

ПРИНЦИП БАРЖО И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СССР

П. А. МУХАЧЕВ

Принцип Баржо заключается в использовании разностей температур воды и воздуха арктических областей для получения механической энергии.

Идея превращения тепла в механическую работу при малых разностях температур горячего и холодного источников появилась еще в конце XIX столетия.

Несмотря на теоретические обоснования целесообразности использования малых разностей температур для энергетических целей, идея эта, видимо, не считалась достойной внимания и долгое время не получала практического применения.

В 1926 г. Клод и Бушеро вновь подняли этот вопрос. В докладе Парижской академии наук они представили результаты своих опытов по использованию разницы температур между глубинными и поверхностными водами морей тропических стран для производства механической энергии. Опыты Клода и Бушеро показали, что, несмотря на малую рентабельность опытной установки из-за громоздкости и дороговизны оборудования, вопрос об использовании малой разности температур не является праздным и удачное практическое разрешение его сулит огромные возможности получения дешевой энергии без затраты топлива.

Громоздкость оборудования опытной установки Клода и Бушеро объясняется тем, что в качестве рабочего тела был применен водяной пар, физические свойства которого при низких температурах (незначительные давления, большой удельный объем) обуславливают, при больших мощностях, преувеличенные размеры машинной установки, создают трудности эксплуатации последней и значительно сокращают полезную выработку энергии из-за больших расходов на перекачивание горячей и охлаждающей воды, а также на эжекцию воздуха.

Недостатки физических свойств водяного пара при низких температурах могли бы быть устранены, если бы в качестве рабочего тела использовать не водяной пар, а пары жидкости, кипящей при низкой температуре, как например, аммиак, жидкую углекислоту и т. д.

Таким образом, идея использования малой разности температур подсказывает применение в качестве рабочего тела веществ, физические свойства которых являются наиболее благоприятными при разрешении проблемы получения механической энергии при малом перепаде температур.

Опыты Клода и Бушеро натолкнули Баржо на мысль использовать для получения механической энергии естественную разность температур воды под слоем льда и наружного воздуха в арктических областях.

Известно, что большие массы воды, будучи защищены от влияния внешней температуры слоем льда, сохраняют во время зимы большие количества тепла. Температура воды, находящейся под слоем льда, даже на крайнем севере составляет 0—4°C. Таким образом, масса воды, яв-

ляясь огромным резервуаром тепла, может быть использована как горячий источник тепла в термодинамическом цикле превращения тепла в механическую работу. Наружный воздух, достигающий температуры -70°C , в этом случае, явится холодным источником тепла.

Баржо на II мировой энергетической конференции в 1930 г. в Берлине предложил осуществить арктическую силовую установку для использования вышеуказанной разности температур по следующему способу (схема на рис. 1).

Насос 1 подает воду из-под ледяного покрова в испаритель 2, где эта вода используется для испарения жидкости, кипящей при низкой температуре. Пар, получаемый в испарителе, служит рабочим телом установки. Вода, поступающая в испаритель, превращается в последнем в лед, который должен непрерывно удаляться из испарителя и транспортироваться на отвал, находящийся за пределами территории станции. Насыщенный пар рабочего тела из испарителя поступает в турбину 3, где расширяется, производя работу, после чего направляется в конденсатор 4, где охлаждается и конденсируется. Конденсат насосом 5 удаляется из конденсатора и подается в испаритель 2.

Баржо предложил в качестве рабочего тела использовать бутан, для которого температура кипения при давлении $760 \text{ мм рт. ст.} - 0,5^{\circ}\text{C}$, удельный вес жидкости при 0°C и давлении 760 мм рт. ст.

$\gamma = 0,601 \text{ кг/литр}$. Бутан обладает свойством почти не растворяться в воде. Свойство нерастворимости бутана в воде и малый удельный вес по сравнению с удельным весом воды позволяют применить чрезвычайно простую конструкцию конденсатора. Конденсатор представляет из себя башню, внизу которой располагается решетка. Башня, начиная от решетки, заполняется криогидратом (холодильным агентом) на $3/4$ своего объема. Криогидратом служит замороженный раствор поваренной соли. Температура за-

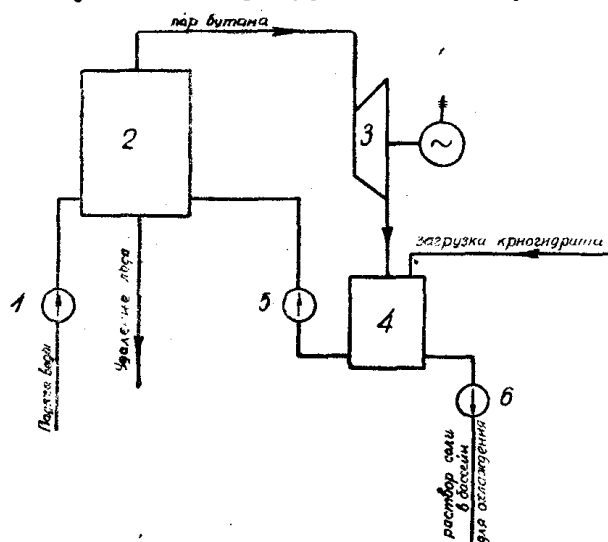


Рис. 1

твердевания раствора поваренной соли (точка плавления криогидрата) зависит от насыщенности раствора и составляет $-21,6^{\circ}\text{C}$ при полном насыщении. Пар бутана, выходящий из турбины, соприкасается в конденсаторе с кусками криогидрата, охлаждается и превращается в конденсат, а криогидрат при этом расплавляется.

Раствор поваренной соли и конденсат бутана стекают вниз под решетку и благодаря разным удельным весам и нерастворимости в воде бутана эти две жидкости будут находиться одна под другой, и их можно легко порознь удалять из конденсатора. Раствор соли удаляется из конденсатора насосом 6 и поступает в открытый канал, расположенный на территории станции, где при температуре воздуха ниже температуры затвердевания замерзает и полученный таким образом криогидрат поступает опять в конденсатор.

Принцип Баржо, общее описание проекта установки в Гудзоновом заливе мощностью 10000 л. с. , проектная стоимость этой установки приведены в двух статьях журнала „World Power“: 1. „Генерирование электри-

ческой энергии из энергии незамерзающей воды под поверхностью льда", 1929 г., сентябрь. 2. „Снабжение энергией в арктических районах“, 1930 г., октябрь.

В этих статьях рентабельность установки Баржо доказывается следующими соображениями:

1. Экономический КПД действительной установки должен быть в среднем 4%, т. е. возможно получить довольно эффективно электроэнергию без затраты дорогого топлива, доставка которого в некоторые северные районы очень затруднительна.

2. Возможно сооружение комплексной установки, состоящей из гидростанции и предлагаемой установки. Минимальная базовая мощность такой комплексной установки выросла бы в несколько раз, так как описанный процесс имеет наивысшую эффективность в период наименьшей мощности гидросиловых станций. Поэтому нелогично сжигать уголь и пускать в работу резервные паровые станции, когда тепло, заключенное в незамерзшей воде, так легко может быть превращено в механическую работу.

3. Капитальные затраты составляют всего около 1/4 стоимости гидроэлектрической станции одинаковой мощности и при самых благоприятных условиях местности. Сметная стоимость запроектированной станции на Гудзоновом заливе мощностью 10000 л. с. составляет 415800 долларов, т. е. стоимость установленной л. с. 41.5 доллара. Срок окупаемости станции 10 лет.

Во время дискуссии на мировой энергетической конференции Баржо сослался на уже построенную экспериментальную установку в Сибири, находящуюся под руководством академика П. П. Лазарева.

Последующие сообщения о строительстве и эксплуатации станции в Гудзоновом заливе или в других местах, а также о станции в Сибири, о которой Баржо упомянул на мировой энергетической конференции, в литературе отсутствуют. Последнее обстоятельство заставляет дальнейшую проработку вопроса об использовании разности температур воздуха и воды в арктических районах базировать, главным образом, на указанных двух статьях, в которых приведены весьма скудные данные. Из этих статей можно заимствовать лишь принципиально-теоретическую постановку вопроса, а технико-экономические соображения о рентабельности предложенных установок должны быть полностью пересмотрены и во многом дополнены. Необходимо полностью разработать теоретическую и расчетно-конструктивную части предлагаемой установки.

Технико-экономические расчеты любых установок, использующих тепло низкого потенциала, нельзя производить, не учитывая расхода энергии на собственные нужды. Баржо, видимо, обратил на это недостаточное внимание и оценил экономичность установки средним экономическим КПД $\eta = 4\%$, без учета расхода энергии на собственные нужды, т. е. дал КПД брутто.

В данном случае, оценка экономичности и рентабельности станции экономическим КПД, подсчитанным хотя бы и с учетом собственных нужд, является совершенно недостаточной. Гораздо большее значение будет иметь коэффициент, показывающий долю энергии, отдаваемой потребителю от всей вырабатываемой, т. е.

$$\eta = \frac{\mathcal{E}_{\text{нетто}}}{\mathcal{E}_{\text{брутто}}}, \text{ где}$$

$\mathcal{E}_{\text{нетто}}$ и $\mathcal{E}_{\text{брутто}}$ — количество электроэнергии, отдаваемой потребителю и вырабатываемой на станции.

Решающее же значение должен иметь синтезирующий технико-экономический показатель—себестоимость единицы отпускаемой со станции электроэнергии.

Неправильным является указание, что благодаря отсутствию в рабочем цикле высоких давлений (свыше 1 *ата*), испарители и конденсаторы могут быть выполнены из цемента, а не из металла, что значительно снижает капиталовложения. Это указание справедливо только для зимнего периода, при работе станции. Летом же для сохранения бутана в жидком виде при высоких температурах наружного воздуха необходимо или иметь какие-то особые металлические баллоны, или иметь испарители и конденсаторы, выполненные из металла для давлений порядка 5—6 *ата*.

Огромное техническое затруднение при проектировании и строительстве рассматриваемых станций заключается в организации транспорта льда с территории станции. Количество льда, получаемого из воды, испаряющей бутан, составляет 200—300 *тн/мгвтч*.

В проекте Баржо отсутствует указание на то, как и куда предполагается удалять такое огромное количество льда.

В 1932 г. инж. Акимов П. П. и Рукавишников В. Н. по заданию Главэнерго дали соображения о рентабельности применения способа Баржо в условиях СССР (Север Сибири). Работа напечатана в журнале „Энергетика“ 1935 г. № 4.

В этой работе авторы поставили своей задачей выяснить предельную температуру наружного воздуха, при которой возможно применение установки Баржо, и выбрать наиболее пригодное вещество для рабочего тела установки. В результате произведенных расчетов и принятия во внимание расхода энергии на собственные нужды, авторы пришли к заключению, что предельной температурой наружного воздуха, при которой возможно рациональное использование установок Баржо, надо считать—15°. Так как в значительной части Сибири средняя температура зимних месяцев лежит ниже—15°C, то использование рассматриваемых установок вполне возможно в течение довольно продолжительного периода времени. В качестве рабочего тела рекомендуется пропан или бутан.

В приведенных расчетах не учтена значительная часть расходов энергии на собственные нужды. В числе неучтенных расходов находится и расход на удаление льда из испарителей и с территории станции.

Определение расходов на собственные нужды произведено на основании неправильного утверждения о том, что род рабочего тела не влияет на эти расходы. Поэтому определение удельных расходов рабочего тела, воды и криогидрата произведено для аммиака, свойства которого хорошо исследованы, считая, что такие же удельные расходы будут и при любом другом рабочем теле.

В расчетах использования установленной мощности в зависимости от температуры воздуха не принято во внимание то положение, что при повышении температуры воздуха от расчетной (расчетная температура воздуха—это температура, для которой произведен расчет установки), вакуум турбины будет ухудшаться и в связи с этим будет происходить недовыработка энергии. Следовательно, полезная отдача энергии зависит от расхода энергии на собственные нужды и недовыработки энергии благодаря ухудшению вакуума при температуре воздуха выше расчетной.

Учет всех указанных факторов, не вошедших в расчеты инж. Акимова и Рукавишникова, несомненно, должен изменить и окончательный вывод этих авторов.

Тема „Использование разности температур воды и воздуха в арктических районах для получения механической энергии“ была в 1934 г. поставлена для разработки в Энергетическом институте Академии наук СССР. Ответственный исполнитель темы Стульников Н. П. Отчет о первом этапе работы, относящийся к концу 1935 года, содержал лишь предварительные соображения по ряду вопросов.

Необходимо констатировать, что способ Баржо не нашел еще практического применения. Вероятной причиной этого положения является недостаточная рентабельность установок Баржо в условиях Северной Америки, где предполагалось строительство таких установок.

В связи с развитием промышленности и транспорта и повышением потребности в электроэнергии в Северной Сибири, идея Баржо может быть с успехом использована, так как климатические условия Севера Сибири более благоприятны для таких установок, чем условия Северной Америки.

Так как охлаждающим телом в установке Баржо является криогидрат поваренной соли, для которого наименьшая возможная температура -21.6°C , то работа установки с наилучшим эффектом будет при температурах воздуха -25°C и ниже. Следовательно, работа установок с максимальным эффектом возможна в продолжение пяти месяцев в году. Общая продолжительность работы установок должна устанавливаться технико-экономическими расчетами. Можно ожидать, что эффективная работа возможна в продолжение 6—7 месяцев в году.

Для выявления общей экономичности арктических установок произведем прикидочный расчет. Примем для расчета следующие данные: мощность установки $N = 1000 \text{ квт}$, рабочее тело—бутан.

Главнейшие свойства бутана: удельный вес жидкого бутана 0.601 кг/л , теплоемкость жидкого бутана $C_1 = 0.55 \text{ кал/кг}^{\circ}\text{C}$. Скрытая теплота парообразования и давление при различных температурах даны в табл. 1.

Таблица 1

	Температура $^{\circ}\text{C}$					
	0	-5	-10	-15	-20	-25
Давление { мм/рт. ст.	775	760	525	425	340	270
{ ата	1.052	1.031	0.715	0.578	0.463	0.367
Скрытая теплота парообразования ккал/кг-	92.98	94.09	95.16	96.20	97.21	98.20

Как сказано, приводимые ниже расчеты являются прикидочными и произведены при ряде упрощающих предположений. Задачей их является лишь установление порядка технико-экономических показателей, характеризующих установку, работающую по циклу Баржо в определенных условиях. Более точные расчеты пока произвести невозможно, т. к. ряд моментов, связанных с эксплуатацией подобного рода установок, нуждается еще в технической доработке.

Тепловой расчет

Испаритель. В испарителе происходит испарение рабочего тела при замерзании нагревающего тела—воды. Таким образом, начальная температура пара бутана может быть принята $t_1 = 0^\circ\text{C}$.

Давление пара при этом $p_1 = 775 \text{ мм рт. ст.} = 1.05 \text{ ата}$.

Степень сухости примем приближенно $x_1 = 1$.

Теплосодержание пара $i_1 = i'_1 + x_1 r_1$,

где i'_1 —теплосодержание жидкости,

r_1 —скрытая теплота парообразования.

Так как $t_1 = 0^\circ\text{C}$, то $i'_1 = 0$ и

$$i_1 = r_1. \quad (1)$$

Турбина. Теплосодержание пара при выходе из турбины

$$i_{2t} = i'_2 + x_2 r_2. \quad (2)$$

Теплосодержание жидкости при температуре в конденсаторе t_2

$$i'_2 = C_p t_2 \quad (3)$$

Скрытая теплота парообразования при температуре t_2 найдется из таблицы 1.

Для определения x_2 составим уравнение, исходя из свойства адиабатического процесса, по которому энтропия $S = \text{const}$, т. е.

$$S = S'_1 + \frac{x_1 r_1}{T_1} = S'_2 + \frac{x_2 r_2}{T_2}.$$

Энтропия жидкости

$$S' = C_p \ln \frac{T}{273}.$$

Так как $t_1 = 0$, то $S'_1 = 0$.

Из уравнения $S = \text{const}$ имеем:

$$x_2 r_2 = \left(\frac{x_1 r_1}{T_1} - S'_2 \right) T_2. \quad (4)$$

Адиабатический тепловой перепад

$$H_0 = i_1 - i_{2t} \text{ ккал/кг}. \quad (5)$$

Удельный расход пара при нормальной нагрузке

$$d = \frac{860}{H_0 \eta_{0э}}. \quad (6)$$

Примем в дальнейших расчетах $\eta_{0э} = 0.6$.

Теплосодержание пара при выходе из турбины

$$i_2 = i_1 - \eta_{0i} H_0. \quad (7)$$

Примем $\eta_{0i} = 0.7$.

Удельный расход воды для образования пара в испарителе

$$d_w = \frac{d(i_1 - i'_2)}{t_w + r_w} \text{ кг/квч}, \quad (8)$$

где

t_w —температура воды, поступающей в испаритель,

r_w —скрытая теплота плавления льда.

Примем $t_w + r_w = 80$ ккал/кг.
Удельный расход криогидрата

$$d_{кр} = \frac{d(i_2 - i'_2)}{C_p(t'' - t'_{кр}) + r_{кр}} \text{ кг/квч}, \quad (9)$$

где

$t'_{кр}, t''_{кр}$ — температура криогидрата при таянии и поступлении в конденсатор,

C_p — теплоемкость криогидрата.

Полагаем $C_p = 1$ ккал/кг °С, $t''_{кр} = t_2$ и $r_{кр} = 80$ ккал/кг.

В таблице 2 приведены подсчеты по вышеприведенным формулам для различных температур наружного воздуха. Температура плавления криогидрата принята на 5° выше температуры воздуха.

Таблица 2

		Температура воздуха °С							
		-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45
$i_1 = r_1$	ккал/кг	92.98	92.98	92.98	92.98	92.98	92.98	92.98	92.98
$i'_2 = 0.55t_2$	"	-2.75	-5.5	-8.25	-11	-11	-11	-11	-11
$S'_{i_2} = 0.55 \ln \frac{T_2}{273}$	энтр. ед.	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
$x_2 i_2 = \left(\frac{x_1 r_1}{T_1} - S'_{i_2} \right) T_2$	—	93.8	94.68	95.46	96.14	96.14	96.14	96.14	96.14
$i_2 i' = i_2 + x_2 i_2$	ккал/кг	91.05	89.18	87.21	85.14	85.14	85.14	85.14	85.14
$H_0 = i_1 - i_2 i'$	—	1.93	3.8	5.77	7.84	7.84	7.84	7.84	7.84
$i_2 = i_1 - 0.7 H_0$	ккал/кг	91.63	90.32	88.94	87.49	87.49	87.49	87.49	87.49
$d = \frac{860}{0.6 H_0}$	кг/квч	740	377	248	183	183	183	183	183
$d_w = d \frac{(i_1 - i'_2)}{80}$	"	885	464	314	238	238	238	238	238
$d_{кр} = \frac{d(i_2 - i'_2)}{80 + (t_2 - t'_{кр})}$	"	820	425	284	212	21	190	180	180

Определение расхода энергии на собственные нужды

1. Подача воды в испаритель. Предусматривается наличие береговой насосной станции. Расход электроэнергии на подачу воды в % от вырабатываемой на станции будет:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{d_w (H_1 + H_2 + H_3)}{102 \cdot 3600 \cdot \eta_n \eta_{мот}} \cdot 100 = \frac{d_w (H_1 + H_2 + H_3)}{3670 \cdot \eta_n \eta_{мот}}$$

где

H_1 — геометрическая высота подачи в м,

H_2 — напор для преодоления внутреннего давления в испарителе в м,

H_3 — потери напора от сопротивления водоводов в м,

η_n и $\eta_{мот}$ — коэффициенты полезного действия насоса и мотора.

Примем $H_2 + H_3 = 6$ м, $\eta_n \eta_{мот} = 0.6$,

тогда

$$\mathcal{E}_1 = \frac{d_w (6 + H_1)}{2200} \%$$

Расход энергии на подачу воды в испаритель в зависимости от высоты подачи H_1 и температуры наружного воздуха приведен в таблице 3.

Таблица 3

Геометр. высота подачи м	Температура воздуха °С			
	-10	-15	-20	-25
5	4.45	2.32	1.57	1.19
10	6.45	3.37	2.28	1.73
15	8.45	4.42	3.00	2.27
20	10.45	5.47	3.71	2.81
25	12.45	6.52	4.43	3.35

2. Расход энергии на подачу бутана из конденсатора в испаритель

$$\mathcal{E}_2 = \frac{d [10 (P_n - P_k) + H_3]}{3670 \cdot \eta_n \eta_{\text{мот}}} \text{‰},$$

где

P_n и P_k — абсолютные давления в испарителе и конденсаторе.

Полагаем $H_3 = 5$ м и $\eta_n \eta_{\text{мот}} = 0.6$.

3. Расход энергии на удаление льда из испарителя и с территории станции. Полагаем, что удаление льда будет производиться гидравлическим способом со спуском под лед водяного источника.

Для этого метода удаления льда можно написать

$$\mathcal{E}_3 = \frac{a \cdot d_w H_3}{3670 \cdot \eta_n \eta_{\text{мот}}} \text{‰},$$

где

a — коэффициент расхода воды для удаления 1 кг льда,

H_3 — напор, необходимый для преодоления сопротивления водоводов и удаления льда.

Полагаем $a = 2$ кг/кг; $\eta_n \eta_{\text{мот}} = 0.6$; $H_3 = 30$ м.

4. Расход электроэнергии на подачу криогидрата в конденсатор элеватором

$$\mathcal{E}_4 = \frac{d_{кр} H}{3670 \cdot \eta_{эл} \eta_{\text{мот}}} \text{‰},$$

где

H — высота подачи криогидрата,

$\eta_{эл}$ — КПД элеватора.

Принимаем $H = 5$ м, $\eta_{эл} \eta_{\text{мот}} = 0.2$.

5. Расход электроэнергии на удаление раствора соли из конденсатора центробежным насосом

$$\mathcal{E}_5 = \frac{d_{кр} [10 (1 - P_k) + H_3]}{3670 \cdot \eta_n \cdot \eta_{\text{мот}}} \text{‰}.$$

Принимаем $H_3 = 5$ м, $\eta_n \eta_{\text{мот}} = 0.6$.

6. Расход электроэнергии на подачу криогидрата к элеватору, на удаление воздуха из конденсатора, на освещение и прочие неучтенные расходы оцениваем в 1‰.

Результаты подсчетов расхода электроэнергии \mathcal{E}_2 , \mathcal{E}_3 , \mathcal{E}_4 и \mathcal{E}_5 , в зависимости от температуры наружного воздуха, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Расход энергии на собств. нужды	Температура наружного воздуха °С						
	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40
$\mathfrak{E}_2 = \frac{d [10(p_u - p_k) + 5]}{2200} \%$	1.75	1.43	1.09	0.9	0.9	0.9	0.9
$\mathfrak{E}_3 = \frac{d_w}{37} \dots \dots \dots \%$	23.9	12.5	8.5	6.45	6.45	6.45	6.45
$\mathfrak{E}_4 = \frac{d_{кр}}{147} \dots \dots \dots \%$	5.57	2.39	1.93	1.44	1.36	1.29	1.22
$\mathfrak{E}_5 = \frac{d_{кр} [10(1 - p_k) + 5]}{2200} \%$	1.75	1.52	1.19	1.00	0.94	0.9	0.85
$\mathfrak{E}_6 \dots \dots \dots \%$	1	1	1	1	1	1	1
Всего $\dots \dots \dots \%$	33.97	18.84	13.71	10.79	10.65	10.54	10.42
округленно $\dots \dots \dots$	34	19	14	11	11	11	11

Суммарный расход электроэнергии на собственные нужды представлен в таблице 5.

Таблица 5

Геометрич. вы- сота подачи воды	Температура воздуха в °С			
	-10	-15	-20	-25
5 м	38.4	21.2	15.3	12
10	40.4	22.2	16.0	12.5
15	42.4	23.2	16.7	13.1
20	44.4	24.3	17.4	13.6
25	46.4	25.3	18.1	14.1

Проходные сечения турбины рассчитываются для определенного вакуума, т. е. в данном случае для определенной расчетной температуры воздуха, определяющей значение вакуума. При отклонении температуры воздуха в сторону увеличения давление за турбиной будет возрастать. Это повлечет за собой, при неизменном расходе пара, снижение мощности турбины. Приблизительно можно считать, что уменьшение мощности происходит пропорционально уменьшению теплового адиабатического перепада

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{H_{02}}{H_{01}}$$

С учетом оговоренного предположения в таблице 6 приведены мощности турбины в % от номинальной при различных расчетных и действительных температурах воздуха.

Таблица 6

Расчетная тем- пература воз- духа	Действительная температура воздуха			
	-10	-15	-20	-25
-10	100	100	100	100
-15	51	100	100	100
-20	33.5	66	100	100
-25	24.6	48.5	74	100

Если принять во внимание еще и расход энергии на собственные нужды, то использование установленной мощности в % будет характеризоваться данными, приведенными в таблице 7.

Таблица 7

Расч. темпер. воздуха	-10				-15				-20				-25				
	Действит. темпер. воздуха	-10	-15	-20	-25	-10	-15	-20	-25	-10	-15	-20	-25	-10	-15	-20	-25
Геометрич. высота подачи м.	5	61.6	61.6	61.6	61.6	29.8	78.8	78.8	78.8	18.2	50.7	84.7	84.7	12.6	36.5	62	88
	10	59.6	59.6	59.6	59.6	28.2	77.8	77.8	77.8	17.5	50	84	84	12.1	35	61.5	87.5
	15	57.6	57.6	57.6	57.6	27.8	76.8	76.8	76.8	16.8	49.3	83.3	83.3	11.5	35.4	60.9	86.9
	20	55.6	55.6	55.6	55.6	26.7	75.7	75.7	75.7	16.1	48.6	82.6	82.6	11.0	34.9	60.4	86.4
	25	53.6	53.6	53.6	53.6	25.7	74.7	74.7	74.7	15.4	47.9	81.9	81.9	10.5	34.4	59.9	85.9

Наивыгодная расчетная температура воздуха будет та, при которой годовая выработка электроэнергии окажется наибольшей или, что равнозначно, будет получаться наибольшее количество часов использования установленной мощности.

Можно принять, что температура воздуха -25°C и ниже наблюдается в продолжение 3600 часов в год, средняя температура -20°C в продолжение 700 часов, температура -15°C в продолжение 400 часов и температура -10°C в продолжение 160 часов. Подсчитанное при этих условиях число часов использования установленной мощности приведено в таблице 8.

Таблица 8

Геометрич. высота подачи воды м.	Расчетная температура воздуха $^{\circ}\text{C}$			
	-10	-15	-20	-25
5	3000	3750	3890	3770
10	2900	3700	3840	3740
15	2800	3650	3800	3710
20	2700	3600	3770	3690
25	2600	3540	3740	3660

Из таблицы 8 видно, что наибольшее число часов использования установленной мощности получается при расчетной температуре -20°C . Мало отличается от этого число часов использования при температуре -25°C . Если принять во внимание, что оборудование для расчетной температуры -20°C более громоздко и более дорого, чем для температуры -25°C , то следует за расчетную температуру принять -25°C . Приведенные выше соображения показывают, что арктические электростанции, работающие по циклу Баржо, могут быть успешно использованы в климатических условиях Севера Сибири.

Для определения экономичности станции произведем прикидочный расчет себестоимости киловатт часа отпускаемой со станции энергии.

Годовые расходы по станции составят

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4, \text{ где}$$

S_1 —расход на зарплату,

S_2 —амортизационные расходы,

S_3 —расходы на ремонт,

S_4 —расходы на поваренную соль.

Примем стоимость установленного *квт* 1000 руб/*квт*. Среднюю зарплату одной штатной единицы 1500 руб/мес. Штат 40 человек с оплатой в продолжение 9 мес., штат 10 человек с оплатой в продолжение года. Ремонт возлагается на эксплуатационный персонал. Процентные отчисления на амортизацию 7%. Расход на ремонтный материал 1% от стоимости оборудования. Стоимость соли 10 руб/т. Расход соли 1000 т/год. Выработку электроэнергии $\mathcal{E} = 3650 \cdot 10 = 36500$ *мгвтч*.

Расход на зарплату $S_1 = 1500 \cdot 40 \cdot 9 + 1500 \cdot 10 \cdot 12 = 720000$ руб/год. Амортизационные расходы $S_2 = 0.07 \cdot 1000 \cdot 10000 = 700000$ руб/год. Расход на ремонт $S_3 = 0.01 \cdot 1000 \cdot 10000 = 100000$ руб/год. Расход на повар. соль $S_4 = 10 \cdot 1000 = 10000$ руб/год.

Полные годовые расходы:

$$S = 720000 + 700000 + 100000 + 10000 = 1530000 \text{ руб/год.}$$

Себестоимость отпускаемого *квч*

$$C = \frac{S}{\mathcal{E}} = \frac{1530000 \cdot 100}{36500 \cdot 1000} = 4.2 \text{ коп/квч.}$$

Цифра себестоимости отпускаемого *квч* ориентировочная, но она указывает на несомненно большую экономичность предлагаемых установок по сравнению с тепловыми.

Заключение

1. Арктические установки, работающие по циклу Баржо, могут быть с успехом применены в условиях Севера Сибири.
2. Себестоимость единицы отпускаемой электроэнергии не выше, чем на тепловых станциях северных районов.
3. Предлагаемые установки должны обязательно работать в системе с тепловыми станциями или лучше с гидростанциями.