

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОПОГРАФИИ И ВЕТРЯНОГО ПАРКА НА РАДИАЦИОННУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ АЭС «КУДАНКУЛАМ»

В.Э. Меринова

torisee@mail.ru

SPIN-код: 4335-7940

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Рассмотрена атомная электростанция (АЭС) «Куданкулам», расположенная на береговой части юга Индии и испытывающая влияние погодных условий, характерных для данной местности. Высокая скорость ветра, а также влияние ветропарка, находящегося на расстоянии 2...3 км от энергоблоков, обуславливают необходимость оценки влияния данных факторов на перенос примесей в атмосфере. В работе выполнена оценка влияния ветрогенераторов на АЭС «Куданкулам» путем введения эквивалентной парку возвышенности шириной 1 км и высотой 150 м. Показано, что в районе ветропарка наблюдается увеличение значения удельной объемной активной примеси.

### Ключевые слова

Радиационная безопасность, ветрогенератор, фактор разбавления, перенос примесей, классы стабильности Паскуилла, атомная электростанция, удельная объемная активность примесей, ветропарк

Поступила в редакцию 04.02.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

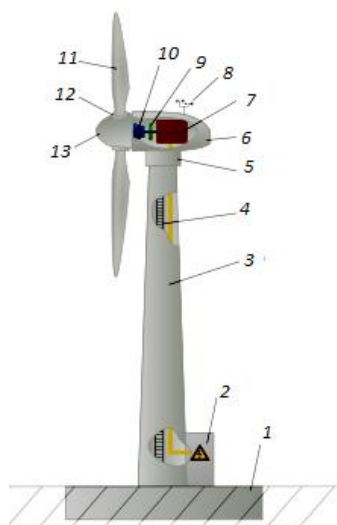
---

**Введение.** Атомная электростанция (АЭС) «Куданкулам» расположена на юге Индии и является самой крупной в стране. Строительство ее было начато в 1998 г., но первые два блока (энергоблоки 1 и 2) введены в эксплуатацию только в 2014 и в 2016 гг. В настоящее время еще два блока (энергоблоки 3 и 4) находятся в стадии строительства и подписано Генеральное рамочное соглашение по сооружению третьей очереди (энергоблоки 5 и 6) [1].

После изучения места расположения АЭС «Куданкулам» было замечено, что на расстоянии 2,2 км от блоков 1, 2 и 3,3 км от блоков 3, 4 в направлении северо-северо-восток (ССВ) и северо-восток (СВ) находится ветряная электростанция (ветропарк). Ветряки возмущают структуру конвективных атмосферных потоков на высотах, соизмеримых с высотами выброса радиоактивных аэрозолей с АЭС «Куданкулам», в связи с чем было принято решение оценить влияние, оказываемое ветровыми электрическими установками (ВЭУ) на радиационную обстановку около места расположения ветропарка.

**Устройство ветрогенератора.** Ветрогенератор (ветроэлектрическая установка) представляет собой устройство преобразования кинетической энергии ветрового потока в механическую энергию вращения ротора с последующим ее преобразованием в электрическую энергию.

Схема устройства ВЭУ и его основные элементы представлены на рис. 1 [2].



**Рис. 1.** Схема устройства ВЭУ:

1 — фундамент; 2 — силовой шкаф; 3 — башня; 4 — лестница; 5 — поворотный механизм; 6 — гондола; 7 — электрический генератор; 8 — система слежения за направлением и скоростью ветра (анемометр); 9 — тормозная система; 10 — трансмиссия; 11 — лопасти; 12 — система изменения угла атаки лопасти; 13 — колпак ротора

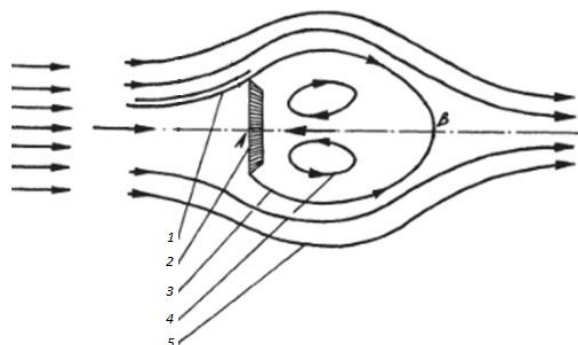
Отметим, что для предотвращения выхода установки из строя в погодных условиях, характеризующихся высокой скоростью ветра на уровне лопастей, она снабжена специальной системой торможения. Для остановки вращающихся магнитов используется индуцированный ток, созданный посредством короткого замыкания. Ротор замедляется, а возникающее противодействие замедляет вращение магнитов.

При ветре свыше 15 м/с тормоза автоматически замедляют вращение ротора. Если скорость движения ветра доходит до 20 м/с, тормозная система полностью останавливает лопасти.

В Индии применяют ветрогенераторы со следующими характерными размерами:

- высоты башни 70...100 м;
- диаметр лопастей 50...100 м.

Принципиальная схема обтекания препятствия потоком воздуха представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема обтекания потоком воздуха препятствия:

1 — элементарная струйка потока воздуха, набегающего на пластину; 2 — пластина; 3 — граница зоны аэродинамической тени; 4 — вихревые движения в зоне аэродинамической тени; 5 — линии тока за пределами зоны аэродинамической тени; A, B — точки торможения

При набегании воздушного потока частицы воздуха обтекают препятствие. Перед лопастью образуется область струек с повышенной плотностью, а позади нее — область разреженного воздуха. Перепад давления с двух сторон лопасти приводит к тому, что струйки воздуха с силой устремляются в разреженное пространство, закручиваются и образуют позади препятствия вихревые структуры [3].

На рис. 2 видно, что искажение потока воздуха происходит на расстояниях, сравнимых с размерами лопастей ветрогенератора.

**Особенности учета погодных условий и скоростей ветра для площадки АЭС «Куданкулам».** Метеорологические условия в расчетах переноса радиоактивной примеси в атмосфере принято учитывать с помощью классов стабильности атмосферы Паскуилла. Всего выделяют шесть классов: А — очень нестабильный, В — нестабильный, С — незначительно нестабильный, D — нейтральный, Е — незначительно стабильный и F — стабильный [4]. Основные параметры классов устойчивости приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Метеорологические условия, определяющие классы устойчивости Паскуилла**

Скорость ветра, м/с	День (солнечная радиация)			Ночь	
	Сильно	Умеренно	Незначительно	Более 4/8 облачность	Менее 3/8 облачность
Менее 2	А	А–В	В	—	—
2–3	А–В	В	С	Е	F
3–5	В	В–С	С	D	Е
5–6	С	С–D	D	D	D
Более 6	С	D	D	D	D

Как видно из табл. 1, наибольшее значение ветра характерно для классов стабильности С и D.

Будем рассматривать только направления ССВ и СВ, соответствующие расположению ветропарка относительно АЭС «Куданкулам». Для категорий стабильности С и D вероятность распределения ветра по скоростям на высоте 80 м представлена в табл. 2. Данные приведены за 2019 г. (год с наибольшими зарегистрированными скоростями ветра из интервала 2015–2019 гг.).

Высота мачт ветряков, расположенных вблизи АЭС, составляет около 80 м. С учетом размеров лопастей примем для консерватизма высоту 150 м.

Скорость ветра изменяется с высотой, при этом влияние температуры с ростом высоты не учитывалось. Данные изменения можно охарактеризовать формулой

$$v_1 = v_0 \left( \frac{H_1}{H_0} \right)^k, \quad (*)$$

где  $v_1$  — скорость ветра на заданной высоте;  $v_0$  — скорость ветра на известной высоте;  $H_1$  — заданная высота;  $H_0$  — высота измерения;  $k$  — эмпирический показатель шероховатости подстилающей поверхности.

Таблица 2

**Распределение ветра по частоте и скоростям на высоте 80 м в направлениях ССВ и СВ для категорий стабильности С и D (частота указана в процентах)**

Скорость ветра, км/ч	Категория С		Категория D	
	ССВ	СВ	ССВ	СВ
3–5	—	0,01	0,01	0,05
6–11	—	—	0,19	0,2
12–19	—	—	0,44	0,34
20–28	0,28	0,07	1,19	0,55
29–39	0,79	0,4	1,55	0,54
39–49	1,48	0,41	1,32	0,37
50–61	0,66	0,31	0,59	0,01
62–74	0,29	0,2	0,14	0,1
75–88	0,06	—	0,01	—
89–102	—	—	0,01	—
Суммарно	3,56	1,41	5,47	2,08

За известную высоту и скорость ветра примем значения, приведенные в табл. 2. Консервативно выберем наиболее вероятную и наибольшую из возможных скоростей по каждому из направлений для двух категорий (табл. 3).

Таблица 3

**Наиболее вероятные и наибольшие по направлению скорости для категорий С и D при высоте 80 м**

Критерий	Категория С		Категория D	
	ССВ	СВ	ССВ	СВ
Наиболее вероятная скорость, м/с	12,2	12,2	9,4	6,7
Наибольшая скорость по направлению, м/с	22,5	18,9	26,4	18,9

Выполним расчет для каждой из указанных скоростей согласно формуле (\*). Ландшафт близ ветряков — сельскохозяйственные земли с отдельными зданиями и оградами на расстоянии около 500 м от АЭС. Тогда эмпирический показатель шероховатости подстилающей поверхности будет равен 0,3 [4].

При расчете скоростей для высоты 150 м получены значения, приведенные в табл. 4.

Таблица 4

**Наиболее вероятные и наибольшие по направлению скорости для категорий С и D при высоте 150 м**

Критерий	Категория С		Категория D	
	ССВ	СВ	ССВ	СВ
Наиболее вероятная скорость, м/с	14,76	14,76	11,40	8,05
Наибольшая скорость по направлению, м/с	27,17	22,81	31,87	22,81

**Учет фактор разбавления.** Оценку влияния ветропарка на АЭС «Куданкулам» можно выполнить с помощью модели эквивалентной возвышенности. Для расчетов факторов разбавления  $aU/Q$  консервативно предположить наличие в районе ветропарка условного вала высотой 150 м и шириной до 1 км. Для расчета используем формулу

$$\frac{aU}{Q} = \frac{\exp\left[-0,5 \frac{h_e}{\sigma_z}\right]}{\pi \sigma_y \sigma_z},$$

где  $\sigma_z$  — вертикальная дисперсия струи примеси в классификации Паскуила, м;  $\sigma_y$  — горизонтальная дисперсия струи примеси в классификации Паскуила, м;  $h_e$  — эффективная высота выброса, принимаем  $h_e = 150$  м [5, 6].

Влияние повышенного рельефа (вала) на величину  $aU/Q$  (до порядка величины) будет уменьшаться с увеличением расстояния от точки выброса, практически исчезая после 1...2 км.

Расчетные значения  $aU/Q$  для высоты выброса 100 м с учетом повышенного (до 150 м) рельефа на расстоянии от 2 до 3 км для категорий погоды С и D представлены на рис. 3, 4. Консервативное значение скорости ветра принято по табл. 4 как значение наиболее вероятной скорости. Использование наибольших скоростей по направлению нецелесообразно, поскольку их значения выше скоростей, при которых ВЭУ будет заторможен.

Для анализа влияния ветряков были использованы нормированные факторы разбавления [7–9]. Эффективную высоту выброса рассчитывали по формуле

$$h_e = h + \Delta h.$$

Высота дополнительного теплового подъема струи  $\Delta h$  была найдена по формуле

$$\Delta h = A \left( 2,6 \sqrt{\frac{Q_h}{U_h}} - 0,029 \frac{V_s d}{U_h} \right),$$

где  $A$  — параметр, зависящий от категории погоды;  $Q_h$  — тепловая мощность источника, кВт;  $V_s$  — скорость выброса газов из вентиляционной трубы, м/с;  $d$  — внутренний диаметр трубы, м;  $U_h$  — скорость ветра на высоте  $h$ , м/с.

Скорость ветра на высоте  $h$  зависит от шероховатости поверхности  $z_0$ , а также от параметра  $\epsilon$ :

$$U_h = U \left[ \frac{h^\epsilon - z_0^\epsilon}{10^\epsilon - z_0^\epsilon} \right].$$

Согласно [7] параметры  $A$  и  $\epsilon$  для расчета подъема струи и скорости ветра равны соответственно 1,6 и 0,04 для категории С, 1,03 и 0,11 — для категории D.

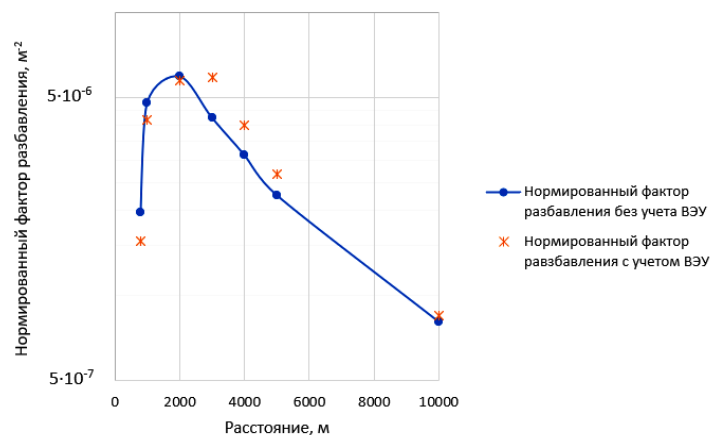


Рис. 3. Нормированный фактор разбавления для категории С с учетом и без учета влияния ветряков

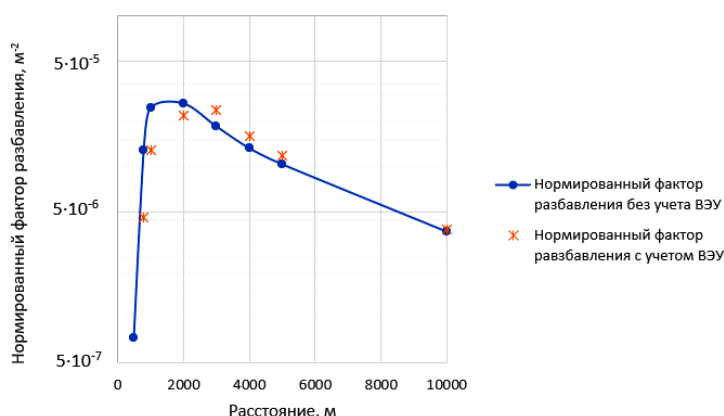


Рис. 4. Нормированный фактор разбавления для категории D с учетом и без учета влияния ветряков

На рис. 3 и 4 видно, что учет ветряков оказывает различное влияние на значение удельной объемной активной примеси для категорий С и D. В первом случае наблюдается явное повышение активности на расстоянии 3...6 км от места выброса. Для категории D есть зоны понижения активности — 1...2 км от места выброса, и повышения — 3...5 км от места выброса.

**Заключение.** Ветряные электростанции (ветропарки) могут влиять на погоду в непосредственной близости от них. Вращение лопастей ветрогенератора вызывает значительную турбулентность в аэродинамических следах. Эта турбулентность способствует более активному вертикальному перемешиванию тепловых потоков и водяного пара, что влияет на состояние метеорологической среды в направлении движения воздуха.

Оценка влияния ветропарка на АЭС «Куданкулам» была выполнена на модели эквивалентного вала с шириной 1 км и высотой, равной высоте ВЭУ, — 150 м.

При сравнении с нормированными факторами разбавления для обеих категорий наблюдается увеличение значения удельной объемной активной примеси в районе ветропарка, однако через 2...3 км после прохождения воздушными массами данного участка значение активности падает до нормированных уровней.

### Литература

- [1] АЭС «Куданкулам». *ase-ec.ru: веб-сайт*. URL: <https://ase-ec.ru/about/projects/aes-kudankulam/> (дата обращения: 20.12.20)
- [2] Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектростанции. Харьков, ХАИ, Севастополь, СевНТУ, 2003.
- [3] Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. М., ГНУ ВИЭСХ, 2006.
- [4] МУ 2.6.5.010-2016. 2.6.5. Атомная энергетика и промышленность. Обоснование границ и условия эксплуатации санитарно-защитных зон и зон наблюдения радиационных объектов. Методические указания (утв. ФМБА России 22.04.2016).
- [5] Atmospheric dispersion models for potential accident consequence assessments at nuclear power plants. RG-1.145, USNRC, 1982.
- [6] Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу (МПА-98). М., Минатом России, 1999.
- [7] Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. М., Энергоатомиздат, 1991.
- [8] Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. М., Энергоатомиздат, 1991.
- [9] Перевезенцев В.В. Газоаэрозольные выбросы атомных электростанций, миграция и накопление радионуклидов в объектах окружающей среды. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.

**Меринова Виктория Эдуардовна** — студентка кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Перевезенцев Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Ядерные реакторы и установки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Меринова В.Э. Оценка влияния топографии и ветряного парка на радиационную безопасность АЭС «Куданкулам». *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 03(56). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-03-682>

---

**ASSESSMENT OF THE IMPACT OF TOPOGRAPHY AND THE WIND FARM ON THE RADIATION SAFETY OF THE KUDANKULAM NPP**

V.E. Merinova

torisee@mail.ru

SPIN-code: 4335-7940

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation****Abstract**

*The nuclear power plant (NPP) Kudankulam is located on the coastal part of the South India and experiences the influence of weather conditions typical for this area. The high wind speed, as well as the influence of the wind farm located at a distance of 2...3 km from the power units, make it necessary to assess the influence of these factors on the transport of impurities in the atmosphere. The paper evaluates the impact of wind generators on the Kudankulam NPP by introducing an elevation equivalent to the farm with a width of 1 km and a height of 150 m. It is shown that an increase in the value of the specific volumetric active admixture is observed in the area of the wind farm.*

**Keywords**

*Radiation safety, wind turbine, dilution factor, impurity transfer, Pasquill stability classes, nuclear power plant, specific volumetric activity of impurities, wind farm*

Received 04.02.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

**References**

- [1] AES “Kudankulam” [“Kudankulam” atomic power station]. *ase-ec.ru: website* (in Russ.). URL: <https://ase-ec.ru/about/projects/aes-kudankulam/> (accessed: 20.12.20)
- [2] Krivtsov V.S., Oleynikov A.M., Yakovlev A.I. Neischerpaemaya energiya. Kn. 1. Vetroelektrogeneratory [Unexhaustible energy. Vol. 1. Wind electrogenerators]. Khar'kov, Khar'k. aviats. in-t Publ., Sevastopol', Sevast. nats. tekhn. un-t Publ., 2003 (in Russ.).
- [3] Kharitonov V.P. Avtonomnye vetroelektricheskie ustanovki [Stand-alone wind electric plants]. Moscow, GNU VIESKh Publ., 2006 (in Russ.).
- [4] MU 2.6.5.010-2016. 2.6.5. Atomnaya energetika i promyshlennost'. Obosnovanie granits i usloviya ekspluatatsii sanitarno-zashchitnykh zon i zon nablyudeniya radiatsionnykh ob"ektov. Metodicheskie ukazaniya (utv. FMBA Rossii 22.04.2016) [Atomic energetics and industry. Limits substantiation and exploitation conditions sanitary protection zones and control areas for radiative objects. Methodology guidelines (approved by FMBA of the RF 22.04.2016)] (in Russ.).
- [5] Atmospheric dispersion models for potential accident consequence assessments at nuclear power plants. RG-1.145, USNRC, 1982.
- [6] Metodicheskie ukazaniya po raschetu radiatsionnoy obstanovki v okruzhayushchey srede i ozhidaemogo oblucheniya naseleniya pri kratkovremennykh vybrosakh radioaktivnykh veshchestv v atmosferu (MPA-98) [Methodology guidelines on calculation of environment radiation situation and prospective public exposure at acute discharge of radioactive materials into the atmosphere (MPA-98)]. Moscow, Minatom Rossii Publ., 1999 (in Russ.).
- [7] Kozlov V.F. Spravochnik po radiatsionnoy bezopasnosti [Handbook on radiation safety]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991 (in Russ.).



- [8] Gusev N.G., Belyaev V.A. Radioaktivnye vybrosy v biosphere [Radioactive emissions in biosphere]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991 (in Russ.).
- [9] Perevezentsev V.V. Gazoerazol'nye vybrosy atomnykh elektrostantsiy, migratsiya i nakoplenie radionuklidov v ob"ektakh okruzhayushchey sredy [Gas-aerosol emission of atomic power plants, migration and build up of radionuclides in environment objects]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2016 (in Russ.).

**Merinova V.E.** — Student, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Perevezentsev V.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Nuclear Reactors and Power Plants, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Merinova V.E. Assessment of the impact of topography and the wind farm on the radiation safety of the Kudankulam NPP. *Politekhnicheskij molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 03(56). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-03-682.html> (in Russ.).