



АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДВИЖЕНИЯ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА С ИСКУССТВЕННЫМ РАССЛОЕНИЕМ ПОТОКА

Хужакулов Рустам- д.т.н., профессор,

<https://orcid.org/0009-0007-6082-0042> e-mail: rustam868793@mail.ru

Исламов Илхом -ассистент,

<https://orcid.org/0009-0000-2307-5863> e-mail: ilhomislomov1990@gmail.com

Турсунов Феруз-PhD, доцент

<https://orcid.org/0009-0001-5350-5999> mail: feruzbektursunov531@gmail.com

Каршинский государственный технический университет, Карши, Узбекистан

Аннотация. Введение. В современных условиях для поддержания благоприятного гидравлического режима на системах машинного водоподъема рационально использовать на водотоках защитные сооружения, использующие энергию водного потока в виде плавучей запани.

Результаты. На основе полученных теоретических закономерностей созданы принципиально новые самоуправляемые плавучие конструкции и уточнены гидродинамические характеристики движения нестационарного трехмерного потока для параметров профиля крыла.

Методы и материалы. В статье для вывода дифференциальной формы уравнения движения среды использован метод определения распределения напряжений на основе элементарной тетраэдрической модели.

Заключение. Теория нестационарного трехмерного движения многофазного потока с его искусственным расслоением и защитой от выбранных фаз по глубине использована плавучими направляющими системами на водозаборах крупных каскадов насосных станций.

Ключевые слова: насосные станции, самоуправляемые плавучие конструкции, трехмерный поток, плавучие запани, водозабор, управление потоком.

Дата поступления: 21.02.2026. После обработки: 04.03.2026 Принято печать: 24.03.2026

For citation: Khujakulov R., Islamov I., Tursunov F. Analysis of Unsteady Motion of a Multiphase Flow with Artificial Stratification. Alternative Energy. 2026. 1(22). pp. 74-80. (In Rus.)

UO‘K 626:627.631.624

SUN'IY QATLAMLAHGAN KO'P FAZALI OQIMNING NOTURG'UN HARAKATINI TAHLIL QILISH

Xujakulov Rustam- t.f.d., prof.,

<https://orcid.org/0009-0007-6082-0042> e-mail: rustam868793@mail.ru

Islamov Ilhom -assistant,

<https://orcid.org/0009-0000-2307-5863> e-mail: ilhomislomov1990@gmail.com

Tursunov Feruz-PhD, dotsent

<https://orcid.org/0009-0001-5350-5999> mail: feruzbektursunov531@gmail.com

Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi, O'zbekiston

Annotatsiya. Kirish. Zamonaviy sharoitda mexanik suv ko'tarish tizimlarida qulay gidravlik rejimni saqlash uchun suv oqimining energiyasini suzuvchi qurilma shaklida ishlatadigan suv oqimlarida himoya inshootlaridan foydalanish oqilona yechim hisoblanadi.





Usul va materiallar. Maqolada muhit harakat tenglamasini differensial shaklda chiqarish uchun elementar tetraedr modeli asosida kuchlanishlar taqsimoti aniqlash usulidan foydalanilgan.

Natijalar. Olingan nazariy tamoyillar asosida tubdan yangi o'z-o'zidan boshqariladigan suzuvchi tuzilmalar yaratildi va qanot profilining parametrlari uchun beqaror uch o'lchovli oqim harakatining gidrodinamik xususiyatlari aniqlandi.

Xulosa. Ko'p fazali oqimning beqaror uch o'lchovli harakati nazariyasi uning sun'iy tabaqalanishi va tanlangan fazalardan chuqurlikdagi himoyasi bilan katta nasos stantsiyalarining suv olish joylarida suzuvchi tizimlari tomonidan qo'llaniladi.

Kalit so'zlar: nasos stantsiyalari, o'z-o'zidan boshqariladigan suzuvchi inshootlar, uyurmali oqim, suzuvchi qurilma, suv olish, oqimni boshqarish.

UDC 626:627.631.624

ANALYSIS OF UNSTEADY MOTION OF A MULTIPHASE FLOW WITH ARTIFICIAL STRATIFICATION

Khujakulov Rustam- DSc, Prof.,

<https://orcid.org/0009-0007-6082-0042> e-mail: rustam868793@mail.ru

Islamov Ilhom -Assistant,

<https://orcid.org/0009-0000-2307-5863> e-mail: ilhomislomov1990@gmail.com

Tursunov Feruz-PhD, Ass.Prof.

<https://orcid.org/0009-0001-5350-5999> mail: feruzbektursunov531@gmail.com

Karshi State Technical University, Karshi, Uzbekistan

Abstract. Introduction. Under modern conditions, maintaining a favorable hydraulic regime in mechanical water-lifting systems requires efficient solutions. The use of protective hydraulic structures in water flows, which utilize the energy of the flow in the form of floating devices, is considered a rational approach.

Methods and Materials. The paper employs a method for determining stress distribution based on an elementary tetrahedral model to derive the differential form of the governing equations of fluid motion.

Results. Based on the obtained theoretical principles, fundamentally new self-regulating floating structures have been developed. The hydrodynamic characteristics of unsteady three-dimensional flow motion were determined for the parameters of the wing profile.

Conclusion. The theory of unsteady three-dimensional motion of a multiphase flow, considering its artificial stratification and selective protection of phases at depth, can be applied in floating systems at water intake facilities of large pumping stations.

Keywords: pumping stations, self-regulating floating structures, vortex flow, floating device, water intake, flow control.

Введение.

Математическое описание и изучение движения жидкости основывается на гипотезе сплошности среды, согласно которой среда рассматривается в макроскопическом масштабе. Для такой среды вводится понятие частицы бесконечно малого объема и различные физические величины, например плотность, скорость, температура, принимаются в виде непрерывных, имеющих достаточное число производных функций координат и времени. К описанию движения среды возможно два подхода - с использованием переменных Эйлера и с использованием переменных Лагранжа [1,2].

В первом случае вводится поле, в котором характеризующие течение величины определяются как функции пространственных координат x и времени t . Основной из таких величин является вектор скорости $u(x,t)$. При этом подходе следует иметь в виду, что через одну и ту же точку пространства в различные моменты времени проходят разные частицы





среды. Во втором случае характеризующие течение среды величины относят к конкретным частицам, движение которых изучается. Для частиц задаются координаты, а в начальный момент времени и вектор скорости определяется, как и (a, t) . Метод Лагранжа имеет много общего с описанием движения материальных тел, применяемым в теоретической механике. Однако из-за сложности решения получаемых уравнений в механике жидкости и газа он находит меньшее применение, чем метод Эйлера, который и положен в основу построения рассматриваемых ниже математических моделей нестационарных течений [3,4].

При эксплуатации НС в водные источники поступает, как принято считать, нормативно-чистая вода, с повышенным температурным режимом. Большое количество взвешенных, донных наносов, плавника и повышенная температура влияет на состояние гидромеханического оборудования. Множество приложений гидравлики жидкости включают транспортировку частиц наносов крупного размера. Для проведения расчётов вязкого течения были построены трехмерные геометрические модели проточной части насоса с использованием программного комплекса SolidWorks. При очень разбавленной суспензии поведение инерционных частиц значительно отличается от жидкостных с концентрацией в определенных участках потока. Статистика этих явлений является объектом теоретических и экспериментальных исследований. В них насосы используются для всех видов работ, где требуется поднять уровень поверхностных вод на 1-3 м для орошения и дренажа [5,6]. Проблема определения средней скорости осаждения инерционных частиц имеет актуальность в исследованиях влияния вихревой структуры, моделированных течений, вращающихся в противоположных направлениях проточной части насосов. Расчет сложных переходных процессов является одним из самых ответственных этапов эксплуатации НС. Разработку методов управления режимами сопрягающих сооружений НС с переходными процессами целесообразно сконцентрировать на элементах устройств, защищающих основное оборудование. Значительное внимание необходимо уделить характеру управления, которое выполняет обслуживающий персонал станции. При автоматическом управлении все операции выполняют соответствующие приборы-автоматы, расположенные внутри здания станции. Современными заданиями кроме режимов являются ресурсосберегающие технологии управления потоком в насосных станциях. Дистанционное управление осуществляется с диспетчерского пункта, расположенного на некотором расстоянии от НС. Особенно большое значение имеют исследования нестационарных процессов, возникновение которых связано с частыми включениями и выключениями насосов.

Оптимальный уровень надежности определяется исходя из минимума суммы затрат на возведение и эксплуатацию оборудования по экономическим расчётам, обеспечивающих нормальную эксплуатацию в течение заданной степени риска. Статистический уровень основан на обобщении опыта эксплуатации оборудования одинаковых типов и конструкций. На первом этапе решения этой задачи необходимо установление количественного критерия нормативного уровня надежности. Метод предельных состояний базируется на официальных нормативных документах и принят к дальнейшим расчётам.

При выполнении работы использованы методы гидравлического исследования структуры потока в узлах насосных станций для обеспечения нормального функционирования гидромеханического оборудования НС на основе общеизвестных методов измерений. Методика исследований уточнялась в процессе имитационного изучения гидравлических процессов, соответствующих различным режимам эксплуатации. Достоверность полученных данных в ходе теоретических исследований доказана математическими методами проверки адекватности результатов экспериментов и натурных исследований при эксплуатации насосов.

Результаты изучения проблем и перспектив информационных технологий для обеспечения внедрения новых инновационных подходов в гидроэнергетике используются для создания ГИС. Объединение результатов различных научных исследований в одну ГИС-базу применено в качестве универсального инструмента





Методы.

Уравнение движения среды, или уравнение гидродинамики, в своем наиболее фундаментальном виде выражает закон сохранения количества движения (импульса). Для жидкого объема V , ограниченного поверхностью S , согласно этому закону, имеем

$$d \int_V u \rho dV = \int_V P_{mp} dV dt + \int_S p_n dS dt, \quad (1)$$

где u - скорость движения центра масс среды, заключенной в объеме dV , ρ - плотность среды; ρ_m - массовая сила, отнесенная к единице массы, т. е. $\rho_m = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta P_m^1}{\Delta m}$, причем ΔP_m^1 -

главный вектор массовых сил, действующих на элемент массы Δm ; p_n — напряжение поверхностных сил, т. е. $p_n = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P_s^1}{\Delta S}$, причем ΔP_s^1 - главный вектор поверхностных сил,

действующих на площадку ΔS .

После деления на dt уравнение (1) принимает вид

$$\frac{d}{dt} \int_V u \rho dV = \int_V P_{mp} dV + \int_S p_n dS, \quad (2)$$

т. е. скорость изменения количества движения выбранной части среды равна сумме всех сил, действующих на эту часть среды. Уравнение (2) представляет собой обобщение второго закона Ньютона на случай движения сплошной материальной среды. Левая часть этого уравнения может быть представлена в виде.

$$\frac{d}{dt} \int_V u \rho dV = \int_V \left(\rho \frac{du}{dt} + \rho \operatorname{div} u \right) dV = \int_V \rho \frac{du}{dt} dV + \int_V u \left(\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} u \right) dV. \quad (3)$$

При отсутствии в выделенном жидком объеме источников и стоков последний интеграл в уравнении (3) обращается в нуль, так как по рассматриваемому в дальнейшем уравнению неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} u = 0$$

При наличии притока или стока массы правая часть этого выражения будет отлична от нуля и равна какой-то величине ρq_m , характеризующей быстроту изменения массы в выделенном объеме. Если $q_m = 0$, то

$$\frac{d}{dt} \int_V u \rho dV = \int_V \rho \frac{du}{dt} dV \quad (4)$$

Результаты и обсуждения.

Для получения уравнения движения среды в дифференциальной форме необходимо найти дополнительные соотношения, определяющие p_n . С этой целью удобно взять жидкий объем в виде бесконечно малого тетраэдра ОАВС, три грани которого перпендикулярны соответственно осям декартовых координат x , y , z , а положение четвертой определяется нормалью n (рис.1). Примем, что p_x , p_y , p_z и p_n — напряжения на гранях тетраэдра, имеющих нормали i , j , k , n . Тогда, применяя уравнение (2) и учитывая соотношение (4), получим [4,5]

$$\int_V \rho \frac{du}{dt} dV = \int_V P_{mp} dV - \int_{S_x} p_x dS - \int_{S_y} p_y dS - \int_{S_z} p_z dS + \int_{S_n} p_n dS, \quad (5)$$

где S_x, S_y, S_z являются проекциями площади S_n грани АВС, т. е. $S_x = S_n \cos(\alpha_x)$, $S_y = S_n \cos(\alpha_y)$, $S_z = S_n \cos(\alpha_z)$.



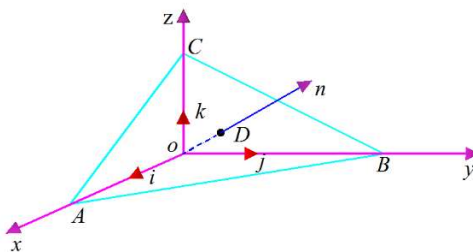


Рис.1 - Жидкий объем в виде элементарного тетраэдра.

Теорема о среднем напряжении позволяет по уравнению (5) найти

$$\left(\rho \frac{du}{dt} - \rho P_m \right)_{cp} \frac{S_n h}{3} = S_n p_{ncp} - S_n \cos(nx) p_{xcp} - S_n \cos(ny) p_{ycp} - S_n \cos(nz) p_{zcp}, \quad (6)$$

где h — высота OD тетраэдра.

При $h \rightarrow 0$ стоящие в правой части уравнения (6) средние напряжения p_{ncp} , p_{xcp} , p_{ycp} , p_{zcp} на гранях тетраэдра примут значения напряжений в точке O , поэтому после сокращения на S_n

$$p_n = p_x \cos(nx) + p_y \cos(ny) + p_z \cos(nz). \quad (7)$$

Соотношение (7) показывает, что напряжение p_n в точке O на произвольно ориентированной площадке определяется по трем напряжениям p_x, p_y, p_z на площадках, перпендикулярных к осям декартовых координат и проходящих через точку O . Каждый из трех векторов p_x, p_y, p_z может быть представлен тремя компонентами. Следовательно, напряжение в точке произвольно ориентированной площадки определяется, если известна матрица

$$\begin{bmatrix} p_{xx} & p_{xy} & p_{xz} \\ p_{yx} & p_{yy} & p_{yz} \\ p_{zx} & p_{zy} & p_{zz} \end{bmatrix} = [p_{ik}]$$

Эта матрица называется тензором напряжений. Первый индекс у каждой проекции p_{ik} указывает ось, перпендикулярно к которой берется площадка, а второй — ось, по которой определяется проекция вектора.

Подставляя значение p_n согласно соотношению (7) в последний интеграл уравнения (2) и применяя формулу Гаусса - Остроградского, найдем

$$\int_S p_n dS = \int_S [p_x \cos(nx) + p_y \cos(ny) + p_z \cos(nz)] ds = \int_V \left(\frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z} \right) dV$$

С помощью соотношений (4) и (7) уравнение (2) можно привести к виду

$$\int_V \left(\rho \frac{du}{dt} - \rho P_m - \frac{\partial p_x}{\partial x} - \frac{\partial p_y}{\partial y} - \frac{\partial p_z}{\partial z} \right) dV = 0 \quad (8)$$

Интеграл (8) должен быть равен нулю при любом объеме V , что имеет место при

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho P_m + \frac{\partial p_x}{\partial x} + \frac{\partial p_y}{\partial y} + \frac{\partial p_z}{\partial z}, \quad (9)$$

Уравнение (9) является дифференциальным уравнением гидродинамики (уравнением движения сплошной среды) в напряжениях. В проекциях на оси декартовых координат из уравнения (9) получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} \rho \frac{du_x}{dt} &= \rho P_x + \frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z}, \\ \rho \frac{du_y}{dt} &= \rho P_y + \frac{\partial p_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial z}, \end{aligned} \quad (10)$$



$$\rho \frac{du_z}{dt} = \rho P_z + \frac{\partial p_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial p_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zx}}{\partial z},$$

которая представляет собой скалярную форму уравнения гидродинамики в напряжениях; в уравнениях (10) P_x , P_y и P_z - проекции отнесенной к единице массы силы P_m , а производные, стоящие в левой части уравнений, являются полными.

Дифференциальные уравнения гидродинамики как в векторной, так и в скалярной формах не могут быть непосредственно использованы из-за того, что для определения напряжений необходимы дополнительные соотношения, вид которых зависит от принятой модели среды [6,7,8]. Если среда является изотропной и при ее движении компоненты тензора напряжений представляют собой линейные функции компонент тензора скоростей деформаций, а при покоящейся среде действуют только нормальные напряжения, то среда называется ньютоновской. В дальнейшем всюду предполагается, что среда может считаться ньютоновской. При этом связь между тензором напряжений и тензором скоростей деформаций в декартовой (не главной) системе координат принимается в виде [3]

$$\begin{bmatrix} p_{xx} & p_{xy} & p_{xz} \\ p_{yx} & p_{yy} & p_{yz} \\ p_{zx} & p_{zy} & p_{zz} \end{bmatrix} = (-p + \lambda_1 \cdot \text{div} u) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + 2\mu \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где ε_{ik} - компоненты тензора скоростей деформаций; μ динамическая вязкость среды; λ_1 - составляющая второго коэффициента вязкости или объемной вязкости, определяемой соотношением

$$\mu_v = \lambda_1 + \frac{2}{3}\mu \quad (12)$$

Для компонента тензора напряжений из уравнения (11) можно найти

$$\begin{aligned} P_{xx} &= -p + \lambda_1 \text{div} u + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x}; \\ P_{yy} &= -p + \lambda_1 \text{div} u + 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y}; \\ P_{zz} &= -p + \lambda_1 \text{div} u + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}; \\ p_{xy} &= p_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right); \\ p_{yz} &= p_{zy} = \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right); \\ p_{zx} &= p_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Компоненты p_{ik} при $i \neq k$ являются касательными напряжениями. Эти напряжения с одинаковыми, но расположенными в обратном порядке индексами будут попарно равны, что следует из равенства моментов относительно произвольной оси. Чтобы подчеркнуть их отличие от нормальных напряжений (p_{ik} при $i = k$), введем следующие обозначения $p_{xy} = p_{yx} = \tau_{xy} = \tau_{yx}$; $p_{yz} = p_{zy} = \tau_{yz} = \tau_{zy}$; $p_{zx} = p_{xz} = \tau_{zx} = \tau_{xz}$;

В этих обозначениях касательное напряжение при параллельно-струйном движении вязкой среды в направлении оси x в плоскости $хоу$ определяется соотношением

$$\tau_{yx} = \mu \frac{\partial u_x}{\partial y}, \quad (14)$$

которое выражает закон вязкого трения Ньютона.

Динамическая вязкость μ среды, входящая в уравнения (14), в общем случае зависит от давления p и температуры T

$$\mu = \mu(p, T). \quad (15)$$





Вязкость зависит от рода и состояния среды, С увеличением температуры вязкость жидкостей уменьшается. Приближенное выражение связи между динамической вязкостью жидкости и температурой можно представить в виде

$$\mu_1 = \mu_2 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^k, \quad (16)$$

Где μ_1 и μ_2 - значения динамической вязкости жидкости при температурах T_1 и T_2 . Показатель степени k в формуле (16) зависит от вида жидкости.

У большинства жидкостей вязкость повышается с увеличением давления. Эта зависимость имеет следующий вид

$$\mu = \mu_0 e^{bP},$$

где μ и μ_0 — значения динамической вязкости жидкости соответственно при давлении P и при атмосферном давлении; b -коэффициент, значения которого для поверхностных вод с наносами Республики Узбекистан составляют 0,02—0,03 1/МПа.

В некоторых случаях совместное влияние температуры и давления на вязкость жидкости может взаимно компенсироваться. Например, при установившемся ламинарном движении жидкости в крыльях, отсеках запаней или в каких-либо других каналах, увеличение вязкости из-за большего давления на входе в канал будет скомпенсировано уменьшением вязкости вследствие увеличения температуры жидкости по длине канала.

Выше была отмечена зависимость полной гидродинамической силы от скорости потока V . Если в некоторую точку пространства, через которую непрерывно проходят отдельные частицы жидкой среды, поместить чувствительный безинерционный прибор, измеряющий мгновенные скорости в каждый данный момент времени, то такой прибор зафиксирует некоторые колебания скорости по времени. Это колебание истинной скорости V по времени называется пульсацией скорости. Под скоростью V в данном случае понимается среднее значение истинной скорости.

Выводы.

Мы не рассматриваем здесь зависимость гидродинамической силы от формы и от углов, характеризующих положение плавучей конструкции в потоке, потому что анализ вопроса об гидродинамическом подобии явлений, о выяснении критериев подобия, мы будем проводить, считая, что тела (модель и натура) геометрически подобны и углы, характеризующие их положение в потоке, т. е. углы атаки и скольжения равны.

Геометрические параметры крыла плавучей конструкции формы крыла в плане - прямоугольная. Наиболее часто употребляемые крылья имеют трапециевидную форму в плане. Концы крыльев обычно закруглены (как это было выполнено в модели плавучей конструкции, запроектированной диссертантом для НС КМК).

Литература

- [1]. Glovatsky O., Ergashev R., Gazaryan A., Rashidov J., Kholbutayev B. Improvement of water intake in large machine water lifting systems (on the example of the Karshi main canal) // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2612. – P. 020031. – DOI: 10.1063/5.0113298
- [2]. Ismoilov N., Nasirova N., Kholbutayev B., Khusanbayeva Kh. Technology of water supply to water inlets of pumping stations // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1030. – P. 012156. – DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012156
- [3]. Mirskhoulava Ts. E. Scour in river basin in its bed mechanism forecast // International Symposium on River Mechanism. – Hong Kong, Thailand, 2003.
- [4]. Xujakulov R. Interaction of hydraulic structures and their subsidence bases // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Vol. 2612. – P. 020038. – DOI: 10.1063/5.0113983
- [5]. Хужакулов Р., Турсунов Ф.Ю., Исломов И.М. Эксплуатационная надежность каскадов ирригационных насосных станций // Архитектура, строительство и дизайн. – 2024. – № 2. – С. 233–239.
- [6]. Хужакулов Р., Турсунов Ф.Ю., Исломов И.М. Достижение эффективного управления эксплуатации насосных станций // Земля Узбекистана. – 2025. – № 1. – С. 10–13.

