

ББК 65.8

Присняков В.Ф., Присняков К.В.

Институт геотехнической механики НАН Украины

МОДЕЛЬ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

Аналізується стан потепління Землі, пропонується механізм нестійкості системи «Земля – атмосфера» до впливу викидів вуглекислого газу. Пропонуються найпростіші моделі, на підставі яких в площині робочих параметрів знаходиться область стійкості. Аналізуються можливі напрямки боротьби з потеплінням Землі. Обґрунтовується реальність охолодження Землі космічними засобами.

Анализируется состояние потепления Земли, предлагается механизм неустойчивости системы “Земля – атмосфера” к воздействию выбросов углекислого газа. Предлагаются модели, на основании которых находится область устойчивости. Анализируются возможные направления борьбы с потеплением Земли. Обосновывается реальность охлаждения Земли космическими средствами.

We analyze the state of warming of the Earth and propose a mechanism of the instability of the “Earth-atmosphere” system to the action of carbon dioxide emission. We propose models that make it possible to find the domain of stability. Different directions of the struggle against warming of the Earth, are analyzed, and the reality of cooling of the Earth by space means is grounded.

A – антропогенное энергетическое воздействие на атмосферу; $A = 27,8 \cdot 10^9$ кВт;

E – темп поступления энергии из ядра Земли;

f – константа скорости разветвления цепи;

j – плотность тока пара с поверхности испарения, в воздухе;

m, m_{CO_2}, m_w – масса атмосферы (равная $5,15 \cdot 10^{18}$ кг), углекислого газа, водяных паров;

m_{ngh} – масса непарниковых газов в атмосфере;

m'_w и m'_w – темп испарения воды, соответствующий максимуму излучения и текущий ($m'_w = 1,65 \cdot 10^{10}$ кг/сек);

m'_{CO_2} – секундный приход углекислого газа;

p_{ngh} и p_{gh} – парциальные давления непарниковых и парниковых газов;

p_{H_2O} – парциальное давление водяных паров;

Q – приход лучистой энергии от Солнца ($Q = 10,5 \cdot 10^9$ Дж/м²год);

dQ/dt – величина тепловых потоков от нагретой поверхности Земли, поглощаемых парниковыми газами, равная $S_m q$;

Q_s – темп поглощения солнечной энергии системой “атмосфера- поверхность Земли”;

S – мидель Земли;

S_m – площадь поверхности длинноволнового излучения Земли;

S_w – площадь водных бассейнов и увлажненных поверхностей;

T_a – средняя по объему температура;

T_{av} – средняя температура атмосферы;

T_t – приповерхностная температура;

V – объем атмосферы, $V = 7,65 \cdot 10^9$ км³;

β – коэффициент массоотдачи;

ε_{cm} – степень черноты поверхности Земли; (при оледенении учитывает сезонное изменение отражательной способности);

ζ – коэффициент отражения солнечной радиации от внешней поверхности атмосферы;

τ_w – запаздывание в поступлении водяных паров в атмосферу;

τ_α – период изменения наклона оси Земли в прецессии, нутации или при изменении эксцентриситета.

Индекс:

$()_0$ – фиксированные параметры в окрестности разложения функции в ряд Тейлора.

Система “Земля – атмосфера” как динамическая система

Обычно рассматриваются модели парникового эффекта в общем квазистатическом подходе,

который позволяет компьютерным моделированием рассчитать тренды изменения Земного температурного режима. Но система “Земля – атмосфера” – динамическая система, которая требует рассмотрения уравнений динамики с последую-

шим исследованием ее на устойчивость. Поэтому мы рассмотрим усредненную для всей Земли модель с учетом запаздывающих эффектов. Особенностью тепломассообменных процессов в атмосфере Земли как в газовом объеме, ограниченного с одной стороны поверхностью, большая часть которой находится на линии насыщения, есть то, что ее температура вследствие постоянного испарения воды зависит только от давления. Кроме того, интенсивность испарения носит периодический характер вследствие смены дня и ночи. На такую закономерность накладывается испарение от конвекции воздуха, обтекающего водные или мокрые участки. В нестационарных условиях меняется во времени как давление в атмосфере, так и температура поверхности T_p , а значит и приход испарившейся воды в атмосферу m'_w . Известно, что в атмосфере в нормальных условиях содержится $m_{w0} = (1,3...1,5) \cdot 10^{16}$ кг водяных паров, за год испаряется $m'_w = 5,2 \cdot 10^{17}$ кг/год воды, т.е. в среднем секундный приход водяных паров в атмосферу равняется $m'_w = 1,65 \cdot 10^{10}$ кг/с. Отсюда следует, что среднеинтегральное время пребывания в атмосфере определенного количества воды от момента испарения до конденсации (с выделением скрытой теплоты испарения) или время чистого запаздывания равняется $\tau_{pp} = 8,5 \cdot 10^5$ с ≈ 240 ч = 10 суток.

В действительности реализация такой идеальной картины маловероятна. Кроме того, на процесс конденсации водяных паров и выпадение осадков накладываются такие физические процессы как прогрев атмосферы с постоянной времени 2 месяца, перемешивание и образование собственно центров конденсации по достижении относительной влажностью критического значения. Темп процесса конденсации определенного количества воды происходит значительно быстрее, чем накопление водяных паров за счет испарения. Процесс выпадения дождя или снега растянут во времени. Очевидно, что ключевым моментом этого процесса является испарение воды с поверхности морей и океанов, с влажных участков суши, подъем их в атмосферу, перемешивание и конденсация водяных паров с последующим выпадением в виде дождя или снега и с одновременным выделением скрытой теплоты фазового перехода. Это выделение теплоты в

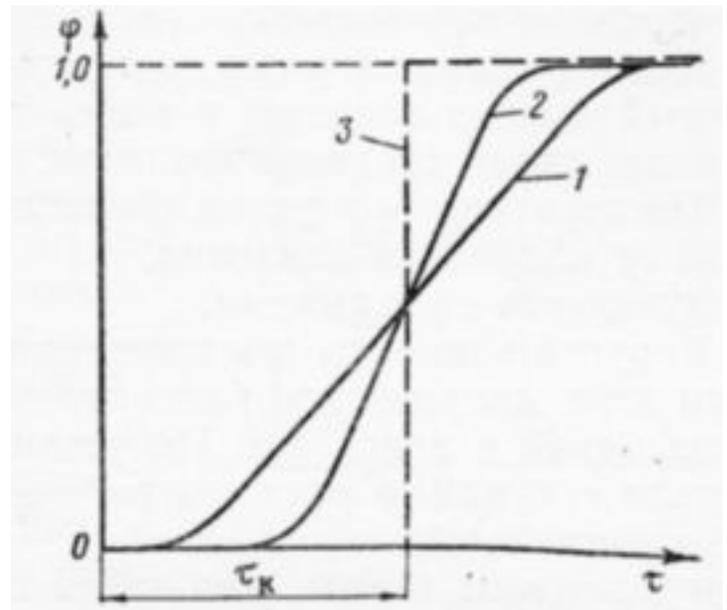


Рис. 1. Схематическое представление кривой образования конденсата воды (кривой конденсации паров в атмосфере): 1 — плохо перемешанные водяные пары, 2 — хорошо перемешанные водяные пары, 3 — ступенчатая линия скачкообразного процесса образования дождя или снега как представление кривой конденсации паров воды чистым временным запаздыванием.

свою очередь вызывает дополнительное испарение воды. При описании нестационарных процессов с подобными явлениями реальная зависимость доли испарившейся воды в атмосфере в период ее накопления до выпадения осадков заменяется скачкообразным процессом, в котором каждая порция поступивших в атмосферу паров не конденсируется сразу, не переходит в жидкую или твердую (снег) фазу в течение времени τ_k , а мгновенно превращается в конденсат через некоторое время запаздывания τ_k (см. рис. 1). Действительные кривые конденсации $\phi(\tau_k)$ (на рис. 1 кривые 1 и 2) характеризуются сложным и постепенным процессом конденсации, закономерность которого трудно описать аналитически с учетом всех деталей физических процессов, протекающих в атмосфере. От момента испарения воды происходит сложный процесс турбулентного перемешивания и прогрева воздуха атмосферы.

С помощью указанной приближенной замены неразрешимая задача описания процесса конденсации паров воды в атмосфере через количе-

ственные характеристики его промежуточных этапов намного упрощается, поскольку единственной величиной, которая необходима для описания процесса во времени будет только время τ_k от момента испарения воды до мгновенного превращения паров в жидкую или твердую фазу. Это время будем называть временем преобразования или временем запаздывания конденсации паров воды. Очевидно, что трудности описания кривой образования конденсата воды переносятся в задачу определения времени фк. Время прогрева атмосферы равно $\tau_h = 5,2 \cdot 10^6$ с. Оценка времени перемешивания в представлении времени пребывания паровой фазы в атмосфере Земли как емкости дает величину $\sim 10^4$ с. Поэтому, если рассматривать наиболее неблагоприятный случай, то мы приходим к $\tau_k = 6,1 \cdot 10^6$ с. Это оценка этой величины из общих соображений. Таким образом, наличие времени преобразования означает, что процессы фазовых превращений с выделением скрытой теплоты парообразования в атмосфере запаздывают по сравнению с процессами испарения. Так, при изменении темпа испарения вследствие возросшего количества паров воды и соответственно выделение скрытой теплоты испарения во время конденсации паров принимает значение, соответствующее измененному приходу паров в атмосферу не сразу, а по истечении времени τ_k . Поэтому секундный расход пара в конденсат при образовании туч и выпадении осадков в момент времени τ будет равен

$$m'_k(\tau) = m'_w(\tau - \tau_k).$$

При этих предположениях рассмотрим механизм неустойчивости течения парникового эффекта в атмосфере к возмущениям, вызванным антропогенной деятельностью с выбросом углекислого газа. Мы будем рассматривать колебания параметров системы “атмосфера – поверхность Земли”, связанные с тепловыми процессами нестационарного поглощения длинноволнового излучения Земли и с выделением скрытой теплоты фазового перехода при выпадении осадков на Землю. В этом случае изменение давления в атмосфере влияет на время запаздывания конденсации (и может считаться величиной второго по-

рядка малости). Рассматривая эту систему как автоколебательный контур, выделим в нем колебательное звено, источник энергии и обратную связь, обеспечивающую подпитку энергией колебательного звена. Как известно, обратная связь дает колебательной системе энергию в нужной фазе, обеспечивая компенсацию неизбежных потерь энергии колебаний. Энергия раскочки системы выделяется в процессе конденсации паров воды и за счет поглощения части длинноволнового излучения парами воды, углекислым газом и другими многоатомными молекулами. Обратная связь, управляющая потоком энергии, осуществляется через время запаздывания. Это имеет место в силу зависимости количества поступающих в атмосферу водяных паров от температуры поверхности Земли (в свою очередь определяемой указанным поглощением и конденсацией (косвенно)), и с другой стороны, в силу уменьшения величины парциального давления водяных паров после выпадения осадков. Таким образом, наличие запаздывания конденсации паров воды и их выпадение на землю из атмосферы, приводит к появлению положительной обратной связи между изменением парциального давления паров воды и нагревом атмосферы. Если рассматривать всю атмосферу в сосредоточенном виде (т. е. имеющую одинаковые параметры по всему объему), то процесс повышения ее температуры и сопутствующие как следствия природные катаклизмы имеют чисто нестационарный характер и должны описываться общим уравнениями динамики атмосферы в обычных производных. Такое уравнение дает возможность находить изменение ее температуры во времени в зависимости от антропогенного загрязнения CO_2 , величина которого характеризуется массовыми секундными выбросами m'_{CO_2} или парциальным давлением p_{CO_2} равным

$$p_{CO_2} = m_{CO_2} R_{CO_2} T_a / V. \quad (1)$$

В начальный момент масса углекислого газа в атмосфере равняется $m_{CO_2} = 2,6 \cdot 10^{15}$ кг, (отметим различные ее значения согласно разным источникам: $m_{CO_2} = 2,6 \cdot 10^{15} \dots 5 \cdot 10^{13}$ кг и даже $2,4 \cdot 10^{17}$ кг или $2,6 \cdot 10^{13}$ кг – естественно, это не влияет на механизм парникового эффекта, от этой величины

могут зависеть только расчетные границы устойчивости).

Еще большее, чем в атмосфере, количество CO_2 (98%) содержится в водоемах, где масса этого газа достигает $130 \cdot 10^{15}$ кг и он служит главным источником (на экваторе) и резервуаром – поглотителем атмосферного CO_2 . Массовый приход CO_2 по разным источникам равняется $m'_{\text{CO}_2} = 3,9 \cdot 10^{15} \dots 2,6 \cdot 10^{13}$ кг/год. По данным [6] в 2000 году эта величина равна $6,5 \cdot 10^{12}$ кг/год = $2,06 \cdot 10^5$ кг/сек (отметим, что некоторые авторы ее принимают равной $2 \dots 2,3 \cdot 10^{14}$ кг/год = $1,24 \cdot 10^8$ кг/сек или $(6,4 \dots 7,4) \cdot 10^6$ кг/с – мы приводим все эти данные, чтобы читатель обратил внимание на необходимость их обоснования). В литературе также указывается, что в среднем в последние годы парциальное давление углекислого газа растет 2 ppm/год. В 2004 г. его изменение составляло 2,6 ppm/год. Не исключено, что эти изменения вызваны вариациями его выделения из океана. Аналогично парциальное давление водяных паров

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = m_w R_{\text{H}_2\text{O}} T_a / V_a, \quad (2)$$

где в начальный момент $m_{w0} = (1,3 \dots 1,5) \cdot 10^{16}$ кг.

Уравнение динамики атмосферы будет определяться не только поступлением углекислого газа, но и поступлением паров воды, приход которых превышает равновесное из-за дополнительного испарения вследствие возрастающего поглощения длинноволнового излучения ее парами и CO_2 .

Запишем уравнение баланса массы атмосферы Земли

$$dm/d\tau = m'_w(\tau) + m'_{\text{CO}_2}(\tau) - m'_k(\tau) = m'_w(\tau) + m'_{\text{CO}_2}(\tau) - m'_w(\tau - \tau_k), \quad (3)$$

где масса атмосферы $m = m_{\text{ngH}} + m_w + m_{\text{CO}_2} = 4,5 \cdot 10^{18}$ кг; масса углекислого газа m_{CO_2} принимается равной $2,6 \cdot 10^{15}$ кг, масса паров воды в атмосфере при обычных условиях $m_w = (1,3 \dots 1,5) \cdot 10^{16}$ кг, во влажном воздухе содержится водяного пара у земной поверхности от 3...4% в тропиках до $2 \cdot 10^{-5}\%$ в Антарктиде; секундный приход водяных паров в атмосферу будем принимать равным $m'_w = 1,65 \cdot 10^{10}$ кг/с, секундный приход углекислого газа – $m'_{\text{CO}_2} = 1,24 \cdot 10^8$ кг/с.

Величина массовой скорости испарения воды с поверхности Земли (приход пара в атмосферу) равняется [3]

$$m'_w = S_w j = S_w j_0 (p_s - p_{\text{H}_2\text{O}}) / p = \chi (p_s - p_{\text{H}_2\text{O}}). \quad (4)$$

Здесь $\chi = S_w j_0 / p = S_w \beta$ – коэффициент, связанный с молекулярным весом, удельным объемом, молекулярной теплотой испарения, давлением насыщенных паров воды и температурой, при которой происходит испарение, находится по некоторой реперной точке, например, при давлении $p = 10^5$ Па на стационарном режиме (для воды при 15°C $\chi = \sim 9,17 \cdot 10^6$ м·с), плотность потока пара с поверхности испарения $j = 1,3 \cdot 10^{-4}$ кг/м²·с), в воздухе при 20°C $j \sim 0,0002$ кг/м²·с [3], плотность потока пара с поверхности в случае свободного испарения (в вакуум), для воды $j_0 = 0,1013$ кг/м²·с.

Масса атмосферы в виде смеси различных газов связана с другими ее параметрами усредненным уравнением состояния

$$m = pV / R_a T_a, \quad (5)$$

где давление в атмосфере равняется

$$p = p_{\text{ngH}} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}_2} = p_{\text{ngH}} + p_{gh}. \quad (6)$$

Парциальное давление парниковых газов

$$p_{gh} = p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}_2}.$$

Так как парциальное давление непарниковых газов $p_{\text{ngH}} = \text{const}$, то производная $dm/d\tau$ находится следующим образом

$$dm/d\tau = [V / R_a T_a] \{ dp_{\text{H}_2\text{O}} / d\tau + dp_{\text{CO}_2} / d\tau \} - pV / (R_a T_a)^2 d(R_a T_a) / d\tau \quad (7)$$

Производная $d(R_a T_a) / d\tau$ может быть преобразована следующим образом:

$$d(R_a T_a) / d\tau = [\partial(R_a T_a) / \partial p_{gh}] dp_{gh} / d\tau.$$

Отсюда получаем с учетом (3) и (7)

$$\{ V / R_a T_a - pV / (R_a T_a)^2 [\partial(R_a T_a) / \partial p_{gh}] \} dp_{gh} / d\tau = = \chi (p_s - p_{\text{H}_2\text{O}}) + m'_{\text{CO}_2}(\tau) - \chi \{ p_s(\tau - \tau_k) - p_{\text{H}_2\text{O}}(\tau - \tau_k) \}. \quad (8)$$

Рассмотрим модель первого приближения, когда за время запаздывания конденсации давление углекислого газа меняется значительно слабее, т.е. при $dp_{H_2O}/d\tau \gg dp_{CO_2}/d\tau$ и $[\partial(R_a T_a)/\partial p_{gh}]d_{pgh}/d\tau = [\partial(R_a T_a)/\partial p_{H_2O}] dp_{H_2O}/d\tau$. Тогда уравнение динамики атмосферы запишется в таком виде

$$[V/R_a T_a] - pV/(R_a T_a)^2 [\partial(R_a T_a)/\partial p_{H_2O}] dp_{H_2O}/d\tau = \chi(p_s - p_{H_2O}) + m'_{CO_2}(\tau) - \chi\{p_s - p_{H_2O}(\tau - \tau_k)\}. \quad (9)$$

В качестве нормирующих величин для парциального давления паров воды и темпа испарения введем значение давления в атмосфере в некоторый стационарный начальный период p и испарения $m'_w{}^0 = \chi(p_s^0 - p_{H_2O}^0)$. Умножим все части (9) на дробь $p/m'_w{}^0$:

$$pV/(m'_w{}^0 R_a T_a) \{1 - p/(R_a T_a) [\partial(R_a T_a)/\partial p_{H_2O}]\} dp_{H_2O}/d\tau = (p/m'_w{}^0) \chi(p_s - p_{H_2O}) + pm'_{CO_2}(\tau)/m'_w{}^0 - (p/m'_w{}^0) \chi\{p_s(\tau - \tau_k) - p_{H_2O}(\tau - \tau_k)\}. \quad (10)$$

Введем обозначения: $\bar{p}_{H_2O} = p_{H_2O}/p$, $\theta = pV/m'_w R_a T_a$ — постоянная времени атмосферы по водяному пару (равная $5,5 \cdot 10^8$ с), $K = 1 - p/(R_a T_a) [\partial(R_a T_a)/\partial p_{H_2O}]$ — коэффициент теплового усиления парникового эффекта по водяному пару. $\Delta\bar{p}_0 = (p_s^0 - p_{H_2O}^0)/p$ — относительная разность между давлением насыщенных паров при температуре поверхности испарения p_s^0 и парциальным давлением паров воды p_{H_2O} , в начальный момент при 15°C ($\Delta\bar{p}_0 = 0,017$).

После некоторых преобразований получаем

$$\theta K d\bar{p}_{H_2O}/d\tau = (\bar{p}_s - \bar{p}_{H_2O})/\Delta\bar{p}_0 + m'_{CO_2}/m'_{w0} - (\bar{p}_s - \bar{p}_{H_2O}(\tau - \tau_k))/\Delta\bar{p}_0. \quad (11)$$

В парниковом эффекте ключевым считается избыток углекислого газа (чтобы не загромождать выкладки, здесь мы не будем учитывать метан, который также провоцирует этот эффект, ибо учесть его не представляет особых трудностей). В нашем анализе основной переменной мы выбрали относительное парциальное давление водяных паров \bar{p}_{H_2O} .

Введем в рассмотрение константу скорости разветвления цепи $f = p_{H_2O}/p_{CO_2}$ (по аналогии с теорией цепного воспламенения Н. Семенова) и

выразим через нее отношение $m'_{CO_2}/m'_w{}^0$. Величина загрязнения атмосферы углекислым газом, выражаемая его массовым секундным приходом $m'_{CO_2}(\tau) = a\tau$, определяется не физическими законами, а человеческой деятельностью (мы рассмотрим наипростейший случай линейной зависимости). Поэтому она представляет исходное известное эмпирическое значение в некоторый рассматриваемый момент времени. В отличие от паров воды, которые конденсируются и периодически выпадают в виде осадков на Землю, углекислый газ накапливается в атмосфере и итоговая величина его парциального давления определяется интегралом

$$m_{CO_2} = \int_0^{\Delta\tau} a\tau d\tau = a\Delta\tau^2/2 = m'_{CO_2} \Delta\tau/2.$$

Значение $\Delta\tau$ представляет эмпирическое время, на интервале которого рассматривается устойчивость атмосферы к воздействию углекислого газа. Это время примем равным одному году, т.е. $\Delta\tau = 3,15 \cdot 10^7$ с. Такое приближение нивелируется переходом к парциальному давлению углекислого газа, которое определяется именно суммарным, накопленным за все время газом. Поэтому найдем с учетом (1) отношение

$$m'_{CO_2}/m'_w{}^0 = 2m_{CO_2}/(\Delta\tau m'_w{}^0) = A \bar{p}_{H_2O}/f \Delta\bar{p}_0, \quad (12)$$

$A = 2\theta \Delta\bar{p}_0/0,68\Delta\tau$, здесь учтено отличие газовых постоянных углекислого газа и воздуха $R_{CO_2}/R_a = 0,68$, а также, что для реперной температуры 15°C $\Delta\bar{p}_0 = 0,016$. Мы принимаем случай $\Delta\bar{p}_0 > 0$, так как величина относительной разницы между давлением насыщенных паров и парциальным давлением паров воды по условиям задачи положительная. Для случая ледяного или снежного покрова поверхности требуется дополнительный анализ. Здесь есть определенное приближение относительно величины массы углекислого газа, накопленной к рассматриваемому времени, и переменности количества испаренной воды в связи с ростом ее температуры, но это мало сказывается на конечном результате, учитывая малость A по сравнению с другими величинами. Тогда для 15°C получаем $A = 0,82$.

Таблица.

Годы	1850	1900	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2010	2050	2100
Δt [5, 7, 8]		-0,4	-0,2...0	0,001... 0,1	0,01... 0,23	0,2... 0,32	0,35... 0,5	0,2...0,4		0,2... 0,6	0,8... 2,6	1,4...5,8
m'_{CO_2} , кг/с	1904	$1,6 \cdot 10^4$	$5,7 \cdot 10^4$	$7,9 \cdot 10^4$	$1,27 \cdot 10^5$	$1,59 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^5$				
Δp_{CO_2} , ppm [7, 9, 10]	270... 300	290... 310	315	310... 325	340	347	354	367... 390	379... 395	389... 400	463... 623	478... 1099
B [9,11]/*			5,5	5,7	5,7	5,7... 6,8... 15,7/3.		6,1... 16,9/3			2,8... 10,6	12,3... 8,5

/* влажность 70%

С учетом (12) уравнение (11) перепишем следующим образом:

$$\theta K \Delta \bar{p}_0 \frac{d\bar{p}_{H_2O}}{d\tau} = (\bar{p}_s - \bar{p}_{H_2O}) + A\bar{p}_{H_2O}/f - [\bar{p}_s (\tau - \tau_k) - \bar{p}_{H_2O}(\tau - \tau_k)] \quad (13)$$

Область устойчивости системы “Земля – атмосфера”

Запишем (13) в отклонениях после разложения функции в ряд Тейлора в окрестности стационарной точки с ограничением величинами первого порядка малости. Тогда с учетом обозначения $\theta K \Delta \bar{p}_0 = G$ получаем

$$G \frac{d\delta \bar{p}_{H_2O}}{d\tau} = \delta \bar{p}_s - \delta \bar{p}_{H_2O} + A\delta \bar{p}_{H_2O}/f - [\delta \bar{p}_s (\tau - \tau_k) - \delta \bar{p}_{H_2O}(\tau - \tau_k)]. \quad (14)$$

Вариацию давления насыщения при температуре поверхности испарения вследствие потепления климата за счет парникового эффекта $\delta \bar{p}_s$ определим, учитывая, что $p_s = p_s\{T_s, \{p_{CO_2}(p_{H_2O})\}\}$, в виде: $\delta \bar{p}_s = (\partial p_s / \partial T_s) (\partial T_s / \partial p_{CO_2}) \exp(\partial p_{CO_2} / \partial p_{H_2O}) \delta \bar{p}_{H_2O} = \{(\partial T_s / \partial p_{CO_2}) \exp(\partial T_s / \partial p_s)\} (\partial p_{CO_2} / \partial p_{H_2O}) \delta \bar{p}_{H_2O}$.

Производная $(\partial p_s / \partial T_s)$ находится при помощи уравнения Клапейрона-Клазиуса $(\partial p_s / \partial T_s) = L / T \Delta v$ (Δv – разница между удельным объемом пара и жидкости). Производная $(\partial T_s / \partial p_{CO_2})_{\text{exp}}$ находится по экспериментальной зависимости потепления климата в функции от увеличения содержания углекислого газа в атмосфере (см. Табл.).

Производная $(\partial p_{CO_2} / \partial p_{H_2O})$ может быть выражена через константу скорости разветвления цепи $(\partial p_{CO_2} / \partial p_{H_2O}) = 1/f$. Таким образом, получаем для вариации давления насыщения при температуре поверхности испарения зависимость

$$\delta \bar{p}_s = [(L / T \Delta v) (\partial T_s / \partial p_{CO_2})_{\text{exp}} / f] \delta \bar{p}_{H_2O} = B / f \delta \bar{p}_{H_2O}, \quad (15)$$

где $B = (L / T \Delta v) (\partial T_s / \partial p_{CO_2})_{\text{exp}} = (\partial T_s / \partial p_{CO_2})_{\text{exp}} / (T \Delta v / L)$ – параметр тепловой чувствительности атмосферы к воздействию углекислого газа.

Подставляем (15) в (14) и после преобразований получаем

$$Gf / (f - A - B) \frac{d\delta \bar{p}_{H_2O}}{d\tau} + \delta \bar{p}_{H_2O} - (f - B) / (f - A - B) \delta \bar{p}_{H_2O} (\tau - \tau_k) = 0. \quad (16)$$

Дальнейшее исследование на устойчивость этого уравнения хорошо известно ([4]). Условие устойчивости можно найти методом D -разбиения, отыскав решение уравнения (16) в виде суммы функций типа $\delta \bar{p}_{H_2O}(\tau) = C \exp(s\tau)$. Соответствующее характеристическое уравнение имеет вид $Gf / (f - A - B) s + 1 - (f - B) / (f - A - B) \exp(-s\tau_k) = 0$.

Определяющими параметрами устойчивости рассматриваемой системы являются величины G , B , τ_k и f , от величины которых зависят численные значения корней s характеристического уравнения. При $s = i\omega$ получаем уравнение границы устойчивости системы “атмосфера – поверхность Земли”:

$$i [Gf / (f - A - B)] \omega + 1 - (f - B) / (f - A - B) \cos(\omega \tau_k) + i(f - B) / (f - A - B) \sin(\omega \tau_k) = 0.$$

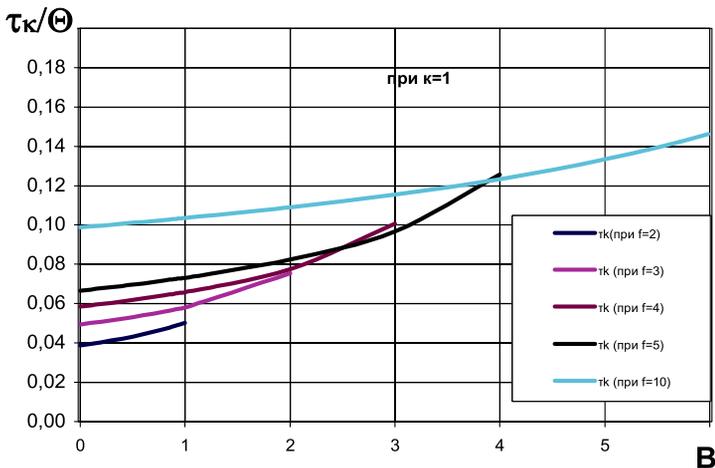


Рис. 2. Область устойчивости при $f=2,3,4,5,10$ (на рисунке кривые, идущие снизу вверх), $\theta = 5,5 \cdot 10^8 \text{ с}$, $K=1$, $k=1$, относительный перепад давления на поверхности испарения $\Delta \bar{p}_0 = 0,016$.

которое преобразуется в формулу

$$\tau_k/\theta = fK \Delta \bar{p}_0 \{k\pi - \arctg[2A(f-B-A/2)]^{1/2}/(f-A-B)\} / (f-B-A/2)^{1/2}, \quad (17)$$

где k – бесконечная последовательность целых и положительных чисел ($k = 1, 2, 3, \dots$).

Расчет по (17) в плоскости параметров $\tau_k/\theta = \tau_k(B, f)$ представлен на рис. 2.

Уточним константу скорости разветвления цепи f , используя следующий прием. Примем, что на границе перехода к неустойчивости атмосферы к парниковому нагреву (ориентировочно, 1960 год) при внешнем возмущении в виде углекислого газа константа скорости разветвления цепи $f=1$ (что очевидно, так как предполагает отсутствие дополнительного испарения воды вследствие отсутствия роста углекислого газа сверх стационарной величины). Величина B для этого года, имеет порядок 0,1. Расчет для этого случая определяет границу $\tau_k/\theta = 0,0285$, что дает время запаздывания $\tau_k = 1,5 \cdot 10^7 \text{ с}$.

Хорошо известными методами нетрудно определить, что область «справа-внизу» от границы есть область неустойчивости. Граница устойчивости, рассчитанная при $k = 2$, лежит слева от кривой, соответствующей $k = 1$, т.е. случай $k = 1$ включает все другие.

Соотношение (18) дает возможность анализировать влияние приведенных переменных на ус-

тойчивость атмосферы Земли к парниковому нагреву за счет увеличения поступления углекислого газа, а значит также и ее устойчивость к другим возмущениям в виде поступления метана. Видно, что в такой простейшей модели устойчивость определяется тремя параметрами: отношением времен τ_k/θ , параметром тепловой чувствительности атмосферы к воздействию углекислого газа B и константой скорости разветвления цепи f . Кроме этого, граница устойчивости зависит от относительной разности между давлением насыщенных паров при температуре поверхности испарения и парциальным давлением паров воды в атмосфере $\Delta \bar{p}_0$, от коэффициент теплового усиления по водяному пару K .

Экспериментальные данные показывают качественное согласование полученных результатов с наблюдениями. Так, потепление климата сопровождается увеличением частоты выпадения осадков, т.е. уменьшением времени запаздывания конденсации паров воды τ_k , что согласуется с предсказаниями теоретической модели. Уменьшение параметра тепловой чувствительности атмосферы к воздействию углекислого газа приводит к увеличению области устойчивости системы «Земля- атмосфера» к выбросу углекислого газа. Из выражения для B видно, что чем меньше x – степень сухости пара (в термодинамической терминологии) или паросодержание атмосферы (в терминологии двухфазных жидкостей), тем больше $\Delta v = v'' - v' = (v - v')/x$ и тем больше область устойчивости. И наоборот, повышение интегральной влажности приводит к уменьшению запаса устойчивости атмосферы к парниковому эффекту.

Полученные зависимости позволяют оценивать количественные методы управления парниковым эффектом (которые в общем-то очевидны) изменением внутренних параметров, в частности изменением скорости испарения с поверхности воды или влажных участков суши. Уменьшение m'_w приводит к росту постоянной времени атмосферы Земли θ , а этот рост увеличивает область устойчивости земной атмосферы. Модель позволяет оценивать техническую эффективность способов борьбы с потеплением за счет уменьшения испаряемости воды. Указанный эффект усиливается падением парциального давления паров воды, которое приводит, с другой

стороны, к увеличению разности $\Delta \bar{p}$ и тем самым к увеличению области устойчивости. Возможно, больше приемлемым может стать путь увеличения времени запаздывания конденсации паров τ_k , для чего необходимо выявлять факторы, которые задерживают дожди или снегопады и приводят к большему времени запаздывания. Это первые очевидные качественные выводы, которые должны сопровождаться анализом реализуемости и стоимости.

Динамика системы “Земля – атмосфера”

Полученные результаты дают возможность более широко подойти к исследованию динамики системы “Земля – атмосфера”, путем определения ее передаточных функций и амплитудно-фазовых и частотных, действительных и мнимых характеристик. Так, передаточная функция между возмущениями массы выбрасываемого углекислого газа и парциального давления водяного пара

$$W(s) = \delta \bar{p}_{H_2O}(s) / \delta \bar{m}_{CO_2}(s) = \Delta \bar{p}_0 / [s \theta K \Delta \bar{p}_0 - (B/f - 1) \{1 - \exp(-s \tau_k)\}].$$

Отсюда, принимая $s = \pm i\omega$, несложно найти выражения для АФЧХ, действительных и мнимых характеристик системы.

Представленное выражение динамической характеристики «Земля-атмосфера» получено в простейшем случае, когда учитывается баланс массы. Более общим и корректным будет случай с учетом баланса энергии в атмосфере, ограниченной поверхностью Земли с одной стороны и границей с открытым Космосом – с другой для случая нестационарных процессов в открытой системе. Изменение во времени теплового состояния атмосферы определяется балансовым динамическим уравнением в виде уравнения первого закона термодинамики для открытой системы:

$$d(em)/d\tau = R_{амм} + dQ/d\tau + H_+ - H_k + E,$$

где количество теплоты, выделяющейся при конденсации паров воды при выпадении осадков (дождя или снега) с расходом

$$m'_k(\tau) = m'_w(\tau - \tau_k) = S_w j(\tau - \tau_k) = S_w j_0 (p_s(\tau - \tau_k) - p_{H_2O}(\tau - \tau_k)) / p = \chi (p_s - p_{H_2O}),$$

$$H_+ = S_w j_0 (p_s(\tau - \tau_k) - p_{H_2O}(\tau - \tau_k)) / p L.$$

Величина поглощаемой Землей и ее атмосферой энергии в довольно длительном времени может считаться постоянной величиной. Так как на поглощение коротковолнового излучения изменения в количестве углекислого газа и водяных паров влияют слабо, то в этом смысле величина темпа поглощения солнечной энергии системой “Земля-воздух” Q_S может считаться постоянной величиной. В долгосрочной перспективе поступление солнечной энергии действительно неравномерное и поэтому необходимо учитывать периодическое (в течение десятков тысяч лет) изменение положения Земли в космическом пространстве. Поэтому будем для долговременной перспективы считать, что получаемая Землей солнечная энергия $Q_S = Q_S(\alpha)$, где α – некоторый угол наклона Земли к перпендикуляру к линии между Землей и Солнцем.

Темп поглощения коротковолнового излучения атмосферой $R_{амм}$ также можно считать в первом приближении величиной постоянной. Тогда на динамическом режиме при переменной величине значения приповерхностной температуры имеем

$$c_v T_i (R_{CO_2} / R_{H_2O}) (\partial p_{H_2O} / \partial p_{CO_2} + 1) dm_{CO_2} / d\tau + mc_v \xi dT_i / d\tau - \{c_v \xi p R_{CO_2} / \{(R_a)^2\}\} [\partial(R_a) / \partial(p_{H_2O} + p_{CO_2})] (\partial p_{H_2O} / \partial p_{CO_2} + 1) dm_{CO_2} / d\tau = R_{амм} + A + S_m \sigma_0 [(1 + \epsilon_{cm}) / 2] \epsilon_g (T_i^4 - T_g^4) + S_w j_0 (p_s(\tau - \tau_k) - p_{H_2O}(\tau - \tau_k)) / p L + E.$$

Отклонения в тепловом балансе от точки стационарного режима будут равны:

$$d\delta Q_{амм} / d\tau = \delta Q_s + \delta I_s + \delta A + \delta E \\ \delta Q_s = Q_{s0} (\partial S / \partial \alpha) \delta \alpha (\tau - \tau_\alpha), \\ \delta I_s = S_m \delta q + \delta L + \delta P.$$

Газы обладают возможностью испускать и поглощать энергию, но для различных газов эта особенность различна. В нашем случае нагретая до температуры T_i поверхность излучает энергию, которая проходит через объем атмосферы с

увеличенным содержанием CO₂ и H₂O (и CH₄) (слой с большими их парциальными давлениями p_{CO₂}, p_{H₂O} и p_{CH₄}) и больше поглощается в сравнении с установившимся балансом в атмосфере. Тепловой поток от поверхности Земли, который поглощается увеличением количеством парниковых газов, приближенно определяется хорошо известной формулой

$$q = \sigma_0 [(1 + \varepsilon_{cm})/2] \varepsilon_g (T_t^4 - T_g^4),$$

$\varepsilon_g = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{CO_2} \varepsilon_{H_2O}$ – суммарная поглощательная способность смеси водяного и углекислого газов (принимается равной приведенной степени их черноты), которая определяется по таблицам в зависимости от величины парциального давления и длины пробега луча $l = 3,6V/S$; иногда учитывают, что $\varepsilon_{CO_2} \sim (p_{CO_2} l)^{1/3}$, $\varepsilon_{H_2O} \sim (pl)^{2/3}$. Необходимо иметь в виду, что большой вклад в потепление косвенно оказывает метан. Если в этом случае ограничиваться перекрытием длин волн излучения только водяных паров и углекислого газа, то суммарная поглощательная способность смеси этих трех газов будет равна:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{CO_2} \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{CH_4}.$$

Представляемая модель позволяет учитывать поглощение и аэрозолей и др. газов. Мы ограничимся аналитическим рассмотрением только смеси водяных паров и углекислого газа. Поэтому запишем:

$$\delta q = \sigma_0/2 \{ \varepsilon_g (T_t^4 - T_g^4) \}_0 \delta \varepsilon_{cm} + \sigma_0 [(1 + \varepsilon_{cm0})/2] (T_t^4 - T_g^4)_0 \delta \varepsilon_g + 2 \sigma_0 (1 + \varepsilon_{cm0}) \varepsilon_{g0} T_t^3 \delta T_t.$$

Входящие в это уравнение отклонения степени черноты различных газов определяются формулами:

$$\begin{aligned} \delta \varepsilon_g &= \delta \varepsilon_{CO_2} + \delta \varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{H_2O} \delta \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{CO_2} \delta \varepsilon_{H_2O} = \\ &= (1 - \varepsilon_{H_2O0})_0 \delta \varepsilon_{CO_2} + (1 - \varepsilon_{CO_20})_0 \delta \varepsilon_{H_2O}; \\ \delta \varepsilon_{CO_2} &= [\partial \varepsilon_{CO_2} / \partial p_{CO_2}]_0 (R_{CO_2} T_{av} / V) \delta m_{CO_2}; \\ \delta \varepsilon_{H_2O} &= [\partial \varepsilon_{H_2O} / \partial p_{H_2O}]_0 \delta p_{H_2O} (\tau - \tau_w); \\ \delta \varepsilon_g &= \delta \varepsilon_{CO_2} + \delta \varepsilon_{H_2O} - \varepsilon_{H_2O} \delta \varepsilon_{CO_2} - \varepsilon_{CO_2} [\partial \varepsilon_{CO_2} / \partial p_{CO_2}]_0 \\ & (R_{CO_2} T_{av} / V) \delta m_{CO_2} = (1 - \varepsilon_{H_2O0})_0 [\partial \varepsilon_{CO_2} / \partial p_{CO_2}]_0 \\ & (R_{CO_2} T_{av} / V) \delta m_{CO_2} + [1 - \varepsilon_{CO_20}]_0 [\partial \varepsilon_{H_2O} / \partial p_{H_2O}]_0 \\ & \delta p_{H_2O} (\tau - \tau_w). \end{aligned}$$

После подстановки этих выражений имеем

$$\delta q = \sigma_0/2 \{ \varepsilon_g (T_t^4 - T_g^4) \}_0 \delta \varepsilon_{cm} + \sigma_0 [(1 + \varepsilon_{cm0})/2] (T_t^4 - T_g^4)_0 \{ (1 - \varepsilon_{H_2O0})_0 [\partial \varepsilon_{CO_2} / \partial p_{CO_2}]_0 (R_{CO_2} T_{av} / V) \delta m_{CO_2} + [1 - \varepsilon_{CO_20}]_0 [\partial \varepsilon_{H_2O} / \partial p_{H_2O}]_0 \delta p_{H_2O} (\tau - \tau_w) \} + 2 \sigma_0 [(1 + \varepsilon_{cm0})] \varepsilon_{g0} T_t^3 \delta T_t.$$

Если принимать обычную формулу для определения турбулентной теплоотдачи от поверхности Земли к атмосфере $P = \alpha (T_t - T_g)$, то легко записать значение отклонения ее величины вследствие увеличения температуры $\delta P = \alpha \delta T_t$. Темп поступления в атмосферу скрытой теплоты при испарении с водной поверхности и с увлажненных участков суши определяется скоростью испарения по (4) [3]

$$L' = S_w j L = S_w L j_0 (p_s - p_{H_2O} (\tau - \tau_w)) / p.$$

Отсюда получаем отклонение темпа поступления скрытой теплоты при испарении

$$\delta L' = (S_w L j_0 / p_0) \{ (\partial p_s / \partial T_t) \delta T_t - \delta p_{H_2O} (\tau - \tau_w) \},$$

где $(\partial p_s / \partial T_s) = L / [T_s (v'' - v')]$.

Записанные формулы дают возможность записать уравнение динамики системы “Земля-атмосфера”, для определения изменения приповерхностной температуры Земли:

$$\begin{aligned} m c_v \xi \frac{d \delta T_t}{d t} - \{ 2 S_m \sigma_0 [(1 + \varepsilon_{cm0})] \varepsilon_{g0} T_t^3 + (S_w L j_0 / p) (\partial p_s / \partial T_t) + \alpha \} \delta T_t = \{ - c_v T_t (R_{CO_2} / R_{H_2O}) \\ (\partial p_{H_2O} / \partial p_{CO_2} + 1) + c_v \xi p R_{CO_2} / \{ (R_a)_2 \} \} [\partial (R_a) / \partial (p_{H_2O} + p_{CO_2})] (\partial p_{H_2O} / \partial p_{CO_2} + 1) \} \delta m_{CO_2} / d t + \\ + \{ S_m \sigma_0 [(1 + \varepsilon_{cm0})/2] (T_t^4 - T_g^4)_0 \{ (1 - \varepsilon_{H_2O0})_0 [\partial \varepsilon_{CO_2} / \partial p_{CO_2}]_0 (R_{CO_2} T_{av} / V) + [1 - \varepsilon_{CO_20}]_0 [\partial \varepsilon_{H_2O} / \partial p_{H_2O}]_0 \} - \\ - (S_w L j_0 / p) \{ \partial p_{H_2O} / \partial p_{CO_2} \} (R_{CO_2} T_{av} / V) \} \delta m_{CO_2} + \\ + Q_{s0} (\partial S / \partial \alpha) \delta \alpha (\tau - \tau_w) + \delta A + \sigma_0/2 \{ \varepsilon_g (T_t^4 - T_g^4) \}_0 \\ \delta \varepsilon_{cm} + \delta E. \end{aligned}$$

Таким образом, мы видим, что если в первой простейшей модели, полученной на основании баланса массы, выходным сигналом есть парциальное давление водяных паров, реагирующих на входной сигнал в виде выбросов углекислого газа, то в модели, основанной на более полном описании явления парникового эффекта выходом есть непосредственно интересующая величина приповерхностной температуры T_t , которая зависит от возмущений выбросов углекислого газа δm_{CO_2} и его темпа $d \delta m_{CO_2} / d t$, а также от возмущений поло-

жения Земли $\delta\alpha(\tau-\tau_\alpha)$, которое некоторые авторы считают причиной потепления, от выбросов теплоты за счет антропогенной деятельности человека δA , от изменения степени черноты поверхности Земли за счет таяния ледников, помутнения воды и т.п. причины, которые также могут влиять на парниковый эффект и могут стать механизмом борьбы с ним (при определении количественного воздействия), от поступления теплоты из ядра планеты. Отсюда найти передаточные функции и динамические характеристики по каждому воздействию системы “Земля-атмосфера” особого труда не представляет.

Космические системы против глобального потепления

Так как энергопотребление в мире на душу населения растет, то самый очевидный способ борьбы с потеплением — ее охлаждение путем уменьшения тепловых антропологических выбросов за счет приостановления роста численности населения, что естественно не находит поддержки в наиболее вероятных кандидатах на это — в слаборазвитых стран. Но с другой стороны, количество получаемой человеком дополнительной энергии вследствие прироста населения Земли (член δA) можно компенсировать уменьшением теплоты, приходящей от Солнца. Французский климатолог Э. Бар среди возможных геоинженерных методов рукотворного изменения климата в случае резкого и неожиданного ухудшения климатической ситуации (а это, возможно, придется уже через пару десятилетий) выделяет наиболее перспективное, по его мнению, эффективное и менее всего опасное средство охлаждения Земли — зеркало между Землей и Солнцем, уменьшающее освещение Земли. В развитие высказанных Э. Баром идей мы проанализировали вариант размещения на некоторой орбите космических экранов (“космического зонта”), составленных из уже разработанных сейчас и проходящих экспериментальную проверку “солнечных парусов”, которые рассматриваются как основной элемент перспективных космических двигателей. Такой парус представляет собой огромное полотно из сверхтонкого материала (к примеру, алюминированного пластика), которое отражает

падающий на него свет и под давлением фотонов создает тягу. В настоящее время разработаны варианты пленок, конструктивное оформление, системы развертывания на орбите. Имеются и очень легкие с малой тягой высокоэкономичные электроракетные двигатели, которые, с одной стороны, будут стабилизировать огромных размеров космический “зонт”, а с другой, поддерживать его на орбите. Таким образом, для создания космических экранов уже имеется большой научный и конструкторский задел.

Оценка основных параметров космического экрана (или нескольких экранов) показала следующее. В качестве базового мы выбрали вариант экрана, способного уменьшить количество падающей солнечной энергии на величину, которая соответствует увеличению тепловой нагрузки на биосферу вследствие ежегодного современного прироста населения в 78 млн человек. При потреблении 2500 Вт на душу населения это дает величину в 195 млрд Вт/год, что требует экран площадью 212 км² (диаметр 16 км). При поверхностной плотности пленки 1 г/м² получаем массу экрана 212 т. Такой парус за счет солнечного давления создает тягу по направлению к Земле в 90 Н, что требует приблизительно 100 ЭРД с тягой около 10 Н для ее компенсации. При фокусировании и определенном размещении компенсаторных двигателей это количество может быть сведено до нескольких.

Основной проблемой, возникающей вследствие масштабных факторов отличия космического экрана от солнечного паруса (размеры больше на несколько порядков) является прочность пленки экрана и ее масса. Очевидно, что должен быть найден оптимум этих взаимоисключающих друг друга характеристик. При этом существенное облегчение для создания экрана в сравнении с солнечным парусом есть возможность его размещения вдали от Солнца, в условиях менее напряженного теплового режима.

В настоящее время некоторые изготовленные солнечные паруса имеют поверхностную плотность менее 10 г/м². Прочность солнечного паруса может быть увеличена за счет включения в парус металлических ребер, что уменьшит повреждения от столкновений с микрометеоритами. Сейчас можно говорить о возможности создания тонкого экрана, состоящего из нескольких слоев крепкого, жаропрочного композитного

волокна с отражающим покрытием, который будет иметь поверхностную плотность менее 1 г/м^2 . В будущем следует ожидать создания солнечных парусов с поверхностной плотностью $0,1 \text{ г/м}^2$. Уже реально рассматривается создание инфраструктуры производства пленок для солнечных парусов непосредственно в космосе. Используя вакуумное напыление, можно изготавливать в космосе большие металлические листы толщиной $20\text{--}30 \text{ нм}$. При этом возможно получить поверхностную плотность экрана до $0,05 \text{ г/м}^2$. В будущем нанотехнология может позволить создавать перфорированные или ячеистые пленки. Если перфорации в ней будут существенно меньше длины волны падающего на него света, малая масса и высокая отражательная способность могут, дополнив друг друга, значительно повысить производительность солнечных экранов.

Что касается электро-ракетных двигателей, то для них наступает время широкой эксплуатации. Они имеют значительно большую удельную тягу, дающую возможность работать длительное время с небольшим запасом рабочего тела при небольшой потребной тяге, характерной именно для ЭРД. Сейчас мы имеем наш разработанный 25 лет назад ЭРД типа ТХД и российский СПД-290 с характеристиками достаточно близкими к требуемым в нашей задаче.

Теперь относительно стоимости запуска всей системы на орбиту. В перспективе космические самолеты будут выводить на орбиту объекты за $1\text{--}2$ тыс. долларов за кг. Конечно, эта стоимость определяется орбитой, но как раз ЭРД могут также выполнить роль дешевых маршевых двигателей, которые будут переводить космический экран с ближайшей орбиты на необходимую. Поэтому по расчетам стоимость солнечного экрана, компенсирующего увеличение производства тепловой энергии на Земле за счет роста народонаселения, будет около 3 млрд долл. Эта величины существенно меньше потерь в стихийных бедствиях или затрат на покупку квот по углекислому газу. Более того, предложенная программа позволяет делить экраны на отдельные части разных размеров, которые запускают разные страны, в частности которые дают наибольший вклад в прирост население и потребляют повышенное количество энергии. Если выделить такие “кос-

мические” страны и континенты, то можно разделить экран например на 10 частей – для каждого субъекта – участника программы. Тогда для отдельной страны будет необходимо обеспечить вывод на орбиту около 20 т, затратив на это приблизительно 300 млн долл. Достоинством предлагаемой системы экранирования Земли является, с одной стороны, малая стоимость экрана, двигателей и всей установки, а с другой возможность вывода ее из эксплуатации в любое время без последствий для Земли, чего нельзя сказать о других вариантах вмешательства в биосферу Земли, которые могут нанести своей неконтролируемостью больший вред, нежели ожидаемую пользу.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Prisniakov V.F., Prisniakov K.V.* Space Systems Against Global Warming//58th Intern. Astr. Cong. Paper. IAC-07-E5.3. Hyderabad, India, – September 24–28, 2007.
2. *Присняков В.Ф.* Динамика жидкостных ракетных двигательных установок. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
3. *Ирисов А.С.* Испаряемость топлив для поршневых двигателей. ГНТИ нефтяной и горно-топливной литературы. – М.: – 1955.
4. *L. Hansen, M. Sato, R. Ruedy et all.* Climate Simulations for 1880–2003 with GISS modele. Draft of 13 Oct. 2006. 37p.
5. *L. Hansen, M. Sato, R. Ruedy et all.* Dangerous human-made interference with climate: A GISS model steady. Draft of 13 Oct. 2006.
6. *Ахмад К.К., Анисимов О., Найджел Арнелл и др.* Изменение климата, 2001 г. Доклад МГЭИК. Женева, 2001. – 60 с.
7. *Шаманов Н.П.* Энергетика в 21 веке. Научный отчет НИЧ Снт-П ГМТУ.
8. *Володин Е.М., Дианский Н.А.* Воспроизведение изменений климата в 19–22 ст. // ИАН, Физика атмосферы и океана. – №3. – 2006.
9. *Терез Э.И.* Устойчивое развитие и проблемы изменения климата Земли. <http://www/poteplenie.ru/doc/terez.htm>.
10. *Смирнов Б.М.* Углекислый газ в атмосфере Земли // УФН. – Т. 126, вып. 3. – 1978. – С. 527–530.

Получено 18.09.2007 г.