

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
NUCLEAR, RADIATION AND
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 623.454.8: 621.86

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02>

EDN GIAKOU

Оригинальная статья / Original paper



Оценка технического состояния малогабаритной ядерной энергетической
установки после опрокидывания транспортного агрегата

О.А. Губеладзе , А.Р. Губеладзе 

Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл.,
Российская Федерация

 buba26021966@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается заключительный этап развития аварийной ситуации связанной с опрокидыванием транспортного агрегата с малогабаритной ядерной энергетической установкой. Проведенное математическое моделирование позволило получить информацию о возможных последствиях. В числе наиболее серьезных прогнозируемых повреждений – нарушения теплозащитного покрытия в области наконечника и донной части блока, входящего в состав разделяющейся головной части. Для оценки неприемлемости того или иного повреждения использована методика расчета аэродинамических характеристик течений вблизи поверхности с дефектом. При незначительных повреждениях возможно рассмотрение вопроса о дальнейшем использовании блока по назначению, что может быть важно в угрожаемый период для государств с ограниченным количеством подобных изделий.

Ключевые слова: малогабаритная ядерная энергетическая установка, опрокидывание транспортного агрегата, разделяющаяся головная часть, прогнозируемые повреждения, теплозащитное покрытие.

Для цитирования: Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Оценка технического состояния малогабаритной ядерной энергетической установки после опрокидывания транспортного агрегата. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(4):19–26. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02>

For citation: Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Technical condition assessment of a small-sized nuclear power plant after transportation unit overturning. *Global nuclear safety*. 2024;14(4):19–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2024-04-02>

Technical condition assessment of a small-sized nuclear power plant after transportation unit
overturning

Oleg A. Gubeladze , Avtandil R. Gubeladze 

Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Rostov region, Russian Federation

 buba26021966@yandex.ru

Abstract. The article considers the final stage of emergency development associated with the transport unit overturning with a small-sized nuclear power plant. Mathematical modelling allowed to obtain information about possible consequences. Among the most serious foreseeable damages are violations of the thermal protection coating in the area of the tip and bottom of the unit, which is a part of the separating head unit. To assess the unacceptability of this or that damage, the method of calculation of aerodynamic characteristics of flows near the surface with a defect was used. In case of insignificant damage, it is possible to consider further use of the unit for its intended purpose, which may be important in the threatened period for states with a limited number of such products.

Keywords: small-size nuclear power plant, overturning of the transportation unit, separating head part, predicted damage, heat shielding.

Малогобаритные ядерные энергетические установки (далее – МЯЭУ) условно можно разделить на две группы: устройства для получения тепловой, электрической или механической энергии в ходе управляемой ядерной реакции, осуществляемой в ядерном реакторе; ядерные боеприпасы – устройства, использующие ядерную энергию, высвобождающуюся в результате лавинообразно протекающей ядерной реакции деления тяжелых ядер или термоядерной реакции синтеза легких ядер. К подвижным объектам с МЯЭУ относятся: транспортные средства с ЯЭУ, ядерные энергетические установки судов, плавучие атомные тепловые электростанции, космические и летательные аппараты с ядерными источниками энергии; мобильные пусковые установки ракет с ядерными боеприпасами и агрегаты для перевозки ядерных боеприпасов; установки для транспортирования ядерного топлива и ядерных материалов, находящихся в транспортно-упаковочных комплексах, сухопутные передвижные атомные электростанции.

Вероятностные модели для различных этапов эксплуатации ракетно-ядерного вооружения будут существенно отличаться друг от друга. При ведении боевых действий обычными средствами поражения на первый план выходят аварийные ситуации (далее – АС), связанные с преднамеренными нерегламентированными деструктивными воздействиями (далее – НДВ). Наиболее опасной операцией является транспортировка головных частей (далее – ГЧ) автомобильным транспортом как в составе носителя на подвижных пусковых установках, так и отдельно на транспортных агрегатах (далее – ТА). При этом возможны различные аварийные ситуации, в том числе пожары, опрокидывания, столкновение с преградой [1].

Значения характеристик внешних воздействующих факторов в моделях аварийных ситуаций определяются с учетом эксплуатации комплекса, а также выполненных исследований безопасности объекта. Из перечня возможных АС и этапов их развития выбраны представленные в таблице 1.

В СССР начале 1991 г. проведен полномасштабный эксперимент по проверке боеготовности боевого железнодорожного ра-

кетного комплекса при воздействии взрывной ударной волны [2,3]. Объектами исследований были две ПУ с загруженным электромакетом ракеты и командный пункт (удаленность взрыва от объекта испытания: 850 и 450 м от центра взрыва соответственно). Взрыв был наземный направленный, заряд обычный (неядерный). Мощность заряда не менее 0,25 кт. Для имитации ядерного взрыва использовали противотанковые мины ТМ-57 [2], которые были выложены в форме усеченной пирамиды высотой 20 м.

Кроме того, проводилась серия экспериментов по моделированию ударных воздействий на подвижную ПУ или ТА при столкновении или опрокидывании:

- опрокидывание ТА с изделием (с макетом заряда без взрывчатых и радиоактивных веществ, делящихся материалов, источников ионизирующего излучения и электродетонаторов);

- изделие (с макетом) в транспортном контейнере испытывалось на механические воздействия при боковом столкновении транспортной машины с железнодорожным составом.

Таблица 1. Возможные АС и этапы их развития

Table 1. Possible emergencies and stages of emergency development

Условное обозначение	Аварийная ситуация	Параметры
АС-I	Падение на бетон (грунт) при столкновении; опрокидывании агрегата	Диапазон высот падения, характеристики поверхности
№ этапа	Этап	
Э-1	Удар о поверхность, преграду	
Э-3	Механическое воздействие на узлы крепления	
Э-13	Взрыв, сгорание	

Подобные исследования требуют больших материальных и временных затрат, поэтому наиболее оптимальным путем является разработка математических моделей и проведение проверки их адекватности (верификация) в ходе экспериментальных исследований. Причем, на начальном этапе, с целью уточнения исходных данных для планирования и отработки крупномасштабного эксперимента необходимо предвари-

тельно проводить исследования с физическими моделями в лабораторных условиях.

Углы предельного бокового крена по опрокидыванию β_o и по скольжению β_c характеризуют способность ТА устойчиво двигаться вдоль уклонов. Значения этих углов приближенно определяется из выражений: $\beta_o = \arctg(B/2H_{цм})$ и $\beta_c = \arctg\mu$. Здесь B – колея агрегата, $H_{цм}$ – высота центра тяжести, G – вес агрегата, μ – коэффициент поперечного скольжения колес ТА.

Поперечную устойчивость тягача в вертикальной плоскости оценивают с использованием следующих критериев:

- статический коэффициент крена K_c – отношение угла крена подрессоренной массы к углу поперечного профиля дороги, вызывающему этот крен в статическом положении;
- динамический коэффициент крена – отношение амплитуды угловых поперечных колебаний подрессоренной массы к максимальному углу наклона профиля дороги, образуемого неровностями под правым и левым колесами.

В данном случае были использованы ранее разработанные модели [4,5] для опреде-

ления ударных ускорений на элементах конструкции МЯЭУ при ее падении на поверхность (рис. 1а) [4] и для оценки силы сопротивления преграды (рис. 1б) [5]. Расчетная схема, с момента времени, когда движение в области преграды по нормали прекращается и объект начинает падать на бок [6], представлена на рисунке 1в. Кроме того, проведена оценка для ТА с многоблочной ГЧ (рис. 2) при движении вдоль уклона. Все эти модели были объединены в пакет программ, который позволяет проводить предварительную оценку результатов развития подобных аварийных ситуаций.

Рассмотрим АС, связанную с опрокидыванием ТА. В качестве тактической обстановки выбран вариант нападения противника на колонну при движении. Для расчетов выбраны: реальный участок местности (полномасштабный эксперимент с опрокидыванием агрегата); боевой порядок диверсионной группы в засаде (рис. 3). На рисунке 4 представлена исходная расчетная схема для случая воздействия ударной волны на ТА при движении вдоль уклона.

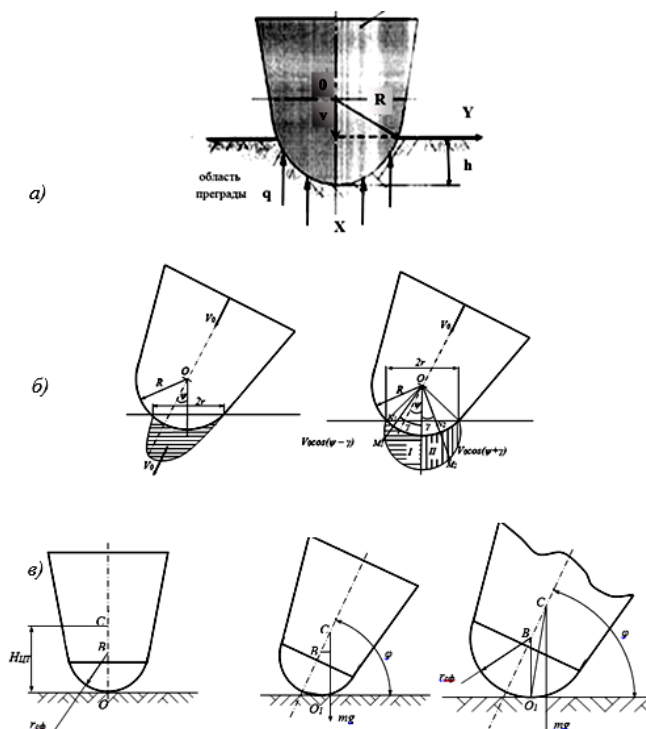


Рисунок 1. Расчетные модели: а – для определения ударных ускорений на элементах конструкции МЯЭУ при ее падении на поверхность [4]; б – для оценки силы сопротивления преграды [5]; в – при падении на бок [6]
Figure 1. Calculation models: a – to determine the shock accelerations on the elements of the MNREU structure when it falls on the surface [4]; б – to estimate the resistance force of the obstacle [5]; c – when falling on the side [6]

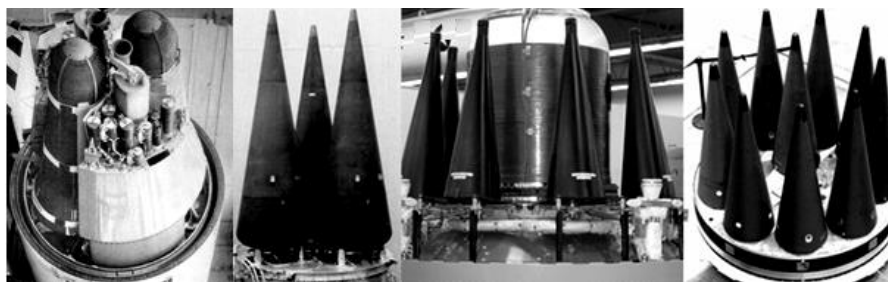
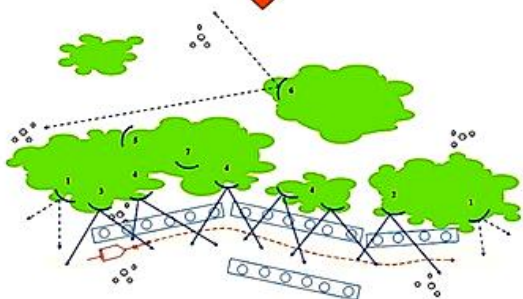


Рисунок 2. Разделяющиеся головные части ракет стратегического назначения США

Figure 2. Separable warheads for U.S. strategic missiles



1-подгруппа доразведки; 2-подгруппа, останавливающая колонну;
3-подгруппа, воспрепятствующая отходу; 4-главные силы;
5-резервная подгруппа; 6-подгруппа боевого обеспечения (охранение);
7-подгруппа захвата

Рисунок 3. Тактическая обстановка

Figure 3. Tactical situation

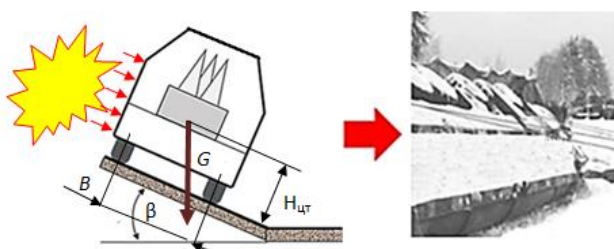


Рисунок 4. Исходная схема для моделирования

Figure 4. Initial scheme to be modeled

Моделирование проводилось для различных компоновочных схем изделий (по числу блоков – 3, 4, 6, 8, 10). Например, для оснащения с шестью блоками расчет показал, что в результате падения транспортного агрегата будет сорван один блок с посадочного места.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод что, возникновение аварийного взрыва объекта, а также разрушение его конструкции с возможным радиоактивным заражением местности осколками заряда при развитии данной аварийной ситуации маловероятно. В числе наиболее серьезных прогнозируемых повреждений – нарушения теплозащитного покрытия (далее – ТЗП) в области наконечника и донной части блока.

Дефекты (повреждения) обтекаемой поверхности создают сложную картину отрывного и безотрывного течения с образованием скачков уплотнения и волн разряжения. Исследование силового и теплового воздействия на конструкцию объекта при спуске на атмосферном участке траектории связано с изучением устойчивости ламинарного пограничного слоя и его перехода в турбулентное состояние. Переход ламинарного слоя в турбулентный совершается не мгновенно, начало и конец перехода соответствуют первому и второму критическим числам Рейнольдса ($Re' = 3 \times 10^6$; $Re'' = 4 \times 10^6$) для малых скоростей. При больших скоростях на переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный существенное влияние оказывают сжимаемость газового потока и теплопередача между обтекаемой стенкой и средой. В случае неадиабатической стенки устойчивость зависит от числа Маха набегающего потока M_∞ для заданного соотношения температур T_{cm}/T_∞ (где T_{cm} и T_∞ –

температуры стенки и набегающего потока соответственно). При $T_{cm}/T_{\infty} \geq 2$ с ростом числа Маха до пяти возрастает и предел устойчивости, а при больших числах Маха наоборот снижается. Наличие шероховатости поверхности увеличивает тепловые потоки в 1,5-2 раза [7]. Анализ результатов исследований влияния шероховатости на количество унесенного материала ТЗП показал, что неучет этого влияния приводит к заниженным в 1,5-2,5 раза данным по суммарным значениям массы.

В качестве шероховатости может рассматриваться наличие выступов или впадин с высотой (глубиной) h . Ожидается, что с ростом относительной шероховатости $h/\delta_{кр}^*$ ($\delta_{кр}^*$ – условная толщина пограничного слоя) характерно снижение значений отношения $Re_{кр}^{шер}/Re_{кр}^{глад}$. Пограничный слой у поверхности блока с поврежденным ТЗП будет крайне неустойчивым и его переход в турбулентное состояние произойдет уже на первых секундах полета в плотных слоях атмосферы.

Величина теплового потока q будет зависеть от места нахождения дефекта на поверхности (удаление от носка объекта). Также значительные изменения величины удельного теплового потока происходят по всей длине l донной поверхности каверны. Влияние физико-химических превращений на теплоотдачу в пограничном слое возможно учесть, используя метод определяющих параметров. Для композиционных материалов, обладающих сложной структурой, следует обратить внимание на пропорцию между глубиной дефекта и характерным его поперечным размером. То есть, в задаче об изучении разгара в области дефекта (каверны) существенным становится отношение толщины вытеснения δ^* к характерному размеру повреждения l и l/h (где h – глубина каверны).

При обтекании каверны, которая полностью находится в области отрывного течения, если ее продольный размер l будет меньше суммы размеров двух отрывных зон

за и перед уступами, образующими эту каверну, безразмерный коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ и безразмерный тепловой поток $\bar{q}$ (рис. 5) за точкой отрыва меньше, чем на пластине при тех же условиях обтекания. С приближением к задней стенке каверны вниз по потоку $\bar{\alpha}$ и $\bar{q}$ возрастают и непосредственно перед стенкой достигают максимума. При сложном обтекании каверны, соответствующем течению в замкнутой полости, относительный коэффициент теплоотдачи к нижней стенке значительно выше, чем для случаев обтекания открытой каверны.

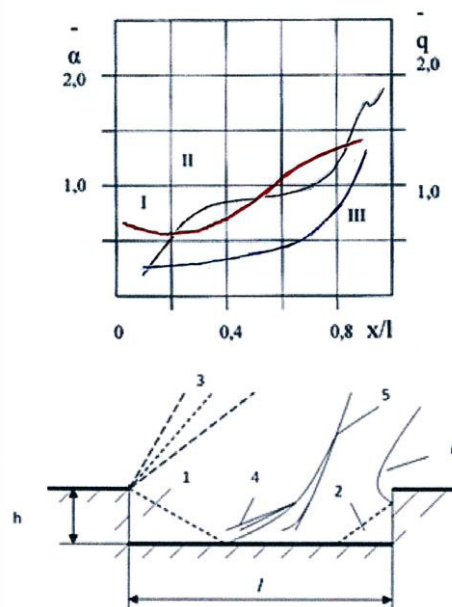


Рисунок 5. Обтекание закрытой каверны I – $\bar{q}$: $M_{\infty}=2,9$ $l/h=5$; II – $\bar{\alpha}$: $M_{\infty}=6,3$ $l/h=30$; III – $\bar{\alpha}$: $M_{\infty}=6,3$ $l/h=5$; 1,2 – зоны циркуляционного течения; 3 – волны разрежения; 4,5,6 – скачки уплотнения
Figure 5. Streamline of a closed cavern I – $\bar{q}$: $M_{\infty}=2,9$ $l/h=5$; II – $\bar{\alpha}$: $M_{\infty}=6,3$ $l/h=30$; ; III – $\bar{\alpha}$: $M_{\infty}=6,3$ $l/h=5$; 1,2 – circulation flow zones; 3 – rarefaction waves; 4,5,6 – compaction jumps

При обтекании обратных уступов (турбулентный отрыв плоского потока) α также повышается в области присоединения потока (рис. 6). При решении задачи определения температурного поля поврежденного ТЗП целесообразно использование ортогональной криволинейной сетки. Здесь решающее значение (для использования метода) имеет перпендикулярность в точке пересечения

касательных к границе и координатной линии, соединяющей узловые точки. В расчетной области, имеющей нерегулярную геометрию (зоны с дефектами поверхности) проводится «блокировка» некоторых объемов регулярной сетки так, чтобы оставшиеся объемы составляли рассматриваемую нерегулярную область, границу которой следует аппроксимировать. Треугольная форма более удобна для аппроксимации нерегулярных областей и получения локального «сгущения» узловых точек сетки метода конечных элементов, который в нашем случае не следует считать отличающимся в принципе от конечно-разностного метода. Возникающие трудности могут быть также успешно преодолены с помощью метода конечных элементов, основанного на интегрировании по контрольному объему.

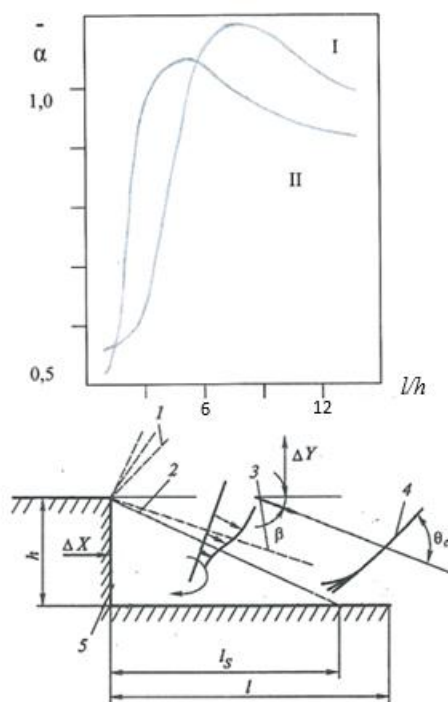


Рисунок 6. Обтекание открытой каверны
I – $M_\infty=3,5$; II – $M_\infty=2,0$; 1 – волны разрежения;
2 – разделяющая линия тока;

3 – «разграничивающая» линия тока; 4 – скачок уплотнения; 5 – область циркуляционного течения

Figure 6. Open cavern streamline I – $M_\infty=3,5$;
II – $M_\infty=2,0$; 1 – rarefaction waves; 2 – dividing current line; 3 – «delimiting» current line; 4 – compaction jump;
5 – circulating flow region

Для оценки неприемлемости того или иного повреждения ТЗП использована мето-

дика расчета аэродинамических характеристик течений вблизи поврежденной поверхности [8–10]. Некоторые результаты представлены на рисунке 7.

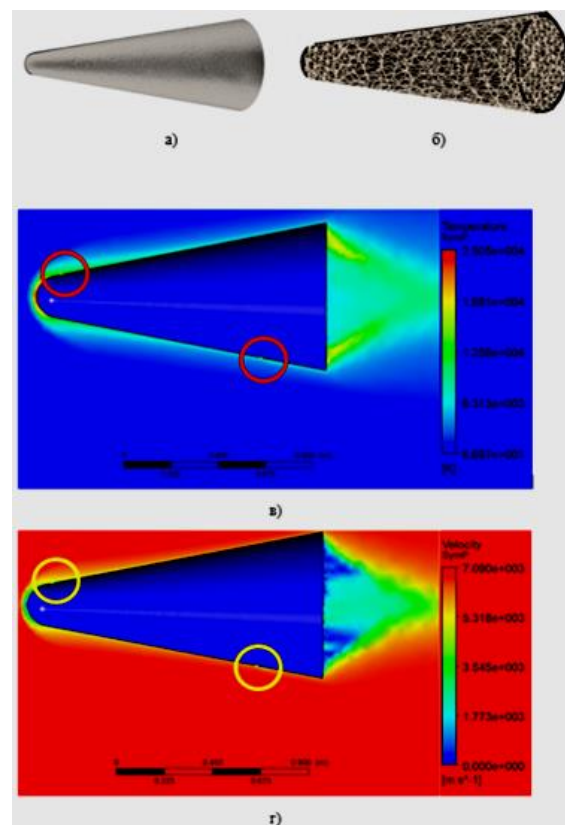


Рисунок 7. Моделирование аэродинамических характеристик течений вблизи поврежденной поверхности а – исходная модель; б – сетка для применения метода конечных элементов; в – расчет температурных полей; г – расчет скоростей потока

Figure 7. Modeling of aerodynamic characteristics of flows near the damaged surface а – initial model; б – mesh for application of finite element method; в – calculation of temperature fields; д – calculation of flow velocities

Таким образом, при незначительных повреждениях ТЗП оценка технического состояния блока представляется актуальной с точки зрения рассмотрения вопроса о дальнейшем использовании по назначению. Это может быть особенно важно в угрожаемый период для государств с ограниченным количеством подобных изделий.

На рисунке 8 представлены зависимости некоторых параметров от угла наклона траектории к местному горизонту θ для различных скоростей входа в плотные слои атмосферы. Здесь q – тепловой поток к ТЗП,

$\Delta\tau$ – время полета, $\tau_q / \Delta\tau$ – относительное время теплового воздействия.

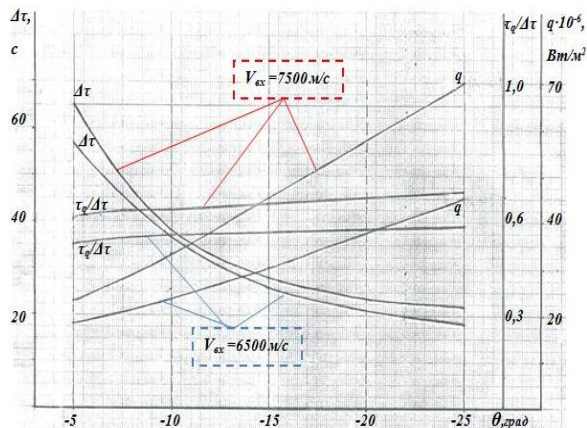


Рисунок 8. Зависимость теплового потока к теплозащитному покрытию от угла наклона траектории

Figure 8. Dependence of heat flux to the heat shield on the trajectory inclination angle

Проведенные исследования показали:

- пограничный слой у поверхности поврежденного ТЗП будет крайне неустойчивым и его переход в турбулентное состояние произойдет уже на первых секундах полета ББ в плотных слоях атмосферы;
- форма дефекта оказывает слабое влияние, а принципиальное значение имеет лишь соотношение между глубиной и протяженностью донной части (диаметром) дефекта;
- изменяя величину θ , можно снизить тепловую нагрузку на ТЗП с малыми дефектами.

Угол наклона зависит от дальности полета, поэтому следует выбрать соответствующие цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Андрияшин И.А. Безопасность ядерного оружия России: законодательная база, научно-технические подходы, организация, жизненный цикл. Министерство РФ по атомной энергии, 1998. 140 с. Режим доступа: https://www.alib.ru/au-andryushin/nm-bezopasnostnmmn_yadernogo_oruzhiya_rossii/ (дата обращения: 08.07.2024).
2. Северный космодром России. Том 1. Под общей редакцией Башлакова А.А.. Мирный: Космодром «Плесецк», 2007. 568 с. Режим доступа: <https://reallib.org/reader?file=737990&pg=1> (дата обращения: 08.07.2024).
3. Рязских А.А. Оглянись назад и посмотри вперед. Записки военного инженера. Книга 2. Москва: Герои отечества, 2006. 622 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_002910223/ (дата обращения: 08.07.2024).
4. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Определение ударных ускорений на элементах конструкции малогабаритной ядерной энергетической установки при ее падении на поверхность. *Глобальная ядерная безопасность*. 2020;1(34):7–16. <https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-01>
Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. The determination of shock accelerations on a small nuclear power plant structural elements when falling to the surface. *Global nuclear safety*. 2020;1(34):7–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2020-01-01>
5. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р. Определение влияния сопротивления грунтовой преграды на малогабаритную ядерную энергетическую установку при аварийной ситуации. *Глобальная ядерная безопасность*. 2021;3(40):25–36. <https://doi.org/10.26583/gns-2021-03-03>
Gubeladze O.A., Gubeladze A.R. Determination of soil barrier resistance influence to compact nuclear power plant at emergency situation. *Global nuclear safety*. 2021;3(3):25–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2021-03-03>
6. Денисов О.В., Губеладзе О.А., Месхи Б.Ч., Булыгин Ю.И. Комплексная безопасность населения и территорий в чрезвычайных ситуациях. Проблемы и решения. Монография. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2016. 278 с. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008865338/ (дата обращения: 08.07.2024).
7. Губеладзе О.А., Гончаров Р.А., Левченко Е.М., Сахабудинов Р.В. Влияние дефектов поверхности корпуса летательного аппарата на тепловой пограничный слой. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2008;1:28–29. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9989546> (дата обращения: 12.07.2024).
Gubeladze O.A., Goncharov R.A., Levchenko E.M., Sakhabudinov R.V. Influence of case surface defects of the aircraft on a thermal interface. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region. Natural Science*. 2008;1:28–29. (in Russ.). Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9989546> (accessed: 12.07.2024).
8. Губеладзе О.А., Губеладзе А.Р., Бурдаков С.М. Безопасность перспективных космических аппаратов с ядерной энергетической установкой. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;7(1):13–20. Режим доступа: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2017.1.1.2.pdf> (дата обращения: 08.07.2024).

Gubeladze O.A., Gubeladze A.R., Burdakov S.M. Safety of perspective spacecrafts with the nuclear power installation. *Global nuclear safety*. 2017;7(1):13–20. (in Russ.). Available at: <http://gns.mephi.ru/sites/default/files/journal/file/ru.2017.1.1.2.pdf> (accessed: 08.07.2024).

9. Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Калугин В.Т. Аэродинамика отрывных течений. Москва: Высшая школа. 1988. 351 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001420647> (дата обращения: 12.07.2024).

10. Avery D.E., Kerr P.A., Wieting A.R. Experimental aerodynamic heating to simulated Shuttle tiles. National Aeronautics and Space Administration. Langloy Research Center. Hampton, Virginia, 1983. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001420647> (accessed: 12.07.2024).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Губеладзе О.А. – написание статьи, математическая реализация решения задачи, участие в проведении эксперимента;

Губеладзе А.Р. – постановка задачи, редактирование текста и участие в проведении эксперимента.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Gubeladze O.A. – writing a paper, mathematical implementation of the problem solution, participation in the experiment;

Gubeladze A.R. – setting the problem, editing the text, and participating in the experiment.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Авторы заявляют об отсутствии финансирования.

FUNDING:

The authors state that there are no sources of funding.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Олег Автандилович Губеладзе, кандидат технических наук доцент, Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Российская Федерация.

<http://orcid.org/0000-0001-6018-4989>

WoS ResearcherID: F-6921-201

e-mail: buba26021966@yandex.ru

Автандил Рубенович Губеладзе, кандидат технических наук доцент, Донской государственный технический университет (ДГТУ), Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Российская Федерация.

<https://orcid.org/0000-0002-6966-6391>

WoS ResearcherID: F-7215-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Oleg A. Gubeladze, Cand. Sci (Eng), Associate Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Rostov region, Russian Federation. Russian Federation.

<http://orcid.org/0000-0001-6018-4989>

WoS ResearcherID: F-6921-201

e-mail: buba26021966@yandex.ru

Avtandil R. Gubeladze, Cand. Sci (Eng), Associate Professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Rostov region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0000-0002-6966-6391>

WoS ResearcherID: F-7215-2017

e-mail: buba26021966@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 31.07.2024

После доработки / Revised 05.11.2024

Принята к публикации / Accepted 12.11.2024