

# Энергетика и электротехника

УДК 550.361; 621.1

## Определение оптимальных параметров геотермальной паротурбинной установки

А.В. Романенко<sup>1</sup>, А.А. Жинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Калужский турбинный завод»

<sup>2</sup> Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана

## Determination of the optimum parameters of a geothermal steam turbine installation

A.V. Romanenko<sup>1</sup>, A.A. Zhinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PJSC Kaluga Turbine Plant

<sup>2</sup> Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University

Предложена методика определения оптимальных параметров цикла паротурбинной установки геотермальной электростанции с учетом характеристик скважин конкретного геотермального месторождения. Рассмотрены одноконтурные тепловые схемы паротурбинной установки при отсутствии и наличии промежуточного ввода пара в турбину. Проведен анализ тепловой эффективности геотермальных установок при различных значениях давления пара на входе в турбину и конденсатор. Показано, что с учетом обеспечения устойчивой работы скважин рост начального давления пара в цикле паротурбинной установки благоприятно сказывается на облике геотермальной электростанции. Для одноконтурных схем начальное давление пара определяется максимумом удельной работы турбины, полученной с учетом изменения давления пароводяной смеси в устье скважин от его расхода. Установлено, что для паротурбинной установки без промежуточного ввода пара в турбину геотермальной электростанции Мутновского месторождения оптимальное начальное давление пара составляет 6...8 атм.

**EDN:** WJBPNX, <https://elibrary/wjbpx>

**Ключевые слова:** паротурбинная установка, геотермальная энергия, геотермальная электростанция, термическая эффективность, оптимизация параметров

The paper proposes a method for determining optimal parameters of the steam turbine installation cycle of a geothermal power plant, taking into account the well characteristics of a specific geothermal field. It considers the single-circuit thermal circuits of a steam turbine installation in the absence and presence of the intermediate steam input into a turbine. The geothermal installation thermal efficiency is analyzed at various values of steam pressure at the input to the turbine and condenser. It is shown that, providing stable operation of the well increases the initial steam pressure in the steam turbine installation cycle and has a beneficial effect on the geothermal power plant appearance. For the single-circuit schemes, the initial steam pressure is determined by the turbine maximum specific work obtained taking into account alteration in the steam pressure at the wellhead, which depends on its

flow rate. It was established that for a steam turbine installation without intermediate steam input into the turbine of the geothermal power plant of the Mutnovskoye field, the optimal initial pressure of the steam-water working fluid was 6–8 atm.

EDN: WJBPNX, <https://elibrary/wjbpx>

**Keywords:** steam turbine installation, geothermal energy, geothermal power plant, thermal efficiency, parameter optimization

Совершенствование геотермальных энергоустановок — одно из самых перспективных направлений развития возобновляемой энергетики [1–8]. Создание высокоэффективных систем использования геотермального тепла является чрезвычайно актуальной задачей для Российской Федерации, богатой на гидро- и петрогеотермальные ресурсы, так как в последние годы наметилось отставание в этой области от ведущих стран мира [3, 9, 10].

Характеристики геотермальных месторождений (и даже отдельных скважин в них) строго индивидуальны и существенно изменяются со временем. При этом они должны максимально точно соответствовать эксплуатационным характеристикам геотермальных энергоустановок.

Устойчивость режимов работы геотермальной скважины во многом зависит от сложных метастабильных течений пароводяного рабочего тела в них от забоя до устья [11]. Чтобы повысить устойчивость работы скважины, применяют различные методы, в том числе дросселирование потока на устье [12].

Цель работы — создание методики определения на этапе проектирования и поддержания при эксплуатации оптимальных параметров пароводяной смеси (ПВС) на входе в энергоустановку для обеспечения устойчивости работы скважин и получения максимальной эффективности установки.

Выбор тепловой схемы, типа и параметров цикла геотермальной энергетической установки, а также рабочего тела, существенно влияет на ее термическую эффективность. В последние годы этой проблеме посвящено большое количество научных исследований [8, 13–19]. Например, в работах [15, 19] рассмотрены вопросы оптимизации параметров циклов паротурбинной установки (ПТУ) с органическими рабочими телами, построенными по одно- и двухконтурным схемам.

Исследуем характеристики одноконтурной ПТУ геотермальной электростанции (ГеоТЭС), работающей на геотермальной ПВС, для нескольких тепловых схем энергоустановки. Более подробно рассмотрим схемы без промежу-

точного ввода ПВС в турбину при различных начальных параметрах ПВС.

Для исследования использованы реальные характеристики скважин Мутновского геотермального месторождения [13] в диапазоне начального давления пара  $p_0 = 4 \dots 24$  ата теплового цикла ПТУ ГеоТЭС. Выбор такого диапазона давления рабочего тела обусловлен его зависимостью от расходных характеристик скважин конкретного месторождения, а также от возможности обеспечения устойчивости их работы. Также на выбор оптимального начального давления пара  $p_0$  существенно влияет давление в конденсаторе ПТУ, определяемого его типом, конструкцией и условиями эксплуатации [20, 21].

Следует отметить, что выбор начального давления пара в цикле оказывает большое влияние не только на термическую эффективность установки, но и на ее конструкцию и габаритные размеры, так как большие расходы и низкие параметры пара ГеоТЭС требуют больших диаметров паропроводов, арматуры и регулирующих органов ПТУ, во многом определяющих ее стоимость.

**Характеристики геотермальных скважин.** Характеристики реальных скважин геотермальных месторождений весьма разнообразны и не описываются единой числовой зависимостью. Вместе с тем расходные характеристики скважин обычно имеют общую качественную закономерность: с ростом давления ПВС в устье скважины уменьшается расход ПВС и выход паровой фазы.

При этом темп снижения расхода пара с ростом давления больше, чем у расхода ПВС  $G_{см}$ . Это можно объяснить тем, что расход пара в ПВС определяется зависимостью

$$G_{п} = G_{см} \frac{h - h''}{r},$$

где  $h$  и  $h''$  — энтальпия ПВС и насыщенного пара;  $r$  — скрытая теплота парообразования.

С ростом давления уменьшается расход ПВС  $G_{см}$ . Одновременно вследствие быстрого

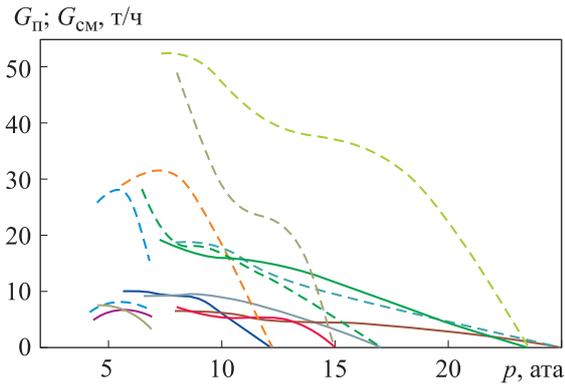


Рис. 1. Зависимости расходов пара  $G_p$  (сплошные линии) и ПВС  $G_{cm}$  (штриховые линии) от давления ПВС в устье  $p$  скважин Мутновского месторождения

роста энтальпии насыщенного пара  $h''$  уменьшается величина  $(h-h'')/r$ , а энтальпия ПВС  $h$  и скрытая теплота парообразования  $r$  изменяются сравнительно мало.

Указанные тенденции иллюстрируют полученные экспериментальным путем расходные характеристики некоторых скважин Мутновского геотермального месторождения (Камчатка), приведенные на рис. 1.

Эти характеристики можно дополнить следующими замечаниями, основанными на анализе физических процессов истечения геотермальной ПВС:

- с понижением давления ПВС в устье следует ожидать возникновения режима звукового истечения паровой фракции из скважины, когда уменьшение давления ПВС в устье уже не приводит к росту расхода рабочего тела;
- с ростом давления ПВС в устье скважины неизбежно должно произойти ее запирание, когда расход рабочего тела резко сокращается, а затем истечение вовсе прекращается;
- основываясь на двух предыдущих пунктах, можно ожидать наличия участка слабого уменьшения расхода рабочего тела при изменении давления ПВС в устье скважины.

Отбор геотермальной среды с определенной глубины скважины предполагает слабое изменение энтальпии ПВС  $h$  с изменением давления ПВС в устье  $p$ , что подтверждают экспериментальные данные (сплошные линии), полученные для нескольких характерных скважин Мутновского месторождения, приведенные на рис. 2. Там же штриховой линией показано среднее значение энтальпии.

Изменение энтальпии ПВС для каждой скважины не превышает  $\pm 10\%$  среднего значе-

ния. Тенденции изменения энтальпии ПВС с ростом давления ПВС в устье конкретной скважины предсказать нельзя, так как она то возрастает, то падает.

Для оптимизации выполнен расчет среднего значения энтальпии ПВС в девяти характерных скважинах Мутновского месторождения. Расчет сделан с учетом массовых расходов и энтальпии ПВС отдельных скважин по уравнению

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^9 (G_i h_i)}{\sum_{i=1}^9 G_i}, \text{ кДж/кг},$$

где  $i$  — номер скважины.

Полученное среднее значение энтальпии ПВС в устье скважин  $\bar{h} = 1230$  кДж/кг хорошо коррелирует с данными геологоразведки, согласно которым на площадке № 3 Мутновского месторождения  $\bar{h} \approx 1300$  кДж/кг.

По данным, приведенным на рис. 1, построены усредненные расходные характеристики рассмотренных скважин Мутновского месторождения в относительных координатах  $\bar{p} = p/p_{max}$  и  $\bar{G} = G/G_{max}$ , где  $p_{max}$  и  $G_{max}$  — максимальные значения давления и расхода ПВС. Все они расположены между штриховыми линиями, показанными на рис. 3.

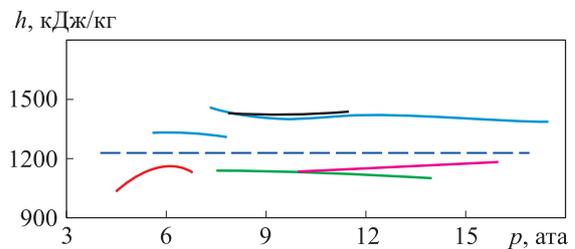


Рис. 2. Зависимости энтальпии ПВС  $h$  от давления ПВС в устье  $p$  скважин Мутновского месторождения

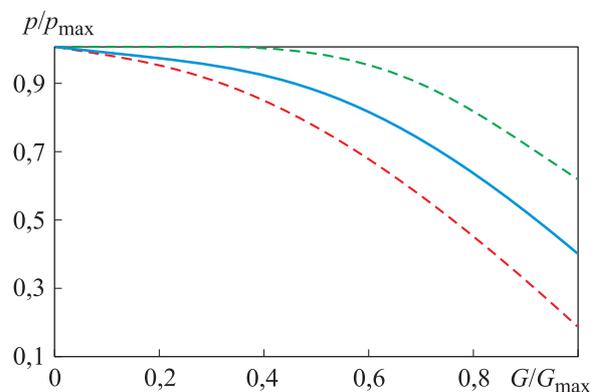


Рис. 3. Усредненные расходные характеристики геотермальных скважин в относительных координатах

В пределах зоны разброса расходных характеристик скважин (штриховые линии), получена усредненная характеристика (сплошная линия) в относительных координатах  $\bar{p}$  и  $\bar{G}$

$$\bar{p} = -0,4167\bar{G}^3 - 0,0625\bar{G}^2 - 0,1208\bar{G}.$$

Далее эта усредненная расходная характеристика геотермальных скважин использована при определении оптимальных параметров цикла ПТУ ГеоТЭС.

**Методика определения оптимальных параметров цикла ПТУ ГеоТЭС.** Оптимальные параметры пара на входе в турбину определены на основании вариантных расчетов цикла ПТУ ГеоТЭС, выполненной по схеме, приведенной на рис. 4. В схеме предусмотрена сепарация ПВС на входе в установку, расширитель и ввод пара из расширителя в промежуточные ступени турбины. Также исследована схема без расширителя и промежуточного ввода пара в турбину.

В качестве целевой функции оптимизации принята теоретическая мощность турбины, которая может быть выработана паром, выделившимся в сепараторе и расширителе при разделении геотермальной ПВС. При этом учтено изменение расхода ПВС, связанное с изменением начального давления пара в устье скважины. Энтальпия ПВС в устье скважины принята неизменной и не зависящей от давления.

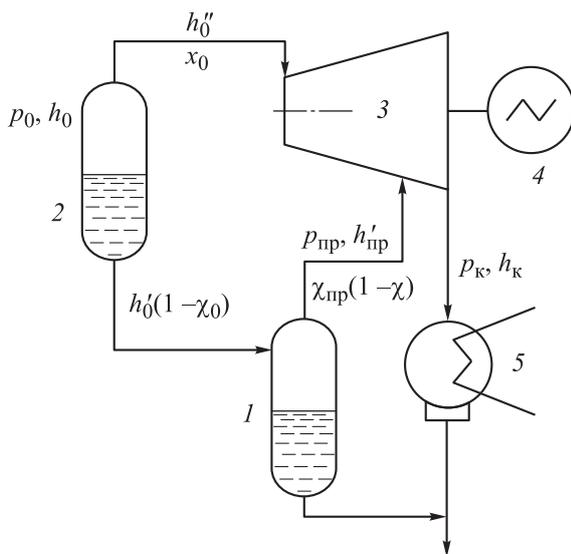


Рис. 4. Расчетная тепловая схема одноконтурной ГеоТЭС:  
1 — расширитель; 2 — сепаратор; 3 — турбина;  
4 — генератор; 5 — конденсатор

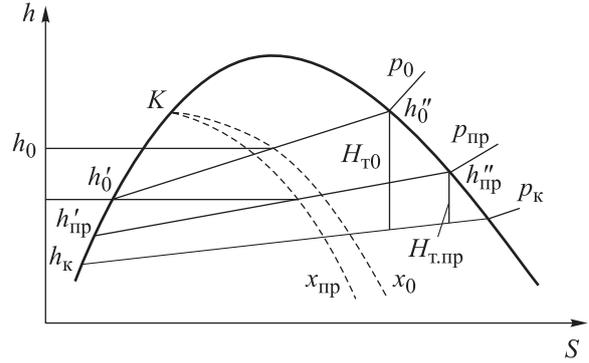


Рис. 5. Характерные процессы цикла ПТУ ГеоТЭС

Характерные процессы рассмотренного цикла ПТУ ГеоТЭС в координатах энтальпия  $h$  — энтропия  $S$  приведены на рис. 5, где  $K$  — критическая точка фазового равновесия вода-пар;  $H_{т.пр}$  — теоретический теплоперепад от параметров потока пара из расширителя до давления выхлопа турбины;  $h_k$  — энтальпия конденсата на выходе из конденсатора;  $h_0''$  — энтальпия насыщенного пара на входе в турбину.

В качестве зависимости расхода ПВС от давления ПВС в устье скважины принята усредненная характеристика, приведенная на рис. 3, при условии, что максимальное начальное давление пара в устье скважин конкретного геотермального месторождения  $p_{0max} < 24$  ата.

Количество пара, выделившееся из одного килограмма ПВС в сепараторе при давлении  $p_0$ , равно степени сухости этой смеси:

$$\chi_0 = \frac{h_0 - h_0'}{r_0},$$

где  $h_0$  — энтальпия ПВС на выходе из скважины;  $h_0'$  и  $r_0$  — энтальпия насыщенной жидкости и теплота фазового перехода при начальном давлении пара  $p_0$ .

Теоретическая удельная мощность, выработанная этим потоком пара в турбине (в расчете на 1 кг/с ПВС) при теоретическом теплоперепаде на турбину  $H_{т0}$ , определяется выражением

$$N_0 = \chi_0 H_{т0}.$$

Теплоперепад  $H_{т0}$  рассчитан по изоэнтропе от давления  $p_0$  до давления в конденсаторе  $p_k$ .

Количество жидкости, поступающей из сепаратора в расширитель равно  $(1 - \chi_0)$  в расчете на 1 кг/с ПВС.

Количество пара, образовавшееся в расширителе при дросселировании от начального давления пара  $p_0$  до его давления в расширителе  $p_{пр}$ :

$$\chi_{\text{пр}} = \frac{h'_0 - h'_{\text{пр}}}{r_{\text{пр}}} (1 - \chi_0),$$

где  $h'_{\text{пр}}$  и  $r_{\text{пр}}$  — энтальпия насыщенной жидкости и теплота фазового перехода при давлении  $p_{\text{пр}}$ .

Дополнительная мощность, выработанная этим потоком пара после его ввода в турбину,

$$N_{\text{пр}} = \chi_{\text{пр}} H_{\text{т.пр}}.$$

Суммарная теоретическая мощность турбины, выработанная потоками пара из сепаратора и расширителя,

$$N_{\Sigma} = N_0 + N_{\text{пр}}.$$

Изменение расхода ПВС при изменении начального давления пара учтено введением относительного расхода ПВС  $\bar{G}$ , полученного по усредненной расходной характеристике (см. рис. 3). Тогда теоретическая мощность, вырабатываемая турбиной, питаемой скважиной или кустом скважин, описывается уравнением

$$N = G_{\text{max}} \bar{G} N_{\Sigma}.$$

Теоретическая удельная мощность турбины

$$\bar{N} = N / G_{\text{max}} = N_{\Sigma} \bar{G}.$$

**Определение оптимального начального давления пара в цикле ПТУ ГеоТЭС без его промежуточного ввода в турбину.** Для демонстрации практического применения предлагаемой методики далее приведены результаты опреде-

ления оптимального начального давления ПВС в цикле одноконтурной ПТУ ГеоТЭС без промежуточного ввода пара в турбину.

В расчетах приняты усредненные характеристики геотермальной ПВС скважин Мутновского месторождения. Давление в конденсаторе ПТУ  $p_{\text{к}} = 5 \dots 20$  кПа выбрано из диапазона, характерного для воздушных конденсаторов и конденсаторов смесительного типа с водяным охлаждением ГеоТЭС. Сравнение вариантов проведено в диапазоне начального давления ПВС  $p_0 = 2 \dots 10$  ата.

Полученная путем расчета зависимость содержания пара в ПВС  $\chi_0$  от начального давления пара  $p_0$  при различных значениях начальной энтальпии ПВС  $h_0$  приведена на рис. 6, а. Видно, что с ростом начального давления ПВС степень ее сухости  $\chi_0$  заметно уменьшается. Одновременно возрастает удельная работа турбины  $H_{\text{т}}$ , причем ее значения зависят от давления в конденсаторе  $p_{\text{к}}$  (рис. 6, б).

Полученные зависимости предполагают наличие оптимального начального давления пара перед турбиной для каждой начальной энтальпии и каждого давления в конденсаторе, при которых удельная работа турбины будет максимальной.

Результаты расчета удельной работы турбины  $H_{\text{т}}$  для различных сочетаний параметров исследованного цикла ПТУ ГеоТЭС приведены на рис. 7. Здесь сплошными линиями показаны зависимости  $H_{\text{т}} = f(p_0, h_0)$  без учета изменения расхода ПВС скважин от начального давления пара, а штриховыми — с учетом ранее полученной зависимости  $\bar{G} = f(p_0)$ .

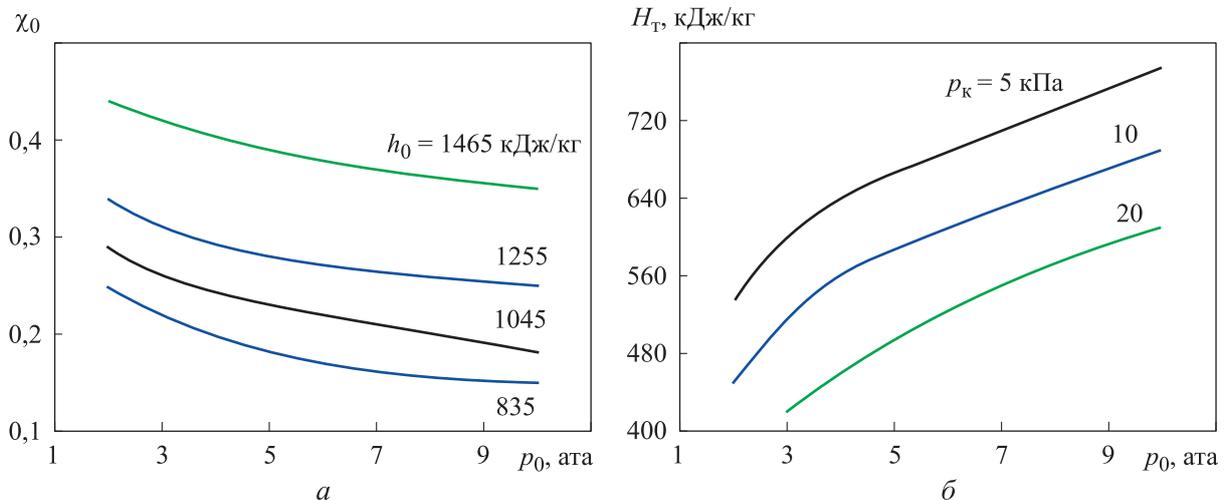


Рис. 6. Зависимости содержания пара в ПВС  $\chi_0$  (а) и удельной работы  $H_{\text{т}}$  (б) турбины от начального давления пара  $p_0$  при различных параметрах цикла

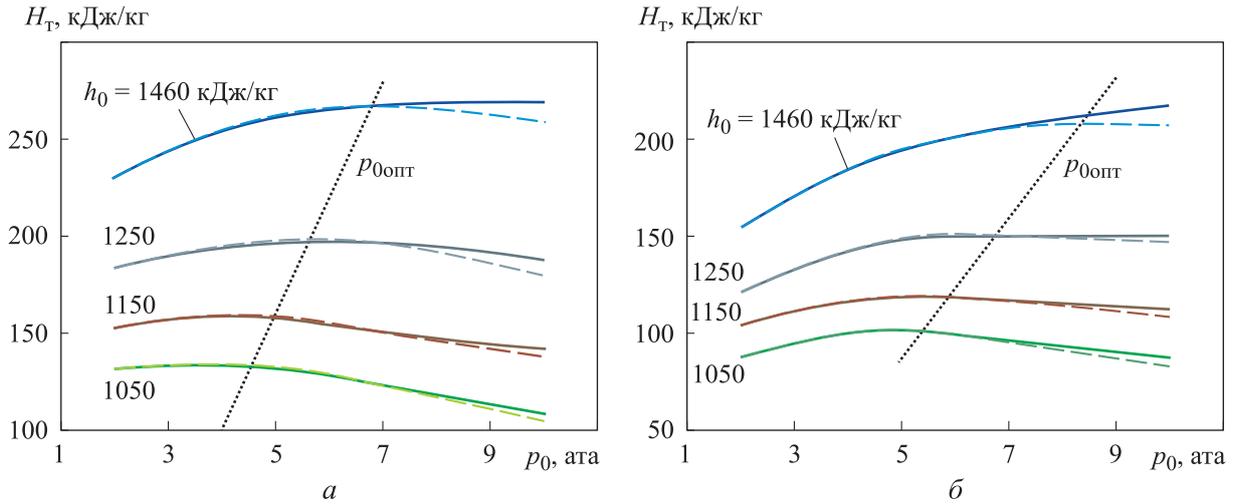


Рис. 7. Зависимости удельной работы турбины  $H_T$  в одноконтурной ГеоТЭС без учета (сплошные линии) и с учетом (штриховые линии) изменения расхода ПВС от начального давления пара  $p_0$  при давлении в конденсаторе  $p_k = 5$  (а) и 20 кПа (б)

Как видно из рис. 7, до  $p_0 = 7$  ата влияние начального давления пара при постоянной начальной энтальпии ПВС на удельную работу турбины  $H_T$  очень незначительное, затем  $H_T$  заметно снижается и при  $p_0 = 10$  ата составляет около 0,93...0,97 максимального значения  $H_T$ . Следует отметить, что эти границы по начальному давлению существенно зависят от характеристик конкретных скважин.

Также на рис. 7 показаны пунктирные линии, проведенные через точки максимального значения удельной работы турбины. На основании этого получены зависимости оптимального начального давления пара  $p_{0,opt}$  от начальной энтальпии ПВС  $h_0$  при различных значениях давления в конденсаторе  $p_k$  (рис. 8).

С уменьшением давления в конденсаторе  $p_k$  падает и оптимальное начальное давление пара  $p_{0,opt}$ . Такое же влияние на  $p_{0,opt}$  оказывает снижение начальной энтальпии ПВС. Если принять за основу, что полученное среднее значение начальной энтальпии ПВС скважин Мутновского месторождения равнялось 1230 кДж/кг, то для рассмотренной тепловой схемы при  $p_k = 10$  кПа оптимальное давление пара  $p_{0,opt}$  составило 6,7 ата.

При определении оптимального начального давления пара в цикле ПТУ ГеоТЭС необходимо учитывать и другие факторы, которые в данной работе не рассмотрены, но способны существенно повлиять на выбор параметров ПТУ:

- повышение начального давления пара приводит к некоторому снижению внутреннего

относительного коэффициента полезного действия турбины вследствие уменьшения высоты лопаток на входе в проточную часть и роста влажности пара на выходе;

- габаритные размеры и масса системы подготовки пара, регулирующих органов парораспределения, стопорного клапана, трубопроводов подвода острого пара существенно зависят от его параметров; рост начального давления уменьшает объемные пропуски пара, потери давления и благоприятно сказывается на конструкции этих элементов;

- увеличение  $p_0$  приводит к снижению расхода пара на турбину, размеров конденсатора, расход энергии на привод вентиляторов воз-

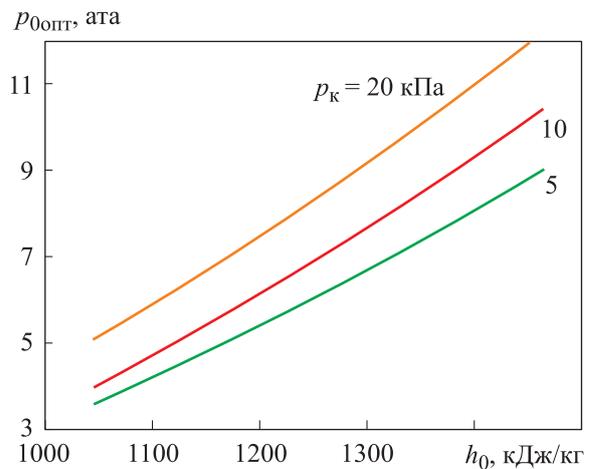


Рис. 8. Зависимости оптимального начального давления пара  $p_{0,opt}$  от начальной энтальпии ПВС  $h_0$  при различных значениях давления в конденсаторе  $p_k$  ПТУ

душно-конденсационной установки (или на насос циркуляции в случае смесительного конденсатора).

Анализ графиков, приведенных на рис. 7, показывает, что зависимость  $H_T = f(p_0)$  имеет пологий характер в районе оптимума, и отклонение от оптимального начального давления на 1,0...1,5 ата не приведет к существенной потери эффективности цикла. Это справедливо если не учитывать снижение расхода рабочего тела с ростом давления  $p_0$ . Если учитывать этот фактор, то с ростом начального давления удельная работа турбины начинает заметно уменьшаться.

Таким образом, можно сделать вывод, что рост начального давления пара в целом благоприятно сказывается на облике геотермальной ПТУ и для одноконтурных тепловых схем ПТУ величина  $p_{0\text{опт}}$  должна лежать в районе максимума удельной работы турбины, полученной с учетом изменения давления ПВС в устье скважин от расхода ПВС.

Для рассмотренного случая оптимальное начальное давление пара  $p_{0\text{опт}} \approx 6,7$  ата. Однако следует иметь в виду, что в конкретных условиях это значение может смещаться на 1,0...1,5 ата в область более низкого или высокого начального давления.

Чтобы достичь глубокого вакуума в конденсаторе одноконтурных ПТУ с низкой начальной энтальпией ПВС, следует руководствоваться данными, приведенными на рис. 8.

Применительно к ПТУ средней мощности (до 12...15 МВт) глубокий вакуум за турбиной

можно достичь только при подаче охлаждающей воды в конденсатор от постоянного постороннего источника (реки, озера, моря).

## Выводы

1. Получена усредненная безразмерная расходная характеристика геотермальных скважин Мутновского месторождения.

2. Предложена методика определения оптимальных параметров цикла ПТУ ГеоТЭС с учетом характеристик геотермальных скважин конкретного месторождения для схем с промежуточным вводом пара в турбину и без него.

3. Выполнен анализ тепловой эффективности геотермальных ПТУ ГеоТЭС при различных значениях давления пара на входе в турбину и давления в промежуточном вводе пара.

4. Показано, что рост начального давления пара в цикле ПТУ ГеоТЭС в целом благоприятно сказывается на облике геотермальной ПТУ, и для одноконтурных схем оптимальное значение начального давления должно лежать в области максимума удельной работы турбины, полученной с учетом изменения давления ПВС в устье скважин от расхода ПВС.

5. Установлено, что для ПТУ без промежуточного ввода пара в турбину ГеоТЭС Мутновского месторождения с конденсатором, охлаждаемым водой, оптимальное начальное давление пара составляет 6...8 ата.

## Литература

- [1] Богуславский Э.И. *Освоение тепловой энергии недр*. Санкт-Петербург, Научное издание, 2020. 435 с.
- [2] Алхасов А.Б. Повышение эффективности использования геотермального тепла. *Теплоэнергетика*, 2003, № 3, с. 52–54.
- [3] Алексеенко С.В., Бородулин В.Ю., Гнатусь Н.А. и др. Проблемы и перспективы развития петротермальной энергетики (обзор). *Теплофизика и аэромеханика*, 2016, т. 23, № 1, с. 1–16.
- [4] Томаров Г.В., Никольский А.И., Семенов В.Н. и др. Тенденции и перспективы развития геотермальной энергетики. *Теплоэнергетика*, 2012, № 11, с. 26–35.
- [5] Алхасов А.Б. *Возобновляемая энергетика*. Москва, Физмалит, 2012. 256 с.
- [6] Берман Э. *Геотермальная энергия*, Москва, Мир, 1978. 416 с.
- [7] Lund J.W., Boyd T.L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 2016, vol. 60, pp. 66–93, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- [8] DiPippo R. Geothermal power plants: evolution and performance assessments. *Geothermics*, 2015, vol. 53, pp. 291–307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.005>
- [9] Поваров О.А., Томаров Г.В., Никольский А.И. и др. Современные российские геотермальные энергетические технологии и их эффективность. *Теплоэнергетика*, 2004, № 6, с. 2–12.

- [10] Томаров Г.В., Шипков А.А. Современная геотермальная энергетика: ГеоЭС с турбинами на геотермальном паре. *Теплоэнергетика*, 2017, № 3, с. 38–50, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040363617030080>
- [11] Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Обоснование особенностей режима работы пароводяной геотермальной скважины в рамках новой теории устойчивости. *GEOENERGY. Мат. III Межд. науч.-практ. конф.* Грозный, ГГНТУ, 2017, с. 21–29.
- [12] Shulyupin A.N., Chernev I.I. Some methods for reducing of steam deficit at geothermal power plants exploitation: experience of Kamchatka (Russia). *Geotherm. Energy*, 2015, vol. 3, art. 23, doi: <https://doi.org/10.1186/s40517-015-0042-4>
- [13] Бритвин О.В., Поваров О.В. и др. Мутновский геотермальный энергетический комплекс на Камчатке. *Теплоэнергетика*, 2001, № 2, с. 4–10.
- [14] Манушин Э.А., Бирюков В.В. Паротурбинная установка геотермальной электростанции бинарного цикла для геотермальных месторождений камчатского края. *Наука и образование: научное издание*, 2011, № 9. URL: <http://engineering-science.ru/doc/220323.html>
- [15] Алхасов А.Б. Использование геотермальной энергии для выработки электроэнергии. *Известия РАН. Энергетика*, 2010, № 1, с. 59–72.
- [16] Поваров О.А., Сугробов В.М. и др. Изучение возможности извлечения тепловой энергии магматического очага Авачинского вулкана с помощью бурения глубоких скважин: научное издание. В: *Проект научного бурения на Мутновском вулкане — исследование связи магматической и гидротермальных систем*. Петропавловск-Камчатский, Камчатский печатный двор, 2006, с. 79–82.
- [17] Franco A., Villani M. Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, mediumtemperature geothermal fields. *Geothermics*, 2009, vol. 38, no. 4, pp. 379–391, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.08.001>
- [18] Zarrouk S.J., Moon H. Efficiency of geothermal power plants: a worldwide review. *Geothermics*, 2014, vol. 51, pp. 142–153, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.11.001>
- [19] Saadatfar B., Fakhrai R., Fransson T. Waste heat recovery Organic Rankine cycles in sustainable energy conversion: a state-of-the-art review. *JMES*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 161–188.
- [20] Федоров В.А., Мильман О.О., Ананьев П.А. и др. Результаты экспериментально-расчетных исследований воздушного потока в циркуляционных воздушных конденсаторах паротурбинных установок. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 5, с. 87–105, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-5-87-105>
- [21] Жинов А.А., Шевелев Д.В. Исследование влияния ветра на производительность вентиляторов воздушно-конденсационной установки геотермальной электрической станции. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 108–118, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-1-108-118>

## References

- [1] Boguslavskiy E.I. *Osvoenie teplovooy energii nedr* [Development of subsoil heat energy]. Sankt-Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2020. 435 p. (In Russ.).
- [2] Alkhasov A.B. A way of using geothermal heat more efficiently. *Teploenergetika*, 2003, no. 3, pp. 52–54. (In Russ.). (Eng. version: *Therm. Eng.*, 2003, vol. 50, no. 3, pp. 230–233.)
- [3] Alekseenko S.V., Borodulin V.Yu., Gnatus N.A. et al. Problems and outlooks for petrothermal power engineering (review). *Teplofizika i aeromekhanika*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 1–16. (In Russ.). (Eng. version: *Thermophys. Aeromech.*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 1–16, doi: <https://doi.org/10.1134/S0869864316010017>)
- [4] Tomarov G.V., Nikolskiy A.I., Semenov V.N. et al. Trends and prospects of development of geothermal power engineering. *Teploenergetika*, 2012, no. 11, pp. 26–35. (In Russ.). (Eng. version: *Therm. Eng.*, 2012, vol. 59, no. 11, pp. 831–840, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601512110146>)
- [5] Alkhasov A.B. *Vozobnovlyayemaya energetika* [Renewable energy]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 256 p. (In Russ.).
- [6] Berman E.R. *Geothermal energy*. Noyes Data Corporation, 1975. 336 p. (Russ. ed.: *Geotermalnaya energiya*, Moscow, Mir Publ., 1978. 416 p.)

- [7] Lund J.W., Boyd T.L. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 2016, vol. 60, pp. 66–93, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
- [8] DiPippo R. Geothermal power plants: evolution and performance assessments. *Geothermics*, 2015, vol. 53, pp. 291–307, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.07.005>
- [9] Povarov O.A., Tomarov G.V., Nikolskiy A.I. et al. State-of-the-art geothermal energy technologies and their efficiency. *Teploenergetika*, 2004, no. 6, pp. 2–12. (In Russ.). (Eng. version: *Therm. Eng.*, 2004, vol. 51, no. 6, pp. 425–435.)
- [10] Tomarov G.V., Shipkov A.A. Modern geothermal power: GeoPP with geothermal steam turbines. *Teploenergetika*, 2017, no. 3, pp. 38–50, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040363617030080> (In Russ.). (Eng. version: *Therm. Eng.*, 2017, vol. 64, no. 3, pp. 190–200, doi: <https://doi.org/10.1134/S0040601517030089>)
- [11] Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A. Justification of the peculiarities of a steam-water geothermal well operation mode within the framework of a new stability theory. *GEOENERGY. Mat. III Mezhd. nauch.-prakt. konf.* [GEOENERGY. Proc. III Int. Sci.-Pract. Conf.]. Groznyy, GGNTU Publ., 2017, pp. 21–29. (In Russ.).
- [12] Shulyupin A.N., Chernev I.I. Some methods for reducing of steam deficit at geothermal power plants exploitation: experience of Kamchatka (Russia). *Geotherm. Energy*, 2015, vol. 3, art. 23, doi: <https://doi.org/10.1186/s40517-015-0042-4>
- [13] Britvin O.V., Povarov O.V. et al. The Mutnovsk geothermal power complex in Kamchatka. *Teploenergetika*, 2001, no. 2, pp. 4–10. (In Russ.). (Eng. version: *Therm. Eng.*, 2001, vol. 48, no. 2, pp. 89–95.)
- [14] Manushin E.A., Biryukov V.V. Geothermal power plants steam turbine with binary cycle for geothermal fields of Kamchatka. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2011, no. 9. URL: <http://engineering-science.ru/doc/220323.html> (in Russ.).
- [15] Alkhasov A.B. Utilisation of geothermal energy for electricity generation. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2010, no. 1, pp. 59–72. (In Russ.).
- [16] Povarov O.A., Sugrobov V.M. et al. [Study of the possibility of extracting thermal energy of the magmatic centre of Avacha volcano by drilling deep boreholes: scientific publication]. *V: Proekt nauchnogo bureniya na Mutnovskom vulkane — issledovanie svyazi magmaticheskoy i gidrotermalnykh system* [In: Scientific drilling project at Mutnovsky volcano — study of the connection between magmatic and hydrothermal systems]. Petropavlovsk-Kamchatskiy, Kamchatskiy pechatnyy dvor Publ., 2006, pp. 79–82. (In Russ.).
- [17] Franco A., Villani M. Optimal design of binary cycle power plants for water-dominated, mediumtemperature geothermal fields. *Geothermics*, 2009, vol. 38, no. 4, pp. 379–391, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2009.08.001>
- [18] Zarrouk S.J., Moon H. Efficiency of geothermal power plants: a worldwide review. *Geothermics*, 2014, vol. 51, pp. 142–153, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.11.001>
- [19] Saadatfar B., Fakhrai R., Fransson T. Waste heat recovery Organic Rankine cycles in sustainable energy conversion: a state-of-the-art review. *JMES*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 161–188.
- [20] Fedorov V.A., Milman O.O., Ananyev P.A. et al. Results of experimental and computational analysis of air flow in the circle channels of the air-cooled condensers of steam power plants. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 5, pp. 87–105, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-5-87-105> (in Russ.).
- [21] Zhinov A.A., Shevelev D.V. Research the wind effect on the fans performance of air-cooled condenser for geothermal power station. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2015, no. 1, pp. 108–118, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2015-1-108-118> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 13.10.2023

## Информация об авторах

**РОМАНЕНКО Александр Васильевич** — заместитель главного конструктора-главный конструктор по энергетическим турбинам. Специальное конструкторское бюро ПАО «Калужский турбинный завод» (248000, Калуга, Российская Федерация, ул. Московская, д. 241, e-mail: Romanenko\_AV@paoktz.ru).

**ЖИНОВ Андрей Александрович** — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Тепловые двигатели и гидромашин». Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (248000, Калуга, Российская Федерация, ул. Баженова, д. 2, e-mail: azhinov@bmstu.ru).

## Information about the authors

**ROMANENKO Aleksandr Vasilievich** — Deputy Chief Designer, Chief Designer for Power Turbines. Special Design Bureau, PJSC Kaluga Turbine Plant (248000, Kaluga, St., Russian Federation, Bldg. 241, e-mail: Romanenko\_AV@paoktz.ru).

**ZHINOV Andrey Aleksandrovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Thermal Engines and Hydraulic Machines. Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University (248000, Kaluga, Russian Federation, Bazhenova St., Bldg. 2, e-mail: azhinov@bmstu.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Романенко А.В., Жинов А.А. Определение оптимальных параметров геотермальной паротурбинной установки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 5, с. 90–99.

### Please cite this article in English as:

Romanenko A.V., Zhinov A.A. Determination of the optimum parameters of a geothermal steam turbine installation. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 5, pp. 90–99.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям учебное пособие

### «Нанохимия. Введение в нанохимию и технологию наноматериалов»

**Авторы: Т.И. Шабатина, С.Л. Березина, Ю.Н. Морозов,  
В.В. Федоров**

Нанохимия — быстроразвивающаяся область фундаментальной и прикладной науки, направленная на разработку физико-химических подходов и методов получения частиц вещества размером несколько нанометров и их упорядоченных ансамблей. Результаты нанохимии открывают перспективы для синтеза наночастиц химических веществ и наноструктурированных материалов с принципиально новыми физико-химическими и функциональными свойствами и создания нанотехнологий на их основе.

Приведено описание углеродных наноматериалов, наноконпозигов, нанопорошковых и нанопористых материалов, квантово-размерных наноструктур и фотонных кристаллов, метаматериалов, а также супрамолекулярных наноструктур и молекулярных нанотехнологий. Рассмотрены экологические и социальные аспекты применения инновационных нанотехнологий и наноматериалов.

Для студентов и магистрантов, специализирующихся в области материаловедения, химической технологии, машиностроительных и приборостроительных специальностей.

### По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>