

Оценка возможных последствий взрыва системы Starship над стартовой позицией

Ю. И. Лобановский

С тех пор я не обращаю внимания ни на что из того, что утверждают «специалисты». Я все вычисляю сам.
Р. Фейнман

Краткое содержание

В работе показано, что при неблагоприятном развитии событий, возникающий и самопроизвольно гаснущий на старте процесс автоколебаний типа «пого», может привести к взрыву системы Starship над стартовой позицией. На основе анализа действия боеприпасов объемного взрыва, данных, характеризующих разрушения от ударной волны для пяти известных крупных и очень крупных взрывов, а также информации о разрушениях под действием взрыва гигантской советской ракеты Н1 на космодроме Байконур, были получены оценки энергии этого взрыва, а также взрыва системы Starship на старте. Все это позволило определить уровни возможных разрушений в ближайших к стартовой позиции системы Starship населенных пунктах и городах округа Камерон штата Техас и муниципалитета Матаморос Мексики, а также возможное там количество раненых.

Ключевые слова: «пого», автоколебания, авария, Starship, объемный взрыв, ядерный взрыв, ударная волна, давление, разрушения

Список символов

- a, b и c – эмпирические коэффициенты в формуле Садовского
- c – скорость звука
- E – энергия взрыва
- E_e – расчетная энергия взрыва
- f_e – частота собственных колебаний корпуса ракеты
- f_n – частота гидроакустических колебаний
- H – высота взрыва
- L – длина
- L_{eq} – эквивалентная длина колебательного контура
- p – давление
- Δp – перепад давления на фронте ударной волны
- R – радиус
- α – коэффициентом избытка окислителя
- ξ – приведенный радиус

I. Введение

В работах [1 – 3] были описаны причины взрывов, произошедших с обеими ступенями системы Starship во время ее второго полета (IFT-2). Там было показано, что оба взрыва, которые привели к уничтожению этих ступеней, произошли из-за автоколебаний типа «пого», возникших в результате взаимодействия с упругими колебаниями корпуса гидроакустических осцилляций в линиях подачи кислорода в двигатели. Упругие колебания влияют на движение объекта, в котором они возникли, поэтому на графике его ускорения появляются следы в виде резкого изменения этого параметра. Эти пики и провалы ускорения и были заметны при IFT-2 в периоды, предшествующие взрыву второй ступени [3], но перед взрывом первой ступени они были незаметны из-за того, что ступень совершала резкие маневры, полностью стершие следы любых других воздействий на ее траекторию полета [2].

II. Возникновение автоколебаний типа «пого» на начальном участке разгона системы Starship

При этом даже на видео IFT-2 в окне, демонстрирующем скорость полета объекта [4], заметны ее резкие колебания в период времени примерно от 5 до 20 секунд с момента старта. Это же подтверждает график ускорения, который приведен на рис. 1. Здесь показаны участки траектории разгона системы Starship как в первом (IFT-1), так и во втором (IFT-2) испытательных полетах вплоть до 160-й секунды, чтобы в большем масштабе можно было показать стартовый участок.

На рис. 1 (см. [5]) было проведено сравнение по времени (в секундах) четырех параметров Starship в двух полетах, а именно: ускорения ракеты (в $\text{см}/\text{с}^2$), скорости (в м/с), высоты (в сотнях метров), а также прямой (горизонтальной) дальности полета (также в сотнях метров). Данные относящиеся ко второму полету (IFT-2) отображаются толстыми линиями, а к первому (IFT-1) – тонкими. Ускорение показано желтыми кривыми, скорость – синими, высота – оливковыми и дальность – фиолетовыми линиями.

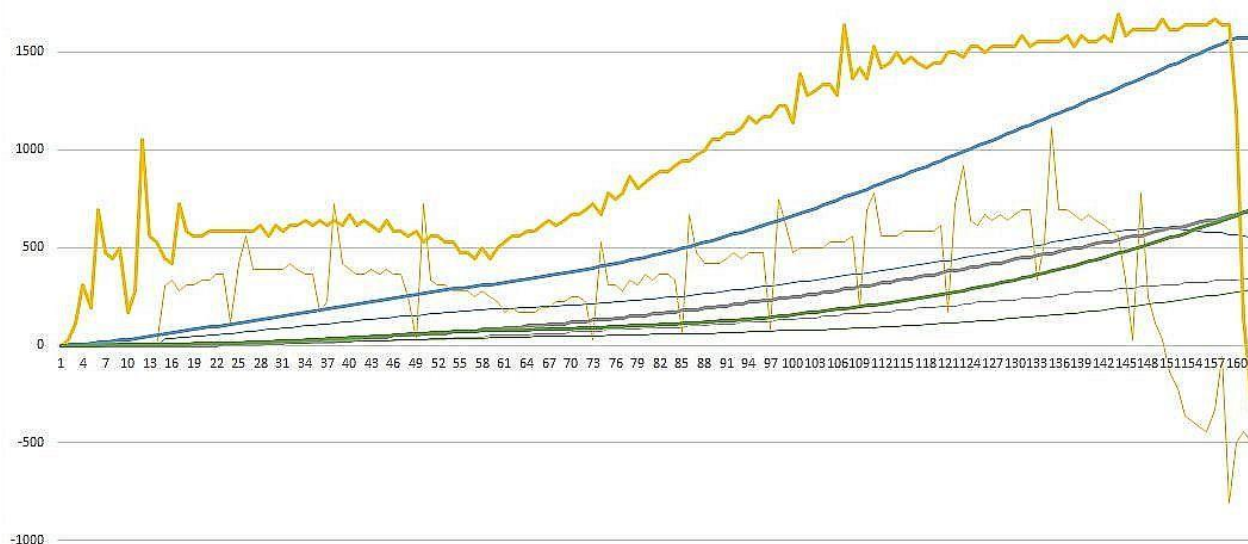


Рис. 1 – Ускорение, скорость, высота и дальность системы Starship в первом и втором полетах [5]

Нас сейчас интересует только ускорение ракетного аппарата во втором полете – это толстая желтая линия. С отметки 4 секунды плавный и быстрый рост ускорения ракеты прекращается, и вплоть до 19-й секунды наблюдаются его резкие колебания, более-менее подобные тем, что наблюдались в первом полете, причем их масштаб намного превосходит все, что можно видеть далее на графике ускорения во втором полете. Но эти колебания прекратились так же быстро, как и начались.

Наиболее естественное объяснение таких резких изменений ускорения – это возникновение в системе Starship автоколебаний типа «пого», огибающая которых и является представленным на рис. 1 участком графика ускорений на старте. В статье [1] была дана оценка частоты собственных упругих колебаний корпуса – $f_c = 11.5 - 12.5$ Гц. Для того, чтобы возник процесс типа «пого», необходимо, чтобы частота гидроакустических возмущений f_n в любом из двух типов топливных линий, питающих ракетные двигатели силовой установки, была бы близка к этой величине или кратна ей. Для вариантов геометрии этих линий, ранее представленных в [1], частота гидроакустических возмущений в кислородном тракте при работе двигателей Raptor-2 на номинальном режиме может находиться в диапазоне $f_c = 9.7 - 11.0$ Гц, см. таблицу 1, что, в целом, находится за пределами диапазона упругих частот.

Таблица 1

Ракета Ступень Двигатель	p_2/p_1	L_1 (м)	L_2 (м)	L_3 (м)	L_{eq} (м)	f_n (Гц)
$c = 930$ м/с						
Starship Super Heavy Raptor-2	170	0.30	3.00	3.30	19.6	11.9
	135				17.5	13.3
	170	0.35		3.35	21.2	11.0
	135				18.9	12.3
	170	0.40		3.40	22.6	10.3
	135				20.2	11.5
	170	0.45		3.45	24.0	9.70
	135				21.4	10.9

В таблице 1 используются следующие обозначения: c – скорость звука в жидком криогенном кислороде, p_2/p_1 – степень повышения давления в кислородном насосе двигателя Raptor-2, L_1 – длина кислородного тракта от насоса до газогенератора, L_2 – длина кислородного тракта от бака до насоса, L_3 – их сумма, L_{eq} –

эффективная длина колебательного контура, то есть длина, которая соответствует частоте возникших в нем колебаний при отсутствии насоса, f_n – частота гидроакустических колебаний жидкого кислорода.

Степень повышения давления в кислородном насосе двигателя Raptor-2 на номинальном режиме работы $p_2/p_1 \approx 170$. Однако, на старте двигателя выходят на этот рабочий режим, естественно, не сразу. Более того, видимо, в связи с тем, что в системе Starship производится автогенный наддув топливных баков (то есть в баки подаются продукты сгорания из газогенераторов двигателей), достижение номинального давления в баках перед выходом двигателей на максимальную тягу требует некоторого времени работы двигателей на промежуточной тяге. И время этого процесса здесь заметно больше, чем, скажем, было у ракеты Saturn V. По крайней мере, судя по рисунку 1, выход на номинальную тягу двигателей системы Starship, обеспечивающую его перегрузки при вертикальном старте не менее $5 - 5.5 \text{ м/с}^2$ при отсутствии колебаний произошел бы примерно к 10-й секунде отсчета времени полета, или к 12-й секунде с момента запуска центральных двигателей и двигателей внутреннего кольца [4], в то время как длина этого интервала у ракеты Saturn V составляла всего $1.5 - 2$ секунды [6].

На финальном участке временного интервала набора полной тяги двигателями Raptor-2 происходит нарастание давления в их основной камере сгорания до номинального значения. При этом, до номинального значения увеличивается и перепад давления на кислородном насосе – параметре, сильно влияющем на частоту гидроакустических осцилляций в кислородном тракте. И чем ниже перепад, тем выше частота этих колебаний, см. таблицу 1. Впервые признаки «пого» возникли примерно на 4-й секунде полета при ускорении системы $2.5 - 3 \text{ м/с}^2$, а прекратились на 22-й секунде, когда ускорение аппарата стало не менее 6.5 м/с^2 . Таким образом, даже с учетом некоторого уменьшения массы, появление «пого» произошло при тяге около 0.8 от номинальной (с учетом $\sim 10 \text{ м/с}^2$ гравитационного ускорения). Этому режиму соответствует перепад давления на кислородном насосе около 135, что увеличивает частоту гидроакустических колебаний примерно на 12 %, см. таблицу 1.

В этом случае эта частота может быть близка к частоте упругих колебаний корпуса ракеты, что должно вызвать возникновение и рост «пого». Однако увеличение тяги двигателя и давления в его основной камере сгорания вскоре приводит к расхождению частот, и «пого» самопроизвольно гаснет. Таким образом, подобная модель объясняет как возникновение этих автоколебаний, так и их прекращение. Этот процесс, к счастью, просто не успевает развиваться до опасного или даже катастрофического уровня, что дважды происходило при IFT-2 позднее.

Однако, потенциально остается возможность, что при ином, неблагоприятном развитии событий, процесс автоколебаний типа «пого» может успеть это сделать. Например, если система наддува кислородного бака по какой-либо причине увеличит давление в нем на 20 – 25 %, тогда даже на номинальном режиме работы двигателей условия в линиях подачи кислорода окажутся таковы, что «пого» будет развиваться вплоть до разрушения ракеты, которое в таких случаях, обычно, сопровождается взрывом. Иной опасный вариант – внесение изменений в конструкцию первой ступени – ускорителя Super Heavy, приводящих к изменениям длины топливных магистралей, что изменит и частоты гидроакустических осцилляций. Кроме того, должно иметься еще немало различных случайных причин, предсказать которые заранее практически невозможно.

В связи с этим представляется целесообразным провести оценки последствий взрыва системы Starship на старте, так как вследствие описанных выше причин в таком взрыве нет ничего невозможного.

III. Формулы, применяемые при расчетах последствий взрывов и оценки энергии взрывов двух гигантских ракет

Основным поражающим фактором воздушного взрыва, который, как предполагается, произойдет в том случае, если процесс автоколебаний типа «пого» в первые 20 – 25 секунд полета системы Starship придет к своему естественному катастрофическому завершению, будет ударная волна. Избыточное давление на ее фронте Δp является достаточно адекватным показателем ее способности к разрушениям. Конечно, отражения и переотражения ударной волны, а также блокирования ее препятствиями, могут сильно повлиять на ее воздействие в случае сильно пересеченной местности и в застройке, состоящей из прочных бетонных сооружений, но в первом приближении, которым мы и ограничимся, этот простейший обобщенный показатель дает неплохое представление о том, что можно ожидать от данного взрыва.

Перепад давления на фронте ударной волны Δp определяется в первую очередь, энергией, выделившейся при взрыве E и расстоянием R от центра взрыва до рассматриваемой точки пространства. Причем для достаточно интенсивной ударной волны ($\sim \Delta p \geq 1 \text{ Па}$) из этих двух величин можно построить автомодельный параметр, приведенный радиус ξ

$$\xi = RE_e^{-\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

который и определяет зависимость Δp от энергии и расстояния (E_e – расчетная энергия взрыва, как она связана номинальной энергией E , описано ниже). Кроме того, для высотных взрывов на давление на фронте ударной волны влияет также его высота в связи со снижением давления окружающей среды. Но в рассматриваемом нами случае высоты взрыва таковы, что этим влиянием можно пренебречь.

Для оценки избыточного давления Δp в первом приближении удобно использовать так называемую формулу Садовского. Она является интерполяцией по параметру ξ экспериментальных данных и апробированным и широко известным способом определения избыточного давления на волне от взрыва [7]:

$$\Delta p = a\xi^{-1} + b\xi^{-2} + c\xi^{-3}, \quad (2)$$

где a , b и c – эмпирические коэффициенты, определенные для точечного взрыва тротила.

В такой модели оценки последствий взрыва следует различать наземные и воздушные взрывы. При воздушном взрыве (когда расстояние от эпицентра взрыва много меньше, чем его высота) его энергия распределяется во всем пространстве, и в формуле (1) расчетная энергия химического взрыва равна его номинальной величине: $E_e = E$. При наземном взрыве его энергия распределяется в полусфере, ограниченной снизу твердой поверхностью, и $E_e = 2E$. При ядерном взрыве только около половины энергии в рассматриваемых условиях переходит в энергию ударной волны, поэтому при воздушном ядерном взрыве $E_e = \frac{1}{2} E$, а при наземном ядерном взрыве $E_e = E$.

Оценим теперь энергию, которая могла бы выделиться при взрыве системы Starship на стартовом участке траектории. Масса топлива в его первой ступени – около 3.4 кт, а во второй – примерно 1.2 кт, то есть – всего около 4.6 кт [8]. Соотношение компонент – метана и кислорода составляет 1:3.6 [9] (при том, что стехиометрическое соотношение для этой пары горючего и окислителя – 1:4.0, то есть коэффициент избытка окислителя $\alpha = 0.90$), так что всего в ракете на старте должно быть около 1.0 кт метана. При удельных энергиях тротила – 4.18 МДж/кг и метана – 50.2 МДж/кг, тротильный эквивалент этого его количества горючего составляет 12.0 кт. Однако, по крайней мере, в основном взрыве, по-видимому, может быть задействован только метан из первой ступени, начинающей разрушаться вследствие возникновения «пого». Кроме того, кислорода из ее бака хватит на сгорание только на 0.9 от имеющегося количества метана, а кислород окружающего воздуха вряд ли успеет существенно повлиять на реакцию горения возникшей метан-кислородной смеси. Кроме того, из рис. 1 можно сделать вывод, что к 20 – 25 секунде полета, когда, предположительно, могли бы возникнуть условия для взрыва, около 10 % топлива уже успело превратиться в газы реактивной струи. В итоге, тротильный эквивалент взрыва первой ступени Super Heavy на 20 – 25 секунде полета на высоте 1 – 1.5 км можно оценить величиной $E = 7.0 - 7.2$ кт, что, с учетом того, что при ядерном взрыве в энергию ударной волны переходит половина энергии взрыва, по этому воздействию составило бы около 90 % от ядерного взрыва в Хиросиме с номинальной энергией $E = 16 \pm 2$ кт [10].

Это, по-видимому, близкая к максимальной оценка количества энергии топлива системы Starship, которая могло быть преобразовано в энергию взрыва. Но, попытаемся решить этот вопрос настолько тщательно, насколько это сейчас возможно. Для этого необходимо рассмотреть наиболее близкий аналог к исследуемому нами гипотетическому событию, и для него проделать все манипуляции, связанные с расчетами совершенно аналогичным образом.

Как известно, 3 июля 1969 года во время второго пуска советской лунной ракеты Н1 за первые 12 секунд полета произошел каскадный отказ 29 ее двигателей, а оставшийся в работе единственный двигатель развернул ее поперек, и на 23-й секунде она плашмя упала стартовую позицию с высоты около 100 м и взорвалась. «В результате крупнейшего в истории ракетостроения взрыва стартовый стол был практически разрушен, а расположенный неподалёку с ним второй стартовый стол сильно поврежден» [11]. Имеет смысл сравнить последствия того давнего взрыва, с тем, что можно было бы ожидать от взрыва системы Starship над ее стартовой позицией.

Масса топлива ракеты Н1 в ее первой ступени составляла 1.75 кт, а всего – 2.43 кт [11] при соотношении компонент – керосина и кислорода в его двигателях НК-15/НК-33 – 1:2.62, при этом коэффициент избытка окислителя оказался равен $\alpha = 0.769$ [12]. Поэтому в первой ступени имелось 0.48 кт горючего из общего количества 0.67 кт (0.68 кт по другим данным), но сгорание только 0.37 кт керосина из баков первой ступени было обеспечено имевшимся там кислородом. Удельная теплота сгорания керосина – 42.9 МДж/кг, и максимально возможный тротильный эквивалент взрыва ее топлива – $E = 6.9 - 7.0$ кт. С учетом всех

факторов, описанных выше при оценке энергии взрыва системы Starship, энергию этого взрыва можно аналогично оценить величиной $E \approx 3.5$ кт, то есть около половины энергии максимально возможного взрыва, а также половиной от проведенной выше энергии взрыва системы Starship.

Разброс имеющихся оценок энергии взрыва Н1 из различных источников (см., например, [13, 14]) настолько велик – от 0.25 кт до 7 кт, что сам по себе указывает на абсолютную невозможность полагаться на них. Для того, чтобы достичь заявленных в работе целей, необходимо построить прозрачную, достоверную и опирающуюся на надежные экспериментальные данные процедуру для определения энергии, выделяющейся при подобных взрывах больших ракет.

По существу эти взрывы подобны тому, что можно наблюдать при работе боеприпасов объемного взрыва: сначала первым небольшим зарядом обычного твердого взрывчатого вещества разрушается канистра, содержащая горючую субстанцию, им же она распыляется в воздухе, и в образовавшемся облаке аэрозоля через ~ 150 миллисекунд вторым небольшим зарядом создается волна детонации [15]. В таких боеприпасах обычно используются горючие субстанции типа окиси этилена с удельной теплотой сгорания около 30 МДж/кг, и тогда из характеристик известной авиабомбы ОДАБ-9000 (масса заряда – 7.1 т, тротильный эквивалент – 44 т) [16] следует оценка, что при ее взрыве детонирует около 85 % основного взрывчатого вещества.

У больших ракет масса горючего на 1.5 – 2 порядка больше, но и время создания облака объемного заряда составляет, обычно, несколько секунд, что тоже на 1.5 порядка больше, чем у боеприпасов объемного взрыва. Кроме того, в рассматриваемых нами случаях перемешивание горючего происходит, в основном, не с атмосферным воздухом, а с бурно испаряющимся во время уже начавшегося в ракете пожара криогенным кислородом, что должно резко увеличить скорость перемешивания компонент облака. Поэтому взрыв с участием в нем порядка 50 % горючего из вскрытых первоначальными взрывами баков ракеты, представляется вполне возможным. Тем более что даже в источнике [13] упоминается об оценке взрыва ракетной ступени при детонации 60 % всего горючего, находившегося в ней. При этом пожар, возникающий при разрушении двигателей, может вызвать детонацию зарядов систем аварийного подрыва, которые и создадут детонационную волну в облаке из компонент топлива.

Так что оценки энергии взрыва ракет Н1 и Starship на старте с тротильным эквивалентом 3.5 кт и 7.0 кт соответственно могут быть приняты к рассмотрению для дальнейшего анализа.

IV. Определения расстояний от эпицентра возможного взрыва на стартовой позиции SpaceX до ближайших поселений, а также подобных дистанций на космодроме Байконур

Для того, чтобы понять, к каким последствиям может привести ударная волна от предполагаемого взрыва системы Starship на старте в некоторых ближайших к нему поселениях округа Камерон штата Техас, с помощью ресурса <https://www.google.com/maps> определим расстояния от стартовой позиции до них.

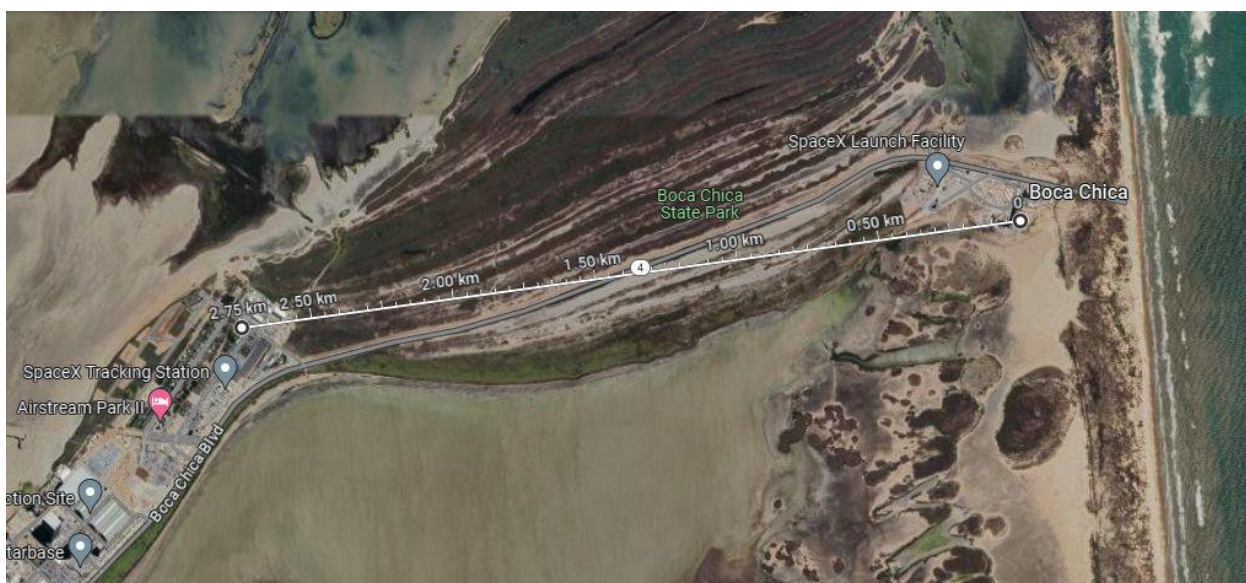


Рис. 2 – Расстояние от старта до Бока Чики

На рис. 2 видно, что расстояние до окраины жилой зоны ближайшего поселения с небольшим количеством жителей – Бока Чики равно 2.75 км, а до центра Порт Исабель – ближайшего городка с населением около 5 тысяч человек [17], – 10 км, см. рис. 3.

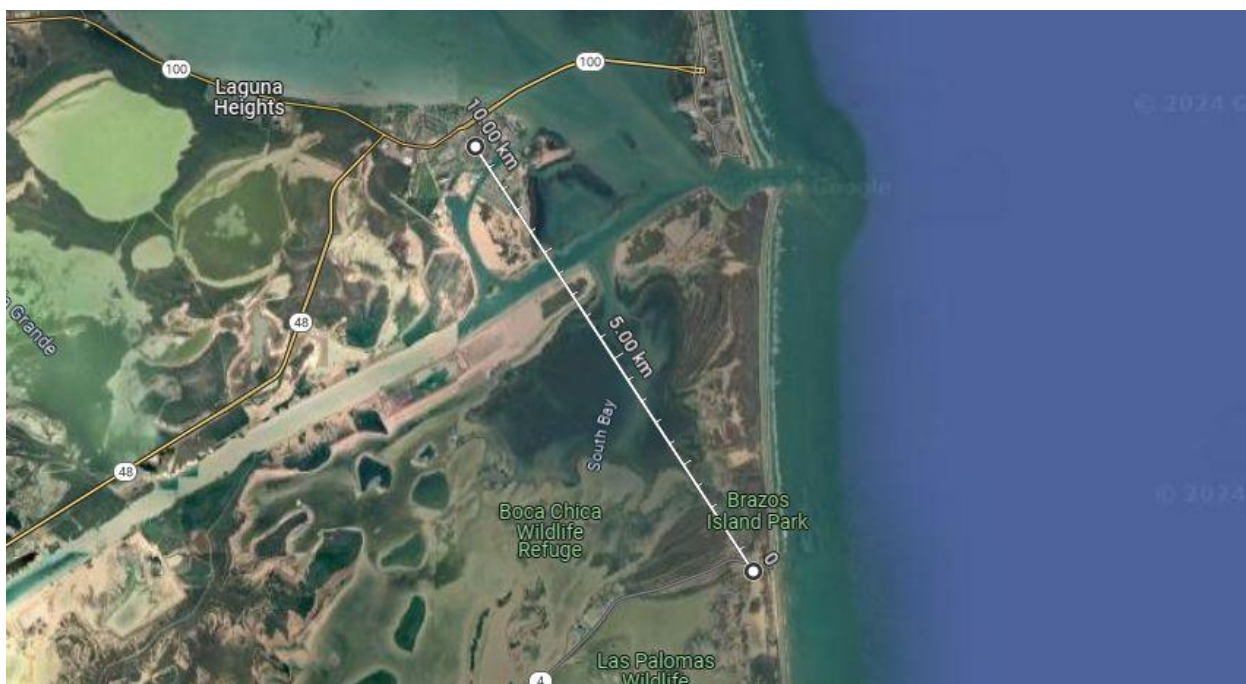


Рис. 3 – Расстояние от старта до города Порт Исабель

До центра крупнейшего города округа – Браунсвилла с населением около 190 тысяч жителей [18] от стартовой позиции примерно 32.5 км. Сразу же за рекой Рио-Гранде лежит еще более крупный мексиканский город Матаморос, где живет 540 тысяч человек [19], и расстояние до его центра – примерно 37 км, см. рис. 4.

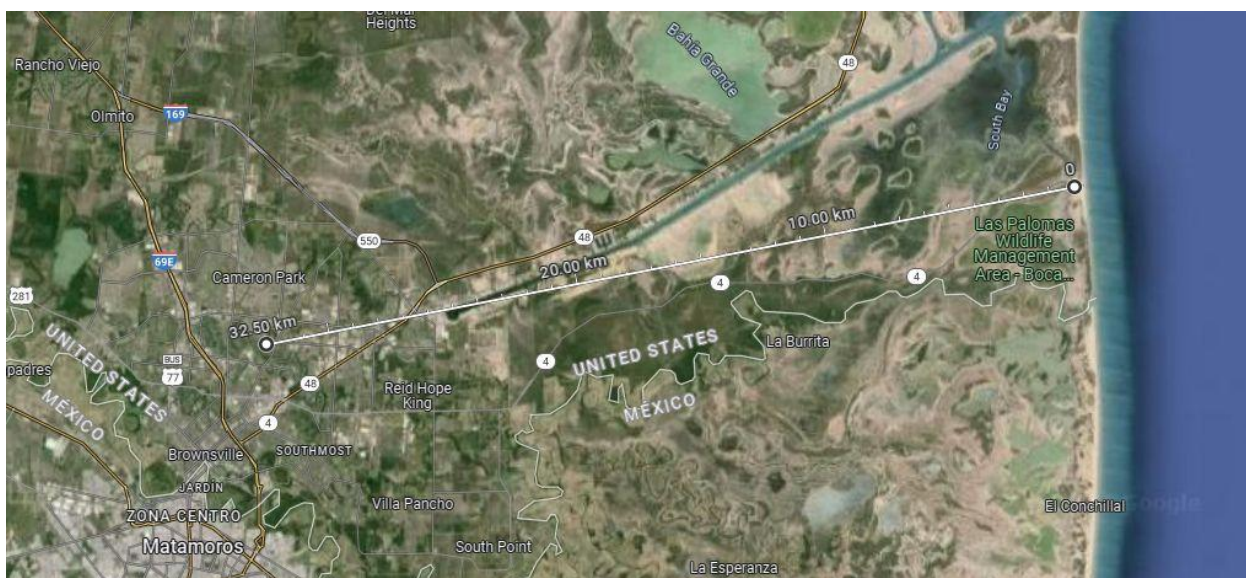


Рис. 4 – Расстояние от старта до города Браунсвилл

На другом конце Земли – на обширной территории космодрома Байконур удалось найти 3 точки, где так или иначе были описаны последствия взрыва, произошедшего 3 июля 1969 года на правой стартовой позиции ракеты Н1 в комплексе сооружений, называемом 110 площадкой, см. рис. 5 [14].

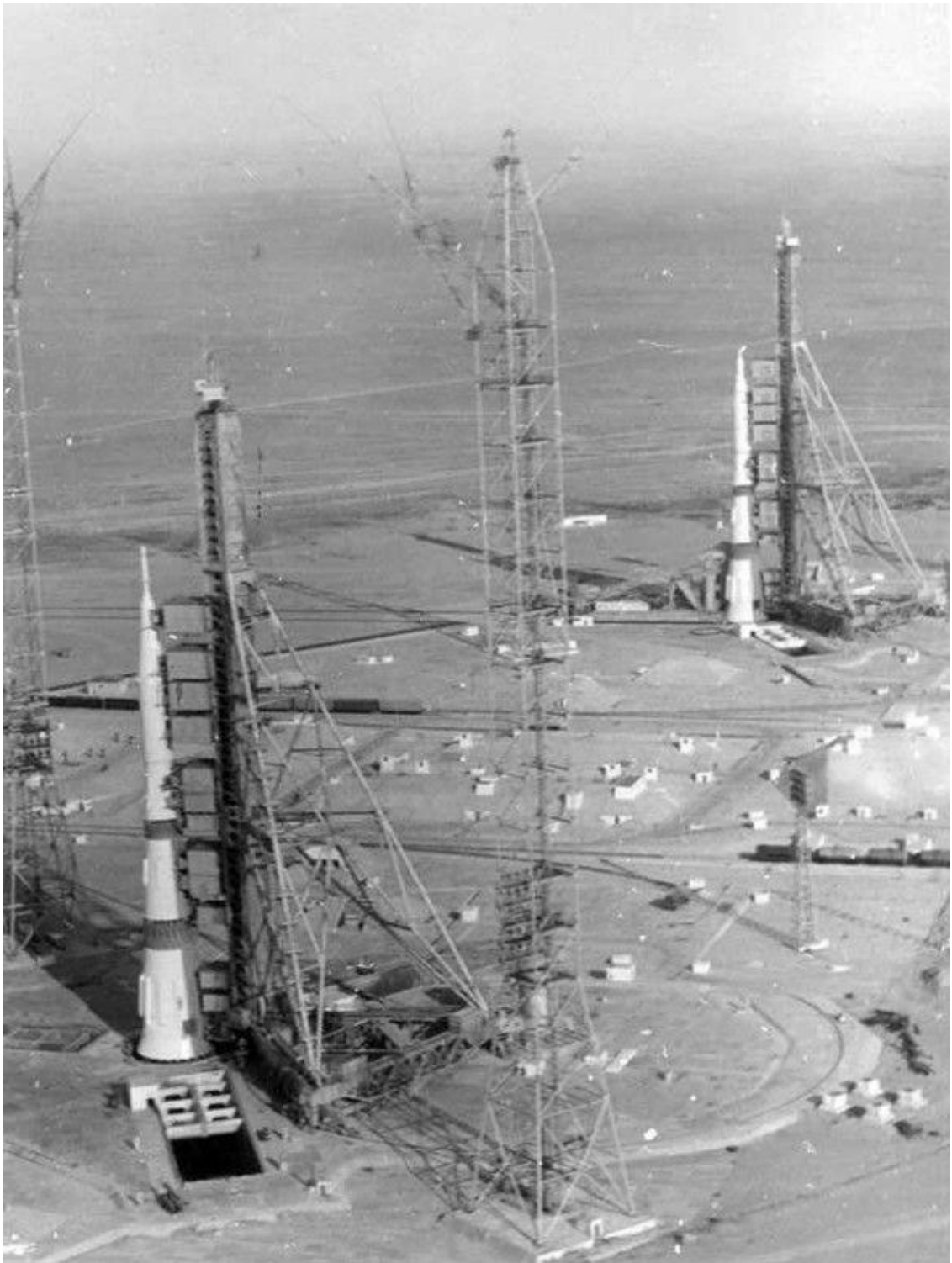


Рис. 5 – Две ракеты Н1 на стартовых позициях [14]

Современное состояние этого места можно увидеть на рис. 6. Расстояние между еще существующей, но перестроенной левой стартовой позицией советской лунной ракеты Н1, и полностью разрушенной правой, – 1.1 км, определено с использованием обеих представленных здесь фотографий, а также других спутниковых фотографий площадки 110 после взрыва.



Рис. 6 – Расстояние между двумя бывшими стартовыми позициями ракеты Н1 – перестроенной и разрушенной

Кроме того, имеются данные о разбитых оконных стеклах, являющихся самым надежным не инструментальным показателем интенсивности ударной волны с перепадом давления на ней в диапазоне ~ 0.5 – 5 кПа: в жилой зоне 95-й площадки космодрома, центр которой находится точно на западе на расстоянии около 28.8 км от точки взрыва, и в городе Байконуре, лежащем почти точно на юге (42.3 км до описываемой точки – гостиницы «Космонавт»), см. рис 7.



Рис. 7 – Расстояния между стартовой позицией ракеты Н1 и жилой зоной 95-й площадки, а также гостиницей космонавтов в Байконуре (Ленинске)

Представленных в этом и в предыдущем разделах данных достаточно для того, чтобы верифицировать описываемый способ оценки энергии взрывов ракет-носителей, а также, а также для оценки возможных последствий предполагаемого взрыва системы Starship для ближайших к нему населенных пунктов.

Следует отметить, что топографические условия как прибрежных территорий округа Камерон, так и полупустыни в окрестностях космодрома Байконур способствуют точности пересчета данных по распространению ударной волны. Обе эти территории – плоские равнины без каких-либо естественных препятствий, которые могли бы повлиять на ее распространение. И расстояние до расчетных точек в Техасе и Мексике и реперных точек на Байконуре отличаются не слишком сильно. Более того, с учетом практически непреложного факта, что тротилловый эквивалент возможного взрыва системы Starship должен быть примерно вдвое больше, чем у Н1, получается, что эквивалентные дистанции поражения для техасского и мексиканского округов в $2^{1/3} \sim 1.25$ раза больше, чем для российского космодрома, и при таком взрыве и тех же последствиях жилая зона 95-й площадки должна была бы находиться на расстоянии около 36 км от эпицентра, что как раз и соответствует берегу реки Рио-Гранде между городами Браунсвилл и Матаморос. Так что для этих городов, собственно говоря, и считать ничего не надо. Достаточно просто узнать, что было на 95-й площадке космодрома Байконур 3 июля 1969 года. После этого остается только сказать, что, хоть Господь Бог, по словам А. Эйнштейна и не злонамерен, но, судя по этому эпизоду, шутить он умеет.

V. Определение величины энергии взрыва ракеты Н1

В разделе III данной работы была получена оценка энергии взрыва ракеты Н1 в предположении, что основной взрыв, который определял разрушения от ударной волны, был обусловлен смесью основных компонент топлива в том количестве, которое было в первой ступени на момент взрыва, причем лимитирующим фактором было количество кислорода в ее баках. При таком условии энергия взрыва оказывается около значения $E = 3.5$ кт ТНТ, что соответствует тому, что во время взрыва произошла детонация 50 % горючего. Однако, существуют и другие оценки, вплоть до 0.25 кт [13]. Поэтому, на основе информации, представленной выше, проведем расчеты трех вариантов величины тротилового эквивалента этого взрыва: 3.5 кт, 0.25 кт (детонация ~ 3.5 % процентов горючего), а также средней его величины – 1.0 кт (детонация ~ 15 % горючего). И после этого сравним эффекты для вычисленных уровней перепада давления на ударной волне с аналогичными эффектами от нескольких взрывов, достаточно подробно описанных в литературе. Так как уровни энергии для рассматриваемых трех вариантов описания взрыва Н1 отличаются друг от друга в 3.5 – 4 раза для каждой ближайшей пары, то для заданной точки перепада давления на волне у них будут различаться в 1.5 – 1.6 раза, что бывает заметно даже без использования измерительных приборов. По этим данным и произведем отбор варианта, наилучшим образом соответствующего наблюдавшимся явлениям.

В таблице 2 приведены расчетные значения Δp для трех указанных выше значений энергии взрыва (Н1-1, Н1-2 и Н1-3) на трех описанных выше дистанциях. Приведены также данные о взрыве первой американской урановой ядерной бомбы Малыш (Little Boy – LB) над японским городом Хиросима [10], первым советским двухступенчатым термоядерным зарядом РДС-37, взорванным в тех же казахских степях [20], где спустя 14 лет произошёл и взрыв Н1, а также о самом мощном рукотворном взрыве – тем, что выдал советский термоядерный заряд АН602 («Царь-бомба» или «Кузькина мать») [21]. Расчеты проводились по методике, описанной в разделе III. Коэффициенты в формуле (2) были стандартными: при энергии в мегатоннах и расстоянии в километрах $A = 0.084$, $B = 0.270$ и $C = 0.700$ [7].

Таблица 2

N	Объект	E (кт)	L (км)	H (км)	R (км)	Δp (кПа)
1	LB	16	0.16	0.58	0.60	83
2			1.10	0.10	1.10	42
3	Н1-1	3.5		0.0		26
4	Н1-2	1.0				14
5	Н1-3	0.25				7.7
6	LB	16	19	0.58	19	1.2
7	РДС-37	1600	175	1.55	175	0.57
8	Н1-1	3.5	28.8	0.0	28.8	0.57
9	АН602	58000	810	4.2	810	0.41
10	Н1-1	3.5	42.3	0.0	42.3	0.39
11	Н1-2	1.0	28.8		28.8	0.37
12			42.3		42.3	0.25
13	Н1-3	0.25	28.8		28.8	0.23
14			42.3		42.3	0.16

В таблице E – это энергия взрыва в килотоннах тротилового эквивалента, L – расстояние в километрах от эпицентра взрыва до рассматриваемой точки поверхности, H – высота взрыва и R – расстояние от центра взрыва в тех же единицах измерения, Δp – избыточное давление на фронте ударной волны в килопаскалях.

Группа из первых 5 расчетных вариантов этой таблицы связана с анализом последствий взрыва ракеты Н1 в его ближайшей окрестности. Первый расчетный случай, рассмотрение которого необходимо для определения масштаба разрушений, относится к так называемому Атомному Дому или Куполу Гэмбаку [10, 22]. Это железобетонное сооружение оказалось всего в 160 м от эпицентра взрыва Малыша. Избыточное давление ударной волны величиной около 80 – 85 кПа не разрушило полностью бетонную коробку этого здания, см. рис.8 [22]. Стандартные оценки таковы: среднее разрушение сейсмостойких зданий происходит при $\Delta p = 80 – 120$ кПа [23], и это, как будто бы, вполне соответствует наблюдаемой картине.

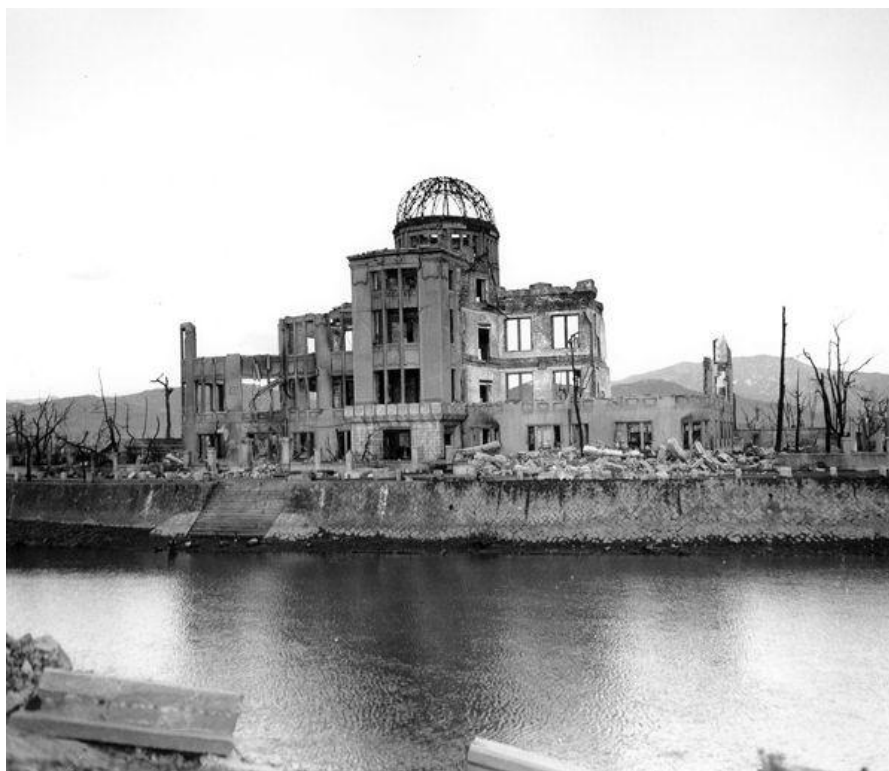


Рис. 8 – Атомный дом в Хиросиме [22]

Если бы эта ядерная бомба взорвалась на правой стартовой позиции для запуска Н1, то уровни перепада давления на левой позиции были бы, примерно, в 2 раза меньше, см. строку 2 таблицы 2 (на для большего подобия воздействия точечного и объемного взрывов, бомба должна была бы поднята над правой стартовой позицией примерно в центр облака топливной смеси, но уже при расстояниях более 1 км это практически не влияет на получаемые данные). Вариант Н1-1 приводит к их снижению еще в 1.5 раза, а в вариантах Н1-2 и Н1-3 силовое воздействие на сооружения левой стартовой позиции падает еще в 2 и 3.5 раза. При этом утверждается, что «второй стартовый стол [был] сильно поврежден» [11]. Однако, также известно, что уже 21 августа 1969 года на левую стартовую позицию был вывезен макетный экземпляр ракеты М1 и его заправляли кислородом. Таким образом, повреждения левого старта, расположенного на расстоянии около 1.1 км от эпицентра взрыва, хоть и были довольно значительными, но за 7 недель их удалось полностью устранить.

При этом силовое воздействие от перепада давления, представленного в 3-й – 5-й строках таблицы 2, описывается следующим образом: при уровнях избыточного давления 20 – 30 кПа происходит полное разрушение деревянных домов, сильное разрушение кирпичных многоэтажных домов, среднее разрушение кирпичных складов и панельных домов, а также слабое разрушение административных каркасных зданий. При 15 – 25 кПа – среднее разрушение малоэтажных кирпичных домов. Слабое разрушение деревянных домов наблюдается при 6 – 8 кПа [23]. Достаточно ясно, что силовое воздействие перепада давления в 7 – 8 кПа, соответствующее варианту Н1-3 на стальные и, в основном, заглубленные, железобетонные конструкции позиции, которая должна была выдерживать старт такой ракеты как Н1, будет совершенно ничтожным, и этот вариант следовало бы сразу исключить из рассмотрения. Да и вариант Н1-2, воздействие ударной волны при котором находится между «средним разрушением малоэтажных кирпичных домов» и «слабым разрушением деревянных домов», представляется весьма сомнительным. Но, пока, все же оставим их для дальнейшего рассмотрения.

Перейдем теперь к существенно более низким уровням давления на волне, хорошим индикатором для которых являются разбитые оконные стекла. Строка 6 таблицы 2 снова нас возвращает к взрыву Малыша. Известно, что в 6 августа 1945 года в Хиросиме были разбиты стекла в радиусе не менее 19 км [10]. По расчетам это соответствует уровню давления $\Delta p \approx 1.2$ кПа, что значительно превышает минимальное давление, при котором оконные стекла еще разбиваются. Однако, все объясняется просто – Хиросима находится низменной дельте реки, которую окружают горы, и по карте высот видно, что нет ни одного направления, где бы ударная волна могла бы беспрепятственно распространяться на большее расстояние (см. рис. 9, где длина лучей, выходящих из эпицентра взрыва равна 19 км). Поэтому данный результат никак не противоречит всем последующим, где данные были получены для плоских равнин без заметных препятствий или для обширных водных пространств.

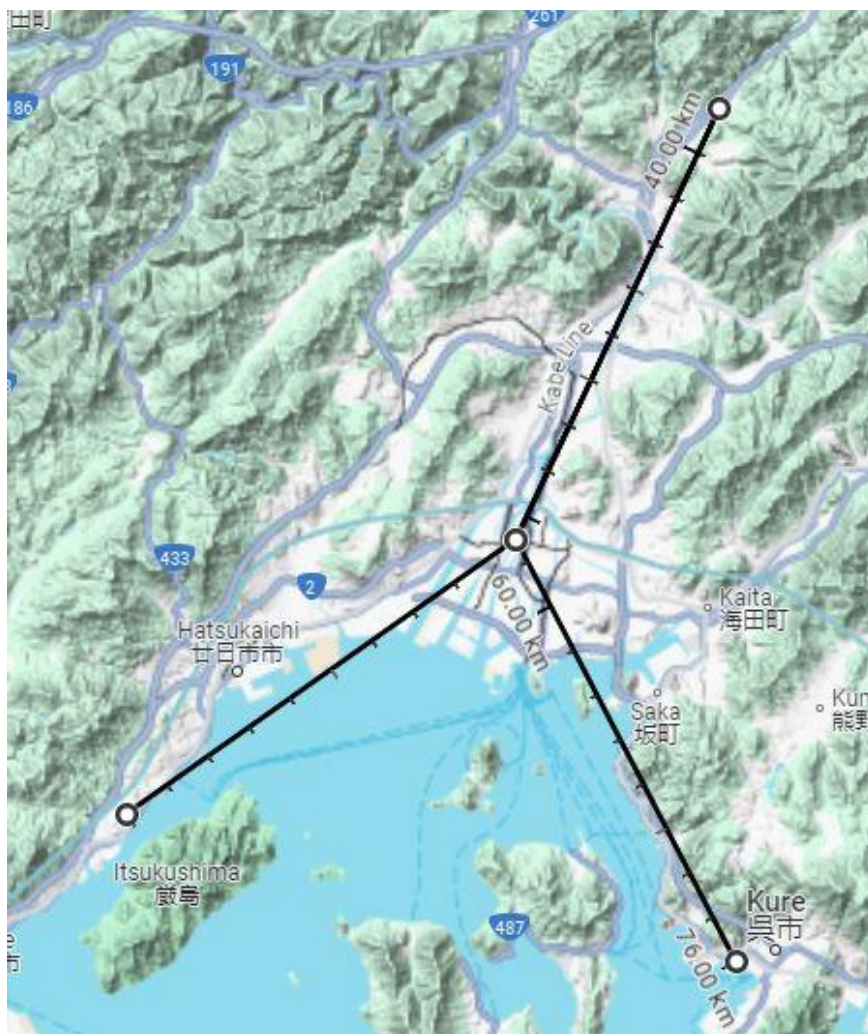


Рис. 9 – Рельеф в окрестностях Хиросимы

Как уже упоминалось выше, расстояние 28.8 км – это удаление от эпицентра взрыва Н1 жилой зоны 95-й площадки космодрома Байконур. Там были построены четырехэтажные дома. По рассказам ветеранов, в их окнах, расположенных, в основном, на четвертых этажах и направленных на 110-ю площадку, частично были выбиты стекла, что хорошо соответствует тому, что наблюдалось при других взрывах при уровне давления 0.5 – 0.6 кПа (см. строку 8 таблицы 2).

В работе [24] из множества источников был собрано большое количество информации о последствиях различных взрывов. Например, строка 7 таблицы 2 соответствует взрыву на Семипалатинском полигоне термоядерного заряда РДС-37. Дистанция 175 км – расстояние до западных окраин Семипалатинска (ныне – город Семей). Там, по сообщениям местных властей, были разбиты стекла и 16 раненых попросили медицинской помощи [24]. Строка 9 – взрыв «Царь-бомбы». Дистанция 810 км – это расстояние до острова и поселка Диксон. «С Диксона ... пост доложил, что взрыв был виден, и внезапно до них дошла небольшой силы воздушная ударная волна, в нескольких домах потрескались оконные стекла. Через день восстановительная партия вставила все оконные стекла – даже те, которые были выбиты раньше до испытаний» [24]. Этот уровень давления, около 0.4 кПа (по более точным оценкам ~ 0.35 кПа), является нижней границей сколько-нибудь заметного разбития оконных стекол, зафиксированной в отчетах о ядерных испытаниях.

Космонавт-испытатель Анатолий Воронов вспоминал, что при подготовке ко второму запуску ракеты Н1 присутствовали космонавты. Поздно вечером они наблюдали ее старт из гостиницы космонавтов: «Вдруг вспыхнуло, мы успели сбежать вниз, и в это время ударной волной выбило все стекла» [25]. Расстояние между стартовой позицией и гостиницей «Космонавт» составляло 42.3 км. То, что в гостинице, по словам Воронова, «выбило все стекла», на первый взгляд представляется явным, преувеличением, которое свойственно многим свидетельствам о различных происшествиях. Ведь тогда, казалось бы, немало стекол было бы выбито и по всему городу, о чем нет никаких данных – в других местах города битые стекла не отмечаются. Кроме того, на дистанции 42.3 км от эпицентра максимально возможного взрыва (вариант

Н1-1) давление на волне, по оценке, оказалось даже на 10 % ниже, чем на Диксоне 30 октября 1961 года, и, практически, было на нижней границе рассматриваемого эффекта.

Однако, может быть, космонавт в своих воспоминаниях был отчасти и прав. Дело в том, что здание гостиницы в плане подобно букве L, внутренний угол которого открыт к набегавшей тогда со 110-й площадки ударной волне. Кроме того в этом пространстве от L-образного корпуса гостиницы стоит еще одно прямоугольное здание, см. рис. 10 (прямая линия с отметкой на конце «42.30 km» показывает направление распространения ударной волны). При уровнях давления на ударной волне ~ 0.4 кПа, ее свойства мало отличаются от свойств звуковой волны, дифракция которой на препятствиях сложной формы приводит к интерференции волн и значительным колебаниям давления в окрестностях препятствий, что и могло привести к разрушению стекол в узком коридоре между корпусами. Нечто подобно, но в многократно большем масштабе, произошло на острове Новая Земля после взрыва термоядерного заряда АН602, когда был полностью разрушен расположенный в горной котловине поселок Лагерный при умеренном номинальном давлении на фронте ударной волны, см. далее.



Рис. 10 – Вид сверху на гостиницу, в которой во время взрыва Н1 были разбиты стекла

Из приведенных в таблице 2 данных следует, что варианты взрыва 3 июля 1969 года, с индексами Н1-2 и, тем более, Н1-3 оказываются неспособными обеспечить описываемые уровни разрушения остекления на 95-й площадке. А в городе Байконуре даже вариант Н1-1 оказался близок к нижней границе такого воздействия, на которой разрушения обычно стекол происходят при их неплотном закреплении или в местах с особыми условиями, где возможно усиление волны из-за интерференции волн при сложном их взаимодействии с препятствиями. Поэтому тротильный эквивалент взрыва ракеты Н1 во втором полете не может быть сколько-нибудь заметно меньше, чем 3.5 кт, что соответствует детонации ~ 50 % горючего.

VI. Оценки давления на фронте ударной волны после предполагаемого взрыва системы Starship и демонстрация разрушений при близких уровнях давления от ранее случившихся взрывов

Из всей информации, представленной в разделах I – V данной работы следует, что наиболее вероятное значение энергии взрыва системы Starship в первые 20 – 25 секунд полета близка к 7 кт ТНТ. Используя представленные ранее данные по удаленности ближайших поселений округов Камерон и Матаморас от стартовой позиции, по формуле Садовского (1, 2) рассчитаем давления на фронте ударной волны в этих

населенных пунктах и сравним возможные разрушения с теми, которые ранее наблюдались при близких уровнях давления, см. таблицу 3.

Строки 1 и 2 таблицы 3 соответствуют возможным разрушениям в ближайшем небольшом поселении Бока Чика. Величина $L = 2.6$ км – это расстояние от эпицентра возможного взрыва до крупных сооружений в виде ангаров, видимо, торгового назначения, расположенных на восточной окраине Бока Чики, а $L = 2.75$ км – расстояние до жилой зоны. При таких дистанциях взрыв является промежуточным между сферически симметричным воздушным взрывом и наземным взрывом, распространяющимся в полусфере, и при $L = 2.6$ км эта оценка находится в пределах $7.3 < \Delta p < 9.7$ (кПа). Тогда давление на фронте ударной волны представим в виде $\Delta p = 8.5 \pm 1.2$ кПа при $L = 2.6$ км и $\Delta p = 8.0 \pm 1.15$ кПа при $L = 2.75$ км.

Таблица 3

N	Объект	E (кТ)	L (км)	H (км)	R (км)	Δp (кПа)
1	SH	7.0	2.60	1.0	2.79	8.5 ± 1.2
2	SH	7.0	2.75	1.0	2.93	8.0 ± 1.15
3	РДС-37	1600	16.0	1.55	16.1	7.8
4	АН602	58000	53.5	4.2	53.7	7.7
5	ЧМ	57000	39.5	28.2	48.5	7.5 ± 0.5
6	SH	7.0	10.0	1.0	10.0	2.2
7	Questa	670	39.7	1.6	39.7	2.0
8	РДС-37	1600	54.5	1.55	54.5	1.9
9	SH	7.0	32.5	1.0	32.5	0.64
10	РДС-37	1600	175	1.55	175	0.57
11	Н1-1	3.5	28.8	0.0	28.8	0.57
12	SH	7.0	37.0	1.0	37.0	0.56

Ближкие уровни давлений были вычислены в трех точках, где имеются данные о разрушениях, при взрывах двух советских термоядерных зарядов РДС-37 и АН602, а также Челябинского метеороида (ЧМ) на различных, значительно больших дистанциях, см. строки 3 – 5 таблицы 3. Данные по давлению для метеороида $\Delta p = 7.5 \pm 0.5$ кПа были получены по наземным измерениям [26], а энергия его взрыва была вычислена по этим данным с помощью более сложной, чем рассматриваемая здесь, расчетной модели [24].



Рис. 11 – Разрушенный при воздушном взрыве метеороида корпус Челябинского цинкового завода 15 февраля 2013 года [27]

Из рис. 11 видно, что перепад давления на волне ~ 7.5 кПа может приводить к довольно масштабным разрушениям [27]. Это означает, что те ангары на восточной окраине Бока Чики при рассматриваемом инциденте вполне могут сложиться. Что может произойти с частными строениями Бока Чики, можно увидеть на рис. 12 [28]. Этот дом находился в 16 км от эпицентра взрыва РДС-37, и перепад давления на волне там был около $7.5 - 8$ кПа.



Рис. 12 – Разрушения дома испытателей Семипалатинского полигона [28]

Еще один пример – полное разрушение поселка Лагерный, построенного за 6 лет до испытаний «Царь-бомбы» на берегу острова пролива Маточкин Шар на острове Новая Земля, и который был полностью разрушен при испытаниях 30 октября 1961 года боезаряда АН602. «Остались стоять лишь только кирпичные трубы, да баня, построенная шахтерами еще в 1959 году из толстых бревен, на берегу речушки Шумилихи» [29]. Однако, здесь воздействие ударной волны на сооружения было значительно усилено ее отражениями и переотражениями из-за сложной топографии местности [24], чего, скорее всего, не может иметь места в Бока Чике.

Интересно также отметить, что описываемый возможный инцидент со взрывом системы Starship на малой высоте является довольно точной моделью взрыва Челябинского метеороида с уменьшением всех линейных размеров примерно в 20 раз и, соответственно, энергии взрыва в 8000 раз. Что это, как не вторая шутка Господа Бога в этой еще не состоявшейся истории?

Рассмотрим теперь бóльшие удаления от эпицентра взрыва, соответствующие положению городка Порт Исабель, лежащего примерно в 10 км от стартовой позиции, см. строки 6 – 8 таблицы 3. Следует сказать, что Questa – это американский термоядерный заряд, взорванный 4 мая 1962 года над Тихим океаном около острова Рождества (сейчас Киритимати) на расстоянии 39.7 км от аэродрома и палаточного городка испытателей [30]. Все самолеты, стоявшие на аэродроме, а также палатки, расположенные рядом, при таком уровне давления на ударной волне, по имеющимся данным, не пострадали. А вот при взрыве РДС-37 это было не так. На расстоянии 54.5 км от эпицентра взрыва находился поселок Майский, в котором получили ранения осколками стекол часть из 26 человек, пострадавших при взрыве в этом и в соседних несколько более удаленных (до 57 км) населенных пунктах [24]. Так что при уровне перепада давления на волне $\Delta p \approx 2$ кПа значительных разрушений зданий не бывает, но оконные стекла могут быть разбиты в достаточно больших количествах, и при этом немало людей получают ранения.

И последняя группа оценок с уровнем перепада давления $\Delta p \approx 0.6$ кПа. Здесь можно говорить практически только о разрушении стекол, и оно тоже уже только частичное. Строки 10 и 11, относящиеся к Семипалатинску (РДС-37) и 95-й площадке Байконура (Н1-1), уже были приведены в таблице 2 и описаны. А строки 9 и 12 описывают уровни давления при возможном взрыве системы Starship в городах Браунсвилл и Матаморос. Как видно из таблицы 3 в Браунсвилле следует ожидать разбития стекол, видимо, несколько большего, чем на 95-й площадке космодрома Байконур, особенно во время дневного бриза, дующего с моря, который может усиливать воздействие ударной волны, а Матаморос – с рассматриваемой точки зрения является практически аналогом 95-й площадки, но тоже, видимо, до тех пор, пока не подует дневной бриз.

Поэтому, можно полагать, что достаточно большое количество разбитых стекол и, как минимум, десятки раненых, здесь вполне возможны, так как обычные жители отличаются от населявших 95-ю площадку сотрудников космодрома, которых к тому же там было в несколько тысяч раз меньше, чем здесь. Да и в Семипалатинске в 1955 году население было, примерно, в 5.5 раз меньше, чем в Браусвилле и Матаморасе [31], но не менее чем полутора десяткам раненых там пришлось обратиться за медицинской помощью. В Порт Исабель все будет еще несколько хуже, а поселение Бока Чика, видимо, второй раз в своей истории, будет полностью разрушено [32].

Выводы

1. Было показано, что процесс автоколебаний типа «пого», возникающий и гаснущий на старте системы Starship, при неблагоприятном развитии событий может привести к взрыву ракеты над стартовой позицией.
2. Анализ действия боеприпасов объемного взрыва, данные, характеризующие разрушения от ударной волны для пяти ранее проведенных и случившихся естественным образом крупных и очень крупных взрывов, а также информация о разрушениях под действием взрыва гигантской советской ракеты Н1 на космодроме Байконур, позволили определить его энергию, а также оценить энергию возможного взрыва системы Starship на старте.
3. Из этих данных были определены уровни возможных разрушений в ближайших к стартовой позиции системы Starship населенных пунктах и городах округа Камерон штата Техас и муниципалитета Матаморос Мексики, а также возможное там количество раненых.

Литература

1. Ю. И. Лобановский – Причины аварий обеих ступеней системы Starship во втором полете. *Synerjetics Group*, 04.12.2023, 10 с. // http://www.synerjetics.ru/article/second_flight.pdf
2. Ю. И. Лобановский – Механизм взрыва первой ступени системы Starship во время ее возвратного маневра. *Synerjetics Group*, 12.01.2024, 11 с. // <http://www.synerjetics.ru/article/boostback.pdf>
3. Ю. И. Лобановский – Механизм взрыва второй ступени системы Starship во втором полете на финише ее разгона. *Synerjetics Group*, 18.01.2024, 7 с. // http://www.synerjetics.ru/article/second_stage.pdf
4. SpaceX Starship launches on 2nd integrated test flight, booster explodes after separation. *VideoFromSpace*, 18 November 2023 // <https://www.youtube.com/watch?v=s-ZwEIJpTTs>
5. Re: SpaceX Starship IFT-2: Starbase TX: 18 Nov 2023 UPDATES, Reply #248, 19 November 2023 // <https://forum.nasaspacespaceflight.com/index.php?topic=59870.msg2541720#msg2541720>
6. Ю. И. Лобановский – Причина отказов двигателей Super Heavy во время статических тестов. *Synerjetics Group*, 05/18.11.2023, 5 с. // http://www.synerjetics.ru/article/ground_tests.pdf
7. Физика взрыва, под ред. Л. П. Орленко, т. 1. Москва, Физматлит, 2002, 832 с.
8. SpaceX Starship. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_Starship
9. SpaceX Raptor. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_Raptor
10. Atomic bombings of Hiroshima and Nagasaki. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/Atomic_bombings_of_Hiroshima_and_Nagasaki
11. H-1. *Wikipedia* // <https://ru.wikipedia.org/wiki/H-1>
12. Ю. И. Лобановский – Законы сохранения и феноменология ракетных двигателей. *Synerjetics Group*, 30.06.2008, 21 с. // http://www.synerjetics.ru/article/rocket_engines.pdf
13. D. A. Day – Saturn's Fury: Effects of a Saturn V Launch Pad Explosion. *QUEST*, 9:4, 2002.
14. Б. Славолубов – Космодром Байконур – первый космодром в мире. *Spacegid.com*, 05.02.2018 // <https://spacegid.com/kosmodrom-baykonur.html>
15. Боеприпасы объемного взрыва. *Wikipedia* // https://ru.wikipedia.org/wiki/Боеприпасы_объёмного_взрыва
16. Авиационная вакуумная бомба повышенной мощности. *Wikipedia* // https://ru.wikipedia.org/wiki/Авиационная_вакуумная_бомба_повышенной_мощности
17. Port Isabel, Texas. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/Port_Isabel,_Texas
18. Brownsville, Texas. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/Brownsville,_Texas
19. Municipio de Matamoros (Tamaulipas). *Wikipedia* // [https://es.wikipedia.org/wiki/Municipio_de_Matamoros_\(Tamaulipas\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Municipio_de_Matamoros_(Tamaulipas))
20. РДС-37. *Wikipedia* // <https://ru.wikipedia.org/wiki/РДС-37>
21. Царь-бомба. *Wikipedia* // <https://ru.wikipedia.org/wiki/Царь-бомба>
22. Under a Mushroom Cloud. Hiroshima, Nagasaki, and the Atomic Bomb. *Japanese American National Museum* // <https://www.janm.org/exhibits/under-a-mushroom-cloud>
23. Атмосферный ядерный взрыв. *Wikipedia* // https://ru.wikipedia.org/wiki/Атмосферный_ядерный_взрыв
24. Ю. И. Лобановский – Челябинский метеороид: критика источников и обоснование выводов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, # 7, 14.06.2016, 40 с. // <https://engjournal.ru/articles/1497/1497.pdf>

25. А. И. Первушин – Ракета-носитель «Н-1»: история катастроф, в кн. Битва за звезды-2. Космическое противостояние (часть I). ООО «Издательство АСТ», 2004 // https://royallib.com/book/pervushin_anton/bitva_za_zvezdi_2_kosmicheskoe_protivostoyanie_chast_I.html
26. P. G. Brown et al. – A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature Letter*, **503**, no 7475, 14.11.2013 // <http://www.nature.com/nature/journal/v503/n7475/full/nature12741.html>
27. Челябинский метеорит в цифрах. *Медиазавод*, 21.02.2013 // <http://mediazavod.ru/articles/131636>
28. Взрыв водородной бомбы. *YouTube* // <https://www.youtube.com/watch?v=T14f3c1nOZo>
29. Г. Г. Кудрявцев – Воспоминания о Новой Земле. *Всякая всячина*, 16.12.1992 // http://www.wsyachina.narod.ru/history/testing_ground_26.html
30. Operation Dominic. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/Operation_Dominic
31. Семей. *Wikipedia* // <https://ru.wikipedia.org/wiki/Семей>
32. Boca Chica Village, Texas. *Wikipedia* // https://en.wikipedia.org/wiki/Boca_Chica_Village,_Texas

Москва,
10.03.2024

Ю. И. Лобановский