

УДК 629.039.58

DOI [10.37153/2618-9283-2024-1-8-21](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2024-1-8-21)

Теоретические и экспериментальные исследования

Учет хвостовой зависимости копула-функций при отборе сочетаний природных воздействий

Олег Владимирович Горюнов¹

¹ФГАОУ ВО «СПбПУ». Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: В соответствии с ФНП РФ (п.2.8, 2.9 НП-064-17) и международными стандартами (IAEA SSG-3) в проекте ОИАЭ (объект использования атомной энергии) должны быть представлены сведения о взаимосвязанных процессах, явлениях и факторах природного происхождения, выявленных в процессе проведения инженерных изысканий и исследований, и определены параметры релевантных сочетаний внешних воздействий, для которых должен быть выполнен анализ их влияния на безопасность атомных станций (АС) в составе ИС проектных и запроектных аварий. Сочетания воздействий могут оказывать более сильное влияние на безопасность станции, чем каждое воздействие, рассматриваемое отдельно, а частота возникновения сочетания может быть сравнима с частотой возникновения отдельных воздействий. В настоящее время в нормативных документах РФ и международных нормах вероятностные подходы не представлены. В работе [1] представлена методика, основанная на теории копула-функций, практика применения которой показала, что на определение частоты и интенсивностей сочетаний влияет учет эмпирических параметров функции распределения: коэффициенты корреляции, хвостовые зависимости. Проведен анализ влияния учета значения хвостовых зависимостей на результат выбора модельной копула-функции в рамках отбора сочетаний внешних природных факторов, которые должны учитываться в проекте ОИАЭ. Показано, что подход, представленный в [1] необходимо дополнить оценкой значения верхней хвостовой зависимости на основе статистических данных, поскольку благодаря более полному применению свойств копула-функций повышается глубина обоснования результатов.

Ключевые слова: внешние воздействия, сочетания воздействий, анализ безопасности, изыскательные работы, атомная станция, ядерная безопасность

Для цитирования: Горюнов О.В. Учет хвостовой зависимости копула-функций при отборе сочетаний природных воздействий // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2024. № 1. С.8–21

DOI [10.37153/2618-9283-2024-1-8-21](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2024-1-8-21)

@ Goryunov O.V., 2024

Theoretical and experimental studies

Consideration of the tail dependence of copula functions in the selection of combinations of natural hazards

Oleg V. Goryunov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract: In accordance with the Federal rules and regulations of the Russian Federation (paragraphs 2.8, 2.9 of RR-064-17) and international standards (IAEA SSG-3), the OUAЕ (the object of the use of atomic energy) project should provide information on interrelated processes, phenomena and factors of natural origin identified during engineering surveys and studies, and the parameters of relevant combinations of external hazards are determined, for which an analysis of their impact on the safety of the NPP as part of the NPP design and beyond-design accidents should be performed. Combinations of hazards can have a stronger impact on the safety of the station than each impact considered separately, and the frequency of occurrence of the combination can be comparable to the frequency of occurrence of individual impacts. Currently, probabilistic approaches are not presented in the regulatory documents of the Russian Federation and international norms. The paper [1] presents a methodology based on the theory of copula functions, the practice of which has shown that the determination of the frequency and intensity of combinations is influenced by taking into account the empirical parameters of the distribution function: correlation coefficients, tail dependencies. The analysis of the effect of taking into account the value of tail dependencies on the result of choosing a model copula function within the selection of combinations of external natural factors that should be taken into account in the project of the OUAЕ is carried out. It is shown that the approach presented in [1] needs to be supplemented with an estimate of the value of the upper tail dependence based on statistical data, since due to a more complete application of the properties of copula functions, the depth of justification of the results increases.

Keywords: external hazards, combinations of hazards, safety analysis, survey work, nuclear power plant, nuclear safety

For citation: Goryunov O.V. Consideration of the tail dependence of copula functions in the selection of combinations of natural hazards. *Earthquake engineering. Constructions safety*. 2024, no. 1, pp. 8–21

DOI [10.37153/2618-9283-2024-1-8-21](https://doi.org/10.37153/2618-9283-2024-1-8-21)

Введение

В соответствии с п.1.2.14 Общих положений обеспечения безопасности АС (НП 001 15) [2] перечень исходных событий, представляемый в ООБ АС, должен включать все возможные внутренние и внешние события, которые нарушают нормальную эксплуатацию ОИАЭ и не исключены на основе свойств внутренней самозащищенности реактора и принципов его устройства. Сочетания отказов систем (элементов) ОИАЭ, ошибок персонала, внутренних или внешних воздействий учитываются в составе указанного перечня исходных событий.

Международные стандарты IAEA, EUR, WENRA и национальные нормы стран ЕС: YVL Guides (Финляндия), NSC (Венгрия), RecDoc (Канада), HAF

(Китай), а также ФНП РФ рассматривают внешнее природное воздействие, как воздействие, вызванное внешними по отношению к ОИАЭ процессами, явлениями и факторами природного происхождения, характерные для площадки АС. НП 064 17 (п. 2.8, 2.9) [3], НП 006-16 [4], SSG-3 (п. 6.2, 6.11) [5] регламентируют в проекте ОИАЭ представлять сведения о взаимосвязанных явлениях и факторах природного происхождения, выявленных в процессе инженерных изысканий и исследований, и, в частности, определять параметры релевантных сочетаний внешних воздействий, для которых должен быть выполнен анализ их влияния на безопасность ОИАЭ. Сочетания воздействий могут оказывать более сильное влияние на безопасность станции, чем каждое воздействие, рассматриваемое отдельно, а частота возникновения сочетания может быть сравнима с частотой возникновения отдельных воздействий – например, повышение уровня воды из-за выпадения ливневых осадков и прорыв плотины из-за выпадения ливневых осадков. Влияние комбинаций воздействий на функции безопасности следует подвергать повторной оценке, поскольку комбинация воздействий может воздействовать на различные функции безопасности или на одну функцию, но значительно более жестко, чем отдельный внешний природный фактор. В качестве примера можно представить следующие потенциальные сочетания воздействий:

- a) засуха (вследствие высокой температуры воздуха), сильный ветер и дым от лесных пожаров;
- b) сильный ветер и гроза;
- c) высокая температура воздуха и высокая температура воды;
- d) снегопад и сильный ветер;
- e) метель и сильный ветер;
- f) метель, сильный ветер и образование внутриводного льда.

Современные стандарты РФ и международные нормы не содержат методики формирования сочетаний природных воздействий, а подходы, описанные в научной литературе [6, 7, 8] дискуссионны и применяются точно. В работе [1] представлена методика, основанная на теории копула-функций, позволяющая с достаточной для практики точностью оценивать параметры сочетаний воздействий.

Исходными данными для применения методики являются:

- номенклатура процессов, явлений и факторов природного происхождения, способных оказать влияние на безопасность ОИАЭ;
- временные ряды,
- значения параметров внешних природных воздействий (маргинальные функции распределения),

полученные в рамках проведения инженерных изысканий и исследований района размещения ОИАЭ.

Результатом применения методики [1] являются совместные функции распределения для каждой пары природных воздействий, и учитываются в проекте систем и зданий ОИАЭ, а также рассматриваются в составе исходных событий запроектных аварий.

Практика применения методики [1] показала, что на выбор копула-функции, а соответственно определение частоты и интенсивностей сочетаний, влияет учет эмпирических параметров функции распределения: коэффициенты корреляции, хвостовые зависимости.

Совместная функция распределения

Благодаря теореме Склера (1959) копула-функции позволяют достаточно гибко моделировать совместные вероятностные распределения, учитывая структуру зависимости между различными переменными, которые могут иметь разные частные распределения. Копула-функция $C(u,v)$ является вероятностью наступления совместного события для случайных величин X, Y : $P(x < X, y < Y) = P(u < U; v < V) = C(u,v)$, где u, v – маргинальные распределения случайных величин X и Y . Копула-функция является функцией, агрегирующей всю информацию относительно структуры зависимости между компонентами случайного вектора. Практической ценностью является определение вероятности превышения определенных значений: $P(u > U; v > V) = 1 - u - v + C(u,v)$.

Определение. Функция $C(u,v)$ называется копулой двух переменных u и v , определенных на множестве $[0, 1]$, если она удовлетворяет следующим условиям:

- 1) $0 \leq C(x, y) \leq 1$;
- 2) $C(u, 0) = C(0, v) = 0$;
- 3) $C(1, v) = v, C(u, 1) = u$;
- 4) $C(u_2, v_2) + C(u_1, v_1) - C(u_2, v_1) - C(u_1, v_2) \geq 0$, где $(u_1, v_1) \in [0,1]^2, (u_2, v_2) \in [0,1]^2$ и $u_1 \leq v_1, u_2 \leq v_2$;
- 5) $\max(u + v - 1, 0) \leq C(u, v) \leq \min(u, v)$, (границы Фреше – Хефдинга).

Плотность распределения совместной функции распределения $f_{XY}(x,y)$ случайных величин X и Y , построенной на основе копула-функции определяется известным выражением:

$$f_{XY}(x, y) = c_{UV}(u, v) \cdot \rho_X(x) \cdot \rho_Y(y),$$

где $c_{UV}(u, v) = \frac{\partial^2 C(u,v)}{\partial u \partial v}$ – плотность копула-функции, $\rho_Z(z) = dF_Z(z)/dz$ – плотность распределения маргинального распределения $F_Z(z)$.

Наиболее применяемые на практике копулы разделяют на три типа [1, 9, 10]:

- 1) **Эллиптические**, если плотность функции распределения имеет вид

$$f(x, y) = \frac{\Omega}{\pi \sqrt{1 - R_{xy}^2}} g\left(\frac{x^2 - 2R_{xy}xy + y^2}{1 - R_{xy}^2}\right), \quad \Omega^{-1} = \int_0^\infty g(z) dz. \quad \text{Самые часто}$$

используемые – это копула Гаусса $g(t) = \exp(-t/2)$ и Стьюдента $g(t) = 1/(1 + t/n)^{(n+2)/2}$.

- 2) **Архимедовы** копулы можно представить в виде [11] $C(u,v) = \phi^{-1}(\phi(u) + \phi(v))$, где $\phi(x)$ – функция-генератор. Функция $\phi^{-1}(t)$ должна быть «вполне монотонной функцией».

- 3) **Экстремальные** копулы созданы на основе одномерных законов распределения экстремумов – для них должно выполняться соотношение $C(u^n, v^n) = C^n(u,v)$, $n > 0$. Частным случаем экстремальной копулы является копула в форме Пикандса $C(u, v) = \exp\left[\ln(uv) A\left(\frac{\ln v}{\ln uv}\right)\right]$, где $A(t)$ является выпуклой функцией, такой, что $A(0) = A(1) = 1$ и удовлетворяет условию $\max[t, 1 - t] \leq A(t) \leq 1$ для $\forall t \in [0, 1]$.

Помимо коэффициентов ранговой корреляции одной из характеристик копула-функций является верхняя и нижняя хвостовая зависимость, также зависящая от параметра копула-функции.

Хвостовые зависимости

При наличии хвостовой зависимости между случайными событиями или существенной асимметрии маргинальных распределений, — необходимо использовать иные подходы к получению корреляционных параметров стандартной формулы. Например, более адекватной может быть оценка, использующая коэффициент хвостовой зависимости [11, 12].

Как было отмечено выше, этот коэффициент отражает асимптотический уровень зависимости на «хвостах» – возможность одновременной реализации экстремальных событий для обоих факторов.

Определение 1. Пусть (X, Y) – случайный вектор, компоненты которого есть непрерывные случайные величины с частными распределениями F_X и F_Y . Тогда коэффициент λ^U верхней хвостовой зависимости X и Y определяется соотношением:

$$\begin{aligned} \lambda^U &= \lim_{u \rightarrow 1} P[Y > F_Y^{-1}(u) | X > F_X^{-1}(v)] = \lim_{u \rightarrow 1} P[X > F_X^{-1}(v) | Y > F_Y^{-1}(u)] \\ &= 2 - \frac{\partial C(u, u)}{\partial u} \Big|_{u=1} \end{aligned}$$

при условии, что пределы существуют, где $C(u, v)$ – двумерная копула-функция случайного вектора (X, Y) .

При этом случайные величины X и Y называют асимптотически зависимыми на верхнем хвосте, если $\lambda^U \in (0, 1)$, X и Y называют асимптотически независимыми, если $\lambda^U = 0$.

Другими словами, верхняя хвостовая зависимость существует тогда, когда имеется положительная вероятность одновременного возникновения положительных выбросов. Величина λ^U широко используется в теории экстремальных значений и представляет собой вероятность того, что одна переменная примет экстремальные значения при условии, что другая переменная также принимает экстремальные значения.

Определение 2. Пусть (X, Y) – двумерный случайный вектор, компонентами которого являются непрерывные случайные величины, частные распределения которых равны F_X и F_Y . Тогда коэффициент λ^L нижней хвостовой зависимости между X и Y равен:

$$\lambda^L = \lim_{u \rightarrow 0} P[Y \leq F_Y^{-1}(u) | X \leq F_X^{-1}(v)] = \lim_{u \rightarrow 0} P[X \leq F_X^{-1}(v) | Y \leq F_Y^{-1}(u)] = \frac{\partial C(u, u)}{\partial u} \Big|_{u=0}$$

при условии, что пределы существуют.

Случайные величины X и Y называются асимптотически зависимыми на нижнем хвосте, если $\lambda^L \in (0, 1)$ и асимптотически независимыми на нижнем хвосте, если $\lambda^L = 0$.

Таким образом, нижняя хвостовая зависимость существует тогда, когда существует положительная вероятность возникающих одновременно отрицательных выбросов [10].

Наличие временных рядов позволяет построить эмпирические характеристики копула-функции, в частности, функцию $C(u, u)$, на основе которой оценить λ_U . Наличие эмпирических значений λ_L , λ_U позволяет заранее сократить

перечень модельных копула-функций, которые могут быть использованы для формирования сочетаний, и сделать выбор более корректным и обоснованным.

Эмпирическая копула-функция может быть определена в форме выражения:

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H(u - U_i) \cdot H(v - V_i) \quad (1)$$

где N – число пар временного ряда; U_i, V_i – пары значений маргинальных функций распределений, анализируемых факторов, соответствующую одному и тому же временному интервалу, $H(x)$ – функция Хевисайда. Помимо очевидного удобства использования явной зависимости выражение (1) инвариантно шагу разбиения области значений аргументов.

Подход к оценке λ_L, λ_U

Аппроксимация $C(u,u)$ полиномом или логарифмом (поскольку таблица 1 показывает, что часто встречается степенная зависимость) позволяет оценить производные и их погрешность, например, на основе метода наименьших квадратов [13]. Значениях λ_L, λ_U могут быть оценены из функции аппроксимации, в качестве которых удобно выбрать логарифмическую зависимость $\ln C(u,u) = A \ln u + B$, тогда $\lambda_L = A e^B \lim_{u \rightarrow 0} u^{A-1}$, $\lambda_U = 2 - A \cdot e^B$. Однако, следует отметить, что при таком подходе λ_L всегда будет равно нулю, что не всегда верно (см. таблицу 1) и связано с погрешностью аппроксимации в области $u = 0$ из-за бесконечного роста $\ln u$ (см. рис. 1). Указанный вид аппроксимации корректнее применять в форме $\ln C(u,u) = A \ln u$ для оценки λ_U , поскольку $C(u,u) = 1$ при $u = 1$.

Поскольку справедливо равенство $\frac{\partial C(u, u)}{\partial u} \Big|_{u=1} = \frac{\partial \ln C(u, u)}{\partial \ln u} \Big|_{u=1}$ – эмпирическое значение λ_U будет равно $\lambda_U = 2 - A$.

Таблица 1 – Значения хвостовых зависимостей для различных типов копула-функций

Table 1 – Values of tail dependencies for different types of copula functions

| Копула-функция | $C(u,u)$ | λ^U | λ^L |
|---|---------------------------|---|--|
| Экстремальные | $C(u,u) = u^k$ $k < 2$ | $2 - k$ | 0 |
| Экстремальное (Pickands) | $u^{2A(1/2)}$ | $2 - 2A(1/2)$ | 0 |
| Архимедовы $f^{-1}(f(u) + f(v))$ $dC(u,u)/du = 2 g(u)/g(C(u,u))$, $g = df/du$ | $f^{-1}(2f(u))$ | 0 или $2 - 2^{1/a1}$ | зависит от вида функции-генератора |
| Эллиптические Гаусса Стьюдента | | 0 2 $- 2T_{n+1} \left(\sqrt{n+1} \sqrt{\frac{1-R}{1+R}} \right)$ | 0 $2 - 2T_{n+1} \left(\sqrt{n+1} \sqrt{\frac{1-R}{1+R}} \right)$ |

Из рисунка 1 хорошо виден линейный характер поведения логарифма функции $C(u,u)$ в окрестности точки $u = 1$.

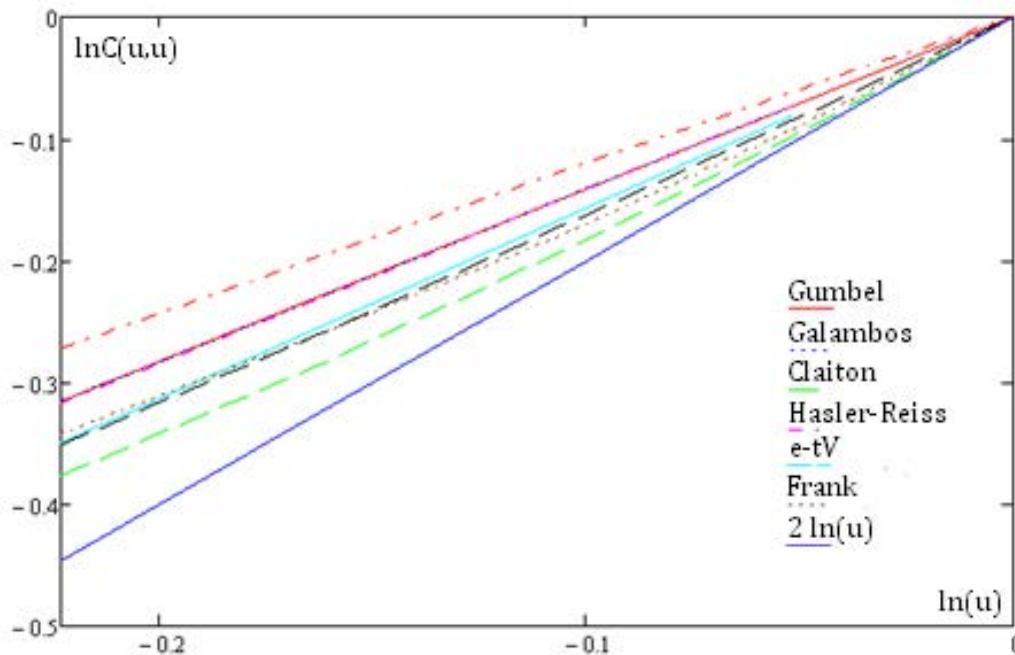


Рисунок 1 – Поведение функции $\ln C(u,u)$ в окрестности точки $u = 1$

Figure 1 – Behavior of the $\ln C(u,u)$ function in the vicinity of the point $u = 1$

Исходными данными для выбора копула-функций являются: перечень модельных копула-функций и временные ряды (x_k, y_k, \dots) , которые для удобства преобразуются в соответствующие значения $u_m = G_X(x_m)$, где $G_X(x)$ – маргинальная функция распределения [9]. В работе [1] предложены четыре критерия отбора копула-функции на основе сравнения ряда расчетных параметров [15, 16]:

1. модельного значения КК Кендалла с эмпирическим;
2. модельного значения КК Спирмена с эмпирическим;
3. суммы квадратов разностей выборочной и модельной копула-функций $D =$

$\sum_{m=1}^N (C_m - F(u_m, v_m, a_{ML}))^2$, где C_m – эмпирическое значение распределения двух случайных величин в точке (u_m, v_m) ; $F(u, v, a)$ – модельная копула-функция; a – параметр копула-функции; N – число пар (u_m, v_m) ; a_{ML} – точка максимума функции правдоподобия.

4. по информационному критерию $AIC = 2 - 2 \sum_{m=1}^N \ln c_{UV}(u_m, v_m, a_{ML})$, который базируется на обобщении принципа максимального правдоподобия. Для информационных критериев действует правило: наилучшая модель имеет наименьшее значение критерия [15].

Очевидно, что одновременное удовлетворение модельной копула-функции нескольким эмпирическим параметрам – коэффициентам ранговой корреляции и значениям хвостовых зависимостей, является сильным основанием в пользу ее выбора. При этом параметры отбора: AIC, D и т.д. могут быть не оптимальными. Неучет указанного обстоятельства может приводить к ошибочным решениям и соответственно к ошибочным проектным мерам.

В качестве примера демонстрации применения подхода в части моделирования статистической зависимости представляется целесообразным с

точки зрения доступности использовать перечень климатических данных за 120 лет для области города Будапешта (<https://www.met.hu>). Найти иные представительные данные для анализа в открытых источниках не удалось.

В результате применения методики [1] к внешним факторам, представленным выше, были идентифицированы следующие сочетания (другие сочетания были идентифицированы как независимые):

1. максимальная годовая температура – количество теплых дней ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$);
2. максимальная годовая температура – количество теплых ночей ($T \geq 20^{\circ}\text{C}$);
3. количество теплых дней ($T \geq 30^{\circ}\text{C}$) – количество теплых ночей ($T \geq 20^{\circ}\text{C}$);
4. количество морозных дней ($T \leq 0^{\circ}\text{C}$) – количество снежных дней.

Рассмотрим случай «количество морозных дней ($T \leq 0^{\circ}\text{C}$) – количество снежных дней». Эмпирические КК Кендала и Спирмена [14] равны 0,363 и 0,516, соответственно. Значение λ_U равно 0,38 (рис. 2), оценка значимости подтвердила ненулевую гипотезу. Результаты расчетов представлены в Таблице 2.

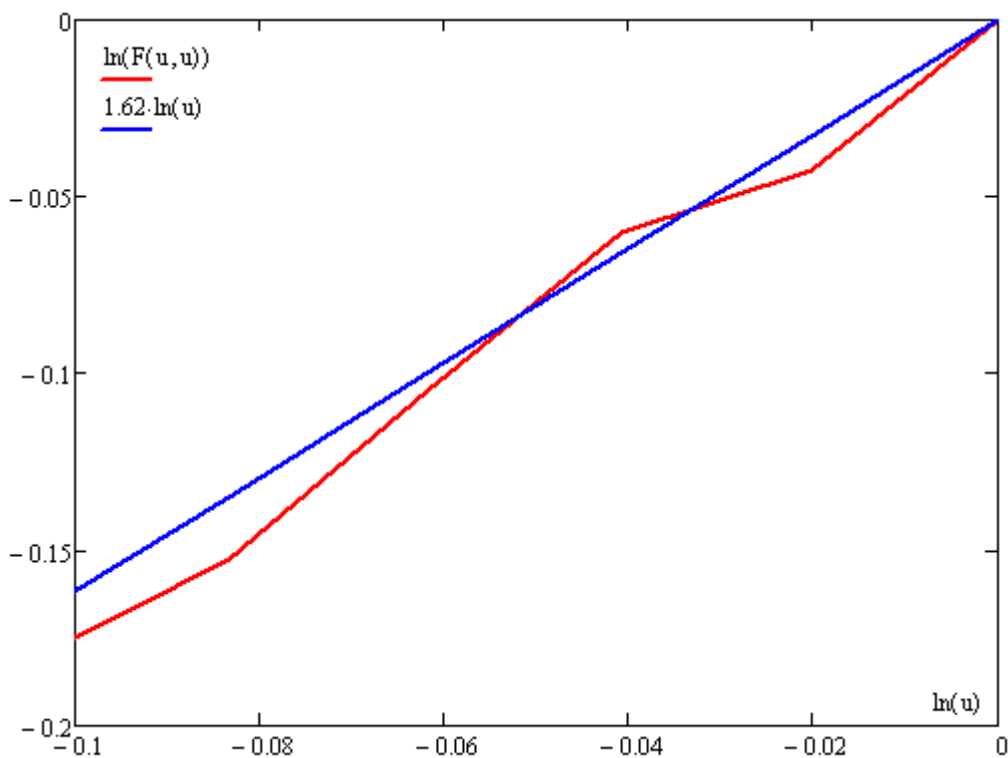


Рисунок 2 – Аппроксимация функции $\ln C(u, u)$

Figure 2 – Approximation of the $\ln C(u, u)$ function

Таблица 2 – Результаты расчетов для сочетания
 «количество морозных дней ($T \leq 0^\circ\text{C}$) – количество снежных дней»

Table 2 – Calculation results for the combination of
 "the number of frost days ($T \leq 0^\circ\text{C}$) – the number of snow days"

| № | Копула-функция | AIC | λ_U (0,38) | КК Спирмена (0,516) | КК Кендала (0,363) | D |
|----|--|--------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|-------|
| 1 | Gumbel | -40,36 | 0,441 | 0,510 | 0,359 | 0,081 |
| 2 | Ali | -33,09 | 0 | 0,478 | 0,333 | 0,095 |
| 3 | Tawn | -39,06 | 0,470 | 0,547 | 0,387 | 0,071 |
| 4 | $uv \exp(-a \ln u \ln v)$ | 3,49 | 0 | 0 | 0 | 0,603 |
| 5 | Galambos | -41,04 | 0,434 | 0,509 | 0,356 | 0,082 |
| 6 | Claiton | -23,40 | 0 | 0,330 | 0,225 | 0,189 |
| 7 | Hasler-Reiss | -41,75 | 0,427 | 0,507 | 0,354 | 0,084 |
| 8 | t-EV copula (extreme t-Student) | -28,36 | 0,427 | 0,101 | 0,331 | 0,328 |
| 9 | Frank | -48,52 | 0 | 0,585 | 0,410 | 0,064 |
| 10 | $(1+[(u^{-1}-1)^a+(v^{-1}-1)^a]^{1/a})^{-1}$ | -16,42 | 0,040 | 0,503 | 0,353 | 0,082 |

Примечание: числа в скобках соответствуют эмпирическим оценкам

По параметру AIC и D оптимальной является копула-функция № 9 (Frank) таблицы 2, но для нее $\lambda_U = 0$ и относительная погрешность по КК выше, чем для копула-функций № 1, 5 и 7. Параметры AIC и D для копула-функций № 1, 5 и 7 обладают близкими значениями и для них $\lambda_U \neq 0$.

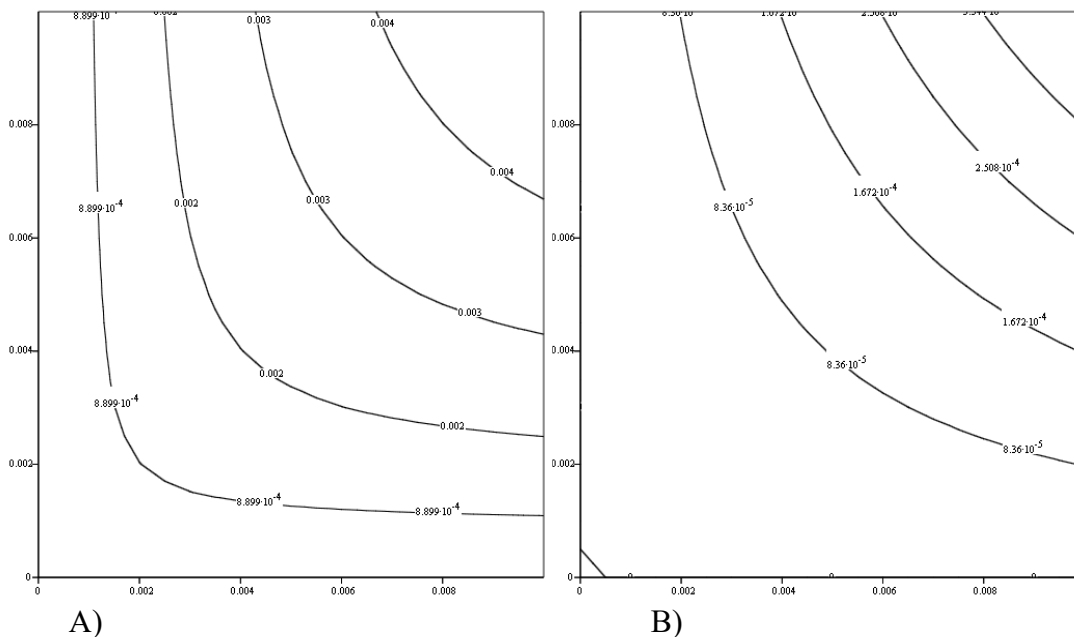


Рисунок 3 – Линии уровня для копула-функции Gumbel (A) и Frank (B)

Figure 3 – Level lines for the copula of the Gumbel (A) and Frank (B) functions

Как видно из рис. 3, если не принимать во внимание значение хвостовой зависимости, то в этом случае значения интенсивностей будут занижены и «одновременность» по значению λ_U не реализуется. Если учитывать значение λ_U , то наиболее корректным будет выбор в сторону копула-функции Gumbel по параметру D и расчетным значениям КК.

Также в виде примера ниже (Таблица 3) приведены данные параметров внешних воздействий в районе города Дабаа (Египет), которые должны учитываться в проекте зданий АС. Использование в расчетах параметра λ_U было учтено в методическом подходе [1], который был применен в рамках определения потенциальных комбинаций внешних природных факторов, релевантных указанному району.

Таблица 3 – Перечень основных параметров внешних воздействий процессов, явлений и природных факторов, учитываемых в проекте объекта использования атомной энергии

Table 3 – List of the main parameters of external influences of processes, phenomena and natural factors taken into account in the design of the object of the use of atomic energy

| Природный фактор | Максимальное установленное значение при наблюдении | Степень опасности* | Объект воздействия** |
|--|--|--------------------|--|
| Ветер, ураган (средняя скорость ветра 32 м/с и более при 10-минутном осреднении) | 40 м/с (2006 г.) | I | Здания, сооружения |
| | 30 м/с | II | Здания, сооружения |
| Высота слоя осадков (ярко выраженная сезонность: окт. – март) годовой, суточный | 447.5 мм 99 мм за 6 ч | I | Здания, сооружения, оборудование блока АС |
| Температура воздуха | 58.5°C | – | Здания, сооружения, оборудование блока АС Персонал блока АС |
| * в соответствии с Приложением №3 НП 064-17 | | | |
| ** в соответствии с Приложением №4 РБ 021-21 | | | |

В частности, в результате обработки и анализа данных были выявлена потенциальная комбинация: ветер – максимальная температура воздуха. Результаты анализа для указанной комбинации представлены на рисунке 4 и в таблице 4. Для указанной комбинации $\lambda_U = 0.25$ (см. рисунок 4), однако с учетом оценки значимости принято $\lambda_U = 0$ (см. Таблица 4). Здесь очевидно влияние объема статистики данных, однако существование параметра λ_U требует его учета в целях целостности подхода и соблюдения корректности оценок. Исключение из рассмотрения λ_U может быть обоснованно особенностями задачи формирования сочетаний.

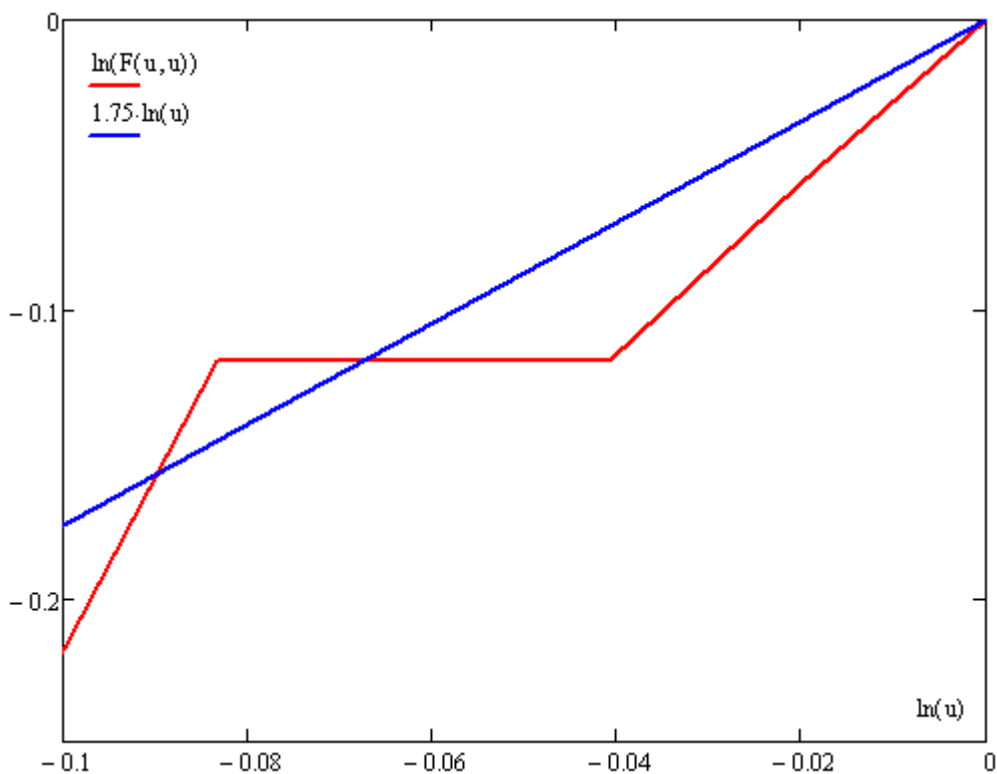


Рисунок 4 – Прямая аппроксимации для комбинации «ветер – макс. температура воздуха»

Figure 4 – Approximation line for the combination "Wind – Max. air temperature"

Таблица 4 – Результаты расчетов

Table 4 – Calculation results

| Совместная функция распределения | Комбинация | Расчетные параметры | |
|--|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|
| | | λ_U (0) | КК Спирмена (-0.410) |
| $uv \exp(-\ln u \ln v)$ | Ветер – Макс. температура воздуха | 0 | -0,452 |
| Примечание: числа в скобках соответствуют эмпирическим оценкам | | | |

В полученном результате важно отметить, что $uv \cdot \exp(-\ln u \cdot \ln v) \leq uv$, откуда следует неравенство для вероятностей возникновения двух различных событий:

$$P(x > X, y > Y) < P(x > X) \cdot P(y > Y).$$

То есть, одновременное воздействие факторов X и Y менее вероятно (возникает реже), нежели в случае их независимого влияния на блок АС.

Заключение

Проведен анализ влияния учета значения хвостовых зависимостей на результат выбора модельной копула-функции в рамках отбора сочетаний внешних природных факторов, которые должны учитываться в проекте ОИАЭ. Показано, что подход, представленный в [1] необходимо дополнить оценкой значения

верхней хвостовой зависимости на основе статистических данных, поскольку благодаря более полному применению свойств копула-функций повышается глубина обоснования результатов.

1. Предложен подход к расчету эмпирического значения верхней хвостовой зависимости.

2. На примере климатических данных для области города Будапешта продемонстрировано влияние на результаты учета в расчетах параметра λ_U при выборе совместного распределения двух случайных величин.

3. Представленный подход на основе открытых гидрометеорологических данных применен для исследования района расположения города Дабаа (Египет), на северо-востоке от границ которого строится АЭС «Эль-Дабаа».

Методика [1], дополненная оценкой параметра λ_U , рекомендуется для применения в составе работ по обоснованию ядерной и радиационной безопасности, промышленной безопасности для объектов энергетики и промышленности после апробации.

Список литературы

1. Горюнов О.В., Вернер А.А., Рышкевич И.А. Методика отбора сочетаний природных воздействий на АЭС // *Электрические станции*. 2022. № 12. С. 20–29.

2. НП-001-15 Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ». 2016. 57 с.

3. НП-064-17 Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ». 2017. 70 с.

4. НП-006-16 Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ». 2016. 410 с.

5. SSG-3 Разработка и применение вероятностной оценки безопасности уровня 1 для атомных станций. Вена: МАГАТЭ. 2014. 243 с.

6. Helander J. Identification and Analysis of External Event Combinations for Hanhikivi 1 PRA, *Nuclear Engineering and Technology*, 49 (2017), 380–386.

7. Castillo E. and etc. *Extreme Value and Related Models with Applications in Engineering and Science*, John Wiley&Sons, Inc. (2002) 326.

8. Zheng F., Westra S., Leonard M., Sisson S.A. Modeling dependence between extreme rainfall and storm surge to estimate coastal flooding risk, *Water Resour.* 50 (2014) 2050–2071.

9. Фантаццини Д. Моделирование многомерных распределений с использованием копула-функций I // *Прикладная эконометрика*. 2011. № 2. С. 98–134.

10. Фантаццини Д. Моделирование многомерных распределений с использованием копула-функций II // *Прикладная эконометрика*. 2011. № 3. С. 98–132.

11. A Global Framework for Insurer Solvency Assessment. 2004. International Actuarial Association, Ontario. 179 p.

12. Лельчук А.Л. Актуальный риск-менеджмент. М.: Анкил. 2014. 424 с.

13. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит. 1986. 544 с.

14. Кендэл М. Ранговые корреляции. Москва: Статистика. 1975. 216 с.

15. Фантаццини Д. Моделирование многомерных распределений с использованием копула-функций III // *Прикладная эконометрика*. 2011. № 4. С. 100 – 130.

16. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. Москва: Мир. 1989. 540 с.

References

1. Goryunov O.V., Verner A.A., Ryshkevich I.A. Metodika otbora sochetanij prirodnykh vozdeystvij na AEHS. *Ehlektricheskie stantsii*. 2022, no. 12, pp. 20–29. [In Russian]

2. NP-001-15 Obshchie polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsij. Moskva: FBU «NTC YARB». 2016. 57 p. [In Russian]

3. NP-064-17 Uchet vneshnikh vozdeystvij prirodnogo i tekhnogenogo proiskhozhdeniya na ob"ekty ispol'zovaniya atomnoj ehnergii. Moskva: FBU «NTC YARB». 2017. 70 p. [In Russian]

4. NP-006-16 Trebovaniya k soderzhaniyu otcheta po obosnovaniyu bezopasnosti bloka atomnoj stantsii s reaktorom tipa VVEHR. Moskva: FBU «NTC YARB». 2016. 410 p. [In Russian]

5. SSG-3 Razrabotka i primenenie veroyatnostnoj otsenki bezopasnosti urovnya 1 dlya atomnykh stantsij. Vena: MAGATEH. 2014. 243 p. [In Russian]

6. Helander J. Identification and Analysis of External Event Combinations for Hanhikivi 1 PRA, *Nuclear Engineering and Technology*, 49 (2017), 380–386. [In English]

7. Castillo E. and etc. *Extreme Value and Related Models with Applications in Engineering and Science*, John Wiley&Sons, Inc. (2002) 326. [In English]

8. Zheng F., Westra S., Leonard M., Sisson S.A. Modeling dependence between extreme rainfall and storm surge to estimate coastal flooding risk, *Water Resour.* 50 (2014), 2050–2071. [In English]

9. Fantaccini D. Modelirovanie mnogomernykh raspredelenij s ispol'zovaniem kopula-funktsij I. *Prikladnaya ehkonometrika*. 2011, no. 2, pp. 98 – 134. [In Russian]

10. Fantaccini D. Modelirovanie mnogomernykh raspredelenij s ispol'zovaniem kopula-funktsij II. *Prikladnaya ehkonometrika*. 2011, no. 3, pp. 98 – 132. [In Russian]

11. A Global Framework for Insurer Solvency Assessment. 2004. International Actuarial Assosiation, Ontario. 179 p. [In English]

12. Lelchuk A.L. Actualniy risk-managment. Moskva: Ankil, 2014. 424 p. [In Russian]

13. Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov. Moscow: Izdatel'stvo Gl.red.fiz.-mat.lit. 1986, 544 p. [In Russian]

14. Kendehl M. Rangovye korrelyatsii. Moskva: Statistika. 1975, 216 p. [In Russian]

15. Fantaccini D. Modelirovanie mnogomernykh raspredelenij s ispol'zovaniem kopula-funktsij III. *Prikladnaya ehkonometrika*. 2011, no. 4, pp. 100 – 130. [In Russian]

16. Bendat Dzh., Pirsol A. Prikladnoj analiz sluchajnykh dannykh: per. s angl. Moskva: Mir. 1989. 540 p. [In Russian]

Информация об авторе / Information about author

Горюнов Олег Владимирович, ФГАОУ ВО «СПбПУ», ассистент ВШАиТЭ, Институт энергетики, кандидат технических наук. Санкт Петербург, Российская Федерация

Oleg V. Goryunov, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, assistant of Higher School of Nuclear and Thermal Power Engineering, Ph.D. (Eng.). Saint Petersburg, Russian Federation