

ОБРАТНАЯ СТОРОНА ВОДЫ

Доктор технических наук, профессор В.Ф. ОЧКОВ,
кандидат технических наук К.А. ОРЛОВ
(НИУ “МЭИ”)

DOI: 10.7868/50233361923030060

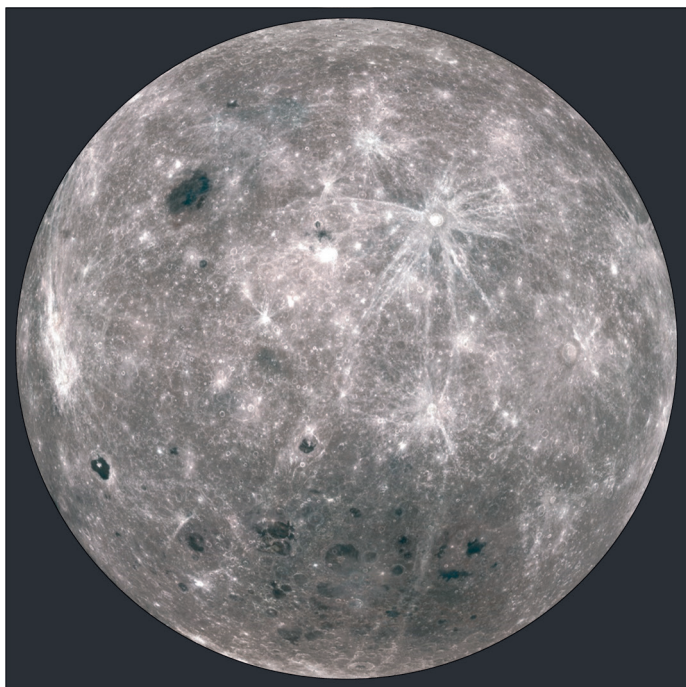
В октябре 1959 года, когда первому автору этой статьи было всего 11 лет, его в очередной раз охватила безмерная гордость за свою страну. В газете “Правда” была опубликована фотография обратной стороны Луны (рис. 1), сделанная советской космической станцией “Луна-3” (рис. 2). А до этого был 1957 год с запуском первого искусственного спутника Земли. А потом был 1961 год с полетом Юрия Гагарина. Автор тогда часто думал о себе так: “Как мне неказанно повезло! Я родился в СССР, да ещё и в столице, в Москве!”. Но и в наше время эти “думы” не до конца потеряли своей детской наивности, несмотря на то что автор уже в зрелые годы много чего разного узнал о своей стране¹ и повидал (в том числе и для сравнения) практически весь мир.

Обратная сторона Луны вспомнилась, когда авторами был нарисован на компьютере “контурный

график”, показанный на рис. 3. Что это такое!? Как это связано с названием журнала и с названием статьи?

Основное рабочее тело и теплоноситель тепловых, атомных и гидравлических электростанций (а это почти 90% всей электроэнергетики мира) – вода и водяной пар. Тепловые сети, как правило, заполнены водой. Нельзя спроектировать и эксплуатировать эти энергетические объекты без знания

Рис. 1.
Обратная сторона Луны.

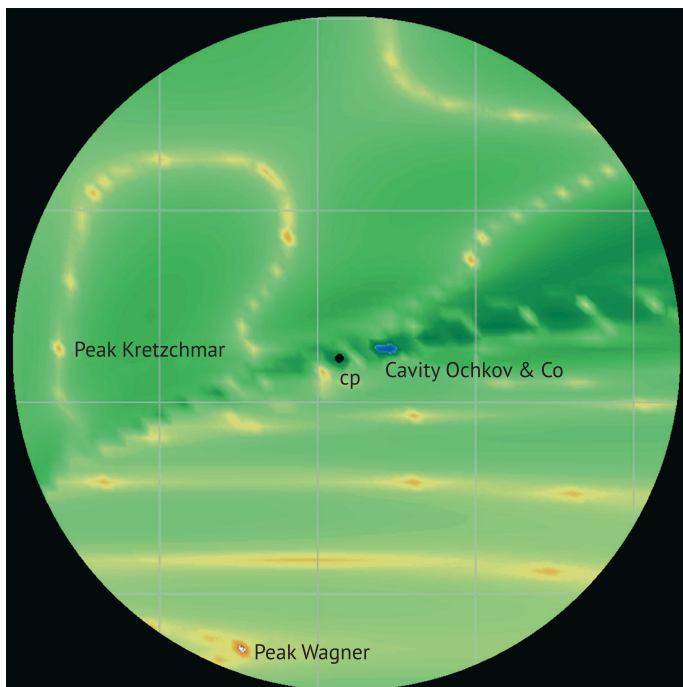


¹ Очков В.Ф. Моя армейская энергетика // Энергия: экономика, техника, экология. № 2. 2022 (статья дополнена и другими воспоминаниями автора – см. <http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/EEE-2-2022-My-Energy.pdf>).



Рис. 2. Почтовая марка, выпущенная в ознаменование полета "Луны-3".

Рис. 3. Обратная сторона теплофизических свойств воды – контурная карта: Пик Кречмара, Peak Wagner – Пик Вагнера, Peak Cavity Ochkov & Co – Впадина Александрова–Орлова–Очкова.



теплофизических свойств воды, играющей огромную роль в жизни на Земле. Кстати, во многих европейских языках нет одного слова, обозначающего эту субстанцию. Мы говорим вода, водяной пар (сухой или влажный), водяной пар при сверхкритических параметрах (флюид). Так, в языках некоторых народов нет одного обобщающего слова "лес", а есть отдельные слова

для разных видов леса: тайга, роща, бор, джунгли и т.д. Далее мы под словом "вода" будем понимать воду в разных её состояниях, при разных параметрах.

Международная ассоциация по свойствам воды и водяного пара (www.iapws.org), в которой работают авторы этих строк, выпустила в виде pdf-файлов две формуляции² для расчёта термодинамических свойств воды: формуляцию IAPWS-95 (<http://iapws.org/relguide/IAPWS-95.html>) и формуляцию IAPWS-IF97 (<http://iapws.org/relguide/IF97-Rev.html>)³. Российский национальный комитет по свойствам воды и водяного пара сделал эти формуляции живыми. Можно поменять исходные данные и получить новый ответ со всеми промежуточными вычислениями и графиками. Есть соответствующие формуляции для вычисления и транспортных свойств воды не только обычной, но и тяжёлой, содержащей соли (морская вода). Отдельные формуляции касаются метастабильных состояний⁴ –

² Слово формуляция, несколько непривычное для русского уха, означает набор формул и описаний условий их применения.

³ Очков В.Ф., Орлов К.А. Цифровой двойник воды // Энергия: экономика, техника, экология. 2021. № 10. С. 18–22 (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/Ochkov-3water.pdf>)

⁴ Метастабильное состояние – неравновесное состояние, устойчивое относительно малых возмущений.

перегретая вода и переохлажденный водяной пар.

Формуляция 1995 года позволяет вести расчёты свойств воды в зависимости от плотности и температуры. Это не очень удобно, так как в лабораториях и на промышленных объектах у воды измеряют не плотность, а давление. Поэтому была создана альтернативная формуляции IAPWS-IF97, где исходные данные – не плотность и температура, а давление и температура. Буква *I* в названии этого руководящего документа означает *industrial*, промышленный. Формуляция же 1995 года предназначена для общих и научных целей. Отказ от плотности и переход к давлению потребовал и отказа от единой формуляции на всём диапазоне исходных данных. В формуляции IAPWS-IF97 выделяются отдельные области со своими формулами для воды (п. 1 на рис. 4), водяного пара (п. 2), околокритического состояния (п. 3) и для водяного пара с высокой температурой (п. 5). Пункт 4 фиксирует не область, а линию насыщения, исходящую из тройной точки воды и заканчивающуюся в критической точке. Для этих четырёх областей и одной линии были созданы отдельные формуляции, которые не совсем точно состыковываются в приграничных зонах. Кроме того, есть довольно заметные различия в результатах счёта по формуляциям 1995 и 1997 годов. Обозначение $g(p, T)$ и $f(p, T)$ на рис. 4 – это свободные энергии Гиббса (Gibbs) и Гельмгольца (Helmholtz). Нужно было, конечно, написать в формуляции не $f(p, T)$, а $h(p, T)$, но буква *h* уже занята под обозначение удельной массовой энтальпии. Эти два вида энергий (термодинамических потенциалов) рассчитываются для отдельных областей через многочлены высокой степени. Коэффициенты этих многочленов определяются сложной статистической обработкой экспериментальных данных.

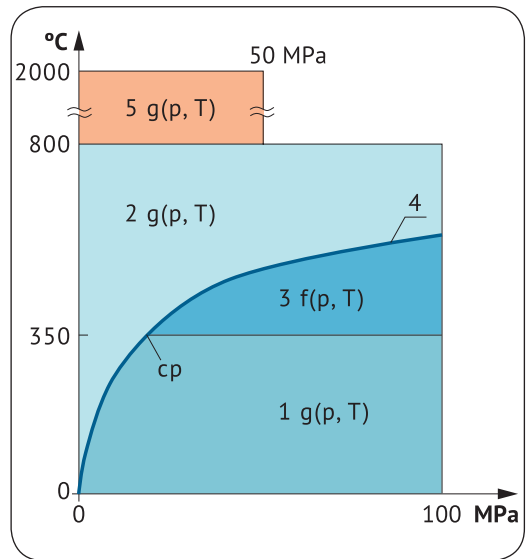


Рис. 4.
Области формуляции IAPWS-IF97 в координатах "давление–температура":
1 – вода, 2 – водяной пар,
3 – околокритическая область,
4 – линия насыщения и 5 – водяной пар высокой температуры.

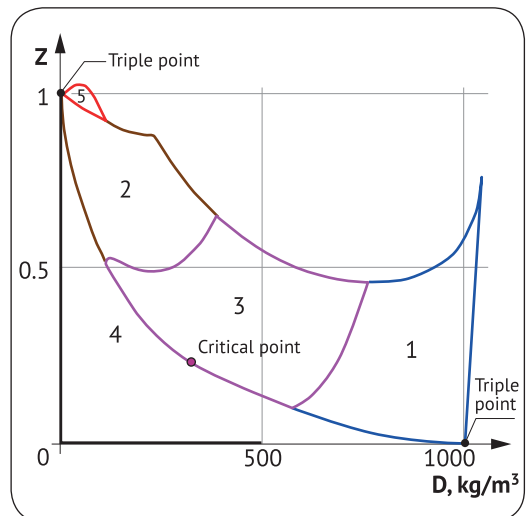


Рис. 5.
Области формуляции IAPWS-IF97 в координатах "плотность–сжимаемость":
Triple point – тройная точка,
Critical point – критическая точка.

Интересно взглянуть на области формуляции IAPWS-IF97 в координатах “плотность – коэффициент сжимаемости” (рис. 5). Коэффициент сжимаемости – это дополнительный параметр Z , превращающий уравнение идеального газа⁵ $p\nu = T$ в уравнение реального газа $p\nu = ZT$, где Z – не константа, а функция, зависящая от давления и температуры. Она меняется от нуля (несжимаемая вода) до единицы и даже сверх единицы у пара с высокой температурой. Тройная точка разбивается на две точки – справа внизу точка для воды и слева вверху точка для водяного пара. Но это тройная, а не двойная точка – где-то там присутствует и лёд, твёрдая фаза воды. Тройная точка – это состояние, где одновременно присутствуют жидкая, газообразная и твёрдая фазы. Интересно также на этой диаграмме и то, что вода и водяной пар не соприкасаются.

В формуляции 1995 года, как уже отмечено, область одна. Она охватывает значения температуры от нуля до 1000 градусов по шкале Цельсия и давления почти от нуля до 1000 МПа, где по многочлену чуть ли не сотой степени высчитывается свободная энергия Гельмгольца $f(D, T)$, а по ней – остальные термодинамические параметры: давление, удельная энтальпия, удельная энтропия, изобарная и изохорная теплоёмкости, скорость звука и т.д.

Так вот, “физическая географическая карта” на рис. 3 визуально отображает, насколько различаются значения плотности воды, рассчитанные по формуляциям 1995 и 1997 годов. Чёрная точка в центре рисунка – это критическая точка воды (“северный

полюс”), от которой влево и вниз до тройной точки идёт линия насыщения – некий “горный хребет”. О других трёх помеченных точках (“географических объектах” эдакого Бермудского треугольника) мы скажем чуть позже.

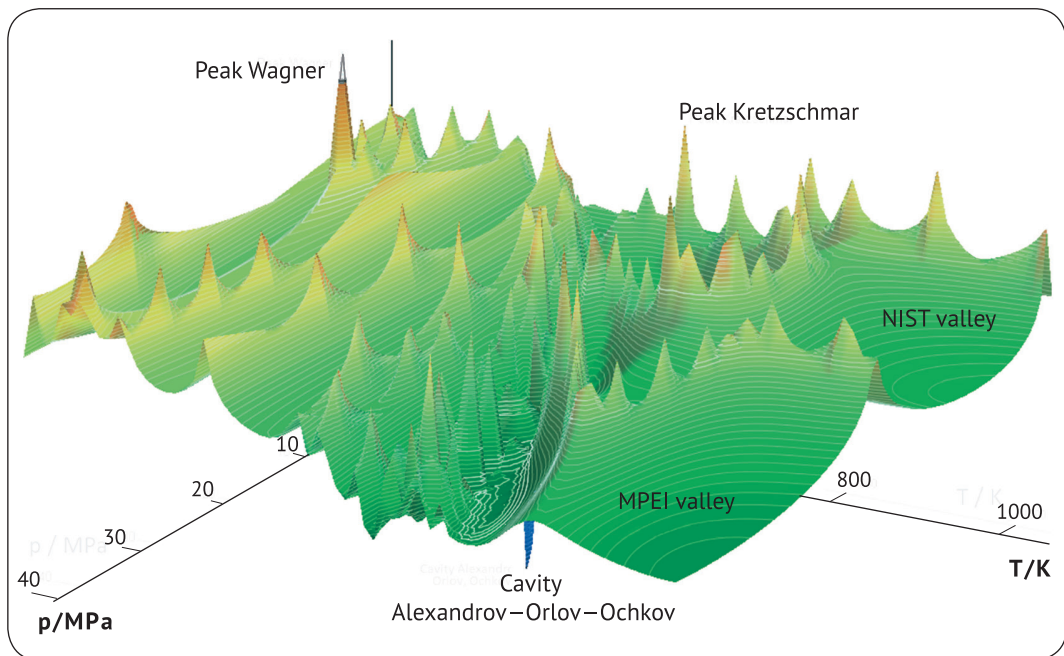
Термин “обратная сторона” не только означает противоположную сторону чего-либо, Луны, например, но и несёт некий негативный оттенок. Например, отсутствие единства в определении свойств воды и, как следствие, расхождение в расчётах – вода одна, а формуляций две. Можно тут порассуждать и о тёмных пятнах на биографии человека, на поверхности Луны и Солнца, а также на рис. 3.

Плоская “контурная карта”, показанная на рис. 3, была преобразована в трёхмерный рельеф – см. рис. 6, на котором чётко видны горные вершины, ущелья, каньоны и долины. Две вершины и одна впадина, а также две долины поименованы! Поговорим о них, вернувшись на время к обратной стороне Луны.

Когда был сделан первый снимок обратной стороны Луны, в СССР в порыве эйфории и патриотизма всем морям, кратерам и другим открытым лунным объектам были даны имена советских учёных, партийных и государственных деятелей и некоторых “прогрессивных иностранцев”. Такая поименованная круглая карта была также опубликована в газете “Правда”. Но большинство этих новых топонимов⁶ не было утверждено Международным астрономическим союзом. Мол, новый космический или географический объект недостаточно сфотографировать – нужно и ступить на него. Да и лишний раз здесь проявилась традиционная

⁵ Очков В.Ф., Орлов К.А. Когда $p\nu = T$ // Законодательная и прикладная метрология. 2022. № 2. С. 38–44 (<http://www.twt.mpei.ac.ru/ochkov/pv-T-ZPM.pdf>)

⁶ Топоним – собственное название природного объекта на Земле или объекта, созданного человеком на Земле



западная русофобия⁷. Оставили только бесспорные имена Юрия Гагарина, Сергея Королева, Льва Ландау и Дмитрия Менделеева (кратеры диаметром более 200 км).

Вернёмся к “обратной стороне воды”, вернее, к её двум формуляциям, отражающим некое двоевластие.

Когда первый автор этих строк впервые “сфотографировал обратную сторону” воды, он тоже на волне эйфории дал двум высочайшим горным вершинам имена своих немецких коллег по IAPWS Вагнера и Кречмара – авторов немецкого справочника по свойствам воды. А глубочайшей впадине в порыве патриотизма было

⁷ Хроническая болезнь Европы с периодами рецессий и обострений. Правда, на Западе эту болезнь называют по-другому и считают, что ею болеет не Запад, а Россия. Но истина, как всегда, находится посередине. Одна из причин сегодняшнего глубочайшего кризиса в международных отношениях – это двойные стандарты, определяемые пословицей “Правда хорошо, а счастье лучше!”.

Рис. 6.
Обратная сторона теплофизических свойств воды – трёхмерный рельеф: Peak Kretzschmar – Пик Кречмара, Peak Wagner – Пик Вагнера, Cavity Alexandrov-Orlov-Ochkov – Впадина Александра-Орлова-Очкова, MPEI valley – долина МЭИ, NIST valley – долина НИСТ.

дано имя авторов российского подобного справочника⁸.

Отечественный справочник выгодно отличается от зарубежных аналогов тем, что он дополнен, как сейчас говорят, цифровым двойником (см. сноску 3 и ссылку <http://twf.mpei.ac.ru/rbtpp>).

В бумажном справочнике исходными данными для расчётов могут быть только давление и температура. Цифровой же двойник работает и с такими парами: “давление – удельная энтальпия”, “давление – удельная энтропия”,

⁸ Александров А.А. Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики / А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф. Очков. 2-е изд., перераб. и допол. М.: Издательский дом МЭИ. 2017. 226 с., илл.

$$\Delta D(p, T) := \frac{D_{IF97} - D_{95}}{D_{IF97}}$$

$$D_{IF97} := \text{wspDPT}(p, T)$$

$$D_{IF97} := \text{CoolProp_Props}("D", "T", T, "P", p, "H_2O")$$

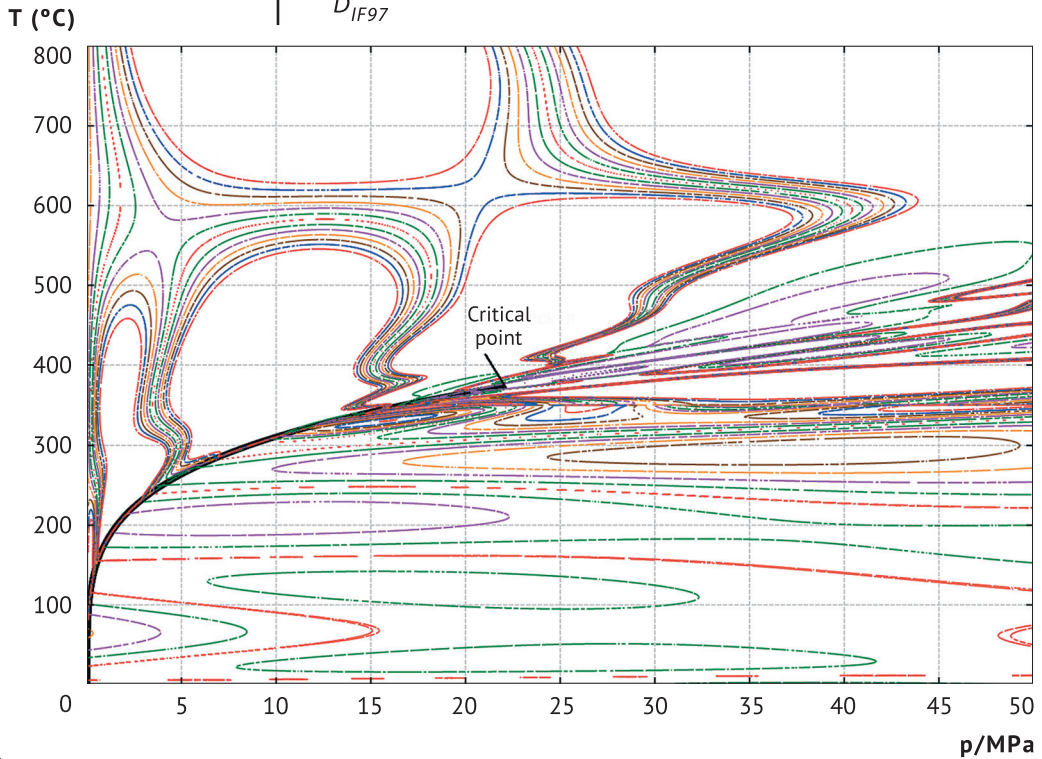


Рис. 7.
Обратная сторона воды,
нарисованная в среде SMath.

“удельная энтальпия – удельная энтропия” и др. Кроме того, он позволяет строить разного рода диаграммы – диаграмму расширения водяного пара в турбине, например.

Есть идея присвоить имена людей, внёсших вклад в исследование свойств воды, на карты, представленные на рис. 3 и 6. И не только отдельных персон, но и целых организаций. Так, на рис. 6 можно увидеть долины МЭИ и НИСТ (Национальный институт стандартов и технологий, США), отделённые горным хребтом, про который сказано в сноске 7. Хорошо бы где-то отметить долину ВТИ – Всесоюзного, ныне Всероссийского теплотехнического института. Когда-то давно в ходу

были две таблицы свойств воды и водяного пара – таблицы ВТИ и таблицы М.П. Вукаловича. Имя Михаила Петровича Вукаловича (1898–1969) носит кафедра теоретических основ теплотехники МЭИ, где работают авторы этой статьи. И на “обратной стороне воды” имя Вукаловича будет смотреться вполне логично.

Рис. 3 и 6 были сделаны с помощью физико-математической программы Mathcad, от которой в настоящее время по известным причинам приходится отказываться (см. сноску 5) и пере-

ходить на вполне достойный отечественный продукт SMath (www.smath.com). В этот пакет встроены функции программы CoolProp (www.coolprop.org), возвращающие свойства не только воды, но и других рабочих тел и теплоносителей тепло- и промтеплоэнергетики – газов, хладагентов... Но беда в том, что в эту программу встроена формуляция IAPWS-95, а не формуляция IAPWS-IF97. “Водный стандарт” 1995 года в России не сертифицирован, а узаконен стандарт 1997 года, который используется в отечественной сертифицированной авторской программе WaterSteamPro (www.wsp.ru). Авторами этой статьи вместе с разработчиком SMath удалось встроить пакет WaterSteamPro в “русский Mathcad” – в программу SMath. На рис. 7 и 8 показано графическое сопоставление (линии одной погрешности) плотности воды и водяного пара, выдаваемое обоими пакетами – WaterSteamPro и CoolProp – в широкой области давления и температуры (рис. 7) и у “Марианской впадины” Александрова–Орлова–Очкова (рис. 8). Глубина этой впадины ещё до конца не измерена!

Кстати, об упомянутой газете “Правда”. В 70-е годы прошлого века в МЭИ появилась первая в СССР аудитория, оборудованная телевизорами для дополнительной иллюстрации лекционных материалов. В наше время это стало рутинной – почти все учебные помещения имеют компьютерные проекторы с цветным качественным изображением. Более того, можно напустить в аудитории “дыму” и показывать поверх голов студентов лазерное шоу трехмерных объектов – парового котла, турбины, да и всей электростанции в целом. Но в прошлом веке это про-

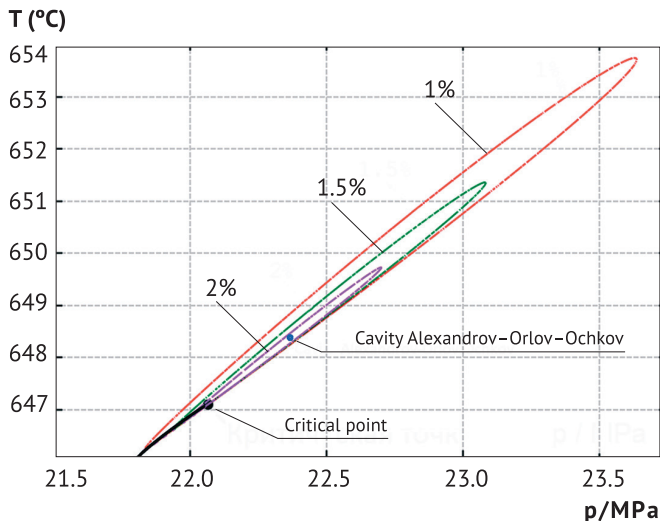


Рис. 8.
Топография водной впадины (пучины)
Александрова–Орлова–Очкова.

извело фурор. Так вот, одну из лекций в новой аудитории МЭИ посетил корреспондент “Правды” и написал об этом заметку, где была такая фраза: “Лектор нажимает кнопку и на экране телевизора как живая появляется петля Гистерезиса”. Коллеги лектора после этого подходили к нему и с ехидцей спрашивали: “Ну, как поживает старик Гистерезис?”. Это была специализированная аудитория электротехники. Упомянутая петля (кривая, изображающая ход зависимости намагничивания от напряжённости внешнего поля) отображает некое запаздывание – гистерезис по-гречески. Корреспондент же посчитал, что это имя учёного. За такие ошибки-опечатки в те времена могли лишиться работы не только самого корреспондента, но и корректора вместе с редактором. Строгие выговоры получали просто за неправильные переносы слов. Теперь же их полно в текстах и за этим мало кто следит. А в сороковые–пятидесятые годы прошлого века можно было загреметь в лагерь, если в газете, журнале или книге сделать перенос в словах Ленин, Сталин и др.