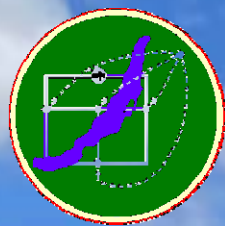




Институт систем энергетики  
им. Л.А. Мелентьева СО РАН



**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ  
АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА  
РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ И  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**ТРУДЫ**

**XVIII Всероссийского научного семинара**

**Алтай  
12 – 18 сентября 2022 г.**

**Иркутск  
2022**

---

ФГБУН Институт Систем Энергетики им. Л.А.Мелентьева СО РАН

---

## XVIII Всероссийский научный семинар

### **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА РАЗВИВАЮЩИХСЯ ТРУБОПРОВОДНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Труды семинара

12 – 18 сентября 2022 г.

Алтай

Иркутск  
2022

УДК 519.6+519.8

Труды XVIII Всеросс. научн. семин. «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». Алтай, 12 – 18 сентября 2022 г. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – 2022. – 477 с.

ISBN 978-5-93908-155-9.

В сборнике научных трудов обсуждаются актуальные проблемы математического моделирования трубопроводных систем (ТПС) энергетики – тепло-, водо-, нефте-, и газоснабжения, а также развития методов теории гидравлических цепей, имеющих межотраслевое значение.

Сборник предназначен для сотрудников научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, преподавателей вузов, студентов и аспирантов.

Ответственный за выпуск: к.т.н. Токарев Вячеслав Вадимович

Без объявления.

ISBN 978-5-93908-155-9

© Институт систем энергетики  
им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2022

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕЧЕНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ

Корельштейн Л.Б., Скрипаченко М.П.

(ООО «НТП Трубопровод», Москва)

### Введение

В современном мире необходимо выполнять множество гидравлических и тепловых расчетов для проектирования и реконструкции объектов различных отраслей промышленности. Для решения задач такого типа чаще всего приходится выполнять сложные итерационные расчёты теплофизических и транспортных свойств (ТФС), и фазовых равновесий (ФР) многокомпонентных многофазных смесей при постоянно меняющихся термодинамических параметрах. Чтобы получить эти данные, инженеры прибегают к использованию всевозможных термодинамических библиотек, к числу которых можно отнести библиотеки “СТАРС”, “Simulis Thermodynamics”, GERG-2008 и т.д. В библиотеках содержатся базы данных, включающих в общей сложности более 2000 индивидуальных веществ, также есть возможность производить расчёт свойств смесей, нефтяных фракций в широком диапазоне температур и давлений.

Задача усложняется с увеличением количества запросов к подобным библиотекам. Количество таких запросов в программах теплогидравлического расчета технологических трубопроводов и аппаратов может исчисляться сотнями тысяч, что резко увеличивает время расчёта. Ситуация усугубляется с ростом сложности состава продукта и используемой термодинамической модели. Примером может послужить оптимизация сложной трубопроводной сети с многофазной многокомпонентной жидкостью с теплообменом и множественным критическим течением. При комплексном расчете до 90% программного времени приходится именно на расчет ТФС и ФР! В силу этого существует большая необходимость в сокращении количества запросов к программам с данными термодинамических свойств, что приведёт к ускорению гидравлических и тепловых расчетов. Целью работы является оптимизация (ускорение) процесса расчета ТФС и ФР при проектировании и реконструкции объектов в различных отраслях промышленности. Этого возможно достигнуть заменой большого количества запросов к программам-библиотекам на использование результатов интерполяции уже по небольшому количеству заранее рассчитанных точек, с расчетом при необходимости дополнительных точек и расширением области интерполяции в случае выхода в процессе расчета параметров продукта за

границы первоначальной области интерполяции (отсюда название «динамическая»).

## Постановка задачи и полученные ранее результаты

В данной статье рассматривается бикубическая сплайн-интерполяция в двухфазной области многокомпонентной смеси.

### 1. Бикубическая сплайн-интерполяция

Бикубическая сплайн-интерполяция используется для решения следующей задачи. Прямоугольник в плоскости  $x, y$ , заданные  $a \leq x \leq b$ ,  $c \leq y \leq d$ , которые разлагаются по точкам сетки  $(x_i; y_j)$ , где  $i = 0, 1, \dots, n$ ;  $j = 0, 1, \dots, m$ ;  $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ ;  $c = y_0 < y_1 < \dots < y_m = d$ . Бикубический интерполирующий сплайн должен проходить через исходные точки:  $S(x_i, y_j) = f_{ij}$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ;  $j = 0, 1, \dots, m$ );  $S(x, y)$  идентичен бикубическому многочлену:  $S(x, y) = S_{ij}(x, y) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 a_{ijkl} (x - x_i)^k (y - y_j)^l$ .  $S_{ij}(x, y)$  определяется 16-ю коэффициентами, а для определения  $S(x, y)$  нужно  $16 \cdot n \cdot m$  коэффициентов; при этом обычно требуют непрерывности самой функции и ее первых частных производных. Таким образом обеспечивается гладкость всей поверхности, для чего  $S(x, y)$  должна удовлетворять условиям в узлах [1-5]:

$$\begin{aligned} S(x_i, y_j) &= f_{ij} \\ \frac{\partial S}{\partial x}(x_i, y_j) &= p_{ij} \\ \frac{\partial S}{\partial y}(x_i, y_j) &= q_{ij} \\ \frac{\partial^2 S}{\partial x \partial y}(x_i, y_j) &= r_{ij} \end{aligned}$$

$f_{ij}, p_{ij}, q_{ij}, r_{ij}$  – ранее заданные значения либо рассчитываемые тем или иным методом по значениям интерполируемой функции в узлах.

Можно использовать результаты одномерной интерполяции кубического сплайна для определения коэффициентов  $a_{ijkl}$ .

Бикубическая сплайн-интерполяция применяется в различных областях и сферах, например, при восстановлении изображений [6], интерполяции рентгеновских изображений [7], а также для анализа медицинских изображений [8].

### 2. Использование сплайн-интерполяции при расчёте термодинамических свойств

Ранее авторами было рассмотрено использование данного вида интерполяции в однофазной области [9]. Применение бикубической интерполяции при зависимости от двух параметров ( $P, T$ ) оказалось эффективным, так как относительные погрешности были в допустимых

пределах и результаты имеют достаточную точность для инженерных расчётов.

Анализ литературы по применению бикубической сплайн-интерполяции для расчётов термодинамических свойств показывает, что данная тема носит очень актуальный характер, но на настоящий момент исследована недостаточно. Авторы поставили перед собой задачу проанализировать данный тип интерполяции в определении ТФС и ФР, на сколько он оправдан для применения в технологических расчетах, нужно ли комбинировать различные виды бикубической интерполяции, использовать ли производные некоторых свойств (когда они могут быть получены из термодинамических библиотек), прибегать ли к дополнительным способам минимизировать погрешность измерений?

В работах [10-13] рассмотрено применение бикубической сплайн-интерполяции для прогнозирования термодинамических свойств и фазовых равновесий сложных смесей. Анализ проводился на смесях с различным числом компонентов. Данный тип интерполяции показал хорошие результаты с точки зрения точности интерполяции, за исключением кривой пар-жидкость и сверхкритического состояния. Погрешность интерполяции существенно возрастает вблизи критической точки.

Таким образом, адаптация этого метода потенциально может позволить выполнять сложное вычислительное моделирование потока в динамике без значительной потери точности. Ошибка расчета физических свойств составляет не более 0,5% по сравнению с фактическими значениями.

### **Бикубическая интерполяция ТФС и ФР многокомпонентных смесей в двухфазной области**

В настоящей статье предметом обсуждения будет является использование бикубической сплайн-интерполяции для определения ТФС и ФР ТФС реальных газов и жидкостей, представляющих собой многокомпонентные смеси, на равномерной сетке в зависимости от натурального логарифма приведенного давления и газосодержания при неменяющихся молярных концентрациях (в дальнейшем будут проводиться планируется также исследовать интерполяцию исследования по  $(P, H)$ ;  $(P, S)$ ) при неменяющихся молярных концентрациях. Подобные расчеты применяются для:

- расчёта чисел Рейнольдса, Грасгофа, Прандтля
- определения поправок на вязкость для кривых насосов
- расчёта гидродара
- диагностики вскипания, конденсации и кавитации, кавитационного запаса

- учета эффекта дросселирования
- расчета скорости звука и числа Маха и др.

Двумерная интерполяция двухфазной области, ограниченной кривыми вскипания и конденсации. Для анализа интерполяции было взято 15 многокомпонентных смесей из практических проектов, выполнявшихся сотрудниками и клиентами НТП Трубопровод. В основном данные смеси состоят из углеводородов (УВ), содержащих от четырёх до двадцати двух компонентов:

Таблица 1

Список анализируемых смесей

1 смесь	Метан, пропан, 1-бутен-2-мметил, этан, азот, углекислый газ, пентан
2 смесь	Этан, метан, пропан, углекислый газ
3 смесь	Сероводород, метан, этан, пропан, бутан, циклопентан, вода
4 смесь	Этан, пропан, бутан, вода
5 смесь	Метан, этан, пропан, бутан, изобутан, изобутен, пентан, гексан, метанол
6-15 смеси с различным содержанием компонентов	Метан, этан, пропан, изобутан, бутан, изопентан, пентан, изогексан, гексан, изогептан, бензол, гептан, изооктан, толуол, октан, изононан, нонан, изодекан, декан, CO <sub>2</sub> , азот, сероводород

Рассматривалась докритическая область смеси, примерно до  $0.8 \cdot P_c$ . Особенностью некоторых смесей было то, что они имеют узкую двухфазную область в зависимости от давления и температуры (рис. 1, 2), поэтому интерполяция по давлению и температуре в этом случае является неэффективной. Вместо этого интерполировалась зависимость свойств вещества от натурального логарифма приведенного давления и газосодержания ( $\ln Pr$ ,  $X$ ) на равномерной сетке, что удобно, так как в этих координатах сетка прямоугольная.

Для изучения данных, полученных из термодинамических библиотек, использовался программный пакет MATLAB. Использовались два метода: функция “spline” и функция “makima”. Исследование проводилось на равномерной сетке натурального логарифма приведенного давления и газосодержания, размером: 10x10, 15x15, 20x20.

Метод “spline”. Интерполированное значение в точке запроса основано на кубической интерполяции значений в соседних точках сетки в каждом соответствующем измерении. Интерполяция основана на кубическом сплайне с использованием конечных условий not-a-knot. Сплайн not-a-knot требует, чтобы третья производная сплайна была непрерывна в точках  $X_1$ ,  $X_{n-1}$ .

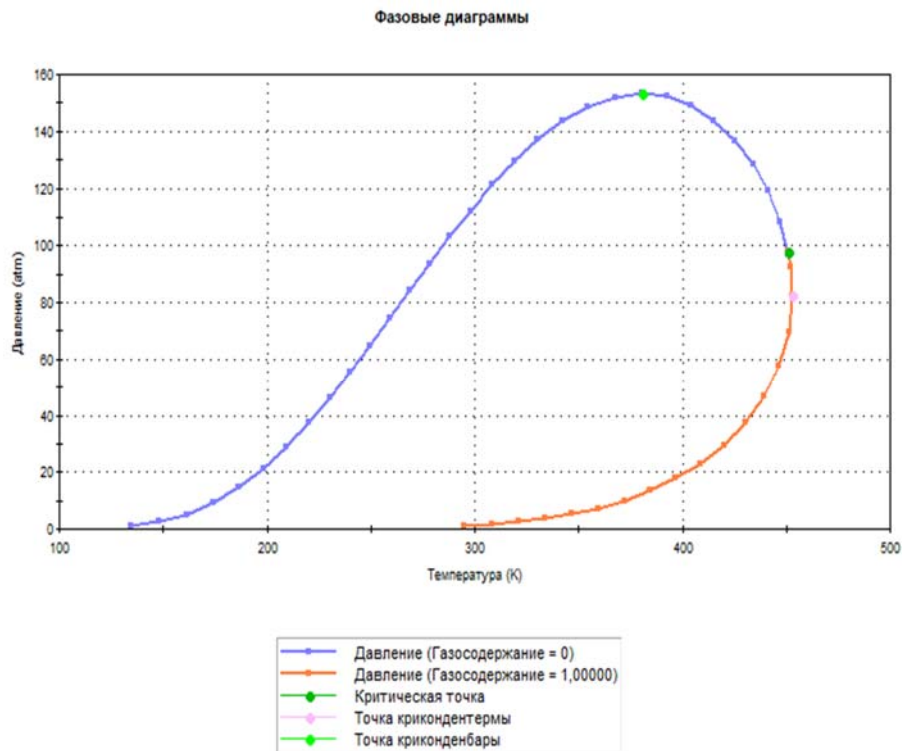


Рис. 1. Фазовая диаграмма для 1 смеси в P,T-координатах

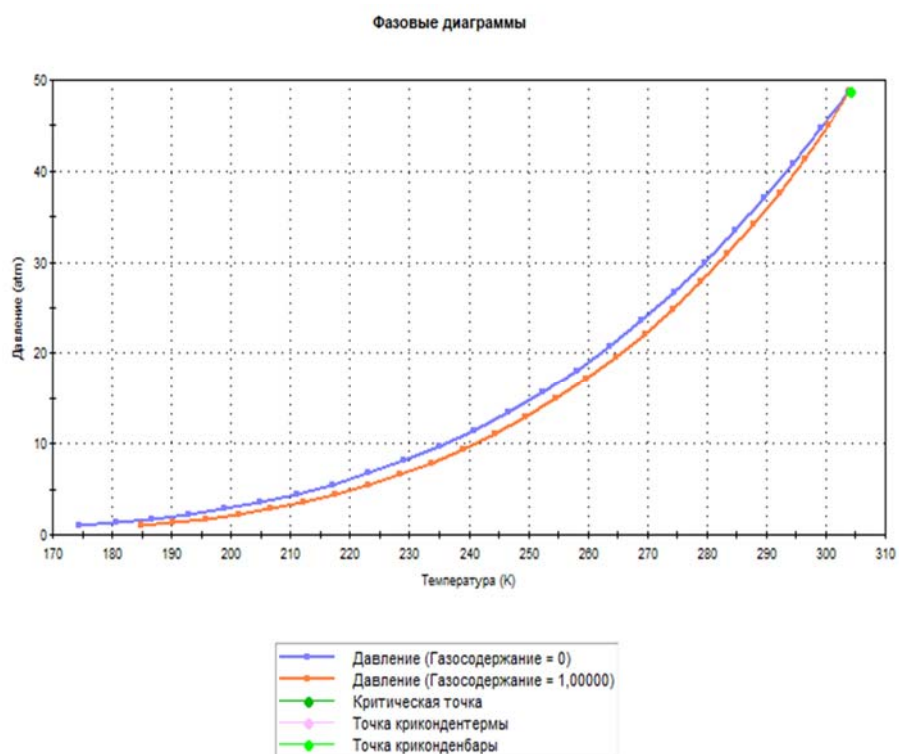


Рис. 2. Фазовая диаграмма для 2 смеси в P,T-координатах

Метод “takima”. Модифицированная кубическая интерполяция Эрмита Akima. Интерполированное значение в точке запроса основано на кусочной функции полиномов степени не более трех, оцениваемой с использованием значений соседних узлов сетки. Формула Акима изменена, чтобы избежать перерегулирования [14].



Важный вопрос, на который надо ответить для правильной постановки задачи в этой работе – это с какой именно точностью нужно интерполировать термодинамические функции?

Для ответа на этот вопрос надо учесть два момента:

1. Какова именно сама точность используемых методик гидравлических и тепловых расчетов, и как именно сказывается погрешность значений ТФС и ФР на результате? Разумеется, это зависит конкретно от ситуации – но в общем случае точность методик лежит в интервале от порядка 1-2% (очень редко более точно) для однофазных течений до 5-15% для многофазных. Характер влияния отдельных свойств тоже разный – но в общем как правило термодинамические свойства важны, и должны иметь точность не хуже, чем сами методики – а вот к точности транспортных свойств (вязкость, теплопроводность, а также поверхностное натяжение) требования гораздо менее жесткие.

2. Очевидно, что не имеет никакого смысла интерполировать результаты библиотек расчета ТФС и ФР с точностью существенно большей, чем точность самих методик этих библиотек. Это дает нам оценку снизу – то есть, когда дальнейшее уточнение становится бессмысленным. Разберемся на примере некоторых библиотек

а. Расчет воды и пара, методики IAPWS, реализованные в WaterSteamPro.

- i. Плотность воды считается с точностью от 0.003% до 0.015%.
- ii. Плотность водяного пара считается с точностью 0.1-0.3%
- iii. Теплоёмкость 0.2-0.4%, вблизи критической точки падает.
- iv. Давление насыщенных паров от температуры – точность 0.03%
- v. Вязкость – от 1 до 3%
- vi. Теплопроводность – от 1.5 до 3%

б. Методика GERG-2008 расчета свойств природных газов, в том числе сжиженных

- i. Плотность и скорость звука от 0.1%
- ii. Теплоемкость, энтальпия от 0.5%
- iii. Давление насыщенных паров, решение задач ФР – 1-3%

с. Методики расчета свойств индивидуальных веществ в REFPROP. Возьмем, например этилен.

- i. Плотность – от 0.02% для жидкости и от 0.1% для газа.
- ii. Скорость звука – от 0.05% для газа, 3% для жидкости
- iii. Вязкость – от 5 до 10%

и так далее.

Вывод: интерполяция термодинамических свойств с точностью до долей %, а транспортных порядка 1% вполне приемлема для целей теплогидравлических расчетов трубопроводов.

Что касается самого определения погрешности, то нами принято рассчитывать её как отношение максимальной абсолютной погрешности двух матриц, то есть матрицы после интерполяции и матрицы истинных

значений, и максимального абсолютного перепада на матрицы истинных значений:

$$\text{Error} = \frac{\max |(A(\text{инт}) - A(\text{ист}))|}{|\max A(\text{ист}) - \min A(\text{ист})|} * 100\%$$

Итак, рассматривалась двухфазная область 15 многокомпонентных смесей на сетке различных размеров в зависимости от натурального логарифма приведенного давления и газосодержания. Были проанализированы следующие свойства: коэффициент изобарного расширения жидкости/газа, безразмерный коэффициент объёмного расширения жидкости/газа, удельной теплоемкости изобары жидкости/газа, динамической вязкости жидкости/газа, теплопроводность жидкости/газа, плотность жидкости/газа, поверхностное натяжение, коэффициент Джоуля-Томсона жидкости/газа, коэффициент безразмерный Джоуля-Томпсона жидкости/газа, скорости звука, энтальпия ж-г смеси/жидкости/газа, энтропия смеси/жидкости/газа, коэффициенты изоэнтропы смеси и др. Анализ проводился с помощью с термодинамической библиотеки «Simulis Thermodynamics». В таблице 2 (приложение 1) приведены относительные погрешности некоторых свойств после интерполяции методом “spline” и “makima”. Из-за получившейся погрешности больше 1% нами было предложено уменьшить её “масштабированием” исходных значений свойств (которые позволяют это сделать), т.е. было применено логарифмирование свойств. Тем самым была снижена погрешность на меньшей сетке (10x10), однако в некоторых случаях она сохраняется более 1%.

По итогам численных экспериментов оказалось, что повышенная погрешность интерполяции характерна для только для плотности жидкой фазы и коэффициента поверхностного натяжения для невысоких давлений в случае, когда в рамках термодинамической модели эти величины рассчитываются по формулам идеальной смеси. В этом случае данные величины сильно зависят от состава жидкой фазы и могут претерпевать быстрые изменения в областях почти полного выкипания отдельных компонентов смеси, что и обуславливает трудности с интерполяцией (см. примеры на рис.3, 4). В этом случае интерполяция требуемой точности может быть построена на основе формулы расчета свойств идеальной смеси путем интерполяции доли отгона каждого компонента (и, следовательно, состава жидкой и газовой фаз) и интерполяции свойств каждого отдельного компонента.

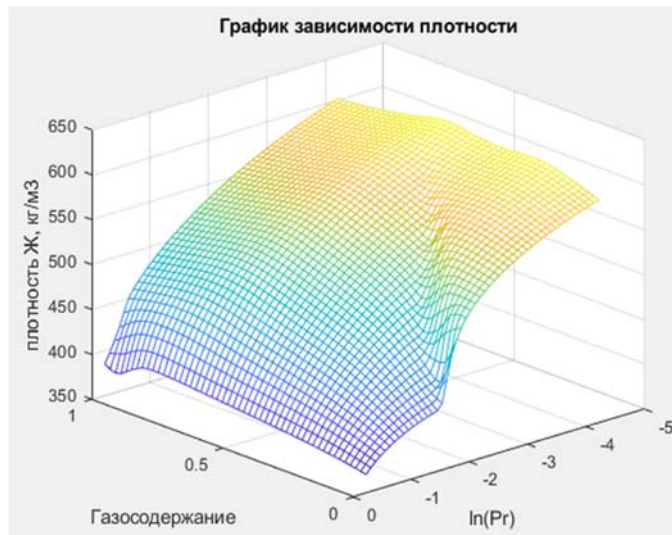


Рис. 3. График зависимости плотности жидкой фазы

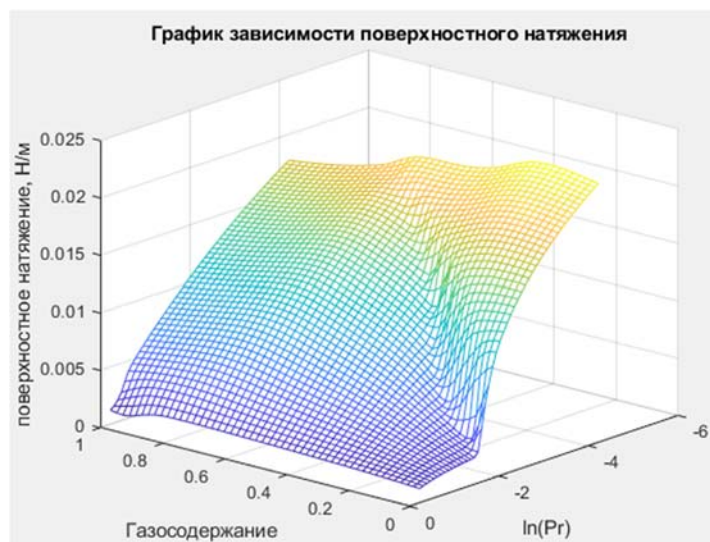


Рис. 4. График зависимости поверхностного натяжения

## Заключение и выводы

- Применение бикубических сплайнов позволяет интерполировать ТФС реальных газов и жидкостей в двухфазной области с достаточной точностью для инженерных расчетов в широких областях изменения параметров на основе сравнительно небольшого количества узлов интерполяции.

- В большинстве случаев метод “spline” даёт несколько лучшую точность по сравнению с модифицированными сплайнами Akima, однако при приближении к критической точке и других случаях, когда изменение интерполируемой величины сильно неравномерно, применение последних, а также интерполяция логарифма величины свойства может существенно повысить точность интерполяции.

- Оптимальной оказалась сетка с количеством точек равным 15x15. Погрешности до логарифмирования свойства являются допустимым в большинстве случаев.

• В наиболее проблемных случаях может быть применена интерполяция долей отгона отдельных компонент и расчет ТФС по аддитивности (по формулам идеальной смеси) на основе интерполяции свойств отдельных компонентов

Авторы выражают глубокую благодарность Заместителю директора НТП Трубопровод по ИТ Алексею Ивановичу Тимошкину за консультации и помощь при проведении данных исследований.

## Литература

1.M. Milivojevic, S. Obradovic, V. Semantic, D. Drndarevic BICUBIC SPLINE ESTIMATOR FOR PROBABILITY DENSITY FUNCTIONS of RAW WATER PROPERTIES // “Science and Higher Education in Function of Sustainable Development”. №10. 2017. p. 91-99.

2.Шикин Е.В., Плис Л.И. Кривые и поверхности на экране компьютера. Руководство по сплайнам для пользователей. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996 г. 233 с.

3.MARGIT LÉNÁRD SPLINE INTERPOLATION IN TWO VARIABLES // Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica. № 20. 1985. p. 145-154.

4.I.N. Bronshtein, K.A. Semendyayev, G. Musiol, H. Muehlig. Handbook of Mathematics, 5th Edition, 1164 p

5.Aparna Kanakatte Delineation of Tumor from Pulmonary Gated PET Images: Department of Electrical & Computer Systems Engineering Monash University, 2008. 147 p.

6.Tashmanov Erjan Baymatovich COMPUTER SCIENCE. EFFECTIVENESS INCREASE OF VISUAL PROCESSING ON THE BASIS OF IMAGE SCALING // American Scientific Journal. №4. 2016. p. 69-71.

7.Prof. Mohamed F. El-Kordy, Prof. Sayed M. El-Araby, Dr. Fathi E. Abd El-Samie, Dr. Osama F. Zahran APPLYING ADVANCED DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES IN INDUSTRIAL RADIOISOTOPES APPLICATIONS.: Menofia University Faculty of Electronic Engineering Department of Electronics & Electrical Communications Engineering, 2012. 158 p.

8.Bambang Krismono Triwijoyo, Ahmat Adil Analysis of Medical Image Resizing Using Bicubic Interpolation Algorithm // Jurnal Ilmu Komputer. № 14. 2. p. 20-29.

9.Скрипаченко М.П., Корельштейн Л.Б., Гартман Т.Н. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИКУБИЧЕСКОЙ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЁТОВ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ // Успехи в химии и химической технологии. №8. 35. С. 134-138.

10. J.Bonilla, L.J.Yebra, S.Dormido Chattering in dynamic mathematical two-phase flow models // Applied Mathematical Modelling. № 36. 5. p. 2067-2081.

11. Brown, S. Peristeras, L.D., Martynov, S. et al. (2016) Thermodynamic interpolation for the simulation of two-phase flow of non-ideal mixtures. Computers & Chemical Engineering, 95. pp. 49-57.

12. Supercritical thermodynamic property evaluation via adaptive mesh tabulation: sai praneeth mupparapu. Waterloo, Ontario, Canada: 2019. 86 p.

13. Matteo Pini Turbomachinery Design Optimization using Adjoint Method and Accurate Equations of State: Milano: POLITECNICO DI MILANO, 2013. 153 p.

14. MATLAB for Artificial Intelligence: [Электронный ресурс]. ГКД: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/interp.html>

## Приложение 1

Таблица 2

Погрешности методом “spline” и “makima”

	Свойство	Spline, 10*10	Spline, 15*15	Spline, 20*20	Makim a,10*10	Makima, 15*15	Makima, 20*20
1	молярная масса Г	0,67	0,30	0,19	1,22	0,57	0,34
2	температура	0,20	0,07	0,05	0,29	0,13	0,08
3	коэф. изобарного расширения Ж	3,66	1,79	1,07	5,25	2,79	1,70
4	коэф. изобарного расширения Г	3,25	1,43	0,84	5,12	2,48	1,45
5	удельная теплоемкость изобары Ж	2,47	1,90	2,03	3,69	2,26	2,17
6	удельная теплоемкость изобары Г	3,32	1,72	0,96	5,00	2,77	1,58
7	удельная теплоемкость изобары смеси	3,55	0,91	0,28	5,12	1,59	0,63
8	динамическая вязкость Ж	0,75	0,59	0,37	1,07	0,61	0,37
9	динамическая вязкость Г	1,33	0,61	0,37	2,14	1,06	0,63
10	теплопроводность Ж	1,20	0,93	0,59	1,46	1,00	0,59
11	теплопроводность Г	0,86	0,15	0,09	1,12	0,33	0,15
12	плотности Ж	12,54	11,16	11,47	13,15	9,70	11,24
13	поверхностное натяжение	16,35	13,03	10,83	16,76	11,65	10,67
14	гамма (отношение Ср к Cv) Ж	3,23	1,59	1,33	4,62	2,48	1,69
15	гамма (отношение Ср к Cv) Г	4,22	1,84	1,42	6,14	3,03	2,05
16	коэф. Джоуля-Томсона Ж	3,09	1,49	0,95	4,47	2,37	1,46
17	коэф. Джоуля-Томсона Г	1,16	0,74	0,68	1,35	0,80	0,70
18	скорость звука Ж	0,62	0,48	0,51	0,63	0,49	0,52
19	скорость звука Г	2,08	0,92	0,89	2,64	1,27	1,08
20	коэф. сжимаемости Г	0,86	0,37	0,23	1,51	0,70	0,42
21	энтальпия смеси	0,27	0,13	0,08	0,49	0,23	0,14
22	энтальпия Ж	0,64	0,31	0,19	1,00	0,50	0,31
23	энтальпия Г	1,71	0,79	0,49	2,78	1,40	0,82
24	энтропия смеси	0,16	0,08	0,05	0,29	0,14	0,08
25	энтропия Ж	0,41	0,20	0,12	0,65	0,32	0,20
26	энтропия Г	0,64	0,29	0,18	1,10	0,53	0,32
27	Число Прандтля Ж	1,93	1,54	1,36	2,10	1,52	1,27
28	Число Прандтля Г	1,34	0,62	0,41	1,80	0,65	0,47
29	Термический коэф. изоэнтропы	2,68	1,39	1,56	3,28	1,61	1,59
30	коэф. изоэнтропы	39,82	39,44	39,08	40,12	39,45	39,21
31	LN Молярной массы Г	0,77	0,24	0,14	0,92	0,42	0,25

**Всероссийский научный семинар  
 “МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОПТИМАЛЬНОГО СИНТЕЗА РАЗВИВАЮЩИХСЯ  
 ТРУБОПРОВОДНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ”,  
 ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Алтай, 12 – 18 сентября 2022 г.**

32	LN температуры	0,31	0,06	0,05	0,38	0,12	0,08
33	LN коэф. изобарного расширения Ж	1,40	0,68	0,41	2,10	1,08	0,67
34	LN коэф. изобарного расширения Г	1,33	0,55	0,33	2,27	1,06	0,61
35	LN удельной теплоемкости изобары Ж	3,30	2,58	2,79	3,22	2,56	2,97
36	LN удельной теплоемкости изобары Г	1,51	0,64	0,53	2,48	1,19	0,70
37	LN удельной теплоемкости изобары смеси	5,61	1,64	0,57	7,49	2,53	0,94
38	LN динамической вязкости Ж	1,01	0,82	0,51	1,27	0,87	0,53
39	LN динамической вязкости Г	0,77	0,39	0,25	1,24	0,62	0,40
40	LN теплопроводности Ж	1,17	0,91	0,57	1,42	0,98	0,58
41	LN теплопроводности Г	0,98	0,16	0,08	1,28	0,37	0,14
42	LN плотности Ж	12,55	11,44	12,54	14,13	10,07	12,34
43	LN поверхностного натяжения	19,48	15,74	18,68	21,86	13,74	18,45
44	LN гаммы (отношение $C_p$ к $C_v$ ) Ж	2,58	1,55	1,64	3,46	1,79	1,70
45	LN гаммы (отношение $C_p$ к $C_v$ ) Г	2,38	0,98	0,85	3,77	1,68	1,19
46	LN коэф. Джоуля-Томсона Г	1,39	0,87	0,80	2,18	1,32	0,81
47	LN скорости звука Ж	0,61	0,44	0,46	0,91	0,62	0,47
48	LN скорости звука Г	2,34	0,95	1,00	2,95	1,43	1,21
49	LN коэф. сжимаемости Г	1,30	0,58	0,35	2,16	1,04	0,62
50	LN Числа Прандтля Ж	3,10	2,43	2,11	3,33	2,38	1,98
51	LN Числа Прандтля Г	1,65	1,13	0,81	1,75	1,09	0,86
52	LN Термического коэф. изэнтропы	3,73	1,28	1,47	4,70	1,70	1,50
53	LN коэф. изэнтропы	26,09	25,13	24,63	26,59	25,34	24,88
54	Состав. Ж. 1 компонент	1,27	0,61	0,37	1,93	1,00	0,61
55	Состав. Г. 1 компонент	0,90	0,25	0,16	1,05	0,48	0,29
56	Доля отгона. 1 компонент	0,76	0,14	0,08	0,67	0,23	0,14
57	Состав. Ж. 2 компонент	1,32	0,56	0,34	1,84	0,95	0,57
58	Состав. Г. 2 компонент	1,36	0,38	0,14	1,36	0,42	0,23
59	Доля отгона. 2 компонент	0,75	0,20	0,09	0,63	0,19	0,12
60	Состав. Ж. 3 компонент	1,33	0,65	0,40	2,08	1,09	0,66
61	Состав. Г. 3 компонент	0,88	0,39	0,24	1,50	0,73	0,43
62	Доля отгона. 3 компонент	0,57	0,16	0,07	0,53	0,20	0,12