования и рециркуляция, они приводят к максимальному расходу энергии и повышенному давлению в системе. При дросселировании удаётся несколько снизить потребляемую мощность в случае снижения производительности. Графики потребления электроэнергии в зависимости от расхода жидкости для различных способов регулирования при постоянном давлении на выходе приведены на рисунке 2.

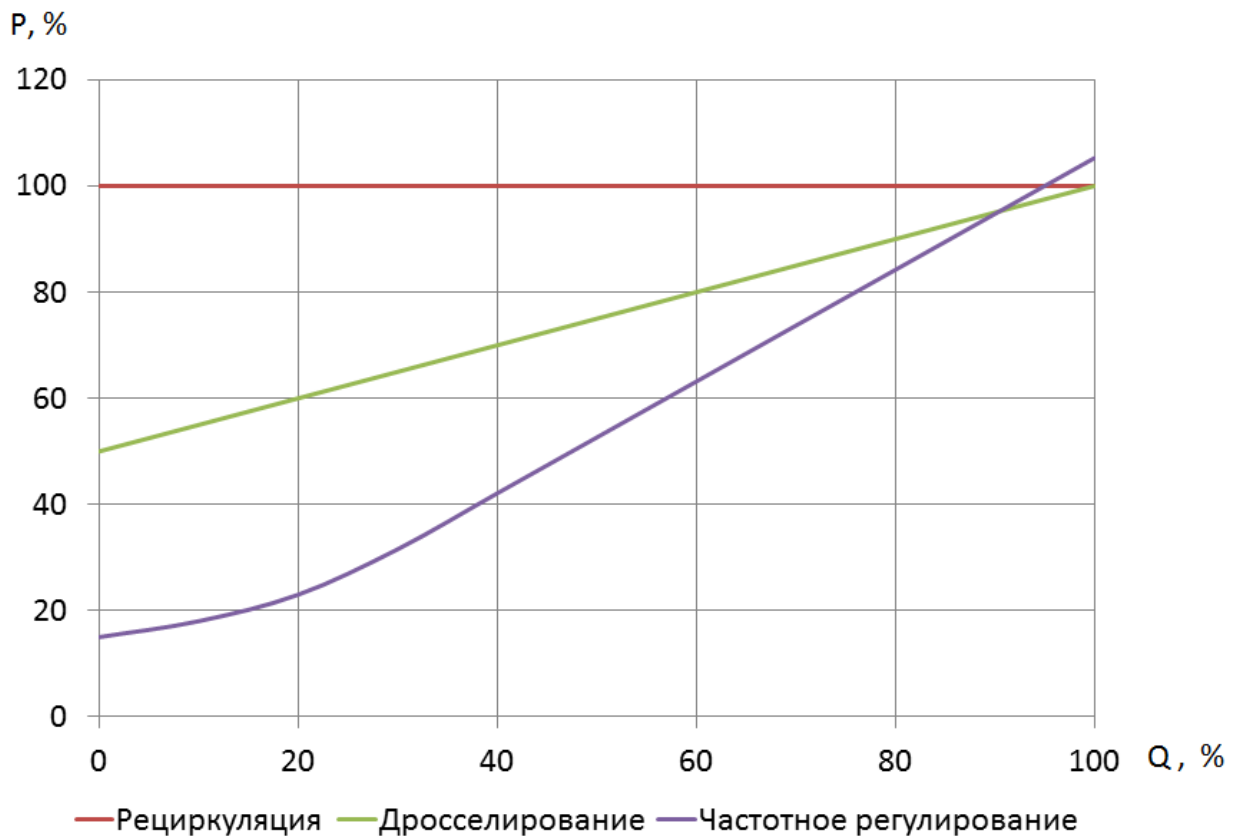


Рисунок 2. Зависимости потребления энергии от расхода жидкости

График потребления энергии при частотном регулировании имеет две особенности: во-первых при малых расходах он «отклоняется вверх» из-за неустойчивости режима работы насоса при малых расходах; во-вторых при максимальном расходе жидкости сказывается КПД частотного преобразователя, и потребление энергии становится больше, чем при прочих способах регулирования.

При расчётах центробежных насосов можно принять следующие зависимости [1]:

- Производительность (расход) прямо пропорциональна скорости вращения ротора;
- Давление прямо пропорционально квадрату скорости вращения ротора;
- Потребляемая мощность пропорциональна кубу скорости вращения ротора;

При дросселировании расход уменьшается, но давление на выходе насоса растёт, поэтому потребляемая мощность слабо уменьшается при уменьшении

расхода. Изменение потребляемой мощности можно оценить по характеристическим кривым или используя эмпирическую формулу.

$$P_{др} = \frac{P_{ном}}{2} * \left(1 + \frac{Q_{др}}{Q_{ном}}\right)$$

Где:

$P_{др}$ и $P_{ном}$ потребляемая мощность при дросселировании и в оптимальной рабочей точке;

$Q_{др}$ и $Q_{ном}$ расход при дросселировании и в оптимальной рабочей точке;

Помимо непосредственно экономии энергии нужно учесть и увеличение затрат:

- КПД ПЧ с учётом затрат на охлаждение принять 90%
- Внедрение ПЧ потребует капитальных затрат, которые окупаются не сразу. Поэтому для оценки экономического эффекта необходимо учитывать ставку дисконтирования по принятой на предприятии методике, обычно речь идёт о 10-30% в год.

Подход к расчёту энергетической эффективности вентиляторов во многом соответствует расчёту центробежного насоса.

Пример расчёта экономии электроэнергии

В качестве примера рассмотрим реальную насосную состоящую из 4 насосов. В своё время станция проектировалась с перспективой роста, но до сих пор работает в режиме с одним работающим насосом. Для уравнивания наработки по агрегатам, раз в месяц происходит переключение на следующий насос. Регулирование давления на выходе станции обеспечивается заслонкой, то есть дросселированием.

- Марка насоса 300Д90А;
- Производительность насоса $Q_{opt}=1250$, м³/час;
- Напор $H_{opt}=54$, м (водяного столба);
- Марка электродвигателя АИР355 С4У3;
- Механическая мощность $P=250$, кВт;
- Частота вращения $n=1490$, 1/мин;
- Напряжение питания $U=380$, В;

- Ток двигателя $I=437$, А;
- Давление на выходе насосной станции $p_{\text{вых}}=2,3$ кгс/см²;
- Давление на входе насоса $p_{\text{вх}}=0,3$ кгс/см²;
- Расход воды в месяц $V_{\text{мес}}=330000$ м³;
- Тип регулирования – дросселирование.

На рисунке 3 приведены характеристические кривые и положение оптимальной рабочей точки при различной скорости вращения ротора для близкого по параметрам насоса 300D70 [2].

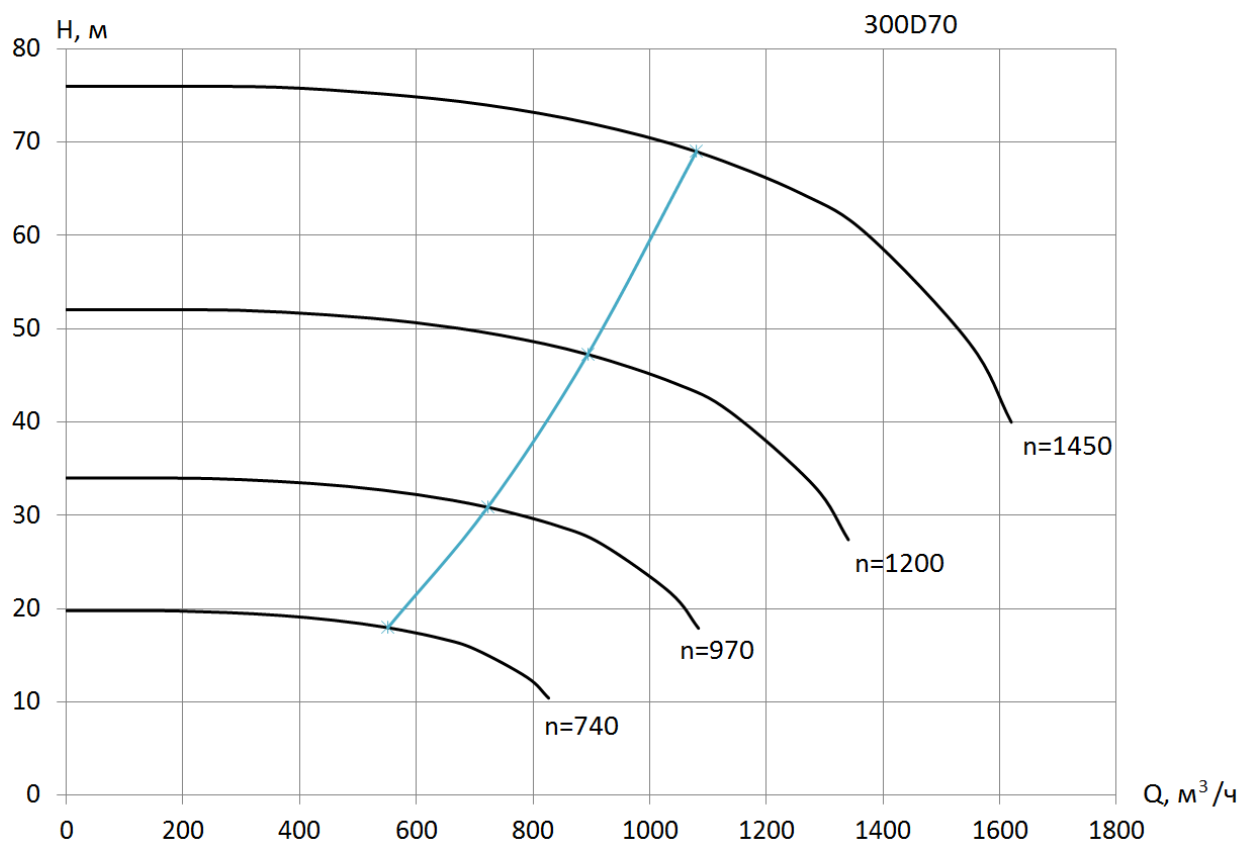


Рисунок 3. Семейство характеристических кривых для насоса 300D70

При регулировании рециркуляцией, насос работает в режиме близком к оптимальному при максимальной (оптимальной) производительности не зависимо от потока воды. Потребление механической энергии равно номинальной мощности двигателя, потребление электрической энергии будет таким же, но с учётом КПД двигателя и $\cos(\phi)$. Потребление энергии можно рассчитать из паспортных данных.

$$P_{\text{рец}}=P_{\text{opt}} = U * I * \sqrt{3} = 380 * 437 * \sqrt{3} = 288, \text{кВА}$$

При регулировании дросселированием, рабочая точка насоса сдвигается в область более высокого давления и меньшего расхода, потребление энергии снижается, но КПД насоса резко падает. Оценить снижение потребления энергии можно по графикам характеристических кривых насоса или по приближенной формуле:

$$P_{др} = \frac{P_{opt}}{2} * \left(1 + \frac{Q}{Q_{opt}}\right)$$

$$Q = \frac{V_{мес}}{730} = \frac{330000}{730} = 452, \frac{м^3}{ч}$$

$$P_{др} = \frac{288}{2} * \left(1 + \frac{452}{1250}\right) = 196, \text{кВА}$$

Рассчитаем частоту вращения ротора насоса исходя из условий снижения производительности и напора.

$$n_Q = n * \frac{Q}{Q_{opt}} = 1490 * \frac{452}{1250} = 539, \frac{1}{мин}$$

$$n_H = n * \sqrt{\frac{H}{H_{opt}}}$$

$$H = (p_{вых} - p_{вх}) * g = (2,3 - 0,3) * 9,8 = 19,6, \text{м}$$

$$n_H = 1490 * \sqrt{\frac{19,6}{54}} = 898, \frac{1}{мин}$$

Рабочая точка, обеспечивающая необходимую производительность, будет достигаться при частоте вращения насоса между n_H и n_Q . Примем за частоту вращения ротора большую.

$$P_{рег} = P_{opt} * \left(\frac{n_H}{n}\right)^3 = 288 * \left(\frac{898}{1490}\right)^3 = 63, \text{кВА}$$

Регулирование частоты вращения двигателя осуществляется с помощью Преобразователя частоты. КПД ПЧ мощностью свыше 100 кВт, обычно не хуже 95%. С учётом этого потребляемая мощность составит

$$P_{ПЧ} = \frac{P_{рег}}{\eta} = \frac{63}{0,95} = 66, \text{кВт}$$

Рассчитаем стоимость электроэнергии для трёх вариантов регулирования. Примем цену электроэнергии 5 руб/кВт.ч. Примем количество часов в месяц 730 ч. Учитывая, что для мощных электродвигателей $\cos(\phi) > 0,9$, примем активную мощность равной реактивной.

Способ регулирования производительности насосной станции	Потребляемая мощность, кВт	Потребление энергии в месяц, кВт*ч	Цена электроэнергии в месяц, тыс. руб.
Рециркуляция	288	210240	1051
Дросселирование	196	143080	715
ПЧ	66	48180	241

Цена электроустановки с ПЧ мощностью 250 кВт колеблется от 1200 т.р. (минимальная конфигурация) до 3200 т.р. (конфигурация с резервированием и «плавным» переключением нескольких насосов). Таким образом, срок окупаемости внедрения ПЧ составит от 3 до 7 месяцев. С учётом сроков ПНР и дисконтирования срок окупаемости вырастет, но составит не более 5-9 месяцев. Впоследствии можно рассчитывать на экономию 5,5 млн.р. в год. Дополнительную экономию можно будет получить за счёт уменьшения износа и повышения надёжности работы насосной станции и трубопроводной системы. Включение ПЧ в АСУ позволит оперативно отслеживать и управлять насосной станцией из центра диспетчеризации. Что в свою очередь позволит высвободить часть персонала.

На рисунке 4 приведена диаграмма, отражающая совокупную стоимость владения насосной установкой из примера, исходя из 10 летнего жизненного цикла. Электроэнергия, даже при применении ПЧ остаётся основным источником затрат. Поэтому для снижения совокупной стоимости владения необходимо уделять максимум внимания снижению затрат на электроэнергию.

Структура совокупной стоимости владения насосной станцией

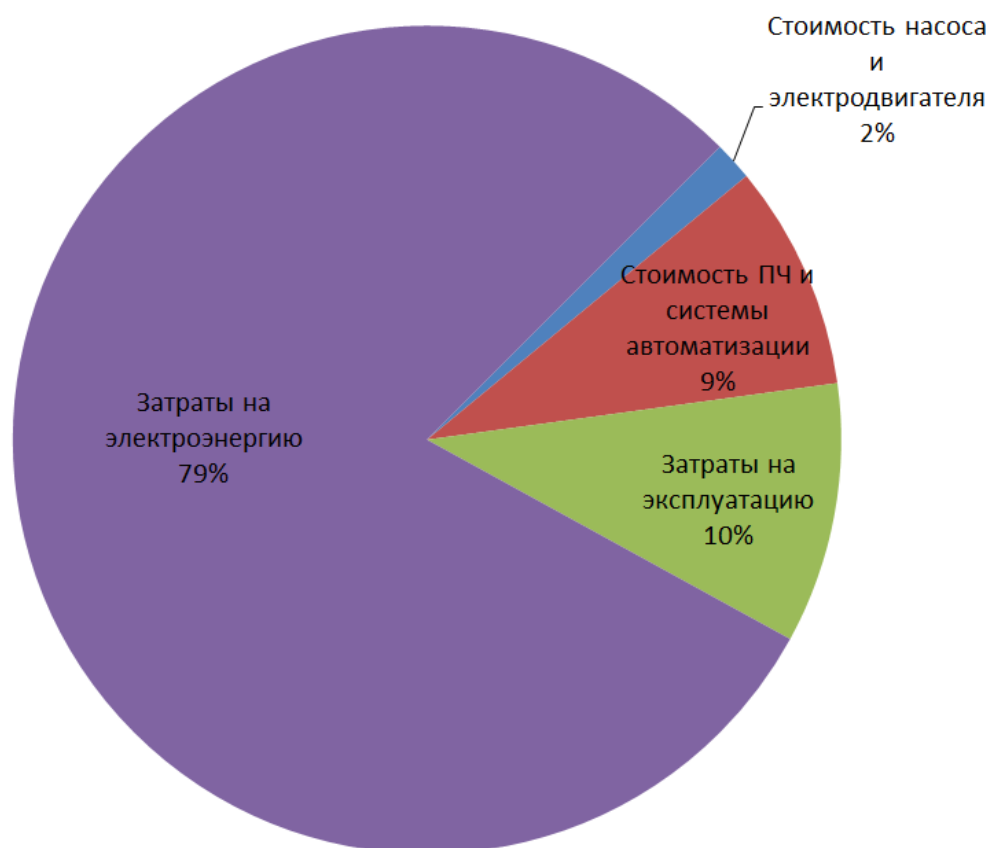


Рисунок 4. Диаграмма совокупной стоимости владения насосной станцией

Заключение

Внедрение ПЧ в приводную технику может принести заметный экономический эффект не только от экономии энергии но и от автоматизации управления и увеличения срока службы системы в целом. Главное, на стадии выработки решения грамотно рассчитать ожидаемый результат, выбрав оптимальное техническое решение. Бездумное внедрение ПЧ может наоборот привести либо к увеличению сроков окупаемости, либо даже к убыточности решения.

Литература

1. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры: учебник для теплоэнергетических специальностей вузов / В.М. Черкасский - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 416 с.

2. Технические параметры насоса 300D70A [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vipom.ru/search_pump1450.shtml?q1=343. – дата обращения 03.03.2017

3. Статистика производства электроэнергии в РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic> – дата обращения 03.03.2017