ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПУЛЬСАЦИИ И КАВИТАЦИИ ВИХРЕВОГО ПОТОКА, ВОЗНИКАЮЩИХ ПЕРЕД ВОДОВЫПУСКНЫМ СООРУЖЕНИЕМ

Айтбаева Феруза Рустембай кизи
Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail:aytbaeva.feruza1 @gmail.com

Азамат Мамбетов
Научно-исследовательский институт ирригации и водных проблем,
Республика Узбекистан, г. Ташкент

The onset of pulsations and cavitation phenomena in vortex flow developing upstream of a water outlet structure

Aytbaeva Feruza
Research Institute of Irrigation and Water Problems,
Republic of Uzbekistan, Tashkent
E-mail:aytbaeva.feruza1 @gmail.com

Azamat Mambetov
Research Institute of Irrigation and Water Problems,
Republic of Uzbekistan, Tashkent

АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются процессы возникновения и развития пульсаций и кавитации в вихревом потоке, формирующемся перед водовыпускными сооружениями. Показано, что при движении потока по криволинейным участкам канала возникают вихревые структуры, приводящие к перераспределению скоростей и давлений. Под действием центробежных сил формируется избыточное давление на элементы сооружения, что способствует возникновению кавитационных явлений. Проанализировано влияние структуры вихревого потока, включая образование воздушного ядра, изменение кинетической и

потенциальной энергии, а также участие мутности в процессе движения. На основе теоретических положений гидродинамики, включая теории Гельмгольца и Стокса, описаны характеристики вихревых линий, труб и полей скоростей. Полученные результаты позволяют глубже понять природу колебательных процессов вблизи водовыпускных сооружений и могут быть использованы при их проектировании и эксплуатации.

ABSTRACT

This study examines the processes of formation and development of pulsations and cavitation in vortex flows formed upstream of hydraulic outlet structures. It is shown that vortex structures arise when the flow moves along curvilinear channel sections, leading to redistribution of velocity and pressure fields. Under the influence of centrifugal forces, excess pressure is generated on structural elements, contributing to cavitation phenomena. The influence of vortex flow structure, including the formation of an air core, variations in kinetic and potential energy, and the role of suspended particles, is analyzed. Based on fundamental hydrodynamic theories, including Helmholtz's and Stokes' theorems, the characteristics of vortex lines, vortex tubes, and velocity fields are described. The obtained results provide deeper insight into oscillatory processes near hydraulic outlet structures and can be applied in their design and operation.

Введение. В современных гидротехнических сооружениях особое внимание уделяется обеспечению надежности и долговечности водовыпускных устройств, работающих в условиях сложных гидродинамических режимов. Одной из актуальных проблем является возникновение вихревых потоков перед водовыпускными сооружениями, сопровождающихся пульсациями и кавитационными явлениями. Эти процессы оказывают существенное влияние на эксплуатационные характеристики сооружений, вызывая вибрации, шум, эрозионные повреждения конструкций и снижение их срока службы.

Формирование вихревых структур обусловлено особенностями движения потока по криволинейным участкам каналов, а также неравномерностью распределения скоростей и давлений. При этом под действием центробежных сил происходит перераспределение давления, что может приводить к образованию зон пониженного давления и развитию кавитации. Дополнительное влияние

оказывает наличие взвешенных частиц (мутности), изменяющих энергетические характеристики потока.

Несмотря на значительное количество исследований в области гидродинамики, вопросы взаимосвязи вихревых потоков, пульсаций и кавитации вблизи водовыпускных сооружений остаются недостаточно изученными. В связи с этим возникает необходимость более детального теоретического анализа данных процессов с использованием фундаментальных положений механики жидкости.

Целью данной работы является исследование закономерностей формирования вихревых потоков, а также анализ условий возникновения пульсаций и кавитации перед водовыпускными сооружениями.

Ключевые слова. вихревой поток, кавитация, пульсации, водовыпускные сооружения, гидродинамика, вихревые линии, вихревые трубы, скорость потока, давление, мутность

Introduction. In modern hydraulic engineering, particular attention is given to ensuring the reliability and durability of water outlet structures operating under complex hydrodynamic conditions. One of the pressing issues is the formation of vortex flows upstream of outlet structures, accompanied by pulsations and cavitation phenomena. These processes significantly affect the operational performance of structures, causing vibrations, noise, erosion damage, and a reduction in service life.

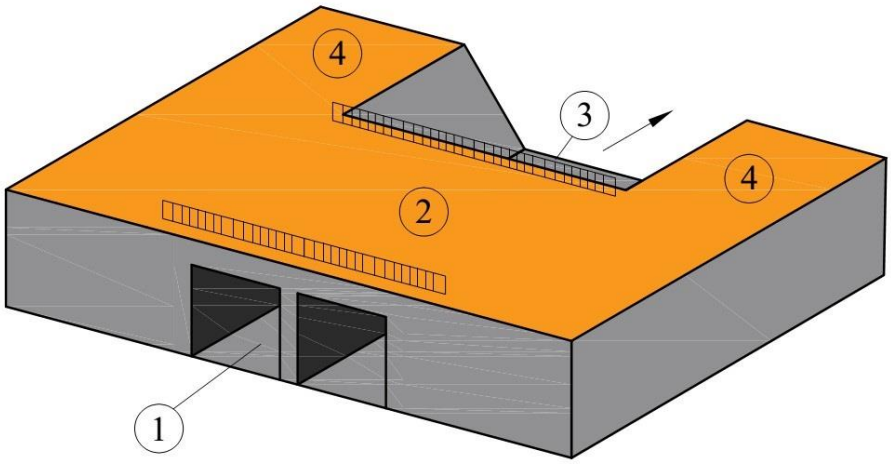
The formation of vortex structures is обусловлено (caused by) the characteristics of flow motion along curvilinear channel sections, as well as by non-uniform distributions of velocity and pressure. Under the action of centrifugal forces, pressure redistribution occurs, which may lead to the formation of low-pressure zones and the development of cavitation. An additional factor is the presence of suspended particles (turbidity), which influences the energy characteristics of the flow.

Despite extensive research in hydrodynamics, the interrelation between vortex flows, pulsations, and cavitation near hydraulic outlet structures remains insufficiently studied. Therefore, a more detailed theoretical analysis of these processes based on fundamental principles of fluid mechanics is required.

The aim of this study is to investigate the formation mechanisms of vortex flows and to analyze the conditions for the occurrence of pulsations and cavitation upstream of hydraulic outlet structures.

Keywords. vortex flow, cavitation, pulsation, hydraulic outlet structures, hydrodynamics, vortex lines, vortex tubes, flow velocity, pressure, turbidity

Основной характер движения потока в водовыпускных сооружениях заключается в том, что за счет движения потока на криволинейных участках трассы канала возникает вихревой поток. Под действием центробежной силы, вызванной вихревым движением, поток воздействует на стенку затвора и создает избыточное давление. Из-за образовавшегося избыточного давления возникает явление кавитации (рис. 1) [1-3].



1. Пролет сооружения
2. Гребень сооружения (машинного проезда)
3. Отводящий канал
4. Инспекторская дорога вдоль канала

Рис. 1. Вид водовыпусного сооружения

Воздушное ядро появляется вихрь перед сооружением. Вихрь образует линии потока, которые увеличиваются с каждым шагом по мере увеличения количества потока. Это связано с тем, что горизонтальная составляющая скорости потока уменьшается, а вертикальная составляющая увеличивается до тех пор, пока не достигнет определенного предела. Когда скорость потока достигает этого предела, кинетическая энергия потока остается постоянной, а потенциальная энергия расходуется на преодоление силы сопротивления. В этом случае диаметр вихря перед сооружением больше диаметра обычного кругового потока [2-4].

Рассмотрим поле движения вихревого потока. В поле движения потока возникает поле скорости, и в этом поле скорость движется криволинейно.

Поток вне трубы постоянного сечения на мгновение останавливается, т. е. в нем сохраняется импульс. После движения потока в потоке появляется вихрь. Величина образовавшегося вихря равна произведению среднего значения компоненты скорости на длину окружности вихря. Если мы создадим кривое сечение AB в потоке (рис. 2), интеграл, полученный этой кривой, дает скорость потока в векторном поле [3-5]:

$$\Gamma_{AB} = \int_A^B \left(\overline{V} d\overline{r}\right) = \int_A^B \overline{V} \cos\alpha ds = \int_A^B \overline{V}_s ds = \int_A^B \left(udx + \vartheta dy + wdz\right) \quad (1)$$

Приведенный криволинейный интеграл (1) для напорной трубы записывается следующим образом:

$$\Gamma_{AB} = \oint_s \left(udx + \vartheta dy + wdz\right) \quad (2)$$

Известно, что в движении течения участвует и мутность. Это оказывает большое влияние на изменение кинетической энергии потока из-за уменьшения скорости потока перед водовыпускными сооружениями и внутри трубы. Поэтому рассмотрим вихревое движение мутности в потоке (рис. 3).

Предполагается, что вихревое движение мутности в потоке вращается с угловой скоростью ω_z относительно оси z, тогда угловая скорость мутности в точке M равна $V=\omega_z r$, а ее проекция на оси 0x и 0y будет равна:

$$u=\omega_z y,\ \vartheta=\omega_z y,\ \omega=0 \quad (3)$$

Найти значения проекций скоростей $\frac{du}{dy}$ и $\frac{d\vartheta}{dx}$ на оси 0x и 0y и записать величину вихря потока следующим уравнением:

$$\Omega_z = \frac{d\vartheta}{dx} - \frac{du}{dy} = 2\omega_z \quad (4)$$

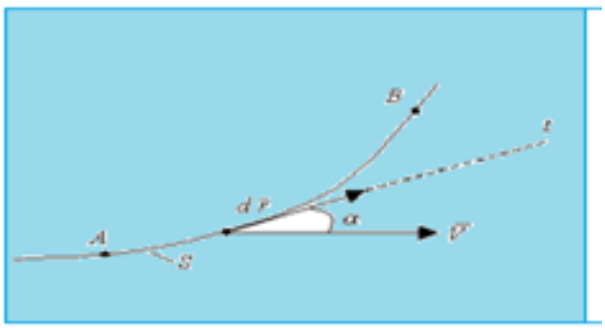


Рис. 2. Интенсивность вихря на криволинейном участке AB

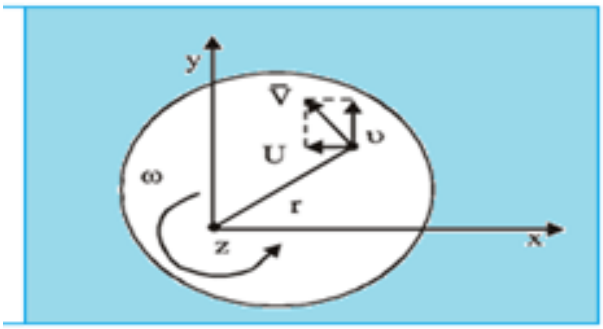


Рис. 3. Круговорот мутности в потоке

Из этого равенства известно, что вихревая составляющая вектора z в потоке находится из того, что вектор частицы потока z связан с компонентой угловой скорости ω_z по формуле $\Omega_z = 2\omega_z$. Аналогичным образом можно найти следующие компоненты:

$$\Omega_x = \frac{dw}{dy} - \frac{d\vartheta}{dz} = 2\omega_x$$
$$\Omega_y = \frac{du}{dz} - \frac{dw}{dx} = 2\omega_y \quad (5)$$

Векторная скорость $\overline{\Omega}$ вихря частиц в потоке определяется угловой скоростью ω следующим образом:

$$\overline{\Omega} = 2\overline{\omega} \quad (6)$$

Поскольку вихревое движение может быть ламинарным или турбулентным, в потоке возникают колебания при потенциальном движении.

Если векторная скорость вихря частиц в потоке равна $\overline{\Omega} = 0$, то поток является потенциальным потоком, то есть потоком без вихря, в этом случае выполняются следующие условия:

$$\frac{dw}{dy} - \frac{d\vartheta}{dz} = \frac{du}{dz} - \frac{dw}{dx} = \frac{d\vartheta}{dx} - \frac{du}{dy} = 0 \quad (7)$$

Из равенства (7) следует существование потенциальной скорости φ(x,y,z), а из этого равенства находятся составляющие скорости потока на осях 0x и 0y:

$$\frac{d\varphi}{dx} = u\,,\ \frac{d\varphi}{dy} = \vartheta\,,\ \frac{d\varphi}{dz} = w \quad (8)$$

Поток, удовлетворяющий условиям (8), называется потенциальным потоком, и в этом случае скорость вихря на участке AB равна разности потенциалов скоростей в точках A и B:

$$\int_A^B udx + \vartheta dy + wdz = \int_A^B \left[\frac{d\varphi}{dx}dx + \frac{d\varphi}{dy}dy + \frac{d\varphi}{dz}dz\right] = \int_A^B d\varphi = \varphi(B) - \varphi(A) \quad (9)$$

Из-за формирования вихревых линий перед водовыпускными сооружениями в них возникают колебания. Основной причиной этого является возникновение вихревых полей, скорости которых составляют вихревое поле вблизи сооружения. Это поле состоит из вихревых линий и труб, и из их определения следует, что нормальная составляющая вихрей равна нулю в любой точке или на поверхности этих линий.

Скорость вектора вихря определяется следующим образом:

$$\int_S \Omega_n dS = 0 \quad (10)$$

где S – площадь поверхности вихря; n – нормальная величина, приложенная к поверхности вихря (рис. 4).



Рис. 4. Вихревые линии и трубы

Поток векторов вихревых скоростей в любом поперечном сечении вихревой трубы одинаков по длине трубы:

$$\int_{S_1} \Omega_n dS_1 = \int_{S_2} \Omega_n dS_2 \quad (11)$$

Это определение вытекает из второй теории Гельмгольца. Вихревой поток характеризует интенсификацию вихрей в трубопроводе и записывается следующим интегралом:

$$i = \int_S \Omega_n dS = 2\int_S \omega_n dS \quad (12)$$

Если значения вихрей постоянны, то есть Ω_n=const, то получается следующее равенство:

$$S_1\omega_{n_1} = S_2\omega_{n_2} = \ldots = S_i\omega_{n_i} = const \quad (13)$$

Из этого равенства можно сделать следующие выводы:

1. Поперечное сечение вихревой трубы не равно нулю ни в одной точке вдоль трубы, поскольку вихревая скорость частиц потока не бесконечна, то есть ее кинетическая энергия не бесконечно велика;

2. Причина, по которой вихревые трубы не заканчиваются внутри потока, заключается в том, что они соединяются друг с другом, образуя вихревой круг, или сливаются со стенкой трубы и свободной поверхностью потока.

3. Вихри дают скоростную характеристику движения потока в трубе и рассчитываются по теории Стокса. Теория Стокса показывает, что ускорение вихревой трубы по напорной трубе равно скорости вихря по этой трубе и рассчитывается по следующему интегралу:

$$\Gamma = \int_S \Omega_n dS = \oint_L \bar{V} dr \quad (14)$$

где L – длина трубы.

Заключение. В ходе исследования рассмотрены основные закономерности формирования вихревых потоков перед водовыпускными сооружениями и проанализированы условия возникновения пульсаций и кавитационных явлений. Установлено, что вихревые структуры образуются на криволинейных участках канала и приводят к перераспределению скоростей и давлений в потоке. Под действием центробежных сил возникает избыточное давление на элементы сооружения, что способствует развитию кавитации и колебательных процессов.

Также показано, что структура вихревого потока, включая воздушное ядро и влияние мутности, оказывает существенное влияние на кинетическую и потенциальную энергию потока, а следовательно, на интенсивность и размеры вихрей. Использование теоретических положений гидродинамики, включая законы Гельмгольца и Стокса, позволяет количественно описать характеристики вихревых линий и труб, а также распределение скоростей и давления вблизи сооружения.

Список литературы:

1. Махмудов Э.Ж., Палуанов Д.Т. Задача о несущей способности оснований низконапорной плотины // Узбекский журнал проблемы механики. – Ташкент, 2010. – № 1. – С. 27-31.

2. Хамидов А.А., Худайкулов С.И. Теория струй многофазной вязкой жидкости. – Т.: Фан, 2003. – С. 140.

3. Яхшибоев Д.С., Худайкулов Б.С. Кавитационная безопасность гидросооружений. – Т.: ТИИМ, 2013.

4. Усмонова Н.А., Худайкулов С.И., Усмонов А.А. Моделирование динамики формирования кавитации и пульсации в трубопроводах инженерных коммуникаций // ФарПИ илмий-техника журнали. – Фарғона, 2019. – Б. 79-83.

5. Худайкулов С.И., Якубов М.А., Якубова Х.М. Рост и сжатие кавитационных полостей в дисперсной смеси // Узбекский журнал «Проблемы механики». – Ташкент, 2013. - №3. – С. 68-71.