

## ИЗМЕНЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ОПАСНОГО КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ ЕГО С ЗЕМЛЕЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОТНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

А. К. Шаненко, С. С. Соколов, В. Н. Мотлохов, Т. И. Чайка, А. В. Самодолов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Смоделировано воздействие ядерного взрыва на реальное космическое тело (астероид типа «Апофис») с помощью математической методики численных гидродинамических расчетов с учетом прочностных свойств материала. Суть настоящей работы – изучение динамических процессов, возникающих в МКТ, угрожающих нашей планете, при различных вариантах воздействия на них ядерными зарядами. Рассматривались два типа подрыва ядерного заряда относительно космического тела: высотный и заглубленный. Расчетно получена картина деформации и отклоняющего импульса для обоих типов воздействия. Рассматривается высотный ядерный взрыв. Цель работы – получение информации о реальных возможностях ядерного взрыва по противодействию МКТ, а также для создания базы данных для будущей полномасштабной системы защиты Земли.

*Ключевые слова:* астероид, высотный и заглубленный способы подрыва ядерного заряда, отклоняющий импульс, разрушение космического тела.

При обсуждении защиты нашей планеты от космической опасности на различных конференциях, научных школах и в печати выдвигаются многочисленные идеи и предложения, касающиеся способов изменения траектории малых космических тел (МКТ) [1].

Неоднократно проводившиеся расчеты и результаты лабораторных экспериментов на мишенях небольших размеров, моделирующих космические тела, с целью получения информации о реализующихся в них процессах разрушения или изменения направления движения показали, что единственно реальным методом воздействия на траекторию МКТ является ядерный взрыв. При этом размеры космических тел, на которые воздействие ядерного заряда (ЯЗ) будет эффективным, ограничены, в лучшем случае, несколькими сотнями метров (до 500–1000 м). К сожалению, ввиду невозможности проведения прямых экспериментов даются прогнозы о воздействии ядерных взрывов на реальные космические объекты в предположении, что процессы, возникающие в мишенях, аналогичны реализующимся в МКТ при одинаковом

уровне удельной энергии нагружения  $f_t = \frac{E}{M_t}$  (где

$E$  – энергия, поглощенная объектом;  $M_t$  – полная масса объекта) [2].

Безусловно, на наш взгляд, это не является аксиомой и нужно серьезное изучение влияния масштабных факторов при перенесении характера воздействия с мишеней на МКТ. В связи с этим приводимая статья является попыткой на доступном нам уровне математических технологий проанализировать исследования динамических процессов, реализующихся в МКТ при высотном и заглубленном подрывах ЯЗ.

В настоящей статье рассматривается воздействие на астероид типа «Апофис» высотного взрыва ЯЗ с энерговыделением 3,5 Мт ТЭ. При этом учитывается как рентгеновское, так и нейтронное излучение. Надо сказать, что из-за отсутствия реальных астрономических данных о геометрии и геолого-минералогическом составе указанного астероида нами он рассматривался согласно «Википедии» (<http://ru.wikipedia.org>, 2010) как шар радиусом  $R = 170$  м, массой  $\approx 50$  млн. тонн.

Ввиду плотности вещества астероида, указанной в «Википедии», составляющей  $\approx 3 \text{ г/см}^3$ , сделан вывод о его каменной структуре силикатного происхождения. На наш взгляд, наиболее близким веществом, имитирующим эту структуру, является кремнезем.

Высота подрыва выбиралась оптимальной:  $h = D \frac{\sqrt{2}-1}{2} \approx 0,2D$  ( $D$  – диаметр МКТ). В этом случае облучению подвергается 0,3 его поверхности, и на поверхность падает 0,25 энергии взрыва [3].

В итоге была рассчитана динамическая картина деформации космического тела, а также значение воздействующего на него импульса и, как следствие, отклоняющей скорости.

Расчет процессов, реализующихся при воздействии ЯЗ на астероид типа «Апофис», производился по методике, предназначенной для расчета задач механики сплошных сред на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах [4].

В случае высотного взрыва первоначально рассчитывалось начальное распределение энергии и давления в облучаемом слое астероида. Практически вся энергия, упавшая на МКТ, выделилась в поверхностном слое толщиной 0,5 см, при этом энергия на единицу массы в этом слое лежит в пределах от  $1,3 \cdot 10^4$  до  $1,5 \cdot 10^4$  кДж/г (рис. 1). Полная энергия, запитанная в МКТ, составила  $E_t \approx 2,14 \cdot 10^{12}$  кДж.

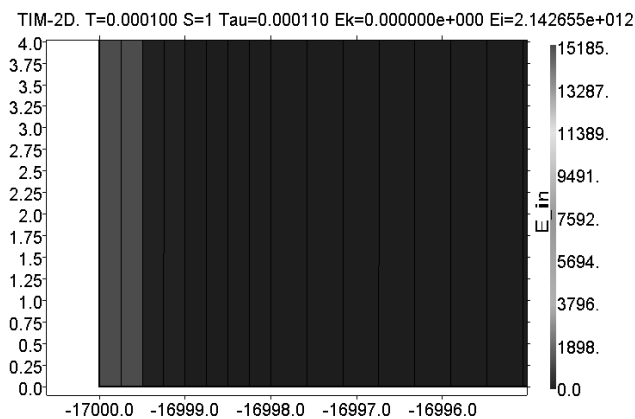


Рис. 1. Распределение величины энергии на единицу массы (кДж/г) во фрагменте астероида у оси симметрии со стороны источника излучения. (Во всех рисунках статьи размерность длин по осям дана в сантиметрах.)

При воздействии на астероид рентгеновское излучение перспективней нейтронного, так как создает более высокую плотность энергии, поглощенной космическим телом.

В статье приводятся результаты двух расчетов. В первом случае рассматривалась откольная прочность ( $-0,3 \text{ ГПа}$ ), во втором – кинетическая модель разрушения вещества [5].

Для этой модели динамического разрушения кремнезема использовались следующие значения параметров (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Параметры для изотропного вязкопластического разрушения

$\rho_0, \text{ г/см}^3$	$\omega_0$	$\omega_{kp}$	$N_0, (\text{см}^3 \cdot 10^{-5} \text{ с})^{-1}$	$R_0, \text{ см}$	$P_{h0}$	$P_{g0}$	$P_1$	$\eta, \text{ ГПа} \cdot 10^{-5} \text{ с}$
					ГПа			
2,7	0,1	0,43	700000	$0,1 \cdot 10^{-4}$	0,3	0,15	0,1	0,0007

Таблица 2

Параметры для сдвигового разрушения

$\rho_0, \text{ г/см}^3$	$C_n$	$E_p$
2,7	2,0	0,1

Ввиду совпадения результатов, полученных в обоих расчетах, в дальнейшем приводятся данные расчета с откольной моделью разрушения.

Энергия, распределенная в тонком поверхностном слое космического объекта со стороны облучения, вызывает формирование динамических процессов, которые с течением времени распространяются вглубь тела в виде разрушающей ударной волны (УВ) и приводят к отрыву поверхностных слоев вещества, создавая отклоняющий импульс.

Хронология процесса, идущая в космическом теле, после облучения высотным ядерным взрывом такова: на момент 500 мкс происходит выброс вещества как в диспергированном (распыленном) виде, так и отдельными фракциями почти нормальной плотности. Длина образовавшегося хвоста из пыли и обломков достигает 130 м от поверхности тела. Вовнутрь объекта начинает распространяться волна напряжения, достигающая 15 ГПа (рис. 2).

Как видно из рисунка, происходит поджатие вещества на фронте УВ до  $3,5 \text{ г/см}^3$ .

Надо отметить, что на момент 500 мкс волна вошла в астероид на 3 м от поверхности, а наружу отлетают с его поверхностного слоя как пыль, так и куски вещества.

К моменту 1000 мкс фронт УВ уходит вглубь до 5 м, продолжается определенное поджатие вещества на ее фронте. На указанный момент времени происходит отслаивание более крупных по толщине слоев породы, чем для времени 500 мкс (рис. 3).

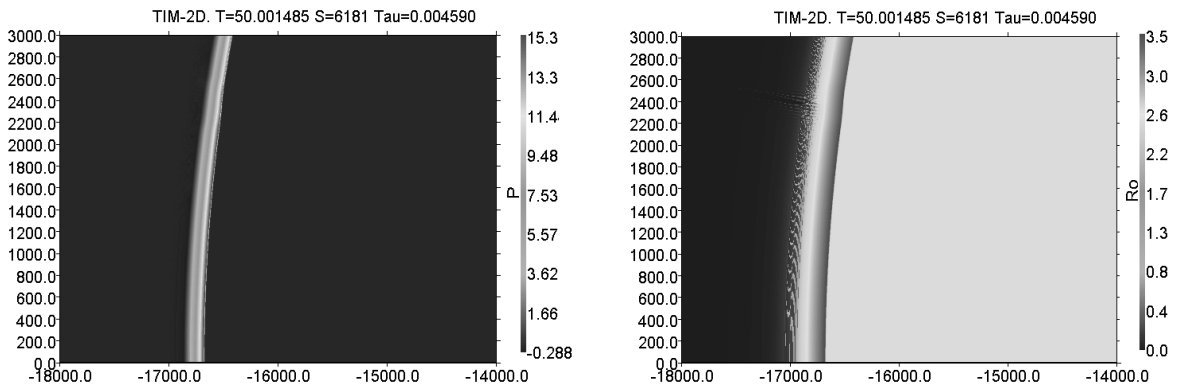


Рис. 2. Распределение давлений (ГПа) (слева) и плотности ( $\text{г/см}^3$ ) (справа) во фрагменте системы. Время 500 мкс

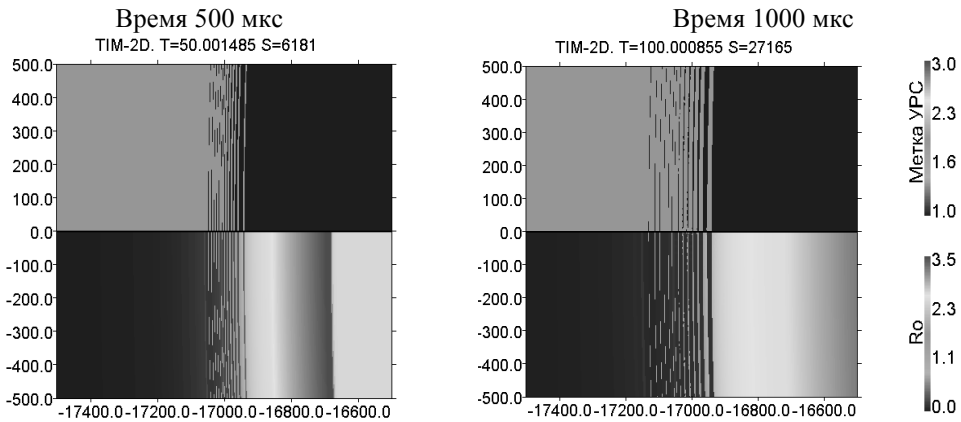


Рис. 3. Распределение индикации состояния материала (вверху) и плотности ( $\text{г/см}^3$ ) (внизу) во фрагменте системы

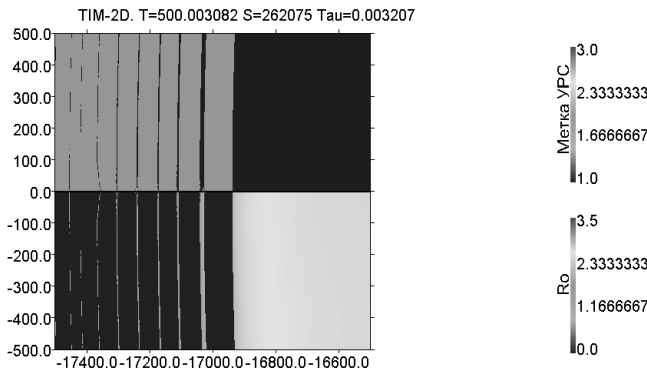


Рис. 4. Распределение индикации состояния материала (вверху) и плотности ( $\text{г/см}^3$ ) (внизу) во фрагменте системы. Время  $5 \cdot 10^3$  мкс

Аналогичная картина наблюдается для моментов времени  $3 \cdot 10^3$  и  $5 \cdot 10^3$  мкс. В дальнейшем продолжается разлет образовавшихся слоев, а процесс образования новых, отколовшихся от поверхности, замедляется. С поверхности рассматриваемого тела к моменту  $5 \cdot 10^3$  мкс откололись многочисленные слои так, что его радиус уменьшился на 60 см со стороны взрыва (рис. 4).

В то время как отколовшиеся слои уносятся от поверхности астероида, вглубь его движется сформировавшаяся УВ, теряющая свою интенсивность за счет волны разрежения сначала по углу до момента  $10^4$  мкс, а затем и по оси (рис. 5).

В картине воздействия на астероид наблюдается возникновение трещиноватости на оси в момент  $2,7 \cdot 10^4$  мкс, в диапазоне от центра в сторону взрыва 60–90 м (рис. 6).

Ниже приведен фрагмент поверхности тела с изображенным полем плотности на момент времени  $2,7 \cdot 10^4$  мкс, где хорошо видны оторвавшиеся от поверхности тела слои достаточно плотного вещества. Следы трещиноватости видны также в этот момент времени на глубине 3 м от поверхности (рис. 7).

В целом космическое тело практически сохраняет свою целостность. Потеря массы, как показали оценки, составила всего 0,02 %.

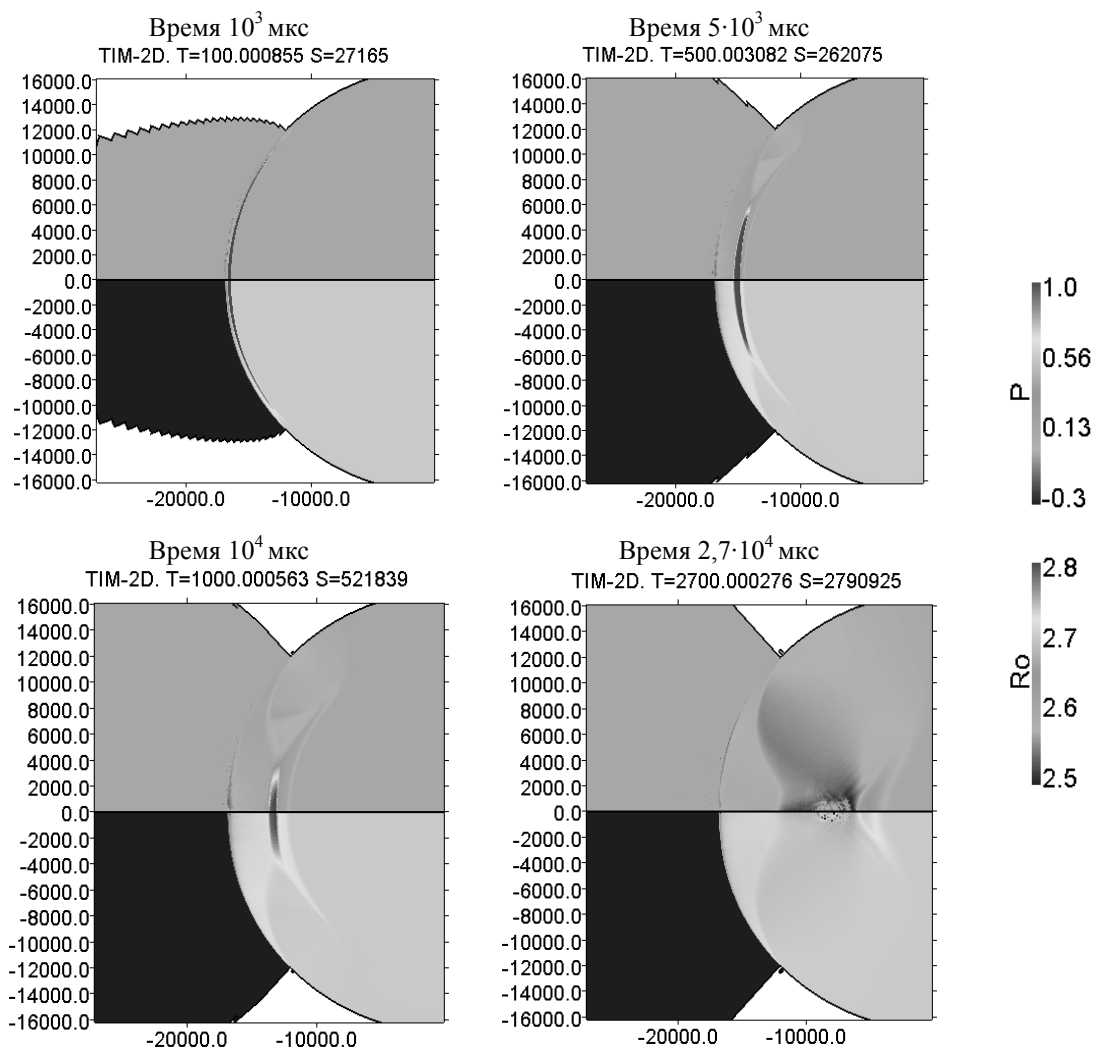


Рис. 5. Распределение давлений (ГПа) (вверху) и поле плотностей ( $\text{г}/\text{см}^3$ ) (внизу) во фрагменте системы

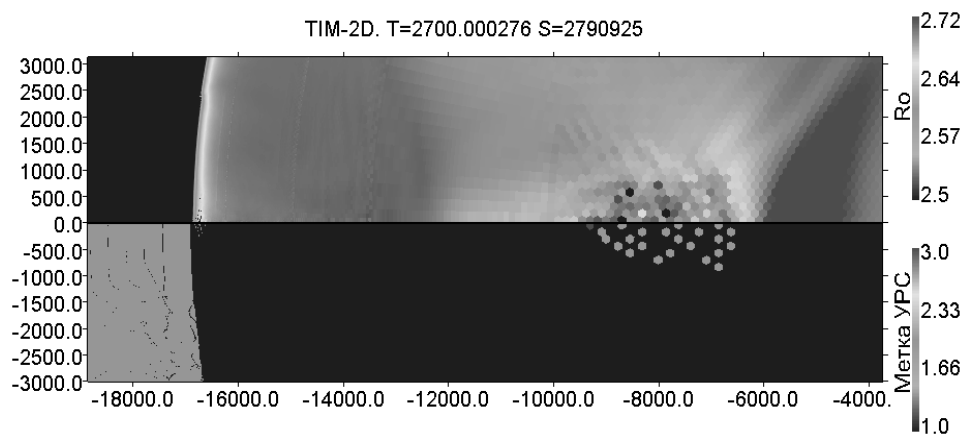


Рис. 6. Распределение плотности ( $\text{г}/\text{см}^3$ ) (вверху) и индикации состояния материала (внизу) во фрагменте системы у оси симметрии. Время  $2,7 \cdot 10^4$  мкс

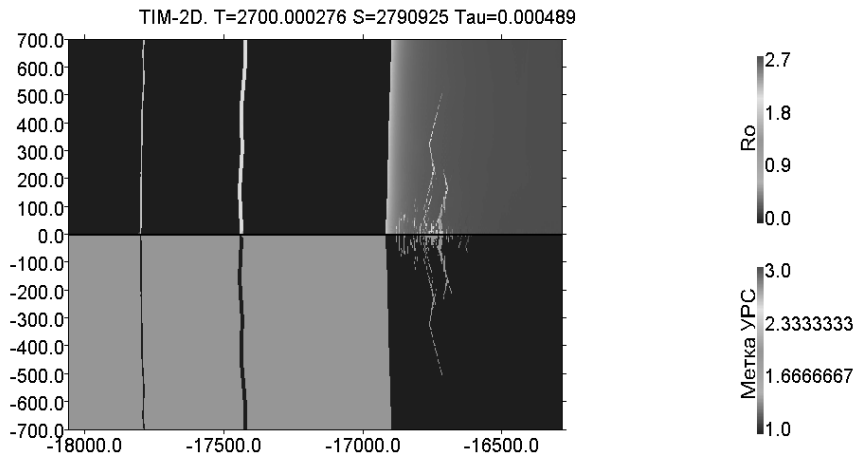


Рис. 7. Распределение плотности ( $\text{г/см}^3$ ) (вверху) и индикации состояния материала (внизу) во фрагменте системы у оси симметрии. Время  $2,7 \cdot 10^4$  мкс

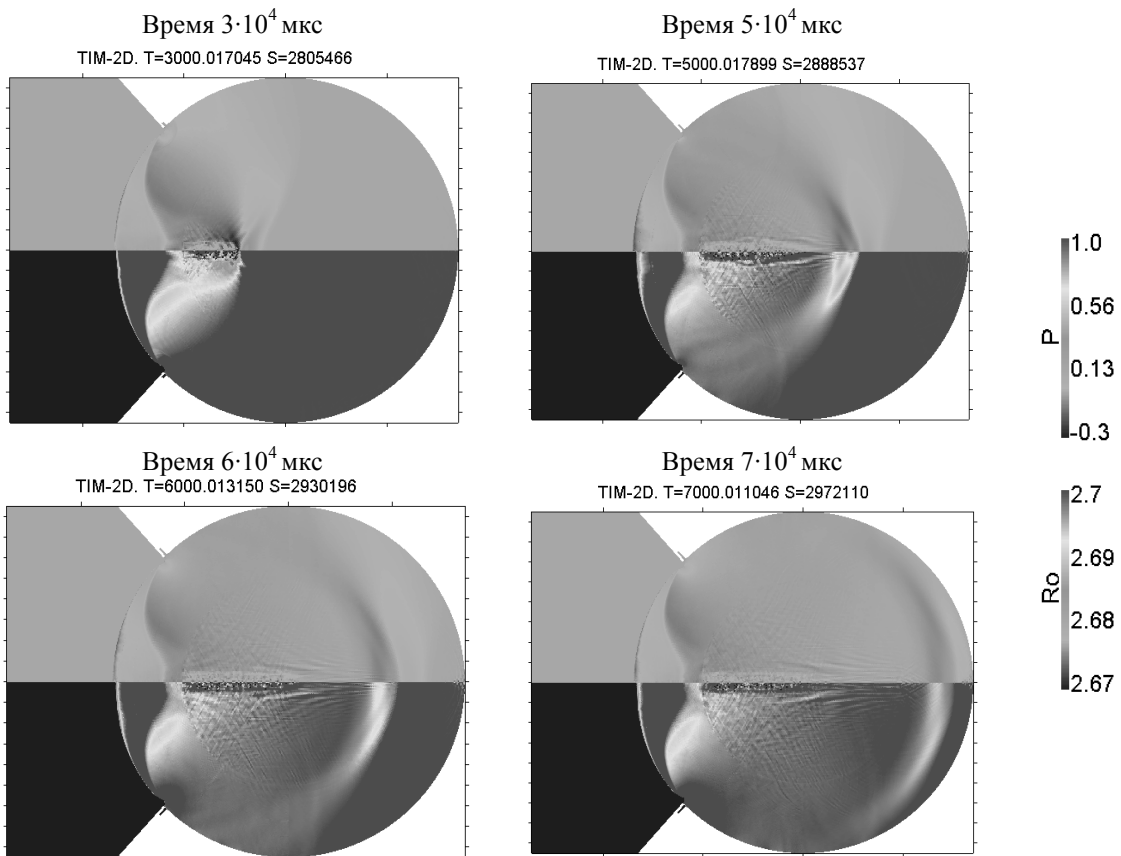


Рис. 8. Распределение давлений (ГПа) (вверху) и поле плотности ( $\text{г/см}^3$ ) (внизу) во фрагменте системы.

Расчет динамического воздействия на космическое тело производился до времени  $9 \cdot 10^4$  мкс, момента выхода УВ на поверхность противоположную взрыву. На рис. 8 приводятся распределение давлений и плотностей на моменты времени:  $3 \cdot 10^4 - 7 \cdot 10^4$  мкс.

Картина взрывного выброса вещества на момент  $2,7 \cdot 10^4$  мкс из астероида, его форма и размеры представлены на рис. 9.

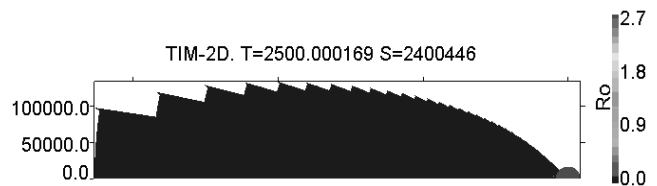
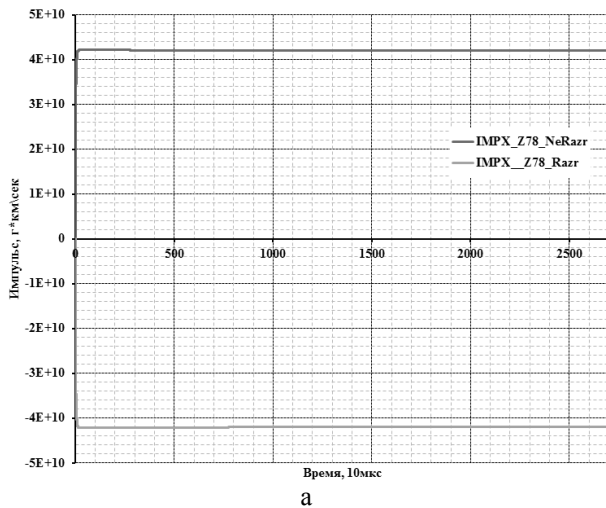


Рис. 9. «Хвост» взрывного выброса вещества длиной 6 км, шириной в поперечнике более 2 км

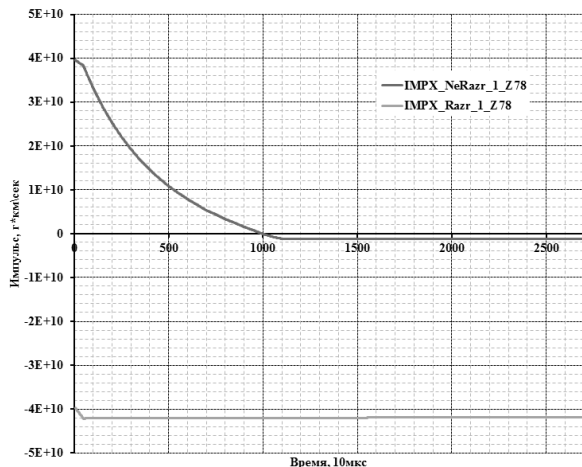
Импульс, создаваемый выбросом вещества, приводится на рис. 10,а (зеленая кривая).

Аналогичный импульс, но в противоположном направлении, получает монолитный остаток (красная кривая) (рис. 10,а). Эти импульсы определяют движение остатка астероида, а также движение выброшенного вещества. Сам астероид практически сохранил монолитность за исключением незначительной трещиноватости внутри и сравнительно небольшой потери массы на выброс.

К моменту времени  $10^4$  мкс после потери отколовшегося вещества все реализовавшиеся внутри астероида скорости перемещения не превышают по величине значение 0,1 км/с и постепенно уменьшаются. В связи с этим зависимость от времени импульса неразрушенного вещества, как отколовшегося, так и содержащегося в астероиде и имеющего скорость выше 0,1 км/с, представлена красной линией на рис. 10,б.



а



б

Рис. 10. Зависимости импульса вдоль оси Ох от времени: а – для всех скоростей, б – для скоростей более  $W1 = 0,1$  км/с. Красный цвет – для неразрушенного вещества, зеленый – для разрушенного

До момента  $10^4$  мкс происходит спад значения импульса неразрушенных масс (идет снижение их скорости перемещения внутри астероида). Затем осуществляется переход кривой в отрицательную область, обусловленный сохранением импульса незначительной массы не разрушенного вещества в выбросе. Сумма импульса, определяемая зеленой кривой и частью красной после  $10^4$  мкс, дает значение импульса всего вещества, движущегося в отрицательном направлении (рис. 10,б).

На рис. 11 приводится временная зависимость массы вещества, имеющего скорость более 0,1 км/с. После момента  $10^4$  мкс такую скорость имеет только вещество, движущееся в выбросе. Его масса составляет  $m_1 = 1,1 \cdot 10^7$  кг, а соответствующий ей импульс  $p_1 = 4,31 \cdot 10^{10}$  кг·м/с. По этим данным легко оценивается значение массы астероида после выброса и его импульс. В итоге скорость смещения космического тела, практически сохранившего свою целостность, составляет 0,8 м/с.

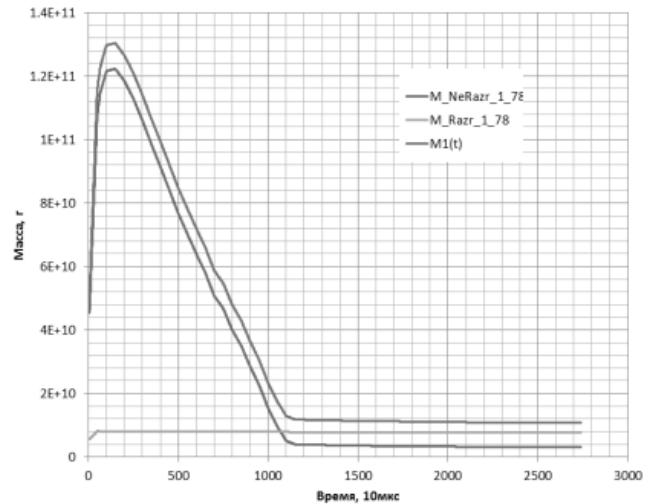


Рис. 11. Зависимости массы вещества, имеющего скорость более  $W1 = 0,1$  км/с от времени. Красный цвет – для неразрушенного вещества, зеленый – для разрушенного, синий – суммарная масса

## Обсуждение результатов

Многочисленные исследования применения различных средств воздействия на опасные космические объекты с целью предотвращения столкновения их с нашей планетой показали, что единственно действенным средством может быть использование ЯЗ. При этом в зависимости от того, какого результата мы хотим добиться, применяются три варианта ядерных взрывов: высотный, поверхностный и заглубленный.

В нашей работе рассматривался высотный взрыв, как более эффективное средство для изменения траектории движения МКТ.

Расчеты показали, что применение ЯЗ с энерговыделением 3,5 Мт ТЭ позволяет без существенного разрушения астероида типа «Апофис» сообщить ему скорость смещения 0,8 м/с, при этом потеря массы на выброс составляет 0,02 % от полной массы космического тела. В связи с тем, что траектории космических тел типа «Апофис» хорошо отслеживаются, можно заблаговременно произвести на него упреждающее воздействие ЯЗ. Так в случае «Апофиса» прохождение его недалеко от нашей планеты прогнозируется в 2029 году, следующее – с возможным столкновением – в 2036 году. То есть у землян есть резерв времени – 7 лет. За это время при полученной скорости смещения 0,8 м/с можно отвести астероид от Земли на расстояние до  $2 \cdot 10^5$  км (порядка 30 радиусов Земли).

В заключение подчеркнем, что полученные оценки по поражению опасных космических тел из-за ряда предположений о их геометрических параметрах, физико-химических свойствах, структуре имеют ориентировочный характер. И только непосредственный эксперимент на реальных космических телах с применением ЯЗ может дать точные данные о возможности землян противодействовать космической опасности.

## Список литературы

1. Александров П. А., Горев В. В. Космическая защита Земли: первые эксперименты. Ереван: ИППФ НАНРА, 2014.
2. Шаненко А. К. О возможности предотвращения столкновения астероида «Апофис» с Землей с помощью ядерных взрывов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Теоретическая и прикладная физика. 2014. Вып. 2. С. 12–19.
3. Медведев Ю. Д., Свешников М. Л., Соколовский А. Г. и др. Астероидно кометная опасность. С-Петербург: ИТАРАН, 1996.
4. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г., Панов А. И., Соболев И. В., Пушкарев А. А. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 4. С. 29–44.
5. Соколов С. С. Феноменологическая модель кинетики развития поврежденности в твердых материалах при импульсных воздействиях // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 4. С. 13–26.

Статья поступила в редакцию 22.03.2016