

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ В XXI ВЕКЕ

Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

**О.В. ДОБРОЧЕЕВ,**

кандидат технических наук, начальник лаборатории

**Ю.Н. УДЯНСКИЙ,**

кандидат технических наук, начальник лаборатории

**Т.Д. ЩЕПЕТИНА,**

(НИЦ “Курчатовский институт”)

Представлен новый подход к прогнозированию структуры ядерной энергетики России на основе турбулентной аналогии Колмогорова, расширенной на очень большие техногенные и социально-экономические системы. Показано изменение структуры мощностей ЯЭ в сторону блоков малой и средней мощности, позволяющее снизить её интегральные риски. Определён 70-летний период циклического развития российской ЯЭ.

**В**озобновление внимания к атомным станциям малой и средней мощности (АС МСМ) связано с перспективами развития энергетики и необходимостью снижения общего рискового давления на общество. Как известно, “риск – благородное дело”, однако к ядерно-радиационному аспекту это не относится. Если ЯЭ призвана развиваться и дальше, то её интегральный риск (ИР) должен обязательно снижаться. ИР включает в себя как

монетизируемые, так и немонетизируемые составляющие; в первую очередь, это потенциальный аварийный ущерб, с прямыми затратами на ликвидацию и с отдалёнными последствиями для физического и психического здоровья, текущая радиационная и тепловая нагрузка на экосистемы и т.п. Оцифровка рисков пока развита в финансовой сфере, а в энергетике существует только в зачатке.

## Гуманистические основы системы атомной энергетики

Снижение ИР ЯЭ связывается в первую очередь с возможным переходом на АС малой и средней мощности (АС МСМ), у которых существенно меньше как аварийный риск, так и масштаб его последствий: в 10 раз меньше единичная мощность – в 1000 раз выше общая безопасность энергоустановки. Даже неустраняемый современными мерами риск человеческого фактора тоже снижается, когда в управление человеку и его “автоматизированным системам” даются объекты с наименьшей потенциальной опасностью, то есть АСММ; это дробление (эквивалентный встречающийся термин – хеджирование) риска, который формально остаётся, но суммарно уменьшается.

В современной экономике АСММ возникают как внеэкономические элементы, призванные работать в экстремальных областях, таких как Север, Арктика, подводный и ледокольный флот, поскольку современная прагматично-либеральная система экономики ориентирована не на человека и его жизненные потребности, а на прибыль. Однако логика подсказывает, что в “нормальном обществе” всё должно служить именно человеку и его насущным потребностям, исключая деградиционно-паразитические. Тем не менее, гуманистические аспекты и традиции в обществе остались. Примером тому служат экстремальные ситуации, когда зимой рвутся теплотрассы (“терпели до последнего”), замерзает северный посёлок (вовремя не завезли достаточно топлива) и вынужденно совершаются совсем внеэкономические действия, такие

как “полцарства за коня” – вертолёт везут бочки солярки, бросают все силы на спасение людей.

Поскольку все процессы в историческом плане носят волновой характер (возникают, развиваются, затухают), можно рассчитывать также и на завершение периода либеральных ценностей и перехода к гуманистическим; это неизбежно как смена времён года. В связи с этим экономические критерии отойдут на дальний план, уступая первенство снижению всех видов давления и риска, в том числе экономического, на все сферы жизни человека.

Пока человечеству не даны иные источники энергии, энергетика преобразования тепла остаётся основной, и она не должна при масштабировании увеличивать общий риск жизни. Так что будущее ЯЭ за блоками малой и средней мощности – как энергией априорно более дорогой, но обладающей существенно меньшим интегральным риском. Поэтому проекты АС МСМ должны разрабатываться и обкатываться, чтобы быть готовыми “подхватить

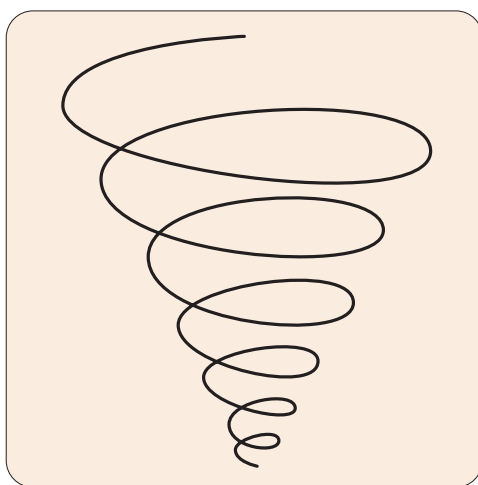


Рис. 1. Философская спираль развития

нагрузку”, когда ориентиры общества в очередной раз поменяются.

Волнообразность природных и социальных процессов и философско-спиральный ход их эволюции, когда на новом витке прежний азимут расположен на более высоком уровне (рис. 1), также подсказывает, что минувшая эпоха малых мощностей в энергетике, пройдя через мощностной разумно достижимый максимум, снова вернётся, но на гораздо более высоком уровне технологий и общественных ценностей. К этому надо готовиться, в том числе и технологически. За эпохой прагматизма должна наступить эпоха гуманизма, принципы которой сейчас подавлены.

Различные исследования показали, что (наряду с расчётными капитальными затратами) главные рычаги в формировании полной стоимости строительства АС – банковский процент и время строительства с учётом риска отклонений от плановых сроков. И в случае задержки вдвое (от 5–6 до 10–12 лет) полные затраты также удваиваются.

В этом отношении главные преимущества проектов АС малой и средней мощности состоят в том, что их финансируют относительно малыми порциями, и при сокращении запланированных потребностей площадки процесс сводится к сокращению числа блоков. (Например, Калининградская АС могла бы остановиться на возведении одного–двух блоков по 300 МВт, которые легко влились бы в существующую энергосистему, вместо полной потери двух фундаментов под тысячники.) Аналогично выглядит и ситуация с непредвиденными задержками строительства. Вся

суть преимуществ малых блоков перед большими состоит в априорно меньшем интегральном риске, включающем в себя упомянутые выше экономические категории, и особенно – ядерно-радиационную составляющую.

Повторимся, в работе<sup>1</sup> рассмотрено несколько вариантов обеспечения одинаковой мощности на площадке: сооружение гипотетических АС с двумя энергоблоками большой, восьмью средней и двадцати малой мощности, соответственно по 1200, 300 и 100 МВт, при увеличении срока строительства вдвое. Рассчитанные основные экономические показатели эффективности указанных вариантов – суммарный доход от реализации проектов и время окупаемости – показывают разницу и чувствительность к рассматриваемому риску, а не собственно срок окупаемости и доходность каждого варианта.

Особенность использованной расчётной модели – смещение акцента исследования с абсолютных значений на относительные отличия – теоретически идеализированная картина, демонстрирующая предельный случай.

В реальности ситуация будет совершенно иной: в отличие от расчётной модели, при наступлении риска затягивания строительства блок большой мощности не имеет альтернатив инвестиционному провалу, в то время как идущее чередой строительство средних или малых модулей может быть остановлено ранее, чем будут заложены все

<sup>1</sup> Алексеев П.Н., Удянский Ю.Н., Щепетина Т.Д. Влияние рисков задержки строительства на экономичность проектов АС различной мощности. ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 2022 г. Вып. 2. С. 131–138.

8 или 20 блоков. Тем самым отрицательный провал показателя доходности для них (замороженные средства) будет кратно ниже по сравнению с аналогичным показателем для большого блока.

В данном случае вариант с увеличением срока строительства вдвое – это идеализированный и сильно упрощённый сценарий, причём ухудшенный для блоков малой и средней мощности, поскольку маловероятно, чтобы на одной площадке возросли сроки строительства всех восьми, а тем более двадцати блоков.

### Теоретические основы прогнозирования атомной энергетики

Глобальный масштаб, приобретённый энергетикой во второй половине XX в., требует, по нашему мнению, выхода за узкие горизонты частных отраслевых гипотез её развития.

Поэтому в настоящей работе прогнозы ядерной энергетики предлагается строить на основе энтропийной версии универсальной модели очень больших систем<sup>2</sup>, появившейся благодаря исследованиям<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Доброчеев О.В. Информационная энтропия как инструмент анализа исторической динамики // Труды Международной конференции Российского национального комитета по истории и философии науки и техники. ИИЕТ РАН им. С.И. Вавилова, г. Москва, апрель 2022 г. С. 465–469.

<sup>3</sup> Батулин Ю.М. Формирование понятия “информационная энтропия” и ее применение в исторической науке. Доклад. Международная конференция Российского национального комитета по истории и философии науки и техники. РАН 28 марта – 1 апреля 2022 г. Москва ИИЕТ РАН. 1 апреля 2022 г. Батулин Ю.М. Становление информационной парадигмы (к 100-летию введения понятия “информация” в математику) // Материалы Второй международной научной конференции “История науки и науковедение: междисциплинарные исследования” 15 октября 2021 г. Баку, 2021. С. 9–19.

Впервые понятие очень больших систем для таких явлений, как эволюция видов, человеческое познание, экономика, – ввёл Пер Бак<sup>4</sup> в 1988 г. “Общее у этих вещей то, – писал он, – что они *очень большие* и имеют много степеней свободы. В скором времени они станут самостоятельными науками...”. Но первое развернутое описание такого класса явлений появилось в монографии МГУ лишь в 2019 г., 31 год спустя<sup>5</sup>. Оно возникло в результате более чем 30-летних экспериментальных и теоретических исследований феномена гидродинамической аналогии в поведении социальных, политических, биологических и техногенных систем, вслед за открытием этого феномена в 1962 г. А. Колмогоровым в поведении систем экономических<sup>6</sup>.

В приложении для техногенных систем гидродинамическая аналогия впервые была обнаружена в спектрах распределения мощностей электроэнергетики<sup>7</sup>.

Для дальнейшего тестирования энтропийной версии турбулентной модели в широком круге очень больших систем потребовалось обращение к её второму приближению (см. сноску 2). Оно описывает два механизма флуктуационного движения среды, совместное

<sup>4</sup> Пер Бак, Кан Чен. Самоорганизованная критичность // В мире науки. 1991. № 3.

<sup>5</sup> Доброчеев О.В. Механика очень больших систем природы жизни и разума. М.: ТЕИС, 2019. 144 с.

<sup>6</sup> Kolmogorov A.N. A refinement of previous hypotheses concerning the local structure of turbulence in a viscous incompressible fluid at a high Reynolds number // J. Fluid Mech. 1962. 13. P. 82–85.

<sup>7</sup> Доброчеев О.В., Соловьянов А.А. О подобию колебаний в энергетическом производстве и социально-экономических процессах // Энергетическая политика. 1995. № 1. С. 22–25.

действие которых формирует дискретную волновую структуру потока. Первый механизм связан с нарастанием энергии флуктуаций частиц потока в процессе их совместного (социального) движения согласно уравнению:

$$E \sim (1 - l/L)^2 (l/L \varepsilon)^{2/3}. \quad (1)$$

Второй описывает энергию флуктуаций в фазе распада потока ( $l/L > 0$ ) по уравнению Колмогорова:

$$E \sim (l \varepsilon)^{2/3} \text{ или } l^2/\tau^3 \sim \varepsilon, \quad (2)$$

где  $\tau$ ,  $l$  – период и линейный масштаб флуктуаций,  $\varepsilon$  – скорость диссипации энергии в системе,  $L$  – устойчивый размер макросистемы.

ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЖЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЕ СОГЛАСИЕ С ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬЮ ПРОДЕМОНСТРИРОВАЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЧИСЛЕННОСТИ НАСЕЛЕНИЯ, АБСОЛЮТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ВВП И ИХ ПРИРОСТ. АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ СО ВРЕМЕНЕМ ПАССИОНАРНОСТИ ЭТНОСА ГУМИЛЕВА И ДЕЛОВОЙ АКТИВНОСТИ Н. КОНДРАТЬЕВА ТОЖЕ ПОКАЗАЛ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ЕЁ ОПИСАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ МОДЕЛЬЮ.

Для завершённого описания флуктуационной динамики очень больших систем физической, социальной, экономической и техногенной природы уравнения (1) и (2) необходимо дополнить установленными в исследовании<sup>8</sup> периодами космических по своей природе когерентных волн, моделирующих их поведение:

$$T = 8.75; 11.6; 17.5; 35; 70; 140;$$

<sup>8</sup> Доброчеев О.В. Волновая модель истории // Институт истории естествознания и техники им. В. Вавилова. Годичная научная конференция. М.: ИИЕТ РАН, 2021. С. 637–642.

280; 560; 1120; 2240 лет,

а также их более высокочастотных гармоник и волн, находящихся с ними в отношении консонанса, которое описывается уравнением:

$$T_n/T_{n+1} = n/(n+1), \quad (3)$$

где  $n$  – целое число 1, 2 и т.д.

В результате этим приближением удалось описать амплитуды “разброса экспериментальных данных” в физико-химических и астрофизических измерениях С. Шноля и его коллег<sup>9</sup>.

При изучении же социально-экономической динамики удовлетворительное согласие с теоретической моделью продемонстрировали измерительные данные изменчивости численности населения, абсолютные значения ВВП и их прирост<sup>10</sup>.

Анализ изменчивости со временем пассионарности этноса Гумилева и деловой активности Н. Кондратьева тоже показал удовлетворитель-

ный характер её описания турбулентной моделью.

Таким образом, результаты тестирования второго приближения турбулентной модели информационной энтропии, имеющей физический смысл числа её характерных макросостояний, доступных для данной системы в тех или иных условиях, в тот или иной период времени,

<sup>9</sup> Шноль С. Э., Коломбет В.А. и др. О реализации дискретных состояний в ходе флуктуаций в макроскопических процессах // Успехи физических наук. 1998. Т. 168. № 10.

<sup>10</sup> Клепач А.Н., Доброчеев О.В. Физические начала макроэкономики // Философия хозяйства. 2020. № 2. С. 37–49.

позволяют рассматривать второе приближение одним из инструментов моделирования динамики техногенных систем.

Если далее рассматривать зависимость информационной энтропии от времени то, как показали исследования<sup>11</sup>, она может изменяться двояко. При линейном росте со временем размеров самоорганизующихся структур, по условию эргодичности Больцмана, согласно которому вариации состояния системы в пространстве эквиваленты вариациям во времени,  $I/L = t/T$  (и как следствие, уменьшению сложности системы), уравнение (1) преобразуется к форме:

$$E \sim (1 - t/T)^2 ((t/T) \varepsilon)^{2/3}, \quad (5.1)$$

согласно которой – энтропия вначале быстро нарастает, достигает некоего плато, а затем плавно уменьшается.

В противном случае увеличения структурной сложности системы в соответствии с уравнением  $I/L = 1 - t/T$  информационная энтропия медленно нарастает, а затем быстро уменьшается:

$$E \sim ((1 - t/T) \varepsilon)^{2/3} (t/T)^2. \quad (5.2)$$

В 1943 г. Э. Шредингер предложил называть последний физический феномен (то есть уменьшение энтропии вопреки второму началу термодинамики) негэнтропией. Такой волнообразный вид изменения энтропии со временем характерен для процессов жизни, начиная – с биологической и заканчивая социальной, экономической и энерго-технологической.

<sup>11</sup> Клепач А.Н., Доброчеев О.В. Ансамбль экономических волн или турбулентная гипотеза экономики // Философия хозяйства. 2015. № 6. С. 180–191.

На этом основании мы используем уравнения (1–5) второго приближения турбулентной модели информационной энтропии для моделирования поведения очень больших техногенных систем.

### Тестирование турбулентной модели на данных развития ТЭС России и основанные на этом первые прогнозные оценки

#### Тестирование модели на статистических данных строительства ТЭС России

Проведению расчётов предшествовал длительный сбор статистического материала о доступных на сегодня интернет-данных, по годам и мощностям ввода энергоблоков на территории России создана база данных. Наиболее полные данные найдены за послевоенный период на сайтах крупных ТЭС и ТЭЦ, а также энергогенерирующих компаний. Представить их перечень не представляется возможным в рамках статьи. В модели учтено более 250 тепловых и атомных электростанций разной мощности, включая бортовые АЭС ледоколов как АЭС малой мощности.

В силу широкого диапазона мощностей энергоисточников структурирование статистического материала по хронологическому вводу ТЭС и АЭС в XX–XXI вв. было осуществлено в логарифмической шкале координат, представленной в таблице.

Сетка интервалов мощностей

До 70 МВт	70–140 МВт	140–280 МВт	280–560 МВт	560–1120 МВт	1120–1400 МВт
-----------	------------	-------------	-------------	--------------	---------------

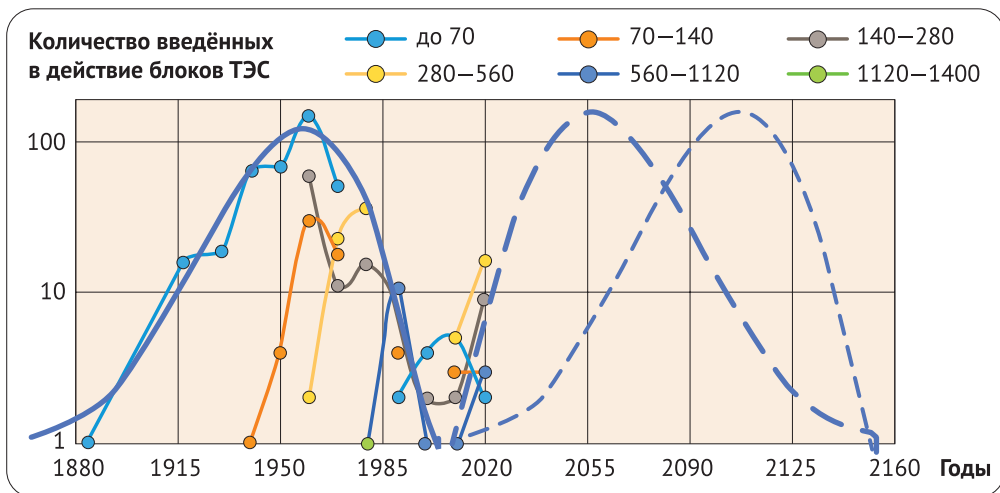


Рис. 2. Количество введенных в действие блоков ТЭС России разных мощностей по десятилетиям – точки. Расчёт динамики ввода новых блоков по модели информационной энтропии: сплошная линия – сопоставление со статистикой, штриховые – прогноз

На рис. 2 показаны графики численности блоков ТЭС, полученные таким образом средней расчётной по модели информационной энтропии и фактической (в виде численности блоков). Сопоставление сплошной линии расчётных данных с численностью введенных в строй блоков демонстрирует на этом рисунке точность описания теоретической моделью статистических данных, а штриховые линии показывают прогнозные оценки на будущее, исходя из двух вариантов изменения структурной сложности энергетики со временем.

Из этого теоретического анализа динамики развития энергетической отрасли следует несколько выводов:

1. Энергетика России развивается волнообразно – так же, как и всё мировое хозяйство, – с циклом в 140 лет<sup>12</sup>.

2. Спектр мощностей энергетики, которая начиналась в XIX в. с 70 МВт, со временем стал смещаться в сторону более высоких единичных мощностей, вплоть до максимума в 1200 МВт, с одновременным уменьшением их численности, в полном согласии с турбулентной моделью изменчивости информационной энтропии очень больших техногенных систем, начиная с её роста и заканчивая падением (негаэнтропией по Э. Шредингеру).

3. В переходный период экономики России 1990-х гг. наблюдался волнообразный локальный подъём строительства самых малых энергоисточников.

4. Ввод в действие в 2020-х гг. блоков ТЭС малой и средней мощности в диапазоне от 70 до 560 МВт в рамках использованной нами модели развития энергетики можно

<sup>12</sup> Батулин Ю.М., Доброчеев О.В. Периодическая таблица критических событий космонав-

тики // *Космонавтика XXI века* / Под ред. акад. Чертока Б.Е. М.: РТ офт., 2010. С. 675–689.

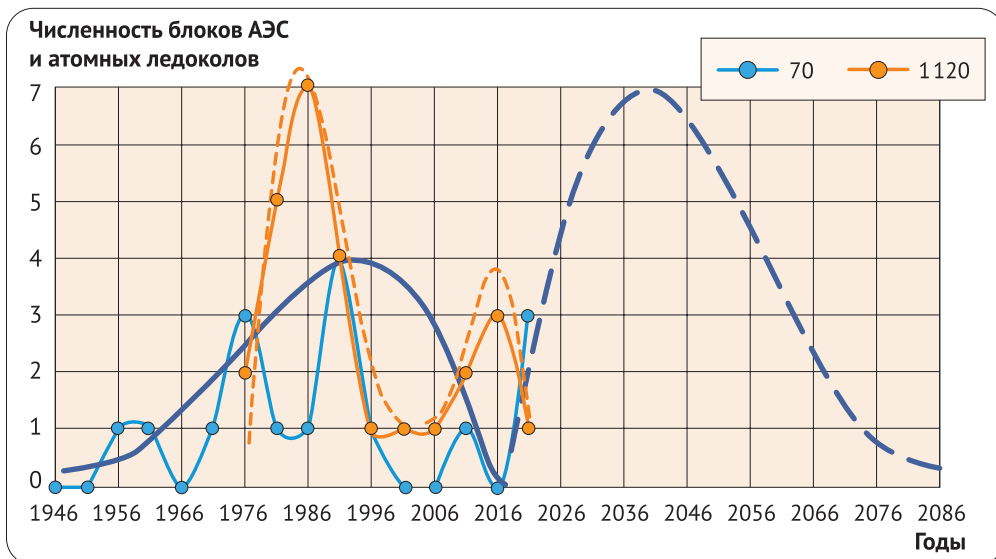


Рис. 3. Сравнение фактического прироста численности блоков АЭС и атомных ледоколов с расчётными данными по турбулентной модели (сплошные линии) и первые прогнозные оценки на будущее (штриховые линии)

рассматривать в качестве начала нового 140-летнего цикла энергетики России.

### Прогнозные оценки развития атомной энергетики в XXI в.

Аналогичным образом, собрав статистические данные по истории строительства блоков АЭС в России, мы сопоставили их с расчётными данными турбулентной модели информационной энтропии развития отрасли, как это показано на рис. 3. Для упрощения графика и наглядности представлены два мощностных интервала – до 70 Мвт и свыше 1000 МВт.

Полученные результаты говорят о следующем.

1. Атомная энергетика России в целом развивается в ритмах

$\frac{1}{2}$  гармоника волны глобальной энергетики с периодом в 70 лет.

2. Её маломощностный ряд в 70 МВт неустойчиво флуктуирует на частоте  $\frac{1}{4}$  гармоника 70-летней волны атомной энергетики.

3. В первом приближении сопоставление модели с фактическими данными позволяет предполагать, что в 2016 г. начался новый 70-летний цикл роста количества малых АЭС в России.

*Постскриптум.* Пока статья готовилась к выходу в свет, поступили информационные сообщения о росте заинтересованности в российских плавучих АЭС за рубежом. Кроме того, у Росатома появились планы строительства нескольких наземных блоков АЭСММ, в том числе в Узбекистане.