

Паротурбинная установка геотермальной электростанции бинарного цикла для геотермальных месторождений камчатского края

09, сентябрь 2011

авторы: Манушин Э. А., Бирюков В. В.

УДК 621.165.438

МГТУ им. Н.Э. Баумана
birukov.vladimir@mail.ru

Камчатский край располагает большими потенциальными запасами геотермальной энергии в виде парогидротерм вулканических районов и энергетических термальных вод с температурой 60...200 °С в платформенных и предгорных районах. Геотермальные станции базируются на источниках пароводяной смеси, добываемой из природных подземных трещинных коллекторов с глубины 0,5...3 км. Пароводяная смесь имеет степень сухости 0,2...0,5 и удельную энтальпию 1500...2500 кДж/кг. В среднем одна эксплуатационная скважина обеспечивает электрическую мощность 3...5 МВт. В качестве энергопреобразователей применяют паровые турбины.

Характеристика геотермальных ресурсов Камчатки

Камчатские месторождения теплоэнергетических вод трещинно-жильного типа горно-складчатых областей распространены в районах современного и недавнего вулканизма. В табл. 1 приведены основные характеристики Камчатского гидрогеотермального региона.

Таблица 1

Основные характеристики гидрогеотермального региона

Регион	Температура, °С	Минерализация, г/л	Запасы воды, тыс. м ³ /сут	Запасы тепла, тыс. Гкал/год	Мощность ГеоЭС, МВт
Камчатский	> 100	< 10	452	10725	> 900

Высокотемпературные геотермальные месторождения Камчатки (по данным ОАО «Геотерм») приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики действующих ГеоЭС (данные 2009 г.)

Месторождения	Состояние теплоносителя на выходе из скважины	Средняя температура в резервуаре, °С	Объем резервуара, км ³	Прогнозная максимальная электрическая мощность, МВт
Мутновское	Перегретый и насыщенный пар	220	80±24	460±138
Северо-Мутновское		220	30±9	172±52
Кошелевское	Перегретый и насыщенный пар	200	37,5±11,2	215±64
Нижне-Кошелевское		220	17,5±5,2	100±30
Больше-Банное	Вода термальная	220	15±4,5	58±17

Оценка геотермальных потенциалов Камчатского края

Гидротермальные конвективные системы Камчатского края разделяются условно на высокотемпературные (температура в недрах выше 150 °С) и низкотемпературные (температура ниже 150 °С).

При оценке прогнозных геотермальных ресурсов высокотемпературных систем применялись два основных метода:

по величине естественной тепловой разгрузки (выносу тепла поверхностными термопроявлениями);

по данным определения тепловой энергии, содержащейся в горных породах, насыщенных флюидом и распространенных в пределах гидротермальных систем.

Например, при расчете прогнозных ресурсов действующей Паужетской гидротермальной системы ее тепловая мощность по сумме выноса тепла естественными термопроявлениями была определена в 104 МВт. Увеличивая это значение в четыре раза и вводя коэффициент перехода в полезную работу тепловой энергии на устье скважин (0,23) и перевода ее в электрическую энергию (0,4), получим прогнозную электрическую мощность – 38 МВт. Оценка ресурсов по второму методу требует определения объема блока, слоя или резервуара нагретых горных пород, знание температуры и удельного теплосодержания горных пород. Результаты расчета Паужетской гидротермальной системы приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика Паужетского месторождения

Месторождение	Естественная тепловая разгрузка, МВт _т	Средняя температура резервуара, °С	Электрическая мощность, МВт _э
Паужетское	104	220	38

На основании проведенных оценок месторождений, выделены перспективные высокотемпературные геотермальные месторождения, на платформе которых возможна работа проектируемой паротурбинной установки. Характеристики месторождений представлены в табл. 4.

Таблица 4

Прогнозные геотермальные ресурсы высокотемпературных систем

Гидротермальное месторождение	Естественная тепловая разгрузка, МВт _г	Средняя температура резервуара, °С	Тепловая энергия резервуара, 10 ¹⁸ Дж	Прогнозная электрическая мощность, МВт _э
Ходуткинское	42	220	16,2±4,8	117±35
Карымское	146	200	20,25±6,1	146±44
Апальское	16	210	12,3±4,3	117±21

В настоящее время на Камчатке закончено строительство четвертого блока Верхне-Мутновской ГеоЭС электрической мощностью 6,5 МВт, комбинированного с бинарным циклом (отработанный теплоноситель не закачивается обратно в пласт, а используется для выработки электрической энергии). Предполагается, что добавление бинарного блока повысит мощность станции на 50 % без увеличения нагрузки на окружающую среду.

Включение в схему ГеоЭС бинарного блока выполнено впервые в России.

Проектирование паротурбинной установки геотермальной электростанции бинарного цикла

В рамках проектирования паровой турбины решаются следующие научно-технические проблемы:

выбор оптимального низкокипящего рабочего тела;

определение минимальной температуры охлаждения конденсата, обеспечивающей предотвращение отложений в рабочем тракте турбины; выбор оптимального метода удаления неконденсирующихся газов из конденсатора - испарителя;

обеспечение экологических ограничений по выбросу сероводорода, основного загрязняющего атмосферу вещества, исследование теплофизических свойств рабочего тела бинарного энергоблока.

Выбор низкокипящего рабочего тела

В качестве низкокипящего теплоносителя второго контура выбран изобутан – углеводород класса алканов, изомер нормального бутана. При бурении геотермальных

скважин выделяется большой объем попутных газов, в том числе изобутана. Его температура кипения минус 11,73 °С, температура плавления минус 159,6 °С.

Выбор тепловой схемы геотермальной станции бинарного цикла

Первым этапом выбора тепловой схемы ГеоЭС, для которой проектируется паротурбинная установка, был анализ принципов создания, упомянутой выше, Верхне-Мутновской ГеоЭС.

В основу создания Верхне-Мутновской станции были положены новые технические решения:

применена блочная, при полной заводской готовности, система подготовки пара, которая расположена в непосредственной близости к ГеоЭС;

использован модульный тип ГеоЭС при 100 % заводской готовности основных блоков - модулей (турбогенераторы, электрическое оборудование);

обеспечена экологически чистая схема использования геотермального теплоносителя с воздушным конденсатором, которая позволяет отобрать энергию от пара в турбинах, а конденсат направить в скважины закачки в землю. В этом случае теплоноситель не попадает в атмосферу.

Принципиально новые технические решения создания Верхне-Мутновской ГеоЭС были учтены, в частности при выборе тепловой схемы проектируемой станции.

На рис. 1 приведена схема ГеоЭС, для которой проектируется паротурбинная установка.

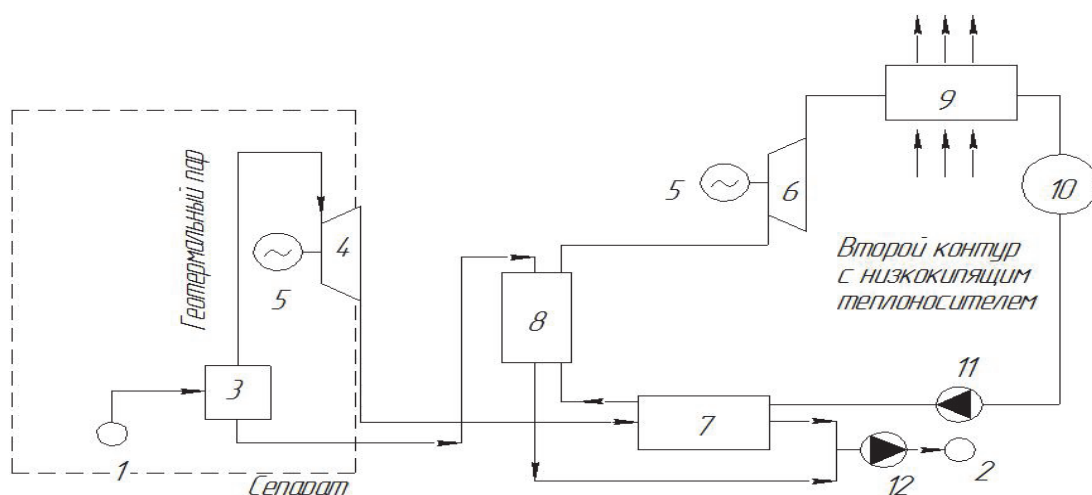


Рис. 1. Тепловая схема геотермальной электростанции бинарного цикла:

- 1 – добычная скважина; 2 – нагнетательная скважина; 3 – сепаратор; 4 – паровая турбина; 5 – генератор; 6 – турбина на низкокипящем рабочем агенте; 7 – конденсатор-испаритель; 8 – пароперегреватель; 9 – воздушный конденсатор; 10 – ресивер; 11 – циркуляционный насос; 12 – нагнетательный насос

Проектирование паротурбинной установки на геотермальном рабочем теле

Как показано на рис. 1, комбинированная геотермальная станция бинарного цикла включает в себя два энергетических узла. Первый энергетический узел состоит из паротурбинной установки, работающей на геотермальном рабочем теле.

На данном этапе исследовательской работы определены тепловые характеристики геотермального рабочего тела, низкокипящего рабочего агента, а также параметры сепараторной части и паровой турбины, для наиболее перспективного с экономической и технической точек зрения геотермального месторождения. По результатам оценок месторождений, представленных в настоящей работе, таким является Карымское геотермальное месторождение (см. табл. 4).

При средней температуре резервуара 200 °С теплоносителем на поверхности является перегретый и насыщенный пар/термальная вода.

В бинарной установке для электростанции предусмотрено использование пара, получаемого двухступенчатой сепарацией пароводяной смеси, которая забирается из геотермальных скважин, для выработки электроэнергии в двух паротурбинных агрегатах конденсационного типа, работающих в базовом режиме с начальным давлением пара 0,65 МПа. Для обеспечения экологической чистоты проекта в технологической схеме электростанции предусмотрена система закачки (реинжекции) конденсата и сепарата обратно в земные пласты, а также предотвращения выбросов сероводорода в атмосферу.

Технико-экономические показатели ГеоЭС и паротурбинной установки: установленная мощность ГеоЭС – 50 МВт (два блока); расход пара на один блок – 47,5 кг/с; расход пара на всю ГеоЭС – 95 кг/с; мощность (нетто) блока – 23,03 МВт, ГеоЭС – 46,06 МВт.

Работа сепаратора обеспечивает на выходе степень сухости пара более 0,9998 и общее солесодержание в паре менее 0,5 мг/л. Для обеспечения этих параметров пара сепаратор имеет промывочное устройство, в которое подается чистый конденсат. На номинальном режиме (по мощности) сепараторы пара работают при следующих параметрах:

Параметры пара на входе в сепаратор: расход – 47,317 кг/с; давление (абс) – 0,64 МПа; температура – 186,3 °С; влажность пара – 0,02 %.

Параметры пара на выходе из сепаратора: расход – 47,5 кг/с;

давление (абс) – 0,65 МПа; температура – 187 °С; влажность пара – 0,1 %.

Активно-реактивная двухпоточная турбина обеспечивает номинальную мощность 25 МВт. Она достигается при начальном давлении пара перед стопорной захлопкой 0,62 МПа, содержании в паре неконденсирующихся газов 0,4 % (по массе), давлении пара в конденсаторе 5 кПа. В каждом потоке турбины – восемь ступеней.

Номинальные расчетные параметры пара перед турбиной:

давление пара – 0,62 МПа;

степень сухости пара перед турбиной – 0,9998;

содержание в паре неконденсирующихся газов – 0,4 %;

давление пара в конденсаторе – 5,0 кПа.

Принципиальная схема установки второго контура

Во втором энергетическом узле, включающем турбину, работающую на изобутане, тепловая энергия сепарата Q_c передается органическому рабочему телу (ОРТ). Соответствующий тепловой баланс может быть записан в виде:

$$Q^c C_p^c (T_1^c - T_2^c) = Q^{орт} C_p^{орт} (T_1^{орт} - T_2^{орт}),$$

где C_p^c , $C_p^{орт}$ – средняя теплоемкость соответственно сепарата и ОРТ; T_1^c – температура сепарата на входе в теплообменник; T_2^c – температура сепарата на выходе из теплообменника; $T_1^{орт}$ – температура ОРТ на входе в теплообменник; $T_2^{орт}$ – температура сепарата на выходе из теплообменника.

На рис. 2 приведена схема установки второго контура.

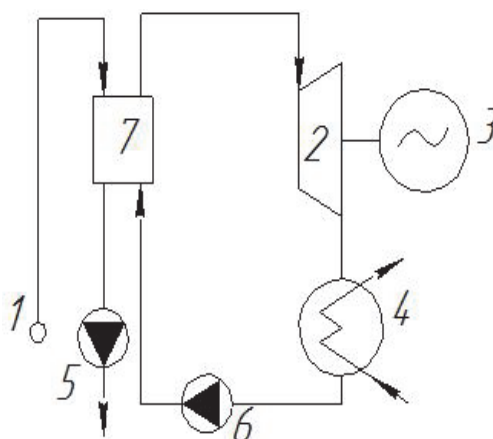


Рис. 2. Принципиальная схема установки второго контура:

1 – геотермальная скважина; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – нагнетательный насос; 6 – циркуляционный насос второго контура; 7 – блок теплообменников для нагрева, испарения и перегрева рабочего агента

Энергоустановка бинарного цикла имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам относятся:

более полное использование теплоты рассола и закачки его в пласт с меньшей температурой;

возможность использования геотермальных ресурсов с пониженной температурой для выработки электроэнергии;

агрессивные компоненты геотермального теплоносителя не попадают в турбину, конденсатор и другое оборудование, что обеспечивает более длительный срок их эксплуатации;

сопутствующие вредные газы не попадают в окружающую среду.

Недостатком установки является усложнение схемы и некоторая потеря температурного потенциала, поскольку для передачи тепла от геотермального флюида к рабочему телу необходим перепад температур.

Особенностью выполнения данной работы является возможность практической реализации и применения в машиностроении результатов проведенного исследования.

В работе определены температурные параметры геотермального и низкокипящего рабочих тел, состояние рабочего тела на поверхности скважин, давления скважин, параметры паровой турбины, давление перед стопорной запорной, расход пара и т.д. Кроме того, выполнен расчет и эскизное проектирование основного преобразователя энергии – паротурбинной установки. Исследование геотермальных месторождений и проектирование паротурбинных установок для Камчатского края носит стратегический характер, как в социальной, так и в экономической сферах.

Литература

1. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. М.: Высшая школа, 1980. 550 с.
2. Алхасов А.Б. Возобновляемая энергетика. М.: Физмалит, 2010. 256 с.
3. Берман Э. Геотермальная энергия. М.: Мир, 1978. 411 с.
4. Конструирование и расчет на прочность турбомашин газотурбинных и комбинированных установок / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, Э.А. Манушин и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009. 519с.
5. Поваров О.А. Мутновский геотермальный электрический комплекс на Камчатке. М.: Теплоэнергетика, 2001. 154 с.
6. Теория теплообмена / Под ред. А.И. Леонтьева.– 2-е изд., испр. и доп.

М.: Изд-во МГТУ им Н.Э.Баумана, 1997. 684 с.

7. Теплотехника / Под ред. А.М. Архарова.– 3-е изд., переработ. и доп. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э.Баумана, 2011.791 с.