

## Использование программного комплекса FlowVision для оценки экологических последствий утилизации твердотопливных ракет методом взрывания

Грахов Ю.В., Кудряков А.Л.

ОАО «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», г. Миасс, Россия

Минувший двадцатый век был нелегким для нашей страны. Период «холодной войны», тяжелой политической напряженности в мире - все это приводило к бурному развитию оборонной промышленности. Создавалось ракетное оружие, создавался ядерный запас страны, ставились на вооружение новые боевые комплексы, которые сменялись, в силу развития, вновь усовершенствованными. После длительного периода, в течение которого был накоплен достаточно большой объем ракетного оружия, стремительная гонка вооружения прекращается. Более того, в соответствии с договорами о сокращении вооружения встал вопрос о частичной утилизации ракет дальнего действия. Утилизацию твердотопливных ракет методом их взрывания предполагалось провести в Челябинской области на дне карьера или на поверхности земли. Уничтожение ракет методом взрывания неизбежно связано с экологическими последствиями. В связи с этим возникла проблема оценки возможных негативных последствий, оказываемых на окружающую среду.

Задача нестационарной газовой динамики о взрыве твердотопливной ракеты вблизи искривленной или ровной поверхности земли решалась в программном комплексе [FlowVision](#) (версия 2.3). В качестве искривленной поверхности рассматривалась поверхность одного из карьеров на дне, которого расположен заряд (рисунок 1). Во втором варианте заряд располагался прямо на поверхности земли (рисунок 2).

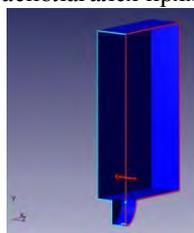


Рис. 1. Расчетная область с ракетой на дне карьера

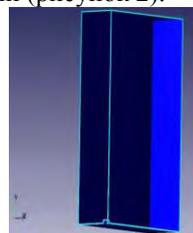


Рис. 2. Расчетная область с ракетой на поверхности земли

Твердотопливная ракета была представлена в виде цилиндра длиной 16 метров и диаметром 2 метра. Расчетная область имеет размеры  $50 \times 70 \times 30$  метров с учетом имеющихся двух плоскостей симметрии, поэтому расчетная область составляет 1/4 часть от всей области моделирования. В результате выброса продуктов взрыва формируется ударная волна, движущаяся по воздуху. Целью моделирования движения газа в расчетной области явилось не только получение пространственных полей физических параметров газа, но, в первую очередь, определение картины распространения продуктов взрыва твердого топлива.

Процесс взрыва связан с высокими градиентами рассчитываемых величин. В зоне взрыва для получения точной картины процесса необходима достаточно мелкая сетка и, соответственно, требуется малый шаг счета по времени. Система FlowVision использует адаптивную локально измельченную сетку, что позволило учесть малые детали геометрии расчетной области и высокие градиенты физических величин (рисунки 3 и 4).

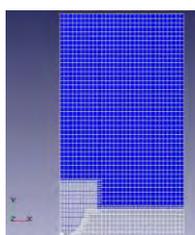


Рис. 3. Расчетная сетка для ракеты в карьере

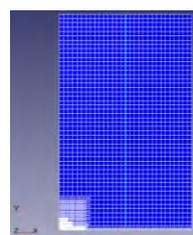


Рис. 4. Расчетная сетка для ракеты на земле

Параметры, необходимые для моделирования детонации твердого топлива в системе FlowVision, рассчитывались, исходя из состава продуктов взрыва и энергетики данного вещества. Процесс взрыва имитировался посредством задания на поверхности ракеты граничных условий, соответствующих истечению продуктов мгновенной детонации, которые действовали в течение промежутка времени  $t_1$ , после чего эти граничные условия заменялись на стенку без протекания. Время  $t_1$  соответствует времени истечения всей массы продуктов взрыва через заданную поверхность и, примерно, соответствует времени прохождения волны разрежения от боковой поверхности ракеты до ее оси и обратно. По расчетам  $t_1$  принимает значение 1.4 миллисекунды. На условной поверхности ракеты задавались следующие граничные условия: скорость 660 м/с, температура 4023 К, давление  $2.14 \cdot 10^9$  Па. Температура окружающего воздуха 15°C. Таким образом были созданы искусственные условия моделирования процесса взрыва. В связи с невозможностью задания в FlowVision в одном объеме двух областей с различными газами и начальными значениями параметров объем ракеты был вырезан из расчетной области. При этом за счет указанных выше граничных условий у поверхности ракеты образовался слой продуктов взрыва толщиной около метра, по массе и внутренней энергии равный массе и энергии взрыва заряда твердого топлива. Кинетическая энергия этой массы при упомянутой скорости на границе, равной 660 м/с, составляет около 5% энергии взрыва, что не должно сказаться на общей картине взрывного процесса на достаточном уда-

лении от места взрыва. Начиная с расстояния 5-10 калибров заряда ударно-волновой процесс и поля течения, включая картину распространения продуктов взрыва, определяются в основном энергией взрыва и окружающими граничными условиями. Кроме описанного на поверхности ракеты граничного условия были заданы две плоскости симметрии, поверхность земли представлена стенками с прилипанием, остальным границам присвоен статус свободного выхода.

Результаты расчета предоставлены в виде графических изображений для давления и концентрации продуктов взрыва в последовательные моменты времени.

В первый рассмотренный момент времени, когда еще не все продукты взрыва "вытекли" (рисунок 5,  $t = 0.0009$  с), уже происходит процесс формирования ударной волны вблизи поверхности ракеты. В последующий момент времени (рисунок 6,  $t = 0.004$  с) ударная волна взаимодействует с искривленной поверхностью карьера, отражается от него, начинается формирование системы ударных волн, которая уже в момент времени  $t = 0.012$  сек. (рисунок 7) покидает карьер и движется вверх.

На рисунке 8 ( $t = 0.036$  с) отчетливо видна система образовавшихся ударных волн. Можно отметить, что толщина фронта ударной волны в газе порядка длины свободного пробега молекул, а на рисунке она более значительна. Это широко известный факт размывания волн на расчетной сетке, но в целом он не должен сказаться на общем поведении ударных волн.

Далее видно (рисунок 9,  $t = 0.096$  с), что продукты взрыва почти оторвались от поверхности земли и поднимаются вверх в более высокие слои атмосферы (рисунок 10,  $t = 0.096$  с, векторы скорости).

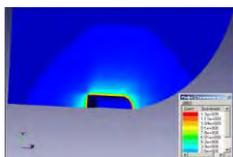


Рис. 5. Поле давления, момент времени  $t = 0.0009$  с.

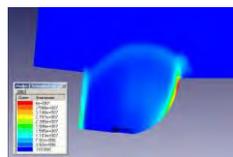


Рис. 6. Поле давления, момент времени  $t = 0.004$  с.

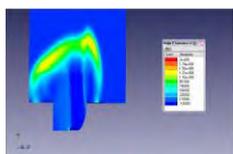


Рис. 7. Поле давления, момент времени  $t = 0.012$  с.

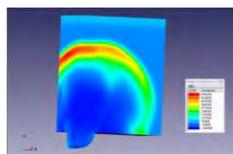


Рис. 8. Поле давления, момент времени  $t = 0.036$  с.

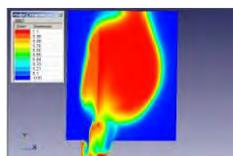


Рис. 9. Концентрация продуктов взрыва, момент времени  $t = 0.096$  с.

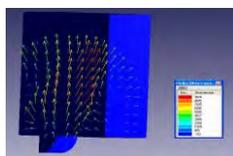


Рис. 10. Векторы скорости, момент времени  $t = 0.096$  с.

По представленной схеме проводился также расчет взрыва при утилизации ракеты лежащей на поверхности земли.

Ниже на рисунках представлены два расчетных момента времени. Первый момент времени – момент формирования ударной волны с разлетом продуктов взрыва (рисунки 11-13,  $t = 0.003$  с) и конечный (рисунок 14,  $t = 0.05$  с), когда отчетливо видно, что образовавшаяся ударная волна поднялась на значительную высоту от поверхности земли. Рисунки 15, 16 ( $t = 0.05$  с) показывают, что существенная часть продуктов взрыва также поднимается высоко вверх.

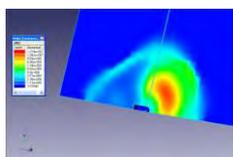


Рис. 11. Поле давления, момент времени  $t = 0.003$  с.

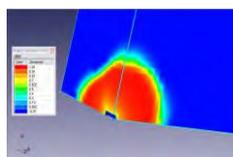


Рис. 12. Концентрация продуктов взрыва, момент времени  $t = 0.003$  с.

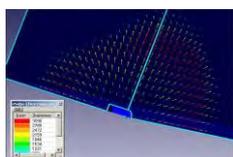


Рис. 13. Векторы скорости, момент времени  $t = 0.003$  с.

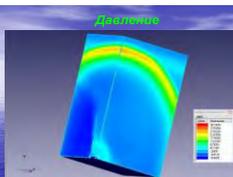


Рис. 14. Поле давления, момент времени  $t = 0.05$  с.

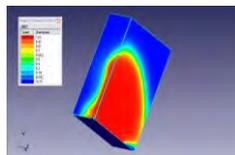


Рис. 15. Концентрация продуктов взрыва, момент времени  $t=0.05$  с.

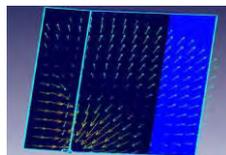


Рис. 16. Векторы скорости, момент времени  $t=0.05$  с.

По результатам расчетов был проведен сравнительный анализ результатов расчетов в карьере и на земле:

1. **По характеру разлета продуктов взрыва.** При взрыве прямо на поверхности земли часть продуктов взрыва обратными токами атмосферы прижимается к земле, а другая часть с меньшей скоростью, чем при взрыве в карьере, устремляется вверх. Стенки карьера играют роль кумулятивного направляющего устройства

2. **По возможности воздействия ударных волн на объекты, расположенные на поверхности земли недалеко от места взрыва.** При взрыве на земле давление ударных волн на одинаковом расстоянии от места взрыва значительно выше.

Таким образом, в процессе работы:

1. Показана возможность моделирования в системе [FlowVision](#) взрывных процессов при подрыве высокоэнергетических взрывчатых веществ.

2. Показано, что в обоих случаях подрыва ракет как в карьере, так и на земле, продукты взрыва поднимаются в атмосферу и могут разноситься ветром, оказывая вредное влияние на растительность, животный мир и человека.

С учетом всего комплекса принятых во внимание факторов утилизация ракет методом взрывания в области с достаточно плотным населением и наличием природных заповедников была запрещена.

## Литература

1. Авакян, Г.А. Расчет энергетических и взрывчатых характеристик ВВ: учебное пособие / Г.А. Авакян. –М.: ВИА имени Ф.Э.Дзержинского, 1964.
2. Голубев, И.Ф. Вязкость газовых смесей / И. Ф. Голубев, И. Е. Гнездилов. – М.: Изд-во Госстандарта, 1971.
3. Зельдович, Я.Б. Теория детонации: учебное пособие / Я.Б. Зельдович, А.С. Компанеец. –М.: ГИЗ ТТЛ, 1955.
4. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд; пер. с англ. под. ред. Б.И.Соколова. – 3-е изд., испр. и доп. – Ленинград: Изд-во «Химия», 1982.
5. Станюкович, К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды. –М.: Изд-во «Наука», 1971. – 856 с.
6. Физика взрыва / Ф.А.Баум, Л.П.Орленко, К.П.Станюкович, В.П.Чельшев, Б.И.Шехтер; под. ред. К.П.Станюковича. - М.: Изд-во «Наука», 1975. – 704 с.

Кондранин, Т.В. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: учебное пособие / Т.В.Кондранин, Б.К.Ткаченко, М.В.Березникова и др. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.