

# Исследование $p, \rho, T, x$ -зависимостей и энергетических характеристик системы вода–1-пропанол

Б. К. Османова, Э. А. Базаев, А. Р. Базаев и А. Б. Алхасов

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН,  
ул. Шамиля д.39а, Махачкала, Дагестан 367030, Россия

E-mail: badji@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2023 г.

**Аннотация.** Приведены новые  $p, \rho, T, x$ -зависимости системы вода–1-пропанол, содержащей 0.1 мольной доли 1-пропанола в однофазной (жидкой, паровой) области, на линии кривой равновесия фаз жидкость–пар, в критической и сверхкритической областях в диапазоне по: температуре 403.15–673.15 К, плотности 31–712 кг/м<sup>3</sup> и давлению до 55 МПа, описанные термическим уравнением вириального вида со средней относительной погрешностью 1.2%. Проведен сравнительный расчет цикла Ренкина для паротурбинной установки на воде и на смеси вода–1-пропанол для различных составов  $x$  в одинаковых термобарических условиях и установлено, что термический и эффективный КПД цикла Ренкина для смеси, содержащей  $x = 0.1$  мольные доли 1-пропанола, принимают максимальные значения. <https://doi.org/10.33849/2023408>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

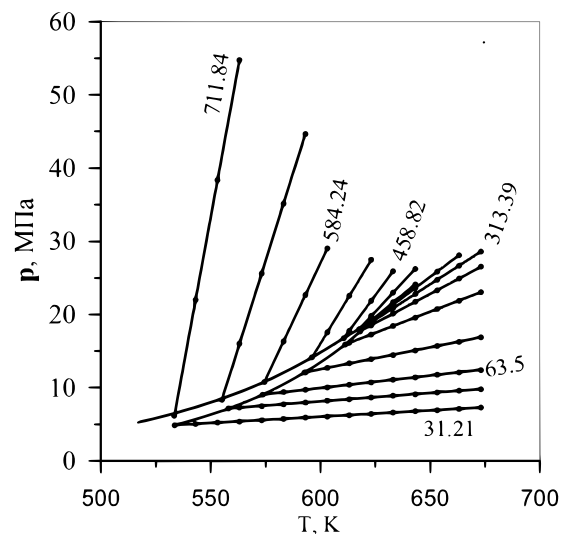
Эффективность энергетических установок, в частности преобразователей тепловой энергии в электрическую, зависит не только от конструкции их тепломеханического оборудования и выбора термодинамического цикла, но и от полноты использования данных о теплофизических свойствах рабочего вещества (тела) в широком диапазоне параметров состояния [1]. Теплофизические свойства воды, основного рабочего тела паротурбинных установок (ПТУ), исследованы подробно и для инженерных расчетов рекомендована Международная система уравнений воды и водяного пара [2]. Как правило, диапазон рабочих температур обычных ПТУ находится в критической области, определяемой критической точкой термодинамической поверхности. Критическая область индивидуального рабочего вещества неизменна и определяется его критическими параметрами, например, воды  $T_k = 647.096$ ,  $p_k = 22.06$ ,  $\rho_k = 321.96$  кг/м<sup>3</sup>. А критическая область смеси, образованной смешением жидкостей, зависит от ее состава, характеризующегося значением мольной доли 1-пропанола и определяется критической линией на термодинамической поверхности [3].

В работе [4] обоснована эффективность использования водоаммиачной смеси в качестве рабочего вещества преобразователей тепловой энергии в электрическую. Как утверждают авторы, преимущество смесевых рабочих веществ по сравнению с индивидуальными состоит в возможности изменить диапазон рабочих температур энергоустановок путем подбора их взаимно растворяющихся компонентов с различными критическими температурами и изменением состава. Это позволяет, во-первых, использовать серийные энергоустановки для преобразования тепловой энергии источников с различными температурами, и во-вторых, унифицировать часть тепломеханического оборудования преобразователей, что экономически целесообразно.

## 2. ОПИСАНИЕ РАБОТЫ

### 2.1. Экспериментальные $p, \rho, T, x$ -измерения

В работе [5] на основе экспериментальных  $p, \rho, T, x$ -зависимостей системы вода–1-пропанол для  $x = 0.2$ , 0.5, 0.8 нами было показано, что эффективный КПД



**Рисунок 1.** Изохоры зависимости давления от температуры смеси вода–1-пропанол при  $x = 0.1$ .

**Таблица 1.** Значение критических параметров смеси вода–1-пропанол.

$T_k$ , К	$p_k$ , МПа	$\rho_k$ , кг/м <sup>3</sup>	
0.0	647.096	22.046	321.96
0.1	620.05	18.37	313.39
0.2	598.15	15.10	306.50
0.5	557.15	9.50	291.00
0.8	542.15	6.47	280.00
1.0	536.85	5.23	273.22

ПТУ на смеси вода–1-пропанол при  $x = 0.2$  максимален и составляет 21% (на воде 18.7%). С целью уточнения этого результата в данной работе нами проведены  $p, T$  и  $p, \rho, T, x$ -измерения этой смеси для  $x = 0.1$  (рисунки 1, 2).

Из таблицы 1 и рисунков 3–5 видно, что изменением состава смеси можно регулировать ее критические параметры и подбирать оптимальный диапазон рабочих температур энергоустановки.

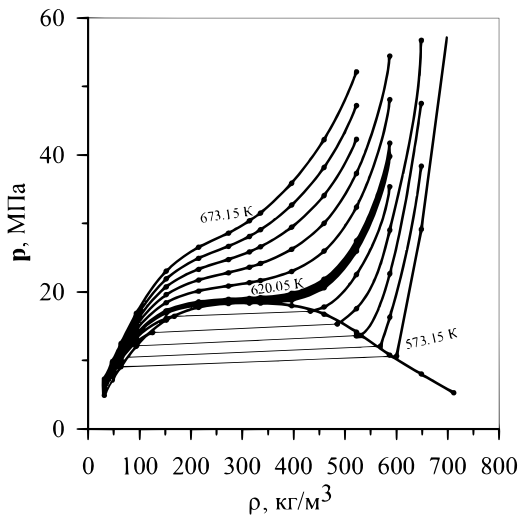


Рисунок 2. Изотермы зависимости давления от плотности смеси вода-1-пропанол при  $x = 0.1$ .

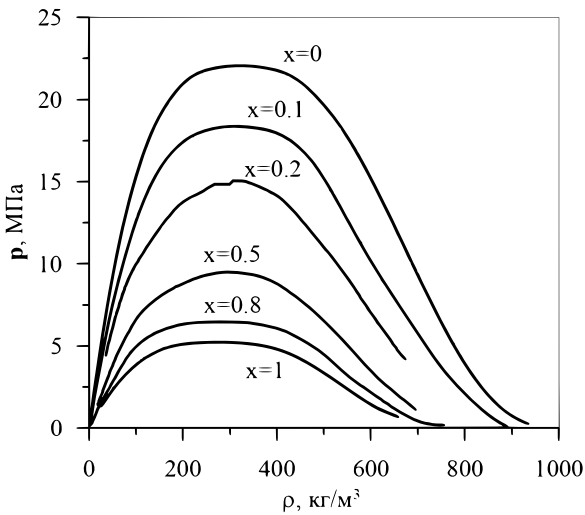


Рисунок 3. Зависимость давления от плотности системы вода-1-пропанол на линии сосуществования фаз для различных значений состава.

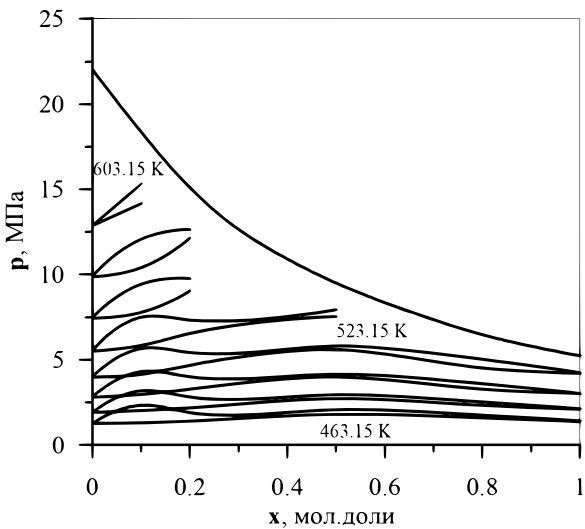


Рисунок 4. Фазовая диаграмма изотерм зависимости давления от состава системы.

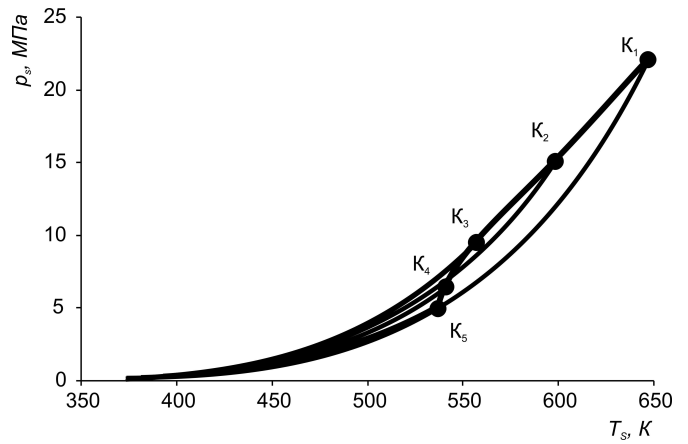


Рисунок 5. Критическая кривая систем вода-1-пропанол.

Таблица 2. Коэффициенты уравнения (2) для смеси вода-1-пропанол,  $x = 0.1$

$a_{10}=4.145878882073635$	$a_{11}=-6.514066127627685$
$a_{12}=0.852098672593587$	$a_{20}=-3.9760150894361046$
$a_{21}=5.236204980617351$	$a_{22}=-0.3403921950316989$
$a_{30}=0.731379646970635$	$a_{31}=-0.4872544024484926$
$a_{32}=-0.07777441939988179$	
$a_{40}=0.8365239557861639$	$a_{41}=-1.3876797635846367$
$a_{50}=-0.3642302248361685$	$a_{51}=0.6373404835574512$
$a_{60}=-0.03180976629916075$	$a_{61}=-0.07116716006374398$

2.2. Описание экспериментальных  $p, \rho, T, x$ -зависимостей полиномиальным уравнением состояния

Зависимость давления от плотности и температуры  $p = f(\rho, T)_x$  описана термическим уравнением вириального вида — разложением фактора сжимаемости  $Z = (p/RT\rho_m)_x$  в ряды по степеням приведенной плотности и приведенной температуры:

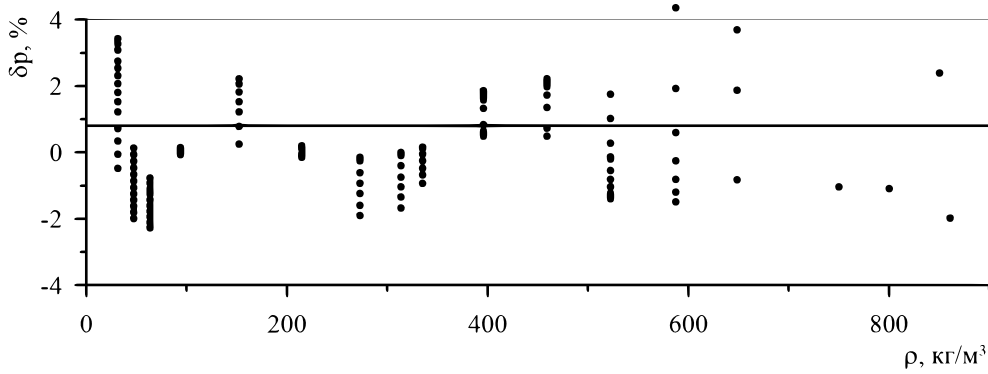
$$Z = p/RT\rho_m = 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{n_i} a_{ij} \varpi^i / \tau_j, \quad (1)$$

откуда

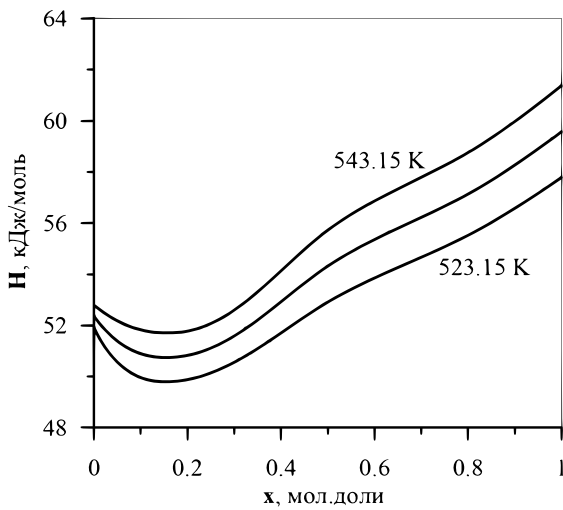
$$p = RT\rho_m \left[ 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{n_i} a_{ij} \varpi^i / \tau_j \right], \quad (2)$$

где  $\rho_m$  — молярная плотность (моль/м<sup>3</sup>);  $\varpi = \rho/\rho_k$ ,  $\tau = T/T_k$  — приведенная плотность и приведенная температура соответственно;  $\rho_k, T_k$  — критическая плотность и критическая температура;  $R = 8.314$  Дж/(моль·К) — универсальная (молярная) газовая постоянная. Коэффициенты уравнения, определенные обобщенным методом наименьших квадратов [6], приведены в таблице 2. Среднее относительное отклонение рассчитанных значений давления по уравнению (2) от экспериментальных составляет 1.2% (рисунок 6).

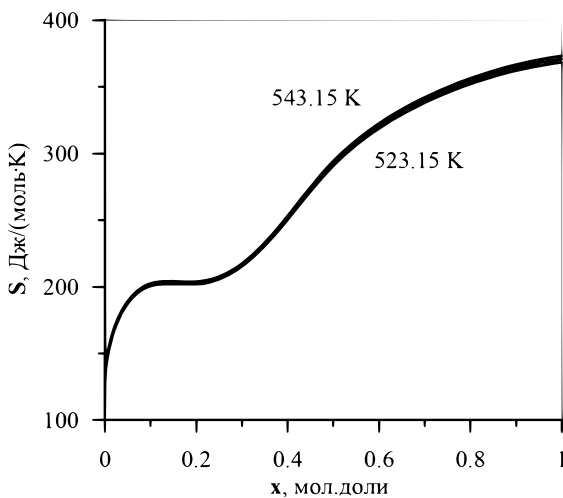
С помощью уравнения (2) получены необходимые для расчета энергетических характеристик системы вода-1-пропанол значения энтальпии и энтропии



**Рисунок 6.** Относительное отклонение расчетных величин давления от экспериментальных для смеси вода–1-пропанол для  $x = 0.1$ .



**Рисунок 7.** Изотермы зависимости энтропии от состава смеси вода–1-пропанол  $\rho_k = 10 \text{ кг/м}^3$ .



**Рисунок 8.** Изотермы зависимости энтальпии от состава смеси вода–1-пропанол  $\rho_k = 10 \text{ кг/м}^3$ .

в жидкой и паровой фазах, на линии сосуществования фаз, в околкритическом и сверхкритическом состояниях (рисунки 7, 8).

**Таблица 3.** Значения КПД для цикла с водой и со смесью вода–1-пропанол.

Рабочее вещество	$x = 0$	$x = 0.1$	$x = 0.2$	$x = 0.5$	$x = 0.8$
Термическое КПД	24.4	34.7	27.6	22.9	20.9
Внутреннее КПД	21.3	30.2	23.9	19.7	17.8
Эффективный КПД	18.7	26.5	21	17.2	15.7

### 2.3. Энергетическая эффективность смеси вода–1-пропанол

Проведен сравнительный расчет циклов на воде и на смесях вода–1-пропанол по методике из работы [7] в одинаковых условиях (давление и температура пара на входе в турбину  $p_1 = 16 \text{ МПа}$  и  $T_1 = 623.15 \text{ К}$ ; температура пара в конденсаторе  $T_2 = 403.15 \text{ К}$ ; КПД парового котла  $\eta = 0.91$ ; внутренний относительный КПД турбины  $\eta_{oi} = 0.88$ ; внутренний относительный КПД насоса  $\eta_{oi}^H = 0.85$ ; механический КПД  $\eta^M = 0.99$ ; КПД электрического генератора  $\eta^G = 0.98$ ).

Как видно из рисунка 9, при одинаковых термобарических условиях (623.15 К и 16 МПа) водяной пар насыщенный, а смеси воды с 1-пропанолом находятся в сверхкритической области (таблица 2). Результаты расчета приведены в таблице 3 и на рисунке 10.

Термический и эффективный КПД ПТУ на смеси вода–1-пропанол растут с ростом концентрации 1-пропанола, и достигают максимума при  $x = 0.1$ , при дальнейшем росте концентрации КПД плавно уменьшаются. Возможно, это связано с тем, что критическая кривая системы вода–1-пропанол имеет выпуклую форму (см. рисунок 5), что в свою очередь можно объяснить структурными особенностями данной системы.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, замещение воды смесью вода–1-пропанол со значением  $x$  до 0.1 в циклах ПТУ позволяет:

1. изменением состава понизить диапазон рабочих температур установки, что оправдано с точки зрения энергосбережения;
2. увеличить термический и эффективный КПД;
3. унифицировать часть тепломеханического оборудования энергоустановок, что экономически целесообразно.

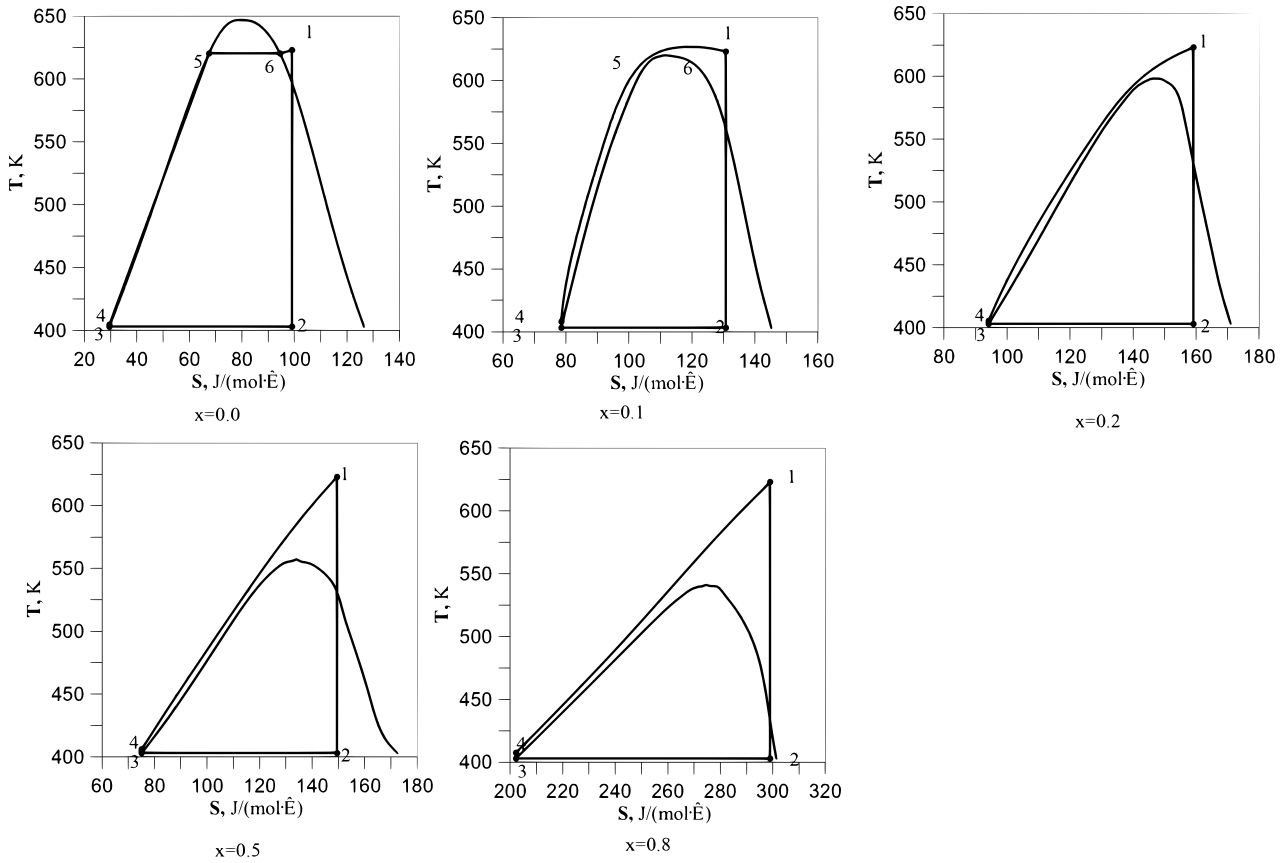


Рисунок 9. T-S диаграмма цикла паротурбинной установки, совершаемого водой и смесями вода-1-пропанол.

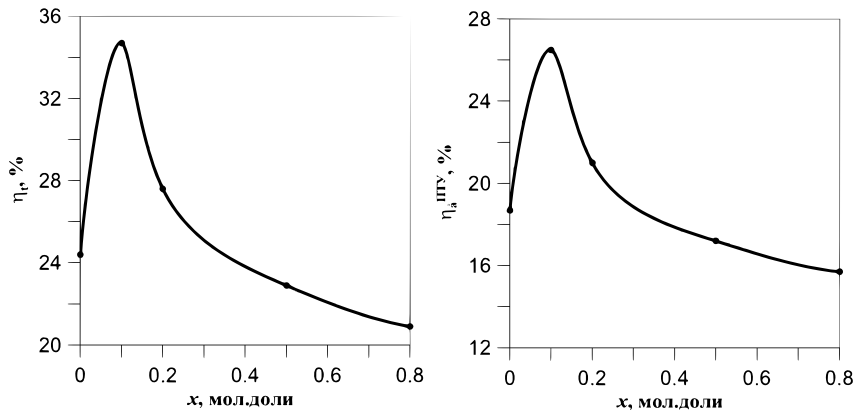


Рисунок 10. Зависимость термического КПД и эффективного КПД ПТУ от состава смеси вода-1-пропанол.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Новиков И И 1975 *Уравнения состояния газов и жидкостей* (Москва: Наука)
2. Dooley R B 1997 *Iapws industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam Preprint* (Electric Power Research Institute. Palo Alto. CA 94304. USA.)
3. Osmanova B K, Bazaev A R and Bazaev E A 2019 *Journal of Physics: Conf.Series* **99** 1385–1393
4. Васильев В А, Крайнов А В и Говорков И Г 1996 *Теплоэнергетика* **5** 27–32
5. Alhasov A B, Bazaev A R, Bazaev E A and Osmanova B K 2017 *Journal of Physics Conference Series* **1** 891–896
6. Бахвалов Н С, Жидков Н П и Кобельков Г М 1975 *Численные методы* (Москва: Наука)
7. Александров А А 2006 *Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок* (Москва: Издательский дом МЭИ)