

Разработка математической модели расчета радиусов зон возможного поражения персонала космодрома «Восточный» при возникновении нештатной ситуации в ходе эксплуатации ракетно-космических комплексов.

Алексеева Н.Н.

Научный руководитель –ст. преподаватель каф. 610 Гусев Е.В.

Московский Авиационный Институт, кафедра 610

Ccg-gus@mail.ru

Стартовая площадка для ракеты-носителя «Союз-2» на космодроме Восточный была введена в эксплуатацию в 2016 году. Весной этого же года осуществлен первый успешный пуск РН «Союз-2.1а» с площадки 1С с разгонным блоком «Волга». Носитель вывел на орбиту спутники «Ломоносов», «Аист-2Д» и «СамСат-218».



Рисунок 1 Исторический первый пуск ракеты с космодрома Восточный РН «Союз-2»

Осенью 2017 года состоялся второй запуск РН «Союз-2.1б» с разгонным блоком «Фрегат». Запуск считается неудачным, так как полезная нагрузка была потеряна. К аварийной ситуации привела нештатная работа разгонного блока после его отделения от ракеты-носителя. В планах запусков на 2018 год – восемь пусков РН «Союз» с РБ «Фрегат». Поэтому оценка возможных последствий при возникновении нештатных ситуаций в ходе наземной подготовки и эксплуатации РБ «Фрегат» и блока выведения «Волга» является актуальной.

РБ «Фрегат» и блок выведения «Волга» используют токсичные компоненты топлива такие как несимметричный диметилгидразин (НДМГ), 1750 кг – на РБ «Фрегат» и 318 кг в блоке выведения «Волга» и азотный тетраоксид (АТ), 3600 кг– на РБ «Фрегат» и 582 кг в блоке выведения «Волга». Поскольку габариты разгонного блока «Фрегат» (и соответственно масса заправки) больше габаритов блока выведения «Волга», то оценки, полученные для разгонного блока «Фрегат» можно распространить и на блок выведения «Волга».

Произведен анализ климатических факторов (скорости ветра и температуры) влияющих на глубину зоны поражения в ближайшем к космодрому Восточный городу Циолковский (находится примерно в 20 км от космодрома) основан в 1961 году, имеет население –6535 человека (на 2018 год), площадь 63,3 км², климат резко континентальный с муссонами.

Статистические данные по климатическим факторам сведены в таблицы и диаграммы. Для примера покажем несколько графиком, описывающих температуру (по сезонам, по месяцам) и скорость ветра

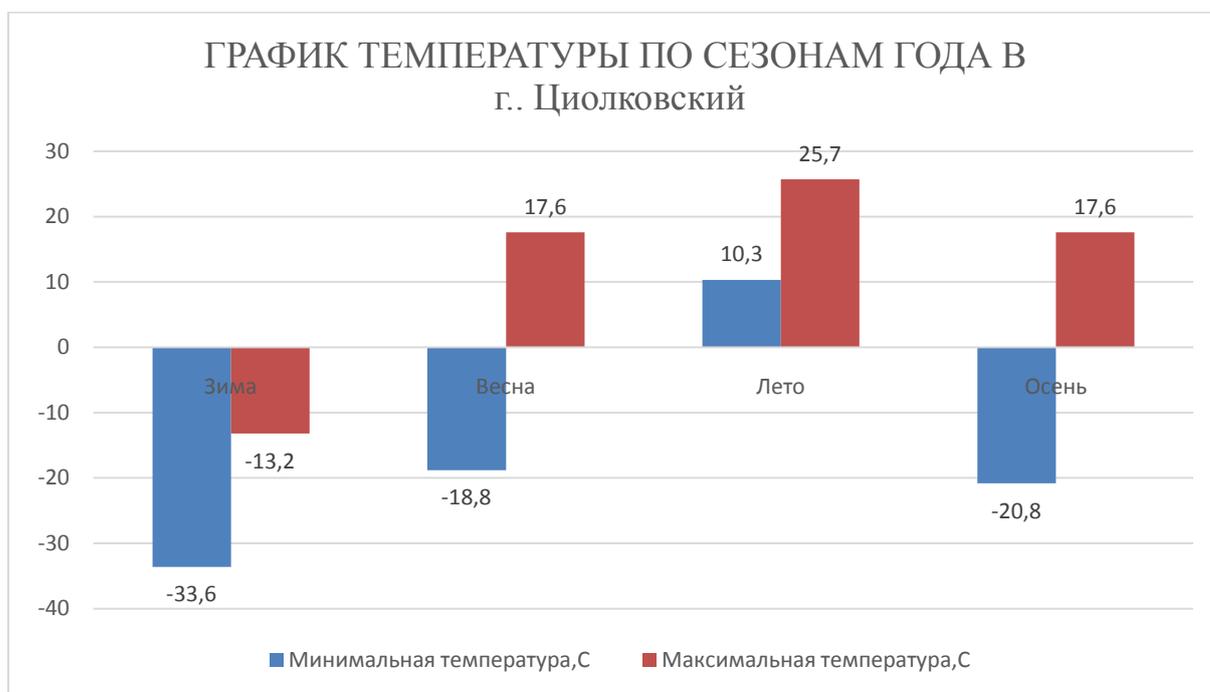


Рис. 2. График температуры по сезонам года

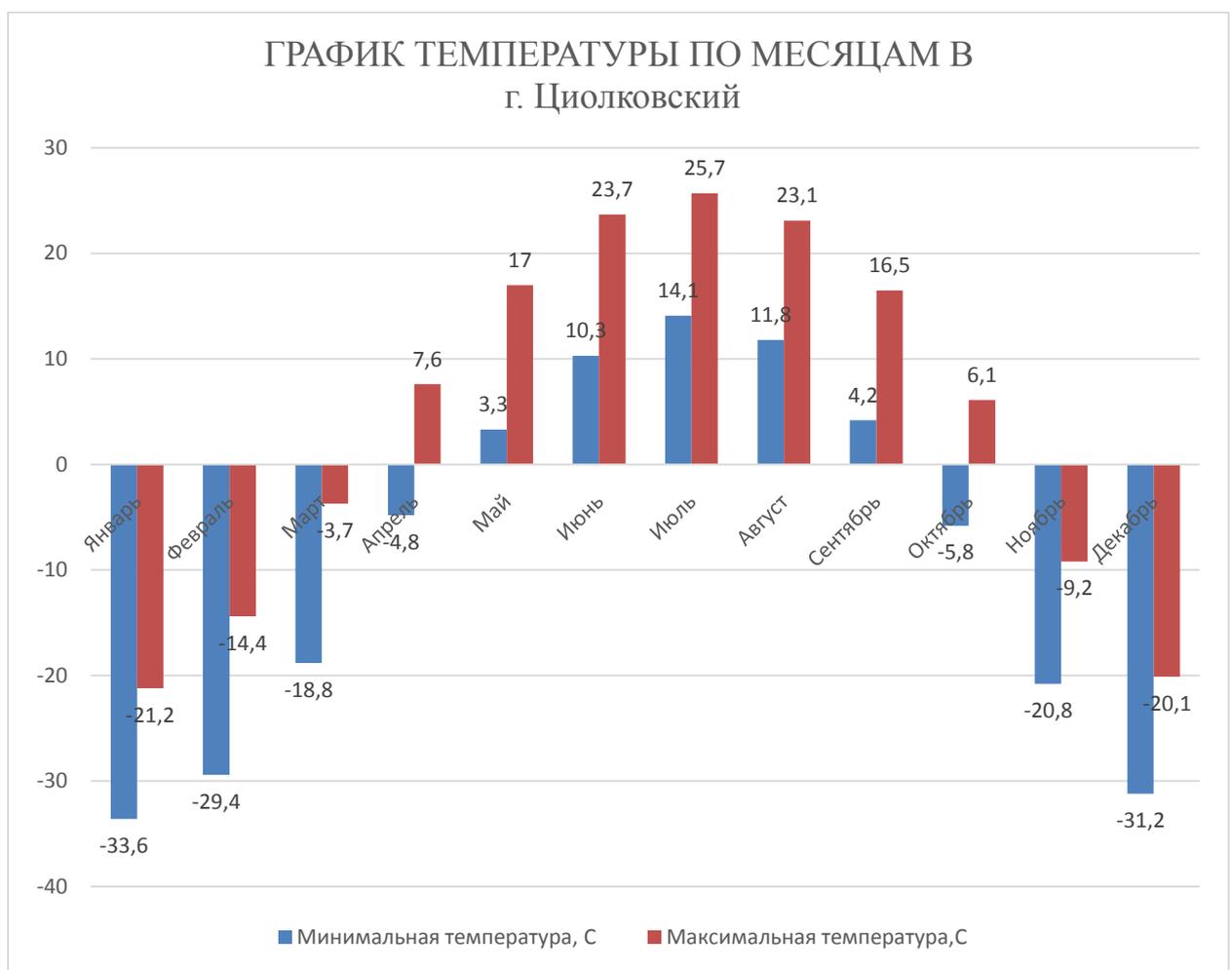


Рис. 3. График температуры по сезонам года

Важнейшую роль при строительстве космодрома Восточный в Амурской области сыграло не только удобное географическое расположение, но континентальный климат муссонного характера, которому характерен слабый ветер, особенно в зимнее время года. Это особенно важно, ведь действие ветра на ракету-носитель во время полёта приводит к появлению дополнительной нагрузки, препятствующей полёту по заданной траектории.

Самый сильный ветер в городе Циолковский отмечается весной, порой достигающий 20 м/с. Это крайне редкое явление, в среднем же в этот период года скорость ветра составляет 2,6 м/с. Зимой практически безветренная погода, максимум за 2017 года скорость достигла 3 м/с.

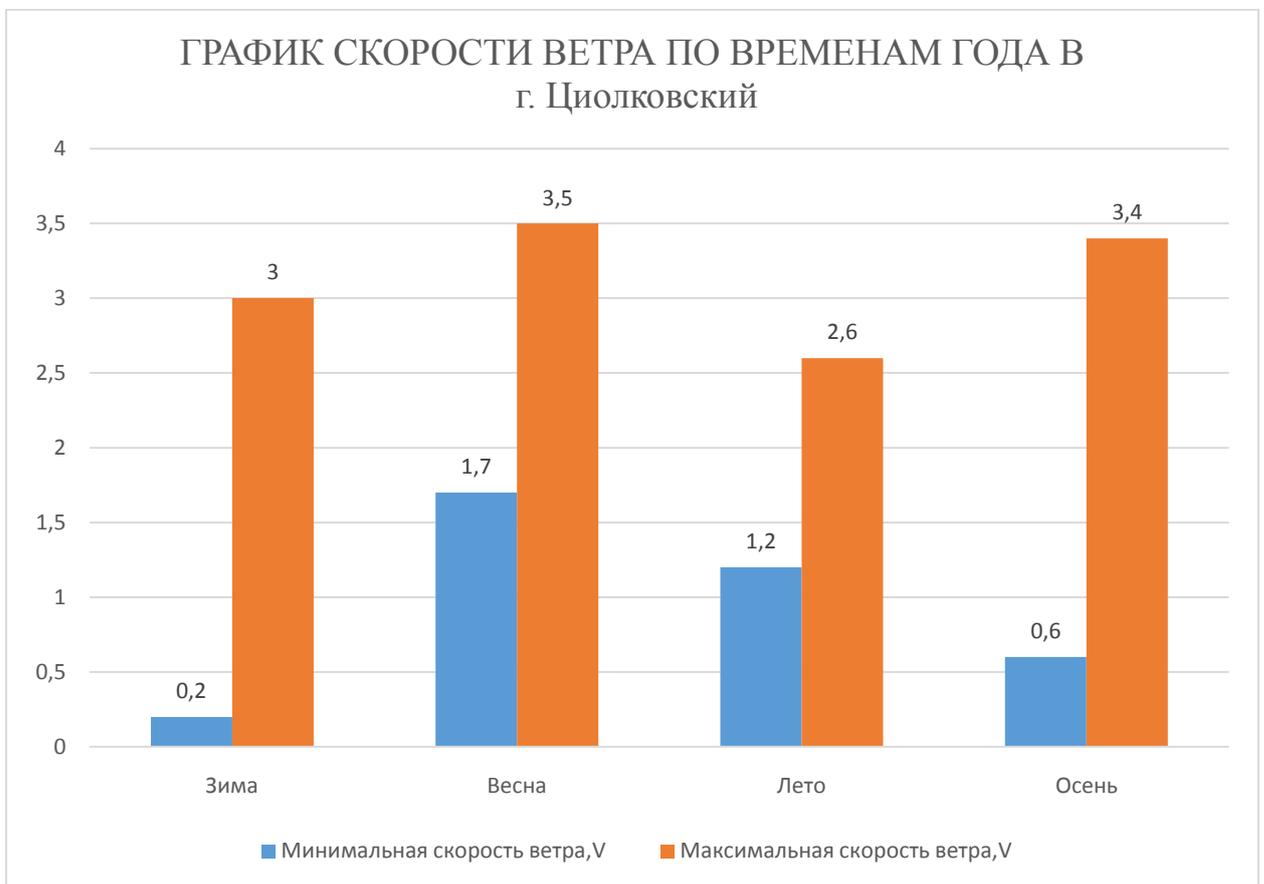


Рис.4. График скорости ветра по временам года

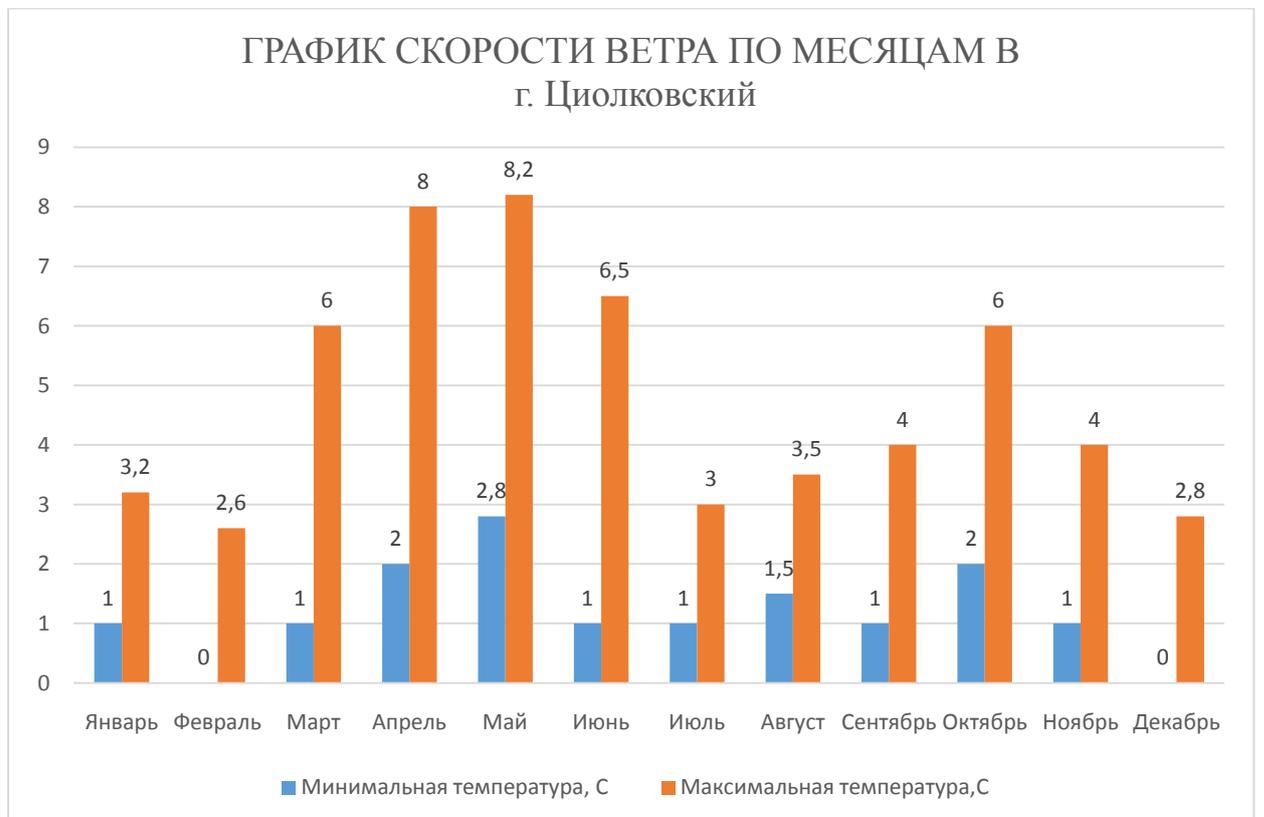


Рис.5. График скорости ветра по месяцам

Произведен расчет последствий возможных нештатных ситуаций и аварий при подготовке РБ «Фрегат». Для анализа радиусов зон возможного поражения технического персонала необходимо учесть ряд факторов: степень вертикальной устойчивости атмосферы,

скорость ветра, тип местности, время испарения, температуру воздуха, физико-химические свойства компонентов топлива и др. Расчет зон опасного поражения технического персонала при отдельных проливах НДМГ и АТ полной массы заправки производился в соответствии с методическими рекомендациями: «РД 52.04.253 – 90».

Разработан алгоритм проведения расчетов, который позволит провести расчеты и оценить последствия при возникновении нештатных ситуаций. В алгоритме ведется сравнение результатов расчета полученных при использовании данной модели с результатами полученными при проведении ОВОС Космодрома Восточный (где получен коэффициент $Q_{Э2} = 3,29$).

Алгоритм лег в основу программы, которая на данный момент реализована в Excele. В дальнейшем после идентификации и оценки адекватности модели она будет переведена в пакет Matlab. В качестве входных данных модель использует:

1. Время года: весна, лето, осень, зима;
2. Скорость ветра;
3. Степень вертикальной устойчивости атмосферы: инверсия, изотермия, конвекция;
4. Время прошедшее после аварии: 1 час, 10 часов, 24 часа;
5. Компоненты топлива: НДМГ, АТ;
6. Масса компонентов топлива.

Математическая модель для расчета количественных характеристик выброса СДЯВ, определения глубины зоны заражения при возможной аварии и прогнозирования площади зоны возможного заражения СДЯВ

$$\left[\begin{matrix} Q_{Э1}^{\max}, Q_{Э2}^{\max}, \\ Q_{Э}^{\max}, S_B^{\max}, S_{\Phi}^{\max} \end{matrix} \right]^T = \operatorname{argmax} \left\{ \begin{matrix} Q_{Э1}^{\max} (Q_{Э1}^{\max})_i, \\ Q_{Э2}^{\max} (Q_{Э2}^{\max})_i, \\ Q_{Э}^{\max} (Q_{Э}^{\max})_i, \\ S_B^{\max} (S_B^{\max})_i, \\ S_{\Phi}^{\max} (S_{\Phi}^{\max})_i, \\ i = \overline{1, n} \end{matrix} \left| \begin{matrix} K_1, K_3, K_5, K_7, N, u, d, h, \Delta T, c_p, \Delta H_{\text{исп}}, \\ P, M, T, N, K_{2i}, K_{3i}, K_{6i}, K_{7i}, Q_i, d_i, \varphi, K_8 \\ Q_{Э1} = K_1 K_3 K_5 K_7 Q_0 \\ Q_{Э2} = (1 - K_1) K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 * \left(\frac{Q_0}{hd} \right) \\ Q_{Э} = 20 K_4 K_5 \sum_{i=1}^n \left(K_{2i} K_{3i} K_{6i} K_{7i} * \frac{Q_i}{d_i} \right) \\ S_B = 8,72 * 10^{-3} \Gamma^2 \varphi \\ S_{\Phi} = K_8 \Gamma^2 N^{0.2} \\ K_2 = 8.1 * 10^{-6} P \sqrt{M} \\ K_6 = \begin{cases} N^{0.8} & \text{при } N < T \\ T^{0.8} & \text{при } N \geq T \end{cases} \end{matrix} \right. \right.$$

Описание модели:

1. Определение эквивалентного количества вещества в первичном облаке

$$Q_{Э1} = K_1 K_3 K_5 K_7 Q_0,$$

K_1 - коэффициент, зависящий от условий хранения СДЯВ

K_3 - коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе другого СДЯВ;

K_5 - коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости атмосферы; для инверсии принимается равным 1, для изотермии 0,23, для конвекции 0,08;

K_7 - коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха

Q_0 - количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, т.

$$K_1 = \frac{c_p \Delta T}{\Delta H_{\text{исп}}}$$

где c_p - удельная теплоемкость жидкого СДЯВ, кДж/(кг·°С);

ΔT - разность температур жидкого СДЯВ до и после разрушения емкости, °С;

$\Delta H_{\text{исп}}$ - удельная теплота испарения жидкого СДЯВ при температуре испарения, кДж/кг.

2. Определение эквивалентного количества вещества во вторичном облаке

Эквивалентное количество вещества во вторичном облаке рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{э2}} = (1 - K_1)K_2K_3K_4K_5K_6K_7 \frac{Q_0}{hd}$$

где K_2 - коэффициент, зависящий от физико-химических свойств СДЯВ;

K_4 - коэффициент, учитывающий скорость ветра 4 ;

K_6 - коэффициент, зависящий от времени N , прошедшего после начала аварии;

значение коэффициента K_6 определяется после расчета продолжительности T (ч) испарения вещества:

$$K_6 = \begin{cases} N^{0.8} & \text{при } N < T \\ T^{0.8} & \text{при } N \geq T \end{cases}$$

при $T < 1$ ч K_6 принимается для 1 ч;

d - плотность СДЯВ, т/м³;

h - толщина слоя СДЯВ, м.

$$K_2 = 8.1 * 10^{-6} P \sqrt{M}$$

где P - давление насыщенного пара вещества при заданной температуре воздуха, мм рт. ст.;

M - молекулярная масса вещества.

3. Расчет глубины зоны заражения при аварии на химически опасном объекте

Расчет глубины зоны заражения первичным (вторичным) облаком СДЯВ при авариях на технологических емкостях, хранилищах и транспорте ведется

$$\Gamma_{\text{п}} = Nv$$

где N - время от начала аварии, ч;

v - скорость переноса переднего фронта зараженного воздуха при данной скорости ветра и степени вертикальной устойчивости воздуха, км/ч

4. Расчет глубины зоны заражения при разрушении химически опасного объекта

В случае разрушения химически опасного объекта при прогнозировании глубины зоны заражения рекомендуется брать данные на одновременный выброс суммарного запаса СДЯВ на объекте и следующие метеорологические условия: инверсия, скорость ветра 1 м/с.

Эквивалентное количество СДЯВ в облаке зараженного воздуха определяется по формуле:

$$Q_{\text{Э}} = 20K_4K_5 \sum_{i=1}^n (K_{2i}K_{3i}K_{6i}K_{7i} * \frac{Q_i}{d_i})$$

где K_{2i} - коэффициент, зависящий от физико-химических свойств i -го СДЯВ;

K_{3i} - коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе i -го СДЯВ;

K_{6i} - коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после разрушения объекта;

K_{7i} - поправка на температуру для i -го СДЯВ;

Q_i - запасы i -го СДЯВ на объекте, т;

d_i - плотность i -го СДЯВ, т/м³.

5. Определение площади зоны заражения СДЯВ

Площадь зоны возможного заражения для первичного (вторичного) облака СДЯВ определяется по формуле:

$$S_{\text{В}} = 8,72 * 10^{-3} \Gamma^2 \varphi$$

где $S_{\text{В}}$ - площадь зоны возможного заражения СДЯВ, км²;

Γ - глубина зоны заражения, км;

φ - угловые размеры зоны возможного заражения

Площадь зоны фактического заражения $S_{\text{Ф}}$ (км²) рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{Ф}} = K_8 \Gamma^2 N^{0.2}$$

где K_8 - коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости воздуха, принимается равным: 0,081 при инверсии; 0,133 при изотермии; 0,235 при конвекции; N - время, прошедшее после начала аварии, ч.

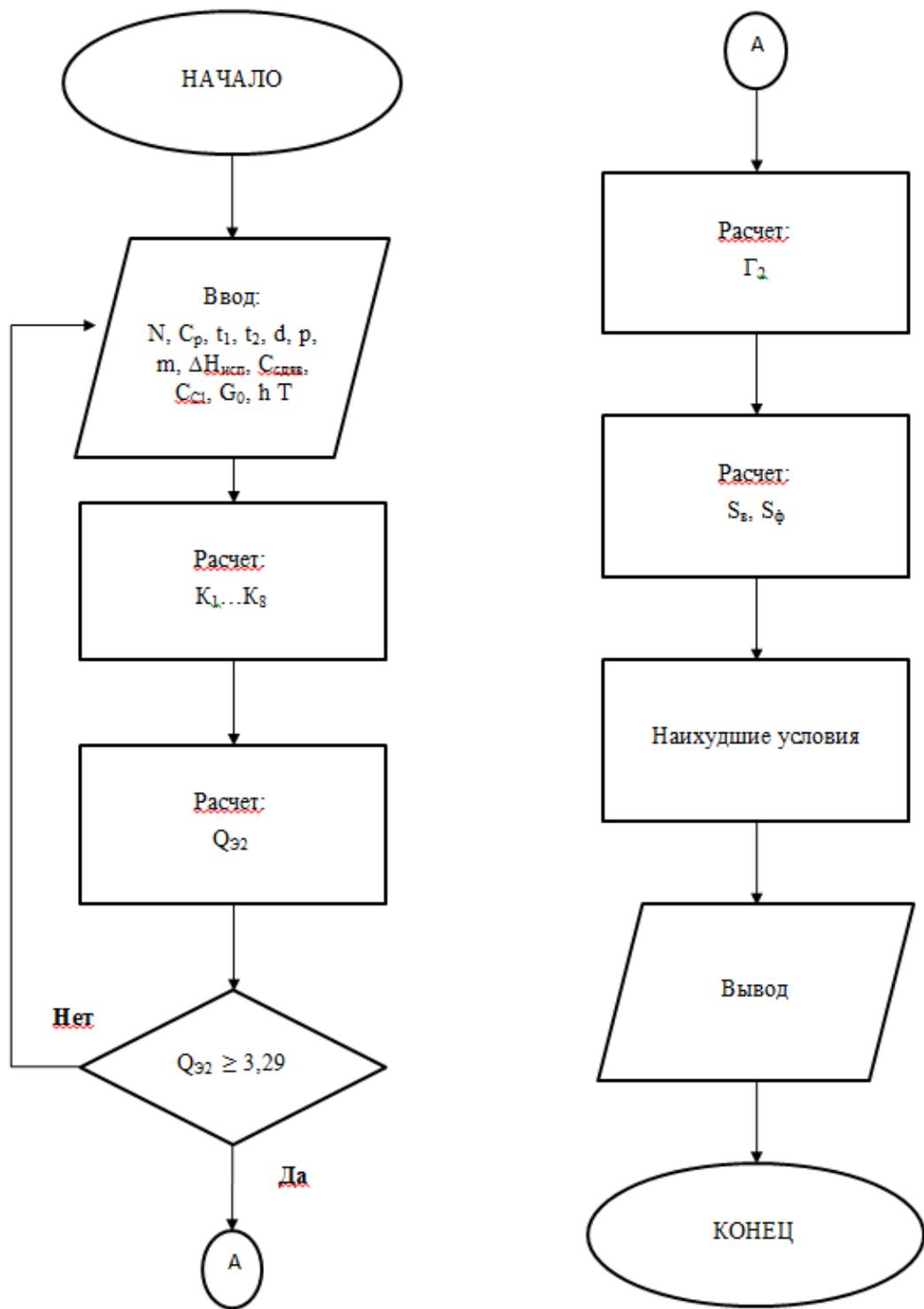


Рис.6. Алгоритм расчета.

Таблица 1. Данные расчета зоны возможного заражения НДМГ и АТ при следующих исходных данных: скорость ветра - 2,6 м/с, степень вертикальной устойчивости атмосферы – инверсия, время прошедшее после аварии- 1 час, масса НДМГ – 1,75 т, масса АТ- 3,6 т, Температура жидкости до / после разрушения 5⁰С/-0,6⁰С

Наименование параметра	Обозначение, расчетная формула и размерность	НДМГ	АТ
Удельная теплоемкость	C_p , кДж/(кг·°С)	2,717	1,78
Изменение температуры при разливе	$\Delta t = t_2 - t_1 $, °С	5,6	5,6
Плотность	d , т/м ³	0,7914	1,443
Давление насыщенного пара	мм рт.ст	16,3	96
Молекулярная масса вещества	m	60,0986	92,011
Удельная теплота испарения	$\Delta H_{исп}$, кДж/кг	583,1	419,1
Значение токсодозы СДЯВ	C_p , кДж/(кг·С)	0,216	4,32
Значение токсодозы хлора	C_{Cl} мг·мин/л	0,6	0,6
Масса вещества	$G_{o,t}$	1,75	3,6
Коэффициент, зависящий от условий хранения СДЯВ	$K_1 = \frac{C_p * \Delta t}{\Delta H_{исп}}$	0,026	0,024
Толщина слоя СДЯВ	h , м	0,05	0,05
Коэффициент, зависящий от физико-химических свойств СДЯВ	$K_2 = 8.10 * 10^{-6} \sqrt{m}$	0,0010	0,0075
Коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе другого СДЯВ	$K_3 = \frac{C_{cl}}{C_{сдьяв}}$	2,778	0,139
Коэффициент, учитывающий скорость ветра	K_4	1,67	1,67
Коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости атмосферы	K_5	1	1
Коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха	K_7	1	1
Время испарения СДЯВ с площади разлива	$\tau_{исп} = \frac{h*d}{K_2*K_4*K_7}$, ч	23,150	5,792
Коэффициент, зависящий от времени N , прошедшего после начала аварии	K_6	12,349	4,076
Эквивалентное количество вещества	$Q_{э2,t}$	2,53	0,34
Глубина зоны заражения для вторичного облака	Γ_2 , км	3,56	1,57
Зона заражения, соответствующая $m1$	R_1 , км	2,17	2,17

Зона заражения, соответствующая m2	$R_2, \text{км}$	3,99	3,99
Площадь зоны возможного заражения СДЯВ	$S_B, \text{км}^2$	4,97	0,97
Площадь зоны фактического заражения	$S_\phi, \text{км}^2$	1,68	0,33
Коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости воздуха	K_8	0,133	0,133
Угловой размер зоны возможного заражения	$\varphi, ^\circ$	45	45

В расчетах с целью получения максимальных оценок рассматривались все возможные неблагоприятные условия состояния атмосферного воздуха. Если сравнивать глубину зоны поражения РБ «Фрегат» и блока выведения «Волга», то можно сделать вывод, что по НДМГ радиус зоны поражения токсичным компонентом при аварии РБ «Фрегат» будет в пять раз больше, а по АТ радиус зоны поражения токсичным компонентом будет в шесть раз больше.

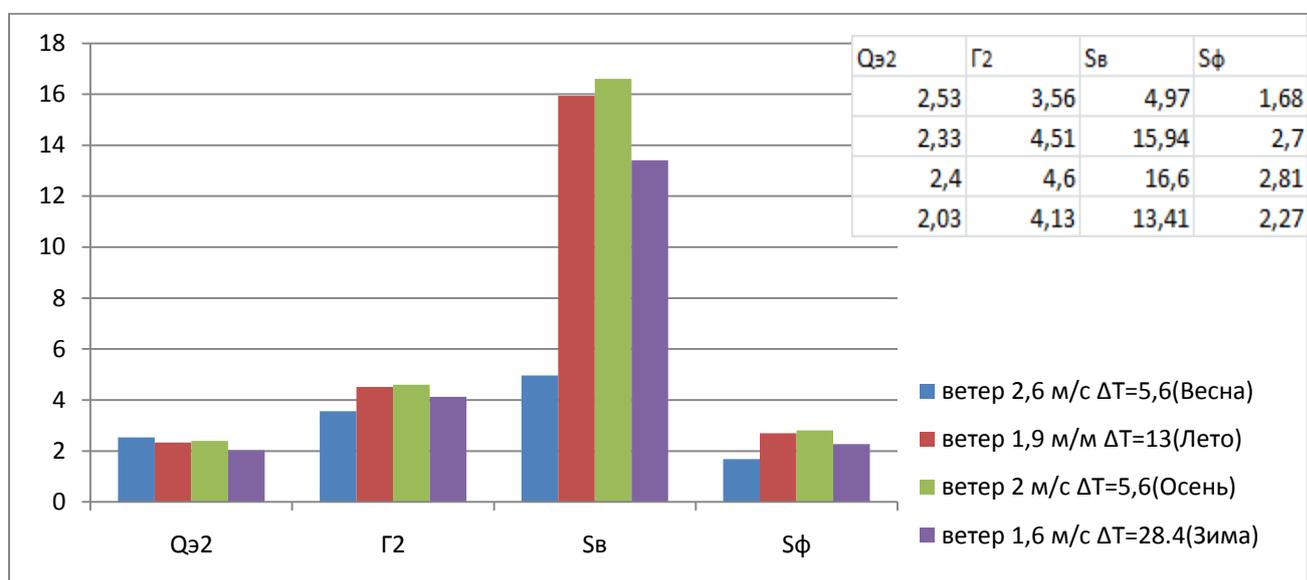


Рис. 7. Диаграмма зависимости значений $Q_{э2}$, Γ_2 , S_B , S_ϕ для НДМГ от климатических факторов при $T=1$ час после аварии.

Приведем результаты расчета значений $Q_{э2}$, Γ_2 , S_B , S_ϕ для четырех времен года с учетом среднестатистической температуры и средней скорости ветра. Результаты расчета сведены в диаграмму и графики. Можно сделать вывод, что $Q_{э2}$ имеет максимальное значение при скорости ветра 1,6 м/с и $|\Delta T| = 5,6^\circ\text{C}$, S_B , S_ϕ имеют максимальные значения при скорости ветра 2 м/с и $|\Delta T| = 6,6^\circ\text{C}$, Γ_2 имеет максимальное значение при скорости ветра 1,9 м/с и $|\Delta T| = 6,6^\circ\text{C}$.

Графики зависимостей $Q_{э2}$, Γ_2 , S_{ϕ} , S_v от скорости ветра и температуры О.С.

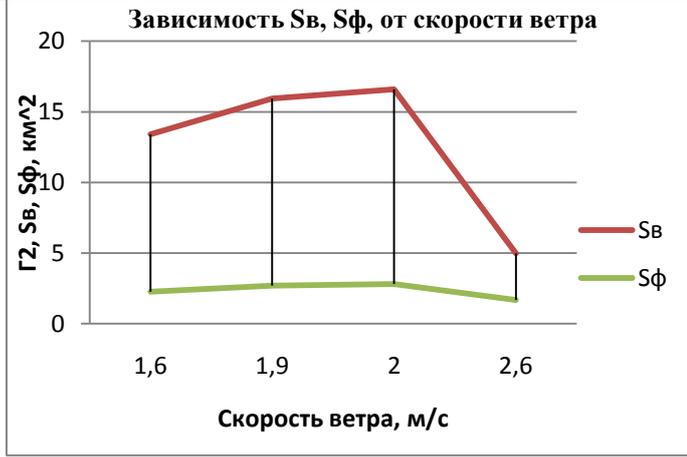


Рис.8.1 График зависимости S_v (Площадь зоны возможного заражения СДЯВ), S_{ϕ} (Площадь зоны фактического заражения) от скорости ветра

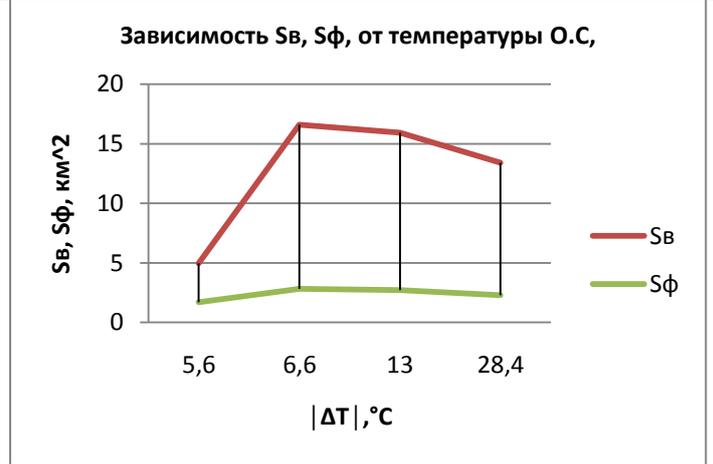


Рис.8.2 График зависимости S_v (Площадь зоны возможного заражения СДЯВ), S_{ϕ} (Площадь зоны фактического заражения) от температуры О.С.



Рис.8.3 График зависимости Γ_2 от скорости ветра



Рис.8.4 График зависимости Γ_2 от температуры окружающей среды

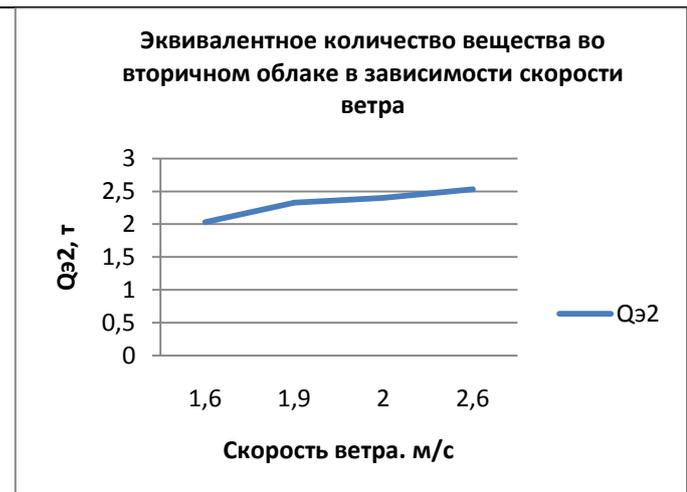


Рис.8.5 Зависимость эквивалентного количества вещества $Q_{э2}$ во вторичном облаке от скорости ветра

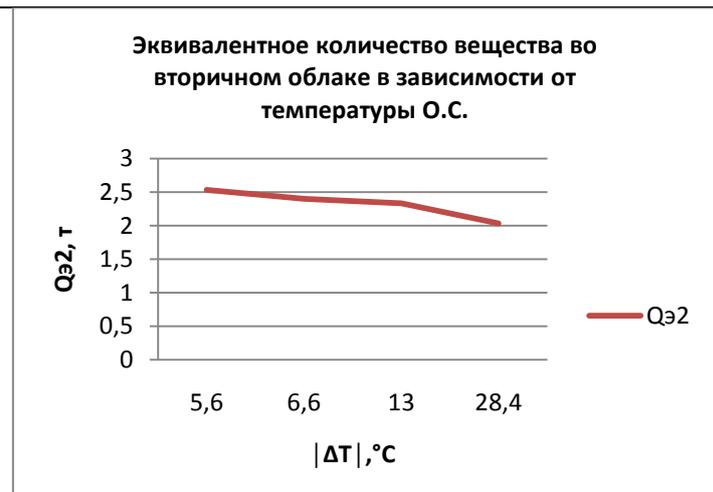


Рис.8.6 Зависимость эквивалентного количества вещества $Q_{э2}$ во вторичном облаке от температуры О.С.

Список литературы:

1. Экологические проблемы и риски воздействий РКТ на окружающую природную среду. Справочное пособие. Группа авторов; Под общ. ред. чл.корр. РАН В.В. Адушкина. - М.: Изд-во «Анкил», 2000.
2. Сотников, Е.Е. Газохроматографическое определение несимметричного диметилгидразина в воде / Е.Е. Сотников, А.С. Московкин // Журнал аналитической химии. - 2006. - № 2. - С. 139-142.
3. Методика оценки последствий аварий на пожаро-взрывоопасных объектах / отв. ред. и сост. О.В. Бодриков, А.П. Елохин, Б.В. Рязанцев, В.С. Рыжиков. - М.: ВНИИ ГОЧС, 1994.
4. Васильков, А.Д. Руководящий материал по ликвидации аварийных больших проливов окислителя АТ (АК) и горючего НДМГ / А.Д. Васильков. - Л.: ГИПХ, 1981. - 172 с.
5. Портола, В.А. Расчет процессов горения и взрыва / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцова, Е.С. Тарасян. - Томск: Томский политехнический университет (Национальный исследовательский университет), 2012.
6. Теория и практика эксплуатации объектов космической инфраструктуры. Объекты космической инфраструктуры. - С.-Пб.: БХВПетербург, 2008. - 400 с.
7. Хоряк, Н.В. Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы «ЖРД-корпус РН» по спектру матрицы: методические основы и приложение / Н.В. Хоряк // Авиационно-космическая техника и технология. - 2007. - № 9 (45). - С. 87 - 91.
8. Космический ракетный комплекс «Союз-2» на космодроме «Восточный». Пояснительная записка. Материалы по оценке воздействия на окружающую среду КРК «Союз-2» при создании и эксплуатации на космодроме «Восточный» Союз - Восток.0000-0 ПЗ-2.(Эскизный проект): - ФГУП «ЦНИИМаш», ГНПРКЦ «ЦСКБ - Прогресс», 2012.
9. Единые правила безопасности при взрывных работах / ПБ 13-407-01: утв. Госгортехнадзор России от 30.01.01. - М.: НПО ОБТ, 2002 г. - 238 с.
10. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте: РД 52.04.253 - 90. - С.Пб.: Интеграл, 2000. - 36 с.
11. Галанов, М.В. Опасность загрязнения окружающей среды гептилом и продуктами его превращения при разливе ракетного топлива / М.В. Галанов, И.С. Мисоченко // Промышленная экология: сб. науч. тр. Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2009. - С. 17-26.
12. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: ОНД-86, утв. Госкомгидромет 04.08.86. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - 76 с.
13. Оценка современного состояния и прогноз воздействия на окружающую среду космодрома «Свободный», ОКР «Свободный». / Аналитический Центр Геологического института, отв. ред. и сост. А.Е. Макаров. - М.: АЦГИ РАН, 1997.
14. Зрелов, В.Н. Жидкие ракетные топлива / В.Н. Зрелов, Е. Серегин. - М.: Химия, 1975. - 320 с.
15. Экологическая безопасность России: Материалы Всероссийской конференции по экологической безопасности / Министерство природных ресурсов Российской Федерации; отв. ред. и сост. В.В. Куценко, А.В. Яблокова. - М.: МПР РФ, 2002. - 202 с.
16. Александров, Е.С. Основы эксплуатации космических средств // Е.С. Александров, Л.Т. Баранов, А.И. Вайнтрауб, В.И. Гарюнов, В.Л. Гузенко, В.С. Жигилей. - Санкт-Петербург: Изд-во ВИКУ имени А.Ф. Можайского, 2000.