

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.039.4

EDN: CULDIU

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗОНЫ ПОРАЖЕНИЯ ОТ ЛЕТАЩИХ ПРЕДМЕТОВ НА АЭС

О.В. ГорюновORCID: 0000-0001-6414-8619 e-mail: ovgoriunov@mail.ru

АО «РЭИН Инжиниринг»

Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты всестороннего аналитического исследования оценки зоны поражения, создаваемой летящим предметом на АЭС при разрушении элемента с высокой потенциальной или кинетической энергией. В рамках консервативного и реалистичного подходов получены явные формулы для построения как частных траекторий полета, так и огибающей всех возможных траекторий с учетом динамического воздействия струи и сил аэродинамического сопротивления. Выполнен оценочный расчет для высокоэнергетической арматуры.

Актуальность работы определяется тем, что в соответствии с апробированной методикой анализа влияния внутренних воздействий оценка перечня отказов из-за воздействия летящих предметов выполняется на основе зоны поражения. Геометрические размеры зоны поражения напрямую влияют на объем зависимых отказов, которые должны быть учтены при обосновании безопасности ОИАЭ в соответствии с ФНП РФ. Полученные результаты рекомендуются для обоснования безопасности ОИАЭ, в частности, при выполнении анализов внутренних и внешних воздействий, анализов проектных и запроектных аварий.

Ключевые слова: атомная станция, безопасность, летящие предметы, арматура, траектория полета, огибающая траекторий.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Горюнов, О.В. Аналитический подход к оценке зоны поражения от летящих предметов на АЭС // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 4. С. 32-43. EDN: CULDIU

AN ANALYTICAL APPROACH TO ASSESSMENT THE AFFECTED AREA FROM FLYING OBJECTS AT NUCLEAR POWER PLANTS

O.V. GoryunovORCID: 0000-0001-6414-8619 e-mail: ovgoriunov@mail.ru

Joint Stock Company «REIN Engineering»

St. Petersburg, Russia

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive analytical study of the assessment of the affected area created by flying objects at a nuclear power plant, caused by the destruction of an element with high potential or kinetic energy. Explicit formulas for constructing both partial flight trajectories and the envelope of all possible trajectories, taking into account the dynamic impact of the jet and aerodynamic drag forces, were obtained within the framework of conservative and realistic approaches. An evaluation calculation was performed for high-energy fitting.

The relevance of the work is that, in accordance with the proven methodology for analyzing the influence of internal influences, the assessment of the list of failures due to the impact of flying objects is carried out based on the affected area. The geometric dimensions of the affected area directly affect the volume of dependent failures, which must be taken into account when justifying the safety of nuclear facilities in accordance with federal standards and regulations of the Russian Federation. The results obtained are recommended for use within the framework of performing a safety justification for nuclear facilities, in particular, when performing analyzes of internal and external impacts, analyzes of design basis and beyond design basis accidents.

Key words: nuclear power plant, safety, flying object, fittings, flight path, envelope of trajectories.

FOR CITATION: O.V. Goryunov. An analytical approach to assessment the affected area from flying objects at nuclear power plants. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 1. Pp. 32-43. EDN: CULDIU

Введение

Российская концепция новых проектов АЭС с ВВЭР, направленная на повышение конкурентоспособности российских АЭС на зарубежных рынках, включает:

- улучшение технико-экономических показателей (повышения экономичности выработки электроэнергии и снижения затрат на сооружение и эксплуатацию);
- обеспечение выполнения современных требований по безопасности (совершенствование компоновочных решений, выполнение требований российских нормативов, IAEA, EUR и требований заказчика).

Разработка проектных решений по повышению безопасности основывается на реализации концепции глубоко эшелонированной защиты (ГЭЗ) [НП-001-15, INSAG-12], предусматривает создание ряда физических барьеров на пути выхода радиоактивных веществ в окружающую среду и обеспечение высокого уровня надежности по защите этих барьеров от повреждений при всех внутренних и внешних воздействиях. Международные нормативные документы (МАГАТЭ SSR-2/1, SSG-64; WENRA; EUR) и национальные нормы ряда стран (YVL Guide B.1, B.7 (Финляндия), NSC 3a (Венгрия), NUREG – 0800 p.3.5.1.1 (США), Recdoc (Канада), ФНП РФ (НП-001-15, НП-006-16, НП-018-05) и др.) требуют учитывать в проекте АС влияние внутренних воздействий на безопасность, в частности, воздействие и последствия возникновения летящих предметов (*missiles*). Данное воздействие может приводить к механическим повреждениям элементов систем и зданий, к отказам, в конечном итоге – к деградации уровня или уровней ГЭЗ.

К летящим предметам относят твердые объекты, образовавшиеся в результате разрушения элементов систем, обладающих большой кинетической или потенциальной энергией. Летящие предметы могут быть вызваны: взрывом, разрывом высокоэнергетического сосуда под давлением, разлетом осколков вращающихся машин (двигатель насоса, ротор генератора турбоагрегата [1, 2] и др.), вылетом крышки/штока арматуры и др. Вылет крышки арматуры может приводить к исходному событию, при анализе которого необходимо учитывать все зависимые отказы. Согласно указанным выше стандартам безопасности, влияние летящих предметов должно быть учтено в детерминистическом и вероятностном анализе безопасности. Результаты анализа влияния летящих предметов на безопасность являются частью исходных данных для выполнения анализов безопасности (ВАБ и ДАБ).

Перечень элементов, обладающих потенциальной энергией, для которых постулируется разрушение, и последствия разрушения которых необходимо учитывать в проекте АЭС, содержит только высокоэнергетические элементы, параметры рабочей среды которых удовлетворяют одному из следующих признаков: 1) рабочее давление $P \geq 2$ Мпа; 2) рабочая температура $T \geq 100$ С. В соответствии с апробированной методикой анализа влияния внутренних воздействий [3] оценка перечня отказов из-за воздействия летящих предметов выполняется на основе оценки зоны поражения – области пространства, в которой могут возникать механическое и/или температурное воздействия, обусловленное внутренним воздействием и его последствиями. Примеры зон поражения: область пространства с температурой выше 500 °С – при пожаре; зона затопления – помещения, имеющие негерметичные связи, не препятствующие или способствующие распространению затопления в рассматриваемое помещение из других помещений, вошедших в зону затопления – для затопления; область пространства, содержащая все семейство траекторий полета осколков ротора генератора – для летящих предметов и т.д. Трубопроводная арматура – группа устройств, устанавливаемых на трубопроводах и емкостях для управления потоками (движением) рабочих сред. Арматура подразделяется на управляемую (вручную или с помощью привода, действующего от постороннего источника энергии) и действующую автоматически (под действием сил, создаваемой давлением рабочей

среды – клапаны, регуляторы и др.) Управление потоком среды в арматуре осуществляется с помощью рабочего – запорного/регулирующего органа, состоящего из затвора и седла [4]. При высоких давлениях, особенно при больших диаметрах трубопроводов, сама арматура может стать источником нарушений эксплуатации [5].

В работе рассматривается подход для расчета параметров огибающей траекторий на примере наиболее представительного отказа арматуры, который может привести к повреждению соседних элементов систем и зданий – вылета крышки арматуры с учетом динамического воздействия струи и сил сопротивления. Результаты расчетов для отказа арматуры будут описывать наиболее общий случай летящего предмета.

В настоящее время детальные методики по анализу влияния на безопасность летящих предметов, источник которых расположен внутри здания, в научно-технической литературе не представлены, что затрудняет обоснование снижения консерватизма и развитие соответствующих расчетных методов, учитывающих ряд особенностей – взаимодействия струи теплоносителя с осколками, силы сопротивления, общий метод построения огибающих, оценку меры повреждающего воздействия и др. Настоящая работа направлена на заполнение указанного пробела в рамках разработанной методологии анализа внутренних воздействий [1].

Цель исследования – разработка метода расчета зоны поражения с учетом взаимодействия компонентов арматуры со струей теплоносителя и сопротивлением воздуха в рамках детерминистического анализа внутренних воздействий.

Постановка задачи

По аналогии со случаями двустороннего разрыва высокоэнергетического трубопровода, в рамках консервативного подхода рассматривается сценарий мгновенного среза всех креплений крышки арматуры, вызывающего движение крышки и элементов, связанных с ней (маховик, шток, шпindel, стойки, электропривод, сильфон и т.д.) под действием теплоносителя в трубопроводе. Последствия указанного события включают:

- 1) затопление;
- 2) повышение давления в помещении;
- 3) механическое воздействие струи на элементы систем и здания;
- 4) динамическое воздействие арматуры (столкновение с элементами систем и зданий).

Как правило, информация о положении/направлении шпинделя/крышки в пространстве отсутствует до завершения монтажных работ. В условиях плотной компоновки арматура может быть установлена под углом. На стадии технического и рабочего проектов неопределенность направления штока требуют рассматривать все возможные траектории полета в рамках оценки потенциальной зоны поражения – огибающую всех возможных траекторий, соответствующих начальным параметрам.

С практической точки зрения крышку арматуры можно рассматривать как материальную точку, уравнение движения которой имеет известный вид (точка над величиной означает производную по времени $\dot{z} = dz/dt$):

$$m\ddot{\vec{r}} = m\vec{g} + \vec{P} + \vec{F} \quad (1)$$

где m – масса крышки арматуры (кг); g – вектор ускорения свободного падения (m/c^2); r – радиус вектор положения центра масс крышки арматуры (м); P – сила, создаваемая давлением струи (Н), в общем случае $P = P(r)$; F – сила сопротивления (Н).

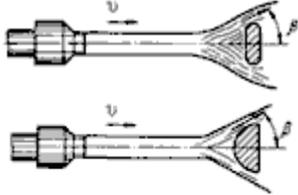
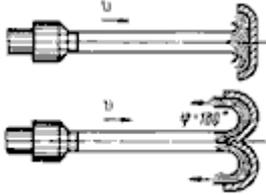
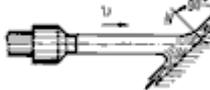
Консервативно силами сопротивления часто пренебрегают, однако полезно учесть их влияние реалистичной постановке. При столкновении с преградой струя оказывает на нее давление с силой, определяемой, в первую очередь, расходом жидкости и ее скоростью, но также зависящей от формы преграды и угла столкновения [6]:

$$P = k \cdot \rho \cdot S \cdot w^2, \quad (2)$$

где k – безразмерный коэффициент формы, зависящий от формы преграды и условий столкновения (табл. 1); w , м/с – средняя скорость струи; ρ , кг/м³ – плотность теплоносителя; S , м² – площадь поперечного сечения арматуры.

Таблица 1.
Коэффициенты формы для ряда случаев неподвижных преград

Table 1.
Shape coefficients for a number of cases of stationary obstacles

Тип преграды	Коэффициент формы	Примечания
Перпендикулярная плоскость 	$k = 1$	Жидкость растекается по плоскости, а не отражается от нее
Небольшая узкая преграда 	$k = 1 - \cos(\beta) < 1$	Сила давления определяется внутренним углом разлета жидкости β , измеренным на кромке преграды
Отражение с частичным разворотом струи 	$k = 1 + \cos(\beta) > 1$	Сила давления определяется углом разворота струи β , измеренным на кромке преграды
Отражение с полным разворотом 	$k = 2$	Характер разворота не влияет на давление при условии, что струя не тормозится
Плоскость под углом 	$k = \sin(\alpha) \leq 1$	Сила давления определяется углом α между плоскостью преграды и осью струи

Очевидно, что указанные в таблице коэффициенты формы аналогичны коэффициенту передачи импульса для абсолютно упругого механического столкновения твердого тела с преградой при соответствующем угле отскока. В случае, если струя содержит пузырьки газа или к моменту столкновения с преградой уже переходит в раздробленную либо распыленную стадию, в качестве плотности следует брать усредненную плотность по всему сечению струи возле преграды. Всякое тело при движении испытывает противодействие со стороны той среды, в которой происходит движение. При движении относительно небольших объектов с малыми скоростями, т.е. при числах Рейнольдса $Re < 1,5$, основная часть сопротивления обуславливается трением тел о воздух, и сопротивление воздуха можно считать пропорциональным первой степени скорости [8, 9] (b , кг/с):

$$\vec{F}_1 = -b\vec{V}.$$

В тех же случаях, когда тела имеют более внушительные размеры ($Re > 10^4$), сопротивление обуславливается инерцией среды, в которой движется точка или тело. Можно считать, что в этом случае сопротивление воздуха пропорционально квадрату скорости [6, 7]:

$$\vec{F}_2 = -\frac{1}{2}\rho_B C_x S V \vec{V}, \text{ Н} \quad (3)$$

где V и \vec{V} – модуль и вектор скорости тела, соответственно (м/с); ρ_B – плотность воздуха (1,2 кг/м³); C_x – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления, величина которого зависит от формы тела. Коэффициент сопротивления C_x может быть принят постоянным до скоростей равных 200-250 м/с [11, 12].

По силам, действующим на тело, движение крышки условно можно разделить на следующих два этапа:

- 1) $P \neq 0$ – движение в воздушной среде под действием давления струи и гравитации;
- 2) $P = 0$ – движение в воздушной среде под действием гравитации и силы сопротивления.

Для корректного решения уравнения (1) необходимо задать начальные условия: начальное положение тела в пространстве и начальную скорость движения.

Движение при $P \neq 0$. Траектория, соответствующая первому этапу, в основном определяется параметрами струи теплоносителя. Рассматриваются арматуры с рабочим давлением не менее 2 МПа и рабочей температурой не менее 100 °С, что при разгерметизации трубопровода приводит к возникновению струи перегретой жидкости. Процесс распада струй истекающей в атмосферу перегретой жидкости имеет ряд особенностей по сравнению с разрушением струй холодной жидкости. Они вызваны наличием в потоке фазового перехода *жидкость – пар*. Источником энергии испарения является остывающая перегретая жидкость. В результате насыщенный пар, произведя работу расширения, оказывается в метастабильном состоянии. На практике реализуется режим некоторой промежуточной неравновесности, когда одна часть жидкости обратилась в пар, а другая перегрета до уровня меньшего, чем первоначальный. Как правило, количественный уровень промежуточной неравновесности неизвестен.

Анализ результатов всех проведенных опытов показывает, что в процессе истечения горячей воды можно выделить следующие три характерные стадии [13].

1. *Первая стадия* связана с формированием движения жидкости непосредственно сразу же после разрыва диафрагмы. Она характеризуется высокой скоростью вылета жидкости из патрубка и сильной неравновесностью. Обобщенный график изменения скорости струи в зависимости от диаметра насадка приведен на рис. 1. Наблюдается устойчивый рост скорости струи при увеличении диаметра патрубка. В начальный момент времени скорости вылета из насадка горячей и холодной жидкостей практически совпадают.
2. *Вторая стадия* связана с взрывным характером развала струи. Через 3-4,5 мс после начала истечения происходит резкое и многократное увеличение объема струи. Развал струи происходит за время порядка 1-1,5 мс. На взрывной характер этого явления указывает и тот факт, что разлет жидкости происходит не только по ходу истечения и в боковые стороны, но и против основного потока.
3. *Третья фаза* истечения наступает по окончании взрывного разлета струи, при которой формируется устойчивая форма струи истекающей вскипающей жидкости. Это формирование заканчивается через 16-20 мс после разрыва диафрагмы. В этот момент происходит полное раскрытие струи, угол в основании раскрытия составляет 180 °, формируется параболическая форма струи.

Выводы:

- 1) процесс образования относительно стабильного профиля струи со стабильными полями давления и скорости в рамках поставленной задачи можно принять мгновенным и рассматривать движение арматуры под воздействием стационарной струи;
- 2) начальную скорость и расход теплоносителя можно оценить по модели истечения жидкости – на основе уравнения Бернулли.

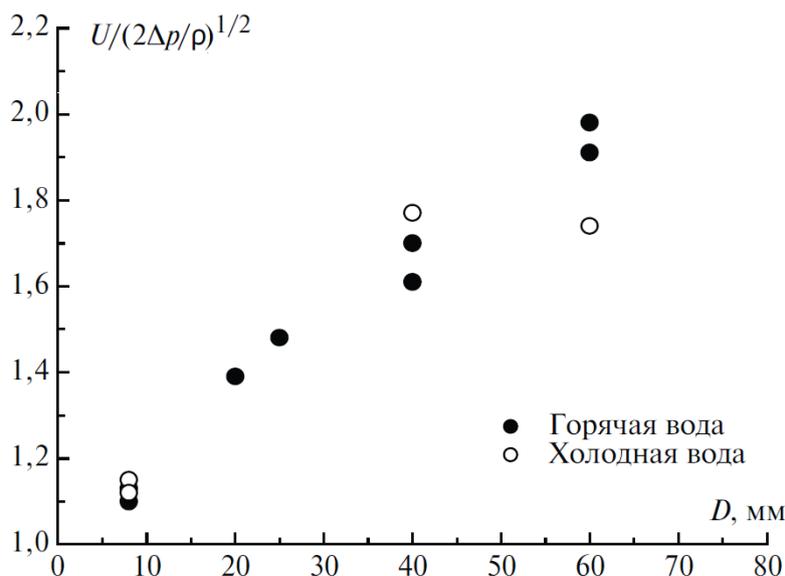


Рис. 1. Начальная скорость вылета струи [13]

Fig. 1. Initial velocity of jet release [13]

До сих пор не удалось аналитически получить уравнение траектории струи, отвечающей действительности, так как не изучены законы сопротивления, которые возникают при движении струи в воздухе [14]. При этом детальный гидродинамический расчет поведения двухфазной среды представляет собой самостоятельную сложную техническую задачу, на корректную реализацию которой и получение представительных результатов, и их верификацию необходимы относительно большие ресурсы. К тому же в настоящее время отсутствуют аттестованные для подобных расчетов программы для ЭВМ. С целью решения практических задач в рамках консервативного подхода постараемся найти относительно хорошо описывающую форму аналитического приближения, которое позволит оценить необходимые для расчетов параметры.

Особое место среди перечня точных решений уравнений гидродинамики занимает решение Л. Ландау [15] о затопленной струе, бьющей из точечного источника в неограниченную среду, которое, однако, на практике имеет ряд ограничений. В работе [16] представлено аналитическое решение для случая симметричной струи идеальной несжимаемой жидкости: поле скорости имеет вид (очевидно, что $\text{div} \mathbf{w} = 0$):

$$\vec{w}(r, z) = \frac{A}{r} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} \right) \vec{e}_r + \frac{A}{\sqrt{r^2 + z^2}} \vec{e}_z$$

что удовлетворительно подтверждается экспериментальными данными для воздушной среды [17]. Также представленное решение описывает течение, вырывающееся из отверстия радиуса r_0 в плоскости $z = 0$ и имеющее форму параболоида. При этом средняя скорость потока $W_z(z)$, воздействующего на арматуру, равна:

$$W_z(z) = 2\pi \int_0^R w_z(r, 0) r dr = \frac{2A}{R^2} (\sqrt{R^2 + z^2} - z) = \frac{2A}{R} \frac{\sqrt{R^2 + z^2} - z}{R} = W_0 \frac{\sqrt{R^2 + z^2} - z}{R}$$

где R , м – эквивалентный радиус поперечного сечения крышки; константа A , м²/с – пропорциональна значению расхода теплоносителя через поперечное сечение Q , кг/с:

$$Q = 2\pi \int_0^R \rho w_z(r, 0) \cdot r dr = 2\pi \rho R A$$

Расход определяется на основе уравнения Бернулли: $Q = \pi R^2 \sqrt{2\rho P_T}$, где P_T , Па – давление теплоносителя в трубопроводе; ρ , кг/м³ – плотность теплоносителя. Сила, действующая на арматуру, определяется в соответствии с выражением (2):

$$P(z) = 4\kappa\pi R^2 \rho \frac{A^2}{R^4} (\sqrt{R^2 + z^2} - z)^2 = 4\kappa\pi R^2 \rho A^2 \left(\frac{\sqrt{R^2 + z^2} - z}{R} \right)^2 = P_0 \left(\frac{\sqrt{R^2 + z^2} - z}{R} \right)^2$$

В соответствии с решениями для траектории свободной струи, представленными в работе [18], прямолинейный участок занимает до 70 % длины траектории, что позволяет решать задачу оценки параметров полета арматуры консервативно без учета сил сопротивления (3) и в одномерной постановке в локальной системе координат OZ: ось Oz совпадает с осью арматуры, начало координат – исходное положение центра тяжести арматуры, соответствующее точке с координатами (0, h) в глобальной системе координат OXY (рис. 2). Начальные условия: $z_{t=0} = 0$, $dz/dt_{t=0} = 0$. Из уравнения (1) находим зависимость скорости движения в зависимости от расстояния:

$$\frac{dz}{dt} = \sqrt{\frac{2}{m} \int_0^z P(x) dx - 2zg \sin \alpha} \quad (4)$$

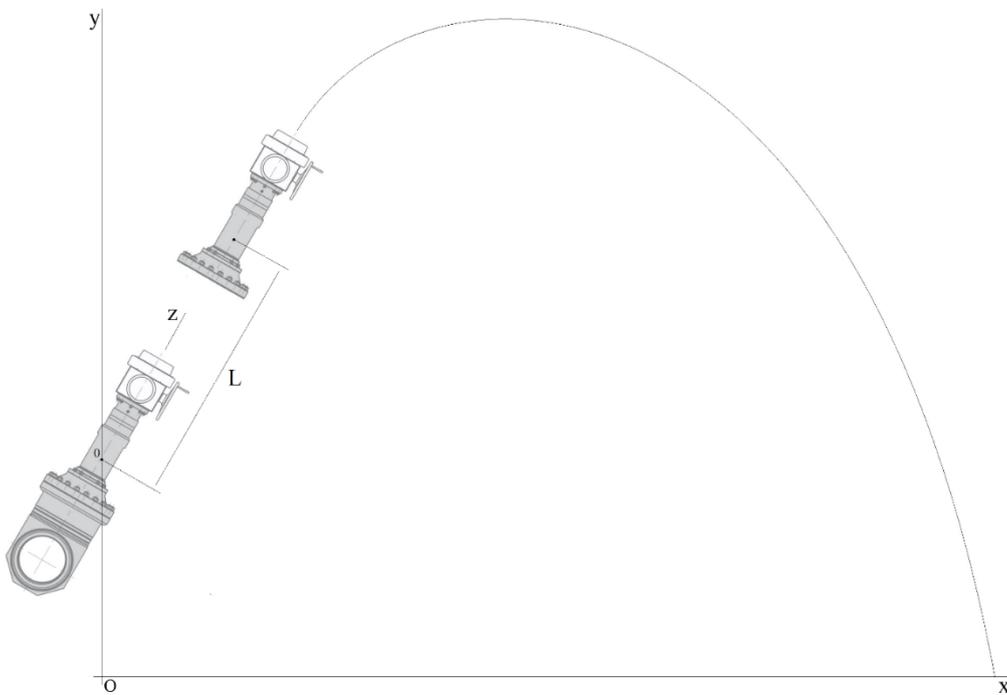


Рис. 2. Общий вид траектории полета крышки арматуры

Fig. 2. General view of the flight path of the fitting cover

Из уравнения (4) следует, что вылет арматуры возможен только при условии $mg \cdot \sin \alpha < \pi R^2 P_T$. Практически для всех высокоэнергетических арматур АЭС указанное условие выполняется в виде $mg/\pi R^2 P_T \ll 1$. Воздействие давления струи теплоносителя перестает действовать при условии $dz/dt = Wz$, т.е. когда арматура движется быстрее потока. Последнее уравнение служит для оценки длины L , которую проходит крышка под действием силы давления струи (рис. 3).

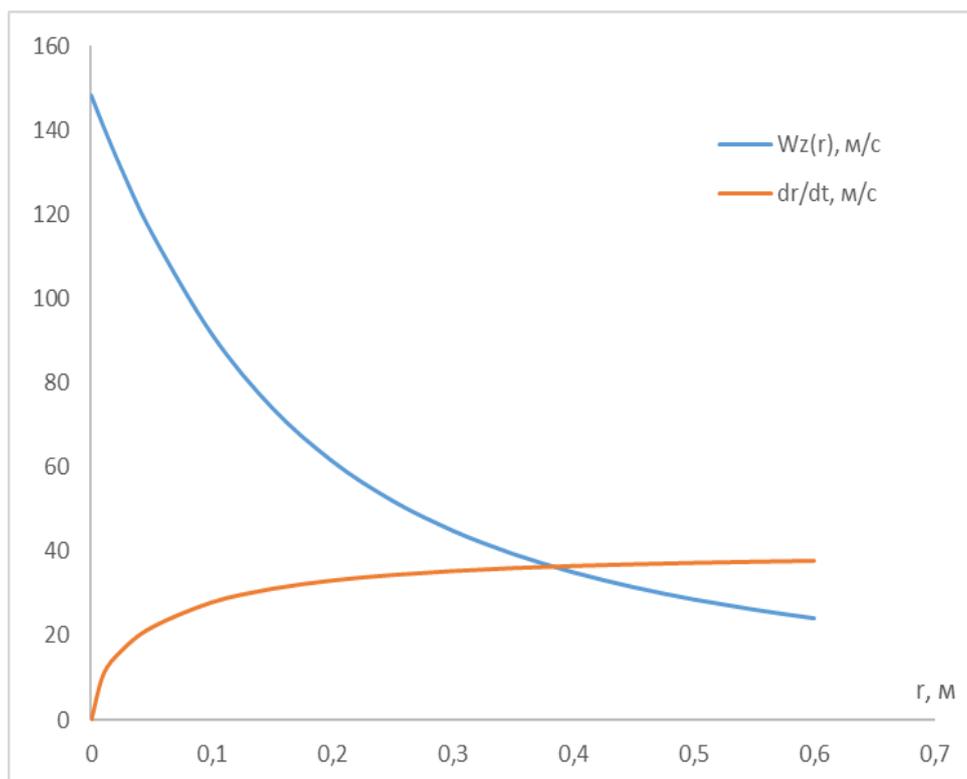


Рис. 3. Пример определения скорости и расстояния, на котором перестает действовать поток

Fig. 3. An example of how to determine speed and distance where the flow ceases to operate

Учитывая, что $mg/\pi R^2 P_T \ll 1$, значение L можно оценить сверху, что позволяет получить соответствующие консервативные оценки величин, которые не зависят от угла α . Введя параметр $M = 2\pi \frac{\rho R^3}{m}$, уравнение $dz(L)/dt = Wz(L)$ можно представить в безразмерном виде ($L = R \cdot u$):

$$M \cdot \left(\frac{2}{3}(u^3 + 1) - \frac{2}{3}(u^2 + 1)^{\frac{3}{2}} + u \right) - (\sqrt{1 + u^2} - u)^2 = 0$$

Решение последнего уравнения с удовлетворительной для практики точностью можно представить в виде $u = 0,6187 \cdot M^{-0,5065}$, т.е. $L = 0,6187R \cdot M^{-0,5065}$. Результатом решения уравнения (1) при представленных выше условиях будут начальные условия для случая $P = 0$: начальная скорость $V_0 = Wz(L)$, $y_0 = h + L \cdot \sin\alpha$, $x_0 = L \cdot \cos\alpha$.

Движение при $P = 0$. Уравнения движения (1) с учетом силы сопротивления (3) в декартовой системе координат имеют вид:

$$\begin{cases} m\dot{V}_x = -DVV_x \\ m\dot{V}_y = -mg - DVV_y \end{cases} \quad V_{x_{t=0}} = V_0 \cdot \cos\alpha, V_{y_{t=0}} = V_0 \cdot \sin\alpha \quad (5)$$

На основе системы уравнений (5) можно показать, что $dy/dx = V_y/V_x$, $d^2y/dx^2 = -g/V_x^2$, при этом из первого уравнения системы (5) следует, что:

$$V_x = V_{x_{t=0}} \cdot \exp\left(-\frac{D}{m}s(t)\right)$$

где s – длина пути ($ds/dt = V$), что позволяет записать выражение для траектории полета $y(x)$ в общем виде:

$$y(x) = y_{x=0} + x \cdot \operatorname{tg}\alpha - \frac{g}{V_0^2 \cos^2\alpha} \int_0^x (x-z) \exp\left(\frac{2D}{m}s\right) dz \quad (6)$$

Из выражения (6) видно влияние коэффициента сопротивления, характеризующего силу сопротивления на траекторию полета. Рассмотрим случай $\alpha = \pi/2$ – тогда уравнение (5) принимает вид $m dV/dt = -mg - DV^2$, которое имеет явное решение:

$$V(t) = \sqrt{\frac{mg}{D}} \cdot \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(V_0 \sqrt{\frac{D}{mg}} \right) - \sqrt{\frac{Dg}{m}} t \right]$$

Максимальная достижимая материальной точкой высота равна:

$$y_{\max} = y_0 + \frac{m}{2D} \ln \left(\frac{mg + DV_0^2}{mg} \right)$$

При этом максимальная кинетическая энергия в момент удара о перекрытие (пол) или элемент системы, расположенный под арматурой будет определяться на основе выражения:

$$\frac{mV_k^2}{2} = \frac{m^2g}{2D} \left(1 - \exp \left(-2D \frac{y_{\max} - y_{\min}}{m} \right) \right) \quad (7)$$

Для изучения движения материальной точки воспользуемся уравнениями Эйлера, проектируя уравнение (1) на касательную к траектории (dr/ds) и главную нормаль ($d\theta/ds \cdot d^2r/ds^2$)¹ к траектории движения [12, 19]:

$$\begin{cases} m\dot{V} = -mg \sin \theta - DV^2 \\ mV\dot{\theta} = -mg \cos \theta \\ V_{t=0} = V_0, \theta_{t=0} = \alpha \end{cases}$$

Из этого следует уравнение для скорости:

$$\frac{1}{V} \frac{dV}{d\theta} = \operatorname{tg} \theta + \frac{D}{mg \cos \theta} V^2$$

которое имеет решение:

$$V(\theta) = V_0 \frac{\cos \alpha}{\cos \theta} \left(1 - \frac{2V_0^2 D}{mg} \int_{\alpha}^{\theta} \frac{\cos^2 \alpha dq}{\cos^3 q} \right)^{-1/2} \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что при $\theta \rightarrow -\pi/2$ значение величины V стремится к предельному значению $V_{\infty} = (mg/D)^{1/2}$. То есть если траектория летящего предмета не пересекается с преградой (стеной, балкой), то кинетическая энергия в момент удара о пол/перекрытие сверху будет ограничена значением $1/2 m^2g/D$, Дж.

Координаты точки траектории в пространстве определяются на основе выражений:

$$\begin{aligned} x(\theta) &= L(\alpha) \cdot \cos \alpha - \frac{1}{g} \int_{\alpha}^{\theta} V^2(q) dq \\ y(\theta) &= h + L(\alpha) \cdot \sin \alpha - \frac{1}{g} \int_{\alpha}^{\theta} V^2(q) \operatorname{tg} q dq \end{aligned} \quad (9)$$

Если рассматривать длину траектории как функцию $s = s(\theta)$, то в общем виде можно показать, что $V(\theta) = V_0 \frac{\cos \alpha}{\cos \theta} e^{-\frac{D}{m}s}$, откуда видно замедляющее влияние сопротивления среды на скорость движения.

Поскольку явный вид траектории полета известен – построим огибающую $Y(x)$ для семейства траекторий, описываемых выражением (6). Следуя классическим путем [20] составляем систему уравнений, решением которой является уравнение огибающей $Y(x)$ – и в общем виде возможно только в параметрической форме ($-\pi/2 \leq \delta \leq \pi/2$):

$$Y(\delta) = h + x(\delta) \cdot \operatorname{tg} \delta + y_0'' \int_{L \cos \delta}^{x(\delta)} (x(\delta) - z) \exp \left(\frac{2D}{m} s(z) \right) dz$$

¹ $ds/d\theta$ – радиус кривизны траектории полета

$$x(\delta) = L \cos \delta \left(1 + \frac{1}{2} \frac{1 - \frac{gL}{V_0^2} \sin \delta + \sqrt{\left[1 + \frac{gL}{V_0^2} \sin \delta\right]^2 + 4 \frac{DL}{m}}}{\frac{gL}{V_0^2} \sin \delta + \frac{DL}{m}} \right)$$

При условии $D = 0, L \neq 0$:

$$Y(\delta) = h + x(\delta) \cdot \operatorname{tg} \delta + \frac{1}{2} y_0'' (x(\delta) - L \cos \delta)^2$$

$$x(\delta) = L \cos \delta + \frac{V_0^2}{g} \operatorname{ctg} \delta$$

При условии $D \neq 0, L = 0$ (например, разлет элементов турбогенератора):

$$Y(\delta) = h + x(\delta) \cdot \operatorname{tg} \delta + y_0'' \int_0^{x(\delta)} (x(\delta) - z) \exp\left(\frac{2D}{m} s(z)\right) dz$$

$$x(\delta) = -\frac{\cos \delta}{y_0'' \operatorname{tg} \delta \cos^3 \delta - \frac{D}{m}}$$

При условии $D = 0, L = 0$ получим классический результат:

$$Y(x) = h + \frac{V_0^2}{2g} - \frac{gx^2}{2V_0^2}$$

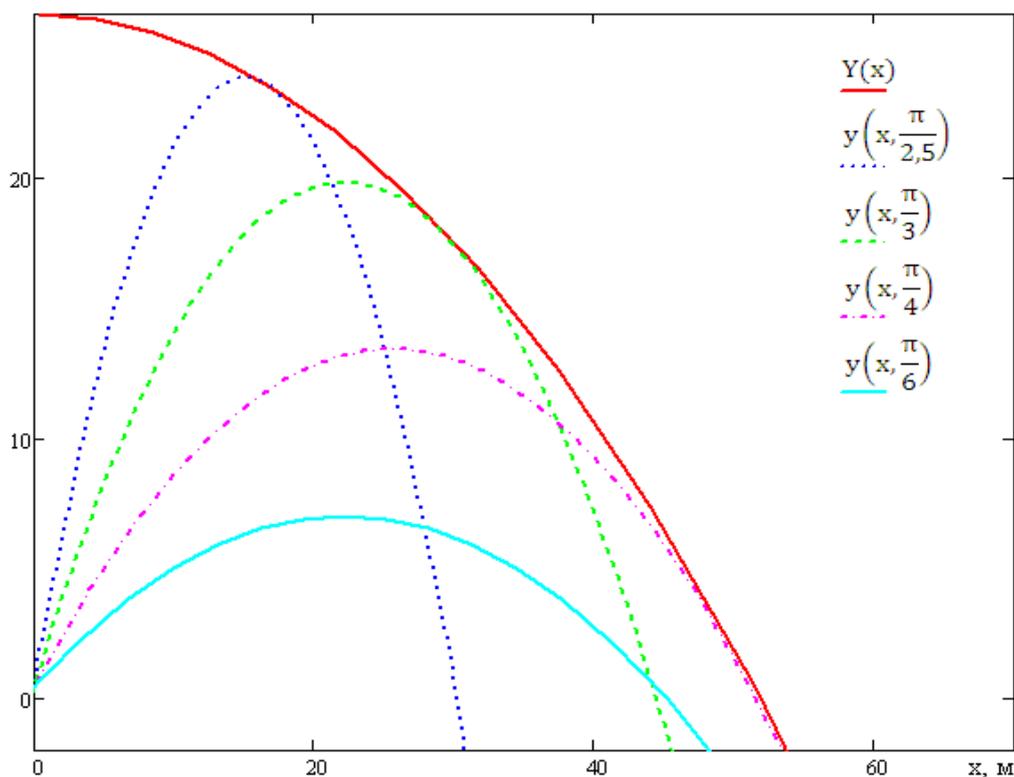


Рис. 4. Огибающая и частные траектории полета крышки арматуры

Fig. 4. Envelope and partial flight trajectories of the fitting cover

Пример. Рассмотрим случай вылета крышки арматуры для высокоэнергетического трубопровода Ду 300 с внутренним рабочим давлением 4 МПа. Масса крышки $m = 440$ кг, $R = 0,2$ м. Центр масс крышки расположен на высоте $h = 0,5$ м от пола в начальный момент времени. Для стадии, характеризующейся условием $P \neq 0$, расчеты приводят к следующим результатам: $M = 0,11$; $L = 0,37$ м; $V_0 = 22,6$ м/с. Для стадии, характеризующейся условием $P = 0$, значение

коэффициента сопротивления консервативно принимается равным (для кругового цилиндра, обтекаемого параллельно образующей) $C_x = 1,0$ – для случая обтекания шара [21]. Результаты расчетов: максимальная дальность – 51 м, максимальная высота – 26,3 м. Значение скорости при падении с большой высоты $V_\infty = 239$ м/с. Огибающая и частные траектории полета, соответствующие различным начальным углам вылета α , представлены на рис. 4.

Результаты расчетов показывают, в частности, что случаи вылета крышки арматуры обладают большой потенциальной опасностью для элементов систем, расположенных в одном помещении, поскольку зона поражения имеет большие размеры.

Предложенный подход является консервативным и позволяет оценить зону поражения от летящих предметов.

Заключение

Проведена оценка зоны поражения от летящего предмета при разрушении элемента с высокой потенциальной или кинетической энергией. Получены явные формулы для построения как частных траекторий полета, так и огибающей всех возможных траекторий. Огибающие позволяют учитывать как силы сопротивления, так и возможные случаи воздействия струи на осколок разрушенного элемента. Результаты могут быть применимы для оценки зоны поражения, создаваемой осколками, образовавшимися при разрушении турбогенератора: лопатки, части корпусов, цилиндров давления, ротора и др. При этом консервативный учет сил сопротивления при необходимости обеспечивает оптимизацию расположения зданий на площадке АЭС, поскольку позволяет обоснованно уменьшить потенциальную зону поражения.

Представленный подход к оценке траектории полета летящего предмета (арматура, осколок и др.) в консервативной и реалистичной постановках учитывает влияние струи и аэродинамического сопротивления. Результаты расчетов могут быть использованы для оценки степени поврежденности элементов систем и зданий. Полученные результаты предлагаются для обоснования безопасности ОИАЭ, в частности, при выполнении анализов внутренних и внешних воздействий, анализов проектных и запроектных аварий. Метод рекомендуется включить в состав методики или руководства по безопасности по выполнению анализа летящих предметов.

Библиографический список

1. **Таранчук, А.С.** Крупные аварии на ТЭС в результате повреждения роторов турбогенераторов // Актуальные проблемы энергетики – 2016: материалы научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Минск : БНТУ, 2017. С. 322-327..
2. **Загреддинов, И.Ш.** Разрушение турбоагрегата 300 МВт Каширской ГРЭС: причины, последствия и вывод / И.Ш. Загреддинов, А.Г. Костюк и др. // Теплоэнергетика. 2004. № 5. С. 515.
3. **Горюнов, О.В.** Методология анализа внутренних воздействий на безопасность АЭС / О.В. Горюнов, Ю.Л. Ермакович и др. // Электрические станции. 2021. № 5. С. 9-16.
4. **Гуревич, Д.Ф.** Арматура атомных электростанций: справочное пособие / Д.Ф. Гуревич, В.В. Ширяев, И.Х. Пайкин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 312 с.
5. **Маргулова, Т.Х.** Атомные электрические станции / Т.Х. Маргулова. – М.: Высшая школа, 1984. – 304 с.
6. **Зубов, В.Г.** Механика / В.Г. Зубов. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
7. **Долгачев, Ф.М.** Основы гидравлики и гидропривод: учебник для техникумов / Ф.М. Долгачев, В.С. Лейко. – М.: Стройиздат, 1981. – 183 с.
8. **Лойцянский, Л.Г.** Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – 676 с.
9. **Березкин, Е.Н.** Курс теоретической механики / Е.Н. Березкин. – М.: МГУ, 1974. – 647 с.
10. **Marion, J.B.** Classical Dynamics of particles and systems / J. B. Marion, S.T. Thornton. – Belmont: Saunders College Publishing, USA, 1995. – 670 p.

11. **Чурбанов, Е.В.** Краткий курс баллистики: учеб. пособие / Е.В. Чурбанов – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2006. – 291 с.
12. **Розе, Н.В.** Теоретическая механика. Ч. 1. Механика материальной точки / Н.В. Розе. – М.Л.: Гос. техн.-теор. издательство, 1932. – 372 с.
13. **Прибатурин, Н.А.** Исследование струи при истечении вскипающей воды при разрыве трубопровода / Н.А. Прибатурин, Ю.А. Безруков, М.А. Быков и др. // Труды 4-й РНКТ (2006). Т. 5. Испарение, конденсация. Двухфазные течения. С. 284-287.
14. **Тимофеева, С.С.** Противопожарное водоснабжение : практикум / С.С. Тимофеева, О.М. Кустов. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2016. – 69 с.
15. **Ландау, Л.Д.** Гидродинамика. Теоретическая физика. Т. VI / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 736 с.
16. **Броман, Г.И.** Затопленная струя Ландау: точные решения, их смысл и приложения / Г.И. Броман, О.В. Руденко // Успехи физических наук. 2010. Том 180. № 1. С. 97-104.
17. **Ткачук, Р.В.** Результаты лабораторных исследований параметров свободной воздушной струи, выходящей из вентиляционного трубопровода // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 9. С. 153-156.
18. **Штеренлихт, Д.В.** Гидравлика: учебник для вузов / Д.В. Штеренлихт. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 640 с.
19. **Аминов, Ю.А.** Дифференциальная геометрия и топология кривых / Ю.А. Аминов – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 160 с.
20. **Пискунов, Н.С.** Дифференциальное и интегральное исчисления для вузов: учебное пособие для вузов. Т. 2. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 560 с.
21. **Кутателадзе, С.С.** Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М.: Гос. энергетическое издательство, 1958. – 418 с.

*Дата поступления
в редакцию: 11.12.2023*

*Дата принятия
к публикации: 30.01.2024*