

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 504; 627.8.09

ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ И ГИДРОЭНЕРГЕТИКА КАК ЭФФЕКТИВНАЯ МЕРА АДАПТАЦИИ

Владимир Владимирович Тетельмин

Институт экологии РУДН им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия,
v-tetelmin@rambler.ru

Аннотация. Проведен анализ и приводится сводная таблица энергетических показателей глобального потепления, рассчитанных с использованием накопленных мировой наукой натуральных данных. Каждый киловатт-час производимой человечеством энергии нагревает нашу планету через парниковый эффект более чем на 20 кВт·ч. Показаны функции и результаты расчета глобального потепления при достижении углеродной нейтральности к 2050 г. и дальнейшем фиксированном значении концентрации парниковых газов на уровне 233 млн⁻¹ (ppm-eq). При этом сценарии глобальное потепление составит 4,2°C и будет продолжаться до 2220 г.

Дан прогноз важных для функционирования объектов гидротехнического строительства последствий глобального потепления: роста уровня Мирового океана и роста частоты экстремальных гидрометеорологических стихийных бедствий. Обоснован вывод, что наблюдаемое увеличение осадков и гидропотенциала планеты усиливает необходимость развития гидроэнергетики и гидротехнического строительства.

Ключевые слова: глобальное потепление, парниковые газы, тепловая энергия, гидроэнергетика, природные стихийные бедствия, уровень Мирового океана

Для цитирования: Тетельмин В. В. Глобальное потепление и гидроэнергетика как эффективная мера адаптации // Гидротехника. 2024. № 1. С.

ORIGINAL ARTICLE

GLOBAL WARMING AND HYDROPOWER AS AN EFFECTIVE ADAPTATION MEASURE

Vladimir V. Tetelmin

Institute of Ecology of the Patrice Lumumba Peoples' Friendship University, Moscow, Russia, v-tetelmin@rambler.ru

Abstract. The table summarises the energy indicators of global warming, calculated using field data accumulated by the world science. Each kilowatt hour of energy produced by mankind warms our planet through the greenhouse effect by more than 20 kWh. The functions and results of calculation of global warming at reaching carbon neutrality by 2050 and further fixed value of concentration of greenhouse gases at the level of 233 mln⁻¹ (ppm-eq). In this scenario, global warming would be 4.2°C and continue until 2220.

The forecast of development of consequences of global warming dangerous for hydraulic engineering objects is given: increase in the level of the World Ocean, increase in the frequency of natural disasters. The observed increase in precipitation and hydropotential of the planet reinforces the need for hydropower and hydraulic engineering development.

Keywords: global warming, greenhouse gases, thermal energy, hydropower, natural disasters, ocean levels

For citation: Tetelmin V. V. Global warming and hydropower as an effective adaptation measure // Hydrotechnika. 2024. № 1. Pp.

Введение

Президент РФ В. В. Путин своим Указом № 812 от 26.10.2023 г. утвердил Климатическую доктрину (КД) РФ, которая излагает систему взглядов на цели и механизмы реализации государственной политики по вопросам, связанным с глобальным изменением климата и его последствиями. В п. 5 и 8 КД выражается обеспокоенность беспрецедентно высокой скоростью глобального потепления и усиливающимся влиянием хозяйственной деятельности человека на климат.

Парижское соглашение к Рамочной конвенции ООН об изменении климата направлено на ограничение роста глобальной температуры максимальным значением 2°C, для чего предлагается к 2050 г. как минимум вдвое сократить выбросы парниковых газов (ПГ) и добиться углеродной нейтральности. В п. 17 КД отмечается, что принятие Парижского соглашения к Рамочной конвенции ООН по изменению климата стало большим шагом по смягчению негативных последствий изменения климата. Стратегическая цель соглашения заключается в удержании прироста глобальной средней температуры ниже 2°C, по сравнению с доиндустриальным периодом. Здесь же справедливо отмечается, что удержать рост средней глобальной температуры ниже 2°C, по сравнению с 1900 г., не удастся. Рассмотрим названные в КД проблемы применительно к гидротехническому строительству как отрасли, чувствительной к наблюдаемому глобальному изменению климата.

В XXI в. климатологи всего мира пришли к заключению, что изменение климата — это следствие выбросов антропогенных ПГ в атмосферу, расшатывающих климатическую систему (КС) Земли, основными составляющими которой являются Мировой океан, атмосфера, суша и биосфера. В дальнейшем изложении содержание основных ПГ в атмосфере (CO₂, CH₄, N₂O) приводится в единицах объемной концентрации (млн⁻¹), эквивалентных потенциалу глобального потепления диоксида углерода GWP на горизонте 100 лет (ppm-eq).

Гипертрофированная зависимость мировой энергетики от ископаемого топлива привела к накоплению в атмосфере массы антропогенных парниковых газов около 1,35 трлн т в CO₂-эквиваленте (в объемных единицах 182 млн⁻¹ в CO₂^{-экв.}, или 182 ppm-eq). Следствием антропогенных выбросов ПГ явилось накопление с 1900 г. Землей тепловой энергии в количестве около 180·10¹⁵ кВт·ч. За этот же период человечество произвело около 8,3·10¹⁵ кВт·ч всех видов энергии, то есть мощность парникового эффекта по нагреванию Земли в 22 раза больше мощности всех электрических и тепловых станций во всем мире. Энерго-климатическая цена использования человечеством энергии ископаемого топлива оказалась очень высокой. Главным аккумулятором накопленной тепловой энергии является Мировой океан — около 91%, на сушу приходится около 5%, на льды около 3%; на атмосферу около 1,0% энергии.

Многие авторы отмечают усиление «конвективных опасных явлений природы» [1] и увеличение частоты спровоцированных глобальным потеплением природных стихийных бедствий [2, 3]. Эти экстремальные события занимают основную долю среди страховых случаев, вызванных природными стихийными бедствиями [4, 5]. В оценочном докладе межправительственной группы экспертов по изменению климата ООН высказано предположение, что в будущем, по мере глобального потепления, наиболее сильные тропические циклоны будут увеличивать свою мощность, в то время как их общая частота будет уменьшаться [6].

Методы и материалы исследования

За последние полтора века глобальная температура увеличилась на 1,2°C. Такого темпа роста земной температуры не наблюдалось никогда. Последнее десятилетие оказалось самым жарким за всю историю метеонаблюдений. Климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое необратимое «широкомасштабное, быстрое и усиливающееся изменение климата» — это следствие роста антропогенных парниковых газов в атмосфере [6].

Таблица 1

Средние значения роста характеристик процесса глобального потепления и роста отмеченных страховыми компаниями природных стихийных бедствий

Table 1

Average values for the global warming process changes and the growth of natural disasters noted by insurance companies

Годы	Содержание выбросов ПГ в атмосфере, К ppm-eq	Рост содержания тепла в КС, ΔQ ₀ ·10 ¹⁵ кВт·ч/10 лет	Рост температуры атмосферы, ΔТ град/10 лет	Рост уровня Мирового океана, Δh мм/10 лет	Частота гидрометеорологических стихийных бедствий, N/год	Суммарная годовая магнитуда землетрясений M ≥ 4
1970–1980	77,5	13,3	0,165	20	170	48
1980–1990	101,4	19,8	0,175	20	267	72
1990–2000	121,0	24,6	0,175	20	365	96
2000–2010	141,4	31,0	0,175	30	463	120
2010–2020	168,6	38,3	0,175	40	561	144

В табл. 1 приводятся систематизированные натурные данные глобального потепления за последние 50 лет наблюдений за КС Земли и соответствующего роста частоты повторяемости природных стихийных бедствий [7, 8]. Следствием глобального потепления являются усиливающиеся экстремальные природные явления: метеорологические (тропические и внетропические циклоны, ураганы, смерчи, осадки, морозы, засухи); гидрологические (наводнения, сели, подтопления, абразия берегов, цунами); геофизические (землетрясения, горные удары, оползни, лавины, извержения вулканов, термокарст и термоэрозия в криолитозоне). Кроме того, долгосрочное глобальное потепление приводит к изменению уровня Мирового океана (табл. 1), изменению состояния почв и биосферы.

Средняя глобальная температура земной атмосферы начала активно подниматься в 1975 г. с темпом $0,175^{\circ}\text{C} / 10$ лет при интенсивности поглощения тепловой энергии климатической системой $Q_0 = 18 \cdot 10^{15}$ кВт·ч / 10 лет. Естественно предположить, что в дальнейшем наблюдаемый темп роста температуры будет сохраняться до тех пор, пока КС Земли будет нагреваться с интенсивностью $Q_0 \geq 18 \cdot 10^{15}$ кВт·ч / 10 лет.

Пространственная картина наблюдаемого глобального потепления неоднородная. На части территории земного шара, заключенной в пределах $32\text{--}42^{\circ}$ северной широты, температура потепления примерно совпадает со средним значением глобального потепления, в то время как поверхность южнее указанной широты нагревается медленнее, а севернее — намного быстрее. Наиболее интенсивное потепление наблюдается в арктическом поясе: на берегах Гренландии и на побережье России тренд потепления характеризуется величиной $0,8^{\circ}\text{C} / 10$ лет, на островах Баренцева и Карского морей — до $1,5^{\circ}\text{C} / 10$ лет [3,9].

Эмпирическая функция, описывающая зависимость получаемого Землей тепла от концентрации K антропогенных ПГ в пределах: $80 \text{ ppm-eq} \leq K \leq 260 \text{ ppm-eq}$, имеет следующий вид [10]:

$$Q_0 = 276 \cdot 10^{12} \cdot (K - 30) \text{ [кВт·ч/10 лет]}, \quad (1)$$

где K ppm-eq — среднее значение объемной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в расчетном 10-летнем периоде времени. В соответствии с (1) интенсивность поглощения планетой тепловой энергии в 2020 г. при $K = 182$ ppm-eq составляла $Q_0 = 42 \cdot 10^{15}$ кВт·ч / 10 лет. Этот получаемый Землей поток отраженной радиации расходуется на нагревание всех составляющих климатической системы: Мирового океана, атмосферы, суши и таяния льдов.

При современных параметрах орбиты Земли и значении солнечной постоянной 1368 Вт/м^2 , когда планета находится в комфортном для жизни состоянии межледникового периода, зависимость максимального глобального потепления T_{max} от содержания K выбросов антропогенных ПГ определяется следующей функцией [10]:

$$T_{\text{max}} = (20,9 \cdot 10^{-3} \cdot K - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K^2) \text{ градус}, \quad (2)$$

где T_{max} — вклад антропогенных ПГ в увеличение радиационно-равновесной температуры относительно средней температуры доиндустриального периода 288 K (15°C). Из функции (2) следует, что при содержании антропогенных

ПГ $K_{\text{НАС}} = 850 \text{ ppm-eq}$ наступит «парниковое насыщение» атмосферы, при котором обеспечивается максимально возможный вклад антропогенных ПГ в глобальное потепление $T_{\text{НАС}} = 8,9^{\circ}\text{C}$.

Результаты исследования

Из (2) следует, что температуру глобального потепления $+2^{\circ}\text{C}$ названную в Парижском соглашении одной из главных целей климатического регулирования, можно было удержать в долговременном плане при условии, если бы человечество обеспечило углеродную нейтральность в 1990 г., когда концентрация антропогенных ПГ в атмосфере составляла около 100 ppm-eq . В современных условиях наметать такую цель поздно. Накопленные в атмосфере антропогенные ПГ разогнали глобальное потепление и обеспечили большой потенциал парникового эффекта, который давно перешагнул наметаемые Парижским соглашением температурные пределы $+1,5^{\circ}\text{C}$ и $+2^{\circ}\text{C}$. К 2050 г. в условиях предполагаемого двойного снижения выбросов и достижения углеродной нейтральности концентрация антропогенных выбросов ПГ в атмосфере составит около $K = 233 \text{ ppm-eq}$, а средняя глобальная температура приземного слоя поднимется до $1,7^{\circ}\text{C}$. В соответствии с функцией (2) этому значению концентрации ПГ отвечает максимальная температура глобального потепления $T_{\text{max}} = 4,2^{\circ}\text{C}$.

На рис. 1 приводится график роста концентрации ПГ в атмосфере и графики соответствующего роста средней глобальной температуры и аккумулированной климатической системой Земли парниковой тепловой энергии. Согласованный рост концентрации антропогенных ПГ в атмосфере и основных показателей глобального потепления подтверждает его антропогенное происхождение.

Если человечеству чудесным образом удастся к 2050 г. обеспечить «углеродную нейтральность» своей хозяйственной деятельности при концентрации ПГ в атмосфере

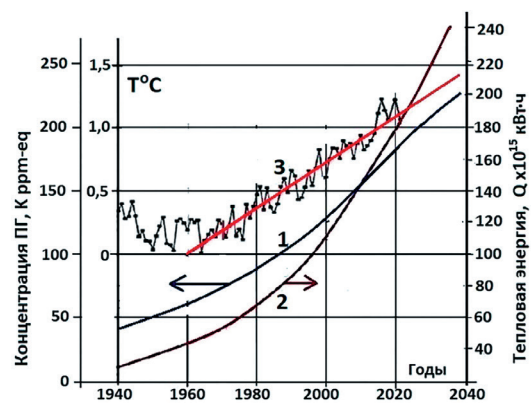


Рисунок 1

Графики согласованного роста: 1 — концентрации антропогенных ПГ в атмосфере; 2 — аккумулированной климатической системой Земли парниковой тепловой энергии; 3 — средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы

Figure 1
Consistent growth graphs: 1 — concentrations of anthropogenic GHGs in the atmosphere; 2 — greenhouse thermal energy accumulated by the Earth's climate system; 3 — average global temperature of the surface layer of the atmosphere

$K = 233$ ppm-eq, то от этого запущенный человеком процесс глобального потепления не остановится. К 2100 г. планета накопит $558 \cdot 10^{15}$ кВт·ч тепловой энергии, а средняя глобальная температура поднимется до $2,6^{\circ}\text{C}$. К состоянию радиационного баланса нагревающаяся Земля придет в 2220 г. при температуре глобального потепления $T_{\max} = 4,2^{\circ}\text{C}$. К тому времени планета аккумулирует около $780 \cdot 10^{15}$ кВт·ч парниковой тепловой энергии, рост которой будет сопровождаться усилением ряда экстремальных и опасных для цивилизации природных стихийных бедствий.

Спровоцированные потеплением природные стихийные бедствия [4, 5] по силе воздействия на экономику выходят на первое место: на тропические циклоны и приносимые ими осадки и наводнения приходится 32%, на землетрясения 12%, на засухи 10% природных катастроф. Только в период 2000–2010 гг. отмечено 1260 метеорологических, 1944 гидрологических, 349 геофизических и 283 климатических стихийных бедствий [11]. По оценке швейцарской страховой компании Swiss Re, при потеплении на 3°C падение мирового ВВП составит от 6,6 до 13%. С 1970 по 2019 гг. в мире произошло более 11 тыс. природных стихийных бедствий, от которых погибло более 2 млн человек. В России число опасных гидрометеорологических событий достигло 1000 ед./год, из которых 450 стихийных бедствий нанесли ущерб населению и экономике. В последнее время частота спровоцированных глобальным потеплением стихийных бедствий в России увеличивается примерно на 20 ед./год [3].

Глобальные финансовые институты в своей деятельности учитывают климатические риски, используя сценарный анализ и разрабатывают методы расчета детальных данных для количественной оценки этих рисков. Частота повторяемости отмеченных в мире страховыми компаниями природных стихийных бедствий (ПСБ) увеличивается по мере накопления в КС Земли тепловой энергии парниковых газов $Q_{\text{КС}}$. Анализ зависимости графиков частоты отмеченных ПСБ от накопленной планетой тепловой энергии $N = f(Q_{\text{КС}})$ показывает, что по мере глобального потепления и увеличения накопленной тепловой энергии ход графиков становится все более пологим и стремится к некоторому предельному значению. Эта функция достигает предельного значения при достижении тангенсом угла наклона касательной нулевого значения. Подобный энергетический подход к анализу роста частоты отмеченных до 2020 г. ПСБ позволяет дать прогноз ожидаемой частоты их повторяемости в будущем.

На рис. 2 представлен график роста частоты метеорологических стихийных бедствий для сценария достижения углеродной нейтральности в 2050 г. при концентрации антропогенных ПГ $K = 233$ ppm-eq. Из рисунка следует, что частота повторяемости катастрофических метеорологических бедствий (М-бедствий) достигнет к 2050 г. значения порядка 370 в год при накоплении в КС Земли около $330 \cdot 10^{15}$ кВт·ч тепловой энергии. Подобный графо-энергетический анализ выполнен также для прогноза частоты повторяемости других классов природных стихийных бедствий. В табл. 2 приводятся осредненные количественные характеристики частоты повторяемости отмеченных страховыми



Рисунок 2

График роста частоты спровоцированных глобальным потеплением метеорологических стихийных бедствий в зависимости от накопленной Землей тепловой энергии
Figure 2

Graph of the increase in the frequency of meteorological disasters triggered by global warming depending on the thermal energy accumulated by the Earth

компаниями природных стихийных бедствий [4, 5], а также их расчетные значения в 2050 г. [7].

Негативным последствием глобального потепления является также наблюдаемое увеличение сейсмической активности, проявляющееся в росте общего числа землетрясений, росте суммарной годовой магнитуды (энергии) землетрясений [12] и кумулятивного скалярного сейсмического момента [16]. Нетто-поглощение парниковой тепловой энергии формирует в толще континентальной литосферы нисходящий тепловой поток, который является встречным по отношению к восходящему геотермическому потоку, он снижает естественный геотермический градиент $0,03$ град/м, чем затрудняет разгрузку идущего из земных недр потока глубинного тепла.

Нагревание горных пород в условиях всестороннего сжатия формирует в толще земной коры большие термоупругие напряжения. Нагревание пород на 1°C создает в глубоких горизонтах напряжение до $2,8$ МПа [13]. Такие

Таблица 2

Рост средних значений отмеченных и расчетных экстремальных природных стихийных бедствий, спровоцированных глобальным потеплением
Table 2

Increase in average values of reported and estimated extreme natural disasters triggered by global warming

Процессы (число в год)	1980 г.	1995 г.	2015 г.	2050 г.
Частота геофизических бедствий				
(ГФ-бедствий)	26	42	54	65
Частота метеорологических бедствий				
(М-бедствий)	107	175	258	370
Частота гидрологических бедствий				
(Г-бедствий)	80	175	290	400
Частота климатических бедствий				
(К-бедствий)	26	48	79	100

напряжения способны вывести горный массив из состояния равновесия, оживить существующие разломы и сочленения тектонических плит и инициировать сейсмическое событие. По всей видимости, подобный механизм лежит в основе наблюдаемого усиления сейсмической активности и активизации магматических очагов на планете Земля.

Горные породы континентальной земной коры с 1900 г. приняли около 5,2% ($33,8 \cdot 10^{21}$ Дж) от общей полученной Землей парниковой тепловой энергии [6], из которой примерно $28 \cdot 10^{18}$ Дж (0,083%) было сброшено через землетрясения. Можно предположить, что нагревающиеся горные породы земной коры возвращают через энергию сейсмических волн не более 0,1% полученной извне парниковой тепловой энергии.

Человечество волнует проблема ускоряющегося роста таяния морского льда, а также таяния материковых льдов и роста уровня Мирового океана (МО), которые вызваны глобальным потеплением. На нагревание МО до глубины 2000 м расходуется 84%, на нагревание суши 5,2%, а на таяние льдов 2,7% накопленной Землей тепловой парниковой энергии [6]. Расчеты показывают, что при умеренном темпе декарбонизации к 2080 г. арктический морской лед в сентябре практически будет отсутствовать, что обеспечит круглогодичную навигацию по Северному морскому пути. Анализ зависимости изменения уровня МО от накопленной тепловой энергии позволил также получить функцию зависимости уровня h от изменяющегося во времени значения накопленной Землей парниковой тепловой энергии [10]: $h = (10^{-15} \cdot Q_{\text{КП}} + 62)$ мм.

Если человечеству удастся обеспечить углеродную нейтральность своей деятельности к 2050 г. при концентрации ПГ в атмосфере $K = 233$ ppm-eq, то к 2100 г. за счет глобального потепления уровень МО поднимется примерно на 700 мм (рис. 3). Подобная перспектива потребует строительства новых и возможного увеличения высоты действующих гидротехнических защитных сооружений во всем мире.

Частота экстремальных гидрологических событий (Г-бедствий) тесно коррелирует с частотой метеорологических бедствий (М-бедствий), потому что тропические и внетропические циклоны несут с собой большое количество осадков. При медленном темпе декарбонизации частота каждого из спровоцированных глобальным потеплением М-бедствий и Г-бедствий к 2100 г. может увеличиться до 520 в год, при этом будет наблюдаться увеличение разрушительной энергии отдельных экстремальных явлений. Именно такая тенденция наблюдается в настоящее время во всем мире [3].

Усиление гидрометеорологических событий ускоряет круговорот воды в природе, приводит к увеличению осадков, перераспределяет залегание грунтовых вод, изменяет гидрологический режим рек. С начала XXI в. в абсолютном выражении содержание водяного пара в атмосфере увеличилось на $1,3 \text{ кг/м}^2$ воздушного столба при среднем значении $28,5 \text{ кг/м}^2$ [14]. Согласно одной из сценарных расчетных моделей МГЭИК SSP3-7,0 [6], к концу XXI в. количество осадков над сушей может увеличиться, в сравнении с 1980 г., на 6%; согласно нашим расчетам, при умеренном темпе декарбонизации осадки над сушей увеличатся на 7%. При увеличивающейся по мере потепления интенсивности круговорота воды на Земле востребованность противопаводкового гидротехнического строительства будет возрастать, а гидроэнергетике как отрасли будет обеспечено надежное будущее.

В ст. 22 Климатической доктрины РФ говорится о необходимости предусмотреть меры по адаптации населения и экономики к неблагоприятным последствиям глобального изменения климата. Нами рассчитан один из наиболее жестких сценариев снижения до 2050 г. выбросов CO_2 на $9,7 \text{ Гт/год}$ за счет сокращения сжигания угля и на $7,5 \text{ Гт/год}$ за счет сокращения сжигания нефти. При таком сценарии мировое производство энергии снизится от современного уровня примерно на $64 \cdot 10^{12} \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$ (на 38%).

Все основные виды ВИЭ: солнечная, ветровая, гидравлическая и биоэнергетика — смогут суммарно производить к 2050 г. не более $40 \cdot 10^{12} \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$ [15]. Атомная энергетика к 2050 г. сможет добавить к этому не более $10 \cdot 10^{12} \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$. Таким образом, при рекомендуемом состоявшимся в Дубае саммитом COP-28 «быстром и глубоком» снижении выбросов ПГ ускоренно вводимые в эксплуатацию мощности ВИЭ не успеют в 2050 г. заместить выпадающее производство $64 \cdot 10^{12} \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$ глобальной энергии.

Как видим, заявленные Парижским соглашением цели не были подкреплены конкретными расчетами. Самые срочные действия мирового сообщества по снижению выбросов ПГ не помогут остановить рост средней глобальной температуры с темпом $0,175^\circ\text{C/год}$ на протяжении многих лет. При гипотетическом достижении углеродной нейтральности к 2050 г. при $K = 233 \text{ ppm-eq}$ мир будет идти по траектории повышения средней глобальной температуры до $2,6^\circ\text{C}$ к 2100 г. и дальнейшего повышения температуры до $4,2^\circ\text{C}$ к 2220 г., отчего будет снижаться пространство комфортного существования человечества.

Надежным способом борьбы человечества за безопасное существование на нагревающейся планете являются меры по адаптации жизненного пространства к изменению климата. Каждая страна должна определять на национальном уровне вклад в снижение мировых выбросов ПГ и разрабатывать собственную стратегию по адаптации

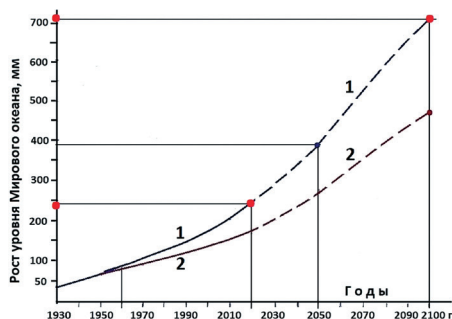


Рисунок 3
Графики наблюдаемого до 2020 г. и расчетного роста уровня Мирового океана: 1 — общий рост; 2 — рост за счет теплового расширения воды
Figure 3
Graphs of the observed and estimated growth of the World Ocean level until 2020: 1 – total growth; 2 – growth due to thermal expansion of water

к последствиям глобального изменения климата. Видение климатического будущего должно быть реалистичным, с учетом необходимости бесперебойного снабжения населения энергией, водой и продовольствием.

Рассмотренные последствия глобального потепления усиливают необходимость развития гидротехнического строительства. Развитие гидроэнергетики органически вписывается в климатическую повестку, т. к. практически исключает выбросы ПГ в атмосферу. Гидроэнергетика является оптимальной альтернативой «угольным проектам» и способна осуществить значительную часть обязательств России по декарбонизации экономики.

Для смягчения климатической проблемы состоявшийся в Дубае саммит COP-28 рекомендует снизить к 2050 г. выбросы CO₂ в топливной энергетике вдвое — на 17,2 Гт/год. В таком случае России с ее долей участия в глобальных выбросах около 4,6% придется снижать выбросы диоксида углерода до 23 млн т/год. Для обеспечения снижения такого количества выбросов придется ежегодно снижать использование угля и нефти на 3,5 млн т и 3,3 млн т, соответственно. В этом случае выпадающее производство энергии составит 63 млрд кВт·ч/год. Для замещения такого количества выпадающего производства энергии Россия может вводить в эксплуатацию 66 млн кВт мощности СЭС, или 36 млн кВт мощности ВЭС, или всего 16 млн кВт мощности ГЭС.

При соизмеримой с солнечными и ветровыми станциями стоимости капитальных затрат на единицу вводимой мощности ГЭС отличается более высоким значением коэффициента использования установленной мощности (КИУМ). В долгосрочном плане с учетом КИУМ замещать энергетику ископаемого топлива гидроэнергетикой в 2,5 раза более эффективно, по сравнению с ветроэнергетикой, и в 3,5 раза — по сравнению с солнечной энергетикой. С учетом более длительного жизненного цикла ГЭС указанные преимущества использования гидроэнергетики возрастают в несколько раз.

Следует учитывать, что не всякое строительство ГЭС отвечает критериям рационального природопользования. Важным показателем экологичности ГЭС является удельный показатель отчуждаемой площади, который может различаться на один-два порядка (м²/кВт): ГЭС «Три ущелья» — 46; Саяно-Шушенская — 92; Итайпу — 112; Братская — 1219; Самарская — 2800. Можно считать, что ГЭС с удельным показателем до 800 м²/кВт, безусловно, отвечают требованиям рационального природопользования.

В настоящее время установленная мощность мировых ГЭС составляет около 1,3 ТВт, которые вырабатывают около 4,5·10¹² кВт·ч/год электроэнергии, что составляет около половины гидропотенциала Земли. Годовой сток российских рек составляет примерно 4,3 тыс. км³, в дальнейшем, по мере глобального потепления, годовой сток сибирских рек будет увеличиваться. Гидропотенциал рек России составляет не менее 800 млрд кВт·ч/год, из которых используется не более 20%. Работающие в России 104 крупных ГЭС суммарной мощностью 52,3 ГВт и 1000 малых ГЭС с мощностью 0,15 ГВт вырабатывают до 180 млрд кВт·ч/год, в то

время как в Китае на ГЭС вырабатывается несопоставимо больше — более 1200 млрд кВт·ч/год электроэнергии.

При сегодняшней себестоимости одного «дизельного» кВт·ч на Чукотке и в Якутии от 30 до 100 руб. является рентабельным строительство малых ГЭС с плотинами высотой до 10 м, с оборудованием в контейнерном исполнении и автоматизированной системой управления работой гидроагрегатов.

Перед возобновляемой энергетикой встает задача по выравниванию выработки энергии на СЭС и ВЭС. По мере развития этих видов генерации следует вводить в эксплуатацию не менее 10% маневровой и выравнивающей мощности гидроаккумулирующих станций (ГАЭС).

Преимуществами развития гидроэнергетики и гидротехнического строительства в условиях глобального энергоперехода являются:

- высокая маневренность;
- отсутствие инвестиционных рисков при неизбежном глобальном потеплении и увеличении годового стока сибирских рек;
- способность работать как накопители гидравлической энергии: ГАЭС в паре с ВЭС и СЭС;
- заинтересованность потребителей в покупке «зеленой» энергии;
- способность снимать пики паводков и выравнивать водный баланс, что становится особенно актуальным при учащающихся ливневых осадках и наводнениях.

Широкое строительство ГЭС является наиболее эффективным способом достижения Россией «углеродной нейтральности» и осуществления «энергетического перехода», а также предотвращения ущерба от экстремальных паводков и половодий, интенсивность которых в условиях глобального потепления будет все более усиливаться. Российской энергетической отрасли следует приступить к реализации указания президента РФ В. В. Путина, который в своем обращении к Федеральному Собранию РФ еще в 2013 г. сказал: «Необходимо начать строительство крупных ГЭС прежде всего в Сибири и на Дальнем Востоке». К этому предложению президента РФ следует добавить, что с точки зрения климата Сибирь и Дальний Восток становятся одними из лучших в мире территорий для проживания.

Выводы

У населения Земли не должно оставаться сомнений в том, что основная причина переживаемого глобального климатического кризиса — это парниковый эффект, вызванный активной деятельностью человека. Климатическая доктрина РФ справедливо указывает на то, что антропогенные выбросы парниковых газов разгоняют глобальное потепление и что цели Парижского соглашения по климату не будут достигнуты ни по одной из заявленных целей: ни по достижению углеродной нейтральности к 2050 г., ни по удержанию прироста средней глобальной температуры ниже 2°C, по сравнению с доиндустриальным периодом.

Для долговременного удержания глобального потепления в пределах широко обсуждаемых 2°C человечество должно было обеспечить углеродную нейтральность в 1990

г., когда концентрация антропогенных ПГ в атмосфере составляла около 100 ppm-eq.

Заявленные Парижским соглашением цели не были подкреплены конкретными расчетами, были определены без учета технологических возможностей глобальной энергетической системы и потребностей мирового населения в энергии и продовольствии. В лучшем случае современный мир будет идти по траектории повышения средней глобальной температуры до 2,6°C к 2100 г., до 4,2°C к 2220 г., отчего будет снижаться пространство безопасного существования человечества.

По мере роста средней глобальной температуры в мире отмечается активизация спровоцированных глобальным потеплением гидрометеорологических, геофизических и климатических стихийных бедствий. К 2050 г. суммарная частота проявления природных стихийных бедствий может достигнуть 930 в год, из которых на гидрометеорологические бедствия будет приходиться около 770 в год. Расчетный уровень Мирового океана к 2050 г. поднимется примерно на 400 мм, а к 2100 г. на 700 мм.

Декарбонизацию мировой экономики, как чрезвычайно затратный процесс, следует осуществлять в оптимальных для каждой страны темпах и объемах. Снижение выбросов парниковых газов не должно проводиться «везде, всегда и любой ценой». Реальное достижение углеродной нейтральности в сфере энергетики, транспорта и промышленности без заметного снижения уровня жизни населения может быть обеспечено не ранее 2100 г.

Постепенное снижение выбросов ПГ и переход на возобновляемую энергетику, безусловно, нужны, однако в обозримом будущем эти меры не остановят наблюдаемого темпа роста глобальной температуры. Декарбонизация способна обеспечить лишь отдаленные позитивные климатические последствия, поэтому приоритетными в борьбе за безопасное существование человеческой цивилизации на нагревающейся Земле должны стать меры по адаптации населения, экономики и жизненного пространства к глобальному изменению климата.

Гидроэнергетика является наиболее чистым способом получения финальной энергии и обладает неоспоримым преимуществом относительно других видов возобновляемых источников энергии. С учетом коэффициента использования установленной мощности и срока службы ГЭС замещать энергетику ископаемого топлива гидроэнергетикой намного более эффективно, по сравнению с ветроэнергетикой и солнечной энергетикой.

В современной России наиболее эффективным способом достижения углеродной нейтральности, осуществления «энергетического перехода», а также предотвращения ущерба от усиливающихся паводков и половодий является широкое строительство ГЭС. При увеличивающейся по мере потепления интенсивности круговорота воды на Земле и глобальном увеличении осадков востребованность противопаводкового гидротехнического строительства будет возрастать, а гидроэнергетике как отрасли обеспечено надежное будущее.

Список источников

1. Чернокульский А. В., Елисеев А. В. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России // Метеорология и гидрология. № 5. 2022. С. 27–41.
2. Голицын Г. С., Васильев А. А. Изменение климата и его влияние на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 9–13.
3. Мохов И. И. Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14.
4. Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю. и др. Глобальная климатическая угроза и экономика России в поисках особого пути. М.: Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО, 2020. 69 с.
5. The heat is insurability and Resilience in a Changing Climate Emerging Risk Initiative-Position Paper / Group Chief Risk Officer (CRO). January 2019. 28. Laboratoire d'Etudes en Geophysique et Oceanographie Spatiales (LEGOS); data from AVISO altimetry (<https://www.aviso.altimetry.fr>).
6. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
7. Тетельмин В. В. Количественная оценка глобального потепления // Горная промышленность. 2023. № 3. С. 64–70.
8. Тетельмин В. В. Расчет темпа глобального потепления и роста уровня Мирового океана // Экология промышленного производства. 2023. № 2. С. 32–38.
9. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории России. Общее резюме. СПб.: Росгидромет. Научно-технические технологии, 2022. 144 с.
10. Тетельмин В. В. Энергетический анализ особенностей глобального потепления и его последствий // Вестник РАН. 2023. № 3. Т. 23. С. 91–99.
11. Бондур В. Г. Что болит у Земли // В мире науки. 2022. № 1/2. С. 5–12.
12. Черноглазова Т. Временные закономерности глобальной сейсмичности Земли // Chaos and Correlation. 2010, March 18. 2010. По данным базы <http://chaosandcorrelation.org/AS/HDFMDAY.rar>.
13. Тетельмин В. В. Не учитываемые при проектировании геодинамические процессы в основаниях высоких плотин // Гидротехника. 2023. № 1. С. 10–16.

14. Френсис Д. Паровые бури // В мире науки. 2022. № 1/2. С. 5–12.
 15. Тетельмин В. В. Пределы роста мировой альтернативной энергетики // Гидротехника. 2019. № 1. С. 60–65.
 16. Лобковский Л. И., Баранов А. А., Владимирова И. С., Алексеев Д. А. Сильнейшие землетрясения и деформационные волны как возможные триггеры потепления климата в Арктике // Вестник РАН. 2023. Том 93. № 6. С. 526–538.

Reference

- Chernokulsky A. V., Eliseev A. V. Opasnie atmosfernie yavleniya kovektivnogo charaktera v Rossii // Meteorologia I gidrologiya. 2022. № 5. Pp. 27-41.
 Golizin G. S., Vasilev A. A. Izmenenie climate I ego vlianie nf chastotu extremalmich yavleni // Meteorologia I gidrologiya. 2019. № 11. Pp. 9-13.
 Mochov I. I. Izmenenie climate: prichini, riski, posledstvia, problem adaptazii // Vestnik RAN. 2022. T. 92. № 1. Pp. 3-14.
 4. Mitrova N., Chochlov A. Melnikov Y. Globalnaua climaticheskaya ugroza I ekonomika Rossii. M.: Zentr energetiki SKOLKOVO, 2020. 69 p.
 5. The heat is insurability and Resilience in a Changing Climate Emerging Risk Initiative-Position Paper / Group Chief Risk Officer (CRO). January 2019. 28. Laboratoire d'Etudes en Geophysique et Oceanographie Spatiales (LEGOS); data from AVISO altimetry (<https://www.aviso.altimetry.fr>).
 6. IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
 7. Tetelmin V. V. Kolichestvennaua ozenka globalnogo poteplenia // Gornaya promischlennost. 2023. № 3. Pp. 64-70.
 8. Tetelmin V. V. Raschet tempa globalnogo poteplenia I rosta urovnya Mirovogo okeana // Ecologia promischlennogo proizvodstva. 2023. №2. Pp. 32-38.
 9. Tretii ozenochii doklad o izmenenii climate I ich posledstviyach. Obchee rezume. SPtb.: Rosgidromet. Naukoemkie technologii. 2022. 144 p.
 10. Tetelmin V. V. Energeticheskii analiz osobennostei globalnogo poteplenia I ego posledstviu // Vestnik RAEN. 2023. № 3. T. 23. Pp. 91-99.
 11. Chto bolit u Zemli // V mire nauki. 2022. № 1/2. Pp. 5-12.
 12. Chernoglazova T. Vremennie zakonomernosti globalnoi seismichnosti Zemli. Chaos and Correlation. March 18. 2010. <http://chaosandcorrelation.org/AS/HDFMDAY.rar>.
 13. Tetelmin V. V. Ne uchitavaemie pri proektirovanii geodinamicheskie prozessi // Gidrotechnika. 2023. № 1. Pp. 10-16.
 14. Frensis D. Parovie buri // V mire nauki. 2022. № 1/2. Pp. 5-12.
 15. Tetelmin V. V. Predeli rosta mirovoi alternativnoi energetiki // Gidrotechnika. №1. 2019. Pp. 60-65.
 16. Lobkovski L.I., Baranov A.A., Vladimirova I.S., Alekseev D.A. Silneischie zemletryaseniya i deformazionnie volni kak vozmoschnie triggeri potepleniya climate v Arctike//Vestnik RAN. 2023. T. 93. №6. P. 526–538.

Информация об авторе

Владимир Владимирович Тетельмин — д. т. н., главный специалист Института экологии РУДН им. Патриса Лумумбы, член общественного совета при Минэнерго РФ

Information about the author

Vladimir V. Tetelmin — Doctor of Sciences in Technical Sciences, Chief Specialist of the Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of the Russian Federation, Institute of Ecology; member of the Public Council under the Ministry of Energy of the Russian Federation

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 11.01.2024; одобрена после рецензирования 25.02.2024; принята к публикации 1.03.2024.

Article info

The article was submitted 11.01.2024; approved after reviewing 25.02.2024; accepted for publication 1.03.2024.