



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДГОНОЧНОГО ПАРАМЕТРА ФРАКТАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ НА ПРИМЕРЕ ВОДЯНОГО ПАРА

Ахмедов Э.Н., Магомедов Р.А.

Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Объединённого института высоких температур РАН

## Аннотация

В работе представлен расчёт изотерм уравнения состояния водяного пара в диапазоне температур  $T = 773$  К до  $T = 1273$  К. Методика расчёта представляет собой доработку ранее предложенного подхода на основе фрактального уравнения состояния и программного модуля Fract EOS. Полученные результаты показывают хорошее согласие с экспериментальными данными. Показано, что методика подходит для точного расчёта промежуточных изотерм в областях температур, которые не представлены в табличных справочных данных.

## Введение

В настоящее время вода ( $H_2O$ ) вызывает большой интерес исследователей [1, 2]. Не смотря на то, что данное вещество уже хорошо изучено, многие вопросы всё ещё остаются открытыми. В связи с этим актуальной является задача получения точного уравнения состояния водыю.

Ни одна из предлагаемых в литературе моделей [3, 4] не является универсальной. В данной работе рассматривается дальнейшее развитие полуэмпирического подхода к построению уравнения состояния, предложенного в работах [5, 6]. Отличительной особенностью данного метода является высокая точность расчёта и всего лишь один подгоночный параметр. Все расчёты производятся при помощи программного обеспечения [7].

## Метод расчёта и результаты

Выражение, использованное для расчёта, на основе ранее предложенной методики [5, 6], имеет следующий вид:

$$P = \rho RT \left\{ 1 + \rho B + (1 - \alpha) \cdot \ln \left( \frac{eM}{\rho N_A} \left( \frac{mkT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \right) + \psi(1) + \psi(2 - \alpha) - \rho B \right\}$$

$P$  – давление,  $\rho$  – плотность,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура,  $B$  – второй вириальный коэффициент,  $\alpha$  – показатель производной дробного порядка,  $e$  – экспонента,  $M$  – молярная масса,  $N_A$  – число Авогадро,  $m$  – молекулярная масса,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $\psi(x)$  – пси функция числа  $x$ .

На рис. 1 представлены изотермы уравнения состояния водяного пара. Символами показаны экспериментальные значения из [8]. Пунктирными линиями показаны расчетные значения для соответствующих температур. Как видно из рисунка, расчётные результаты хорошо согласуются с экспериментальными значениями. Следует отметить, что в нашей модели подгоночным является только показатель производной дробного порядка  $\alpha$ .

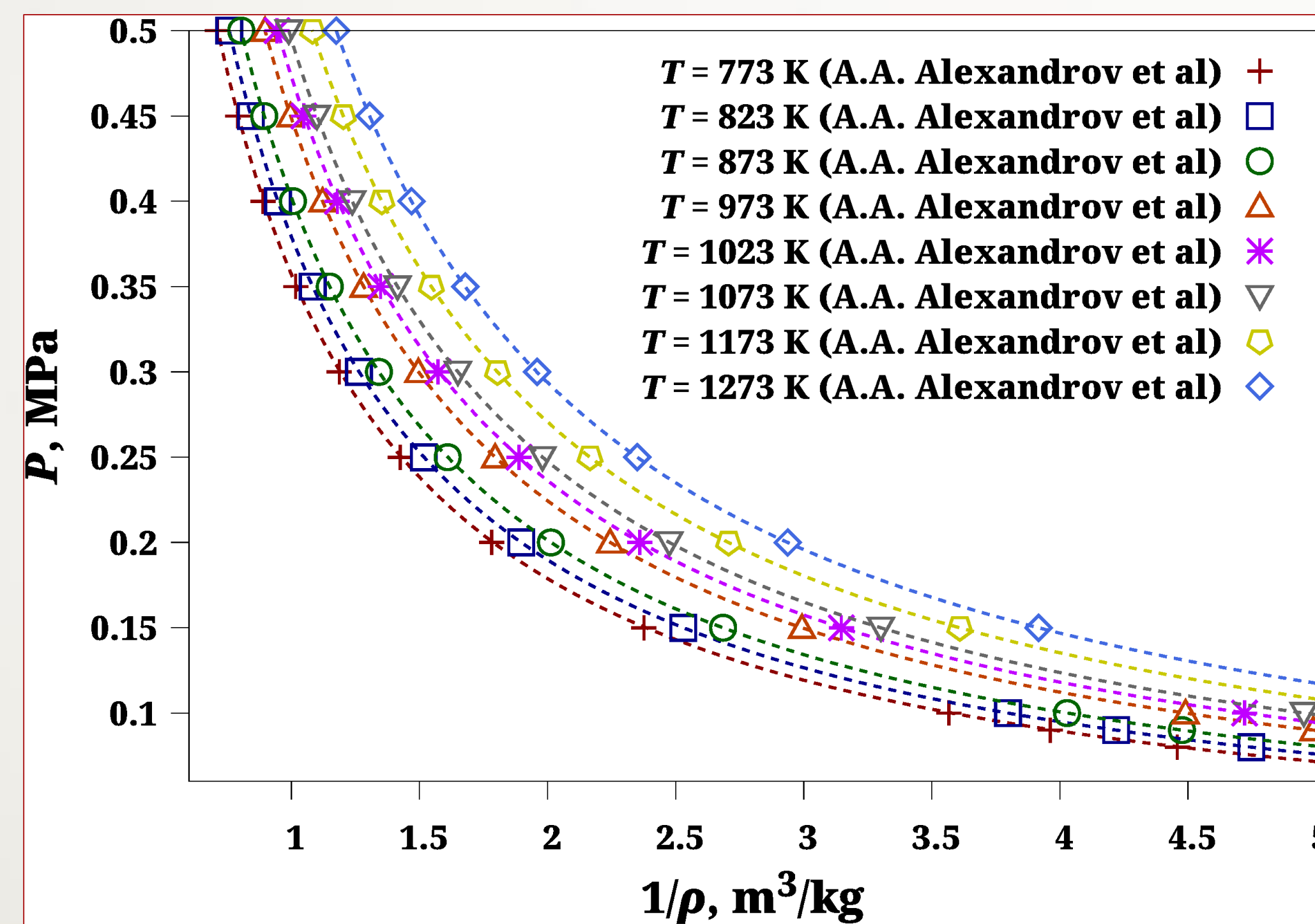


Рис 1. Изотермы уравнения состояния водяного пара для различных температур в сравнении с экспериментальными данными.

В предлагаемом методе  $\alpha$  зависит не только от  $T$ , но и от  $\rho$ . В результате для каждой  $T$  имеем семейство отличающихся расчётных изотерм. Для повышения точности расчёта, зависимость  $\alpha(\rho)$  можно аппроксимировать полиномом. На рис. 2 представлена зависимость  $\alpha(\rho)$  водяного пара для различных  $T$ . Символами показаны значения  $\alpha$ , полученные для экспериментальных точек. Пунктиром – аппроксимационные линии. Используемый полином имеет вид:  $f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^{b_0}$

Для  $T = 823$  К (показана квадратами) и  $T = 1023$  К (показана звёздочками) зависимость  $\alpha(\rho)$  определена не из экспериментальных данных, а с помощью интерполяции. Для этого, для  $\rho = 1, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175$  и  $200$  ( $kg/m^3$ ) произведена аппроксимация по  $T$ .

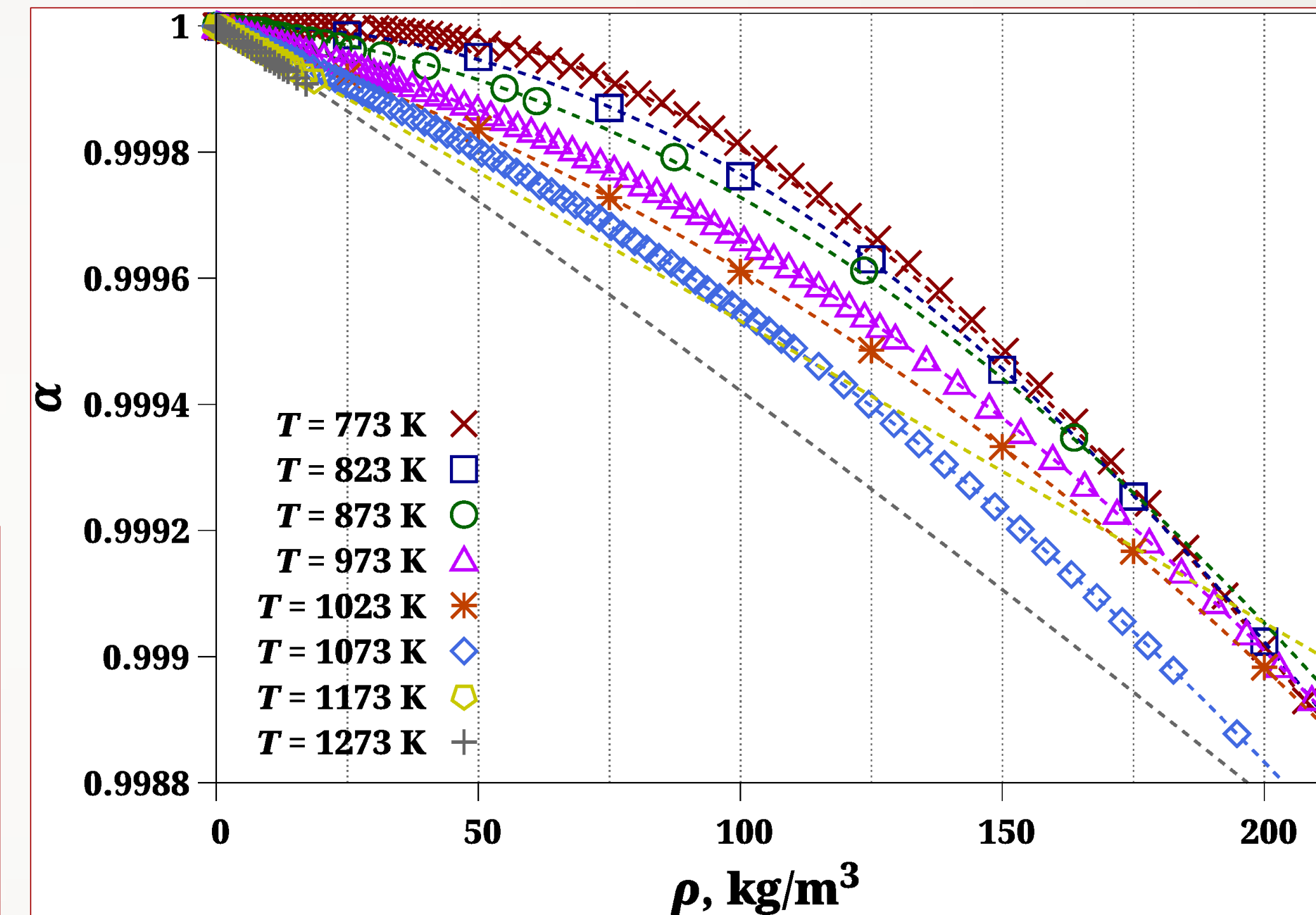


Рис 2. Зависимость показателя производной дробного порядка  $\alpha$  от плотности водяного пара для различных температур.

Затем, для  $T = 823$  К и  $1023$  К получены значения  $\alpha$ . Этих 9 значений достаточно, чтобы с помощью полинома аппроксимировать зависимость  $\alpha(\rho)$  для нужных изотерм.

## Заключение

Полученное фрактальное однопараметрическое уравнение состояния [5] хорошо согласуется с экспериментом. Это показывает, что уравнение подходит для исследования не только простых веществ (идеальные газы), но и для более сложных, таких как вода.

Недостаток метода, состоящий в том, что  $\alpha$ , зависит не только от  $\rho$ , но и от  $T$ , устранён с помощью аппроксимационного полинома.

## Библиографический список

1. Russo J., Akahane K., Tanaka H. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2018. T. 115, № 15. С. E3333–E3341.
2. Галкин А. А., Лунин В. В. Успехи химии. 2005. Т. 74, № 1. С. 24–40.
3. Бушман А. В., Фортвов В. Е. Успехи физических наук. 1983. Т. 140, № 6. С. 177–232.
4. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. Справочное пособие, Л.: Химия, 1982.
5. Meilanov R.P., Magomedov R.A. Journal of Engineering physics and thermophysics. 2014. Т. 87, №. 6. С. 1521-1531.
6. Magomedov R.A., Meilanov R.R., Meilanov R.P., Akhmedov E.N., Beybalaev V.D., Aliverdiev A.A. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2018. Т. 133, №. 2. С. 1189-1194.
7. Ахмедов Э. Н., Магомедов Р. А., Аливердиев А. А. Fract EOS. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021661219 РФ № 2021617802: заявл. 24.05.2021; опубл. 07.07.2021.
8. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. М.: МЭИ. 1999.

## Контакты

Ахмедов Э.Н. (aen-code@yandex.ru); Магомедов Р.А. (ramazan\_magomedov@rambler.ru) ИПГВЭ ОИВТ РАН (http://ipgdncran.ru)