



## УЛУЧШЕНИЕ РАБОТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ

*В статье показана возможность совершенствования процессов движения жидкостей либо газов за счет выявления структуры потоков методом визуализации. Метод визуализации основан на физическом моделировании оптически-активной жидкостью. Совершенствование геометрии проточных частей обеспечивает снижение сопротивления в 5 раз и более. Высокая степень организации гидравлических потоков может быть основой для создания новой парадигмы "структуры потоков", которую целесообразно использовать при проектировании оборудования и гидравлических систем. Для анализа эффективности гидравлического оборудования предложен коэффициент гидродинамической эффективности, что позволяет разрабатывать системный показатель оптимальности как сочетание КПД гидромашин и эффективности динамических процессов.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* гидроэнергетика, потери энергии, эффективность, сопротивления, структура потоков, турбулентность, визуализация.

**Г**идроэнергетика является важной частью энергетического комплекса. Гидротурбины имеют высокие значения КПД, способны быстро изменять мощность. Однако даже при положительных отличиях от оборудования ТЭС и АЭС эксплуатация гидравлических электростанций нередко имеет существенные проблемы: большие потери энергии вспомогательных систем, вибрацию оборудования и др. Проблемы гидроэнергетики связаны с тем, что процессы движения жидкостей и газов практически недоступны для визуальных исследований. До сих пор гидродинамика основана на парадигме турбулентности, которая ассоциируется как хаос.

**Введение.** Работа гидравлических электростанций связана с движением воды. Основной проблемой гидродинамики являются значительные потери энергии для преодоления гидравлического сопротивления. Кроме значительных потерь энергии сопротивления вызывают пульсации, вибрацию, шум и другие негативные явления. Новые технологии 3-d печатания металлических проточных частей позволяют перейти к сложной, но гидравлически оптимальной геометрии каналов или проточных частей оборудования.

Основной причиной этих проблем является оптическая прозрачность жидкостей, поэтому их структура потока недоступна для изучения. Механика жидкостей до сих пор не имеет законов, описывающих организацию гидродинамической структуры и применимых к проектированию оптимальных проточных каналов [1–3]. Современные представления о движении жидкостей и газов до сих пор основаны на концепции турбулентности. Турбулентность считается сложным движением диссипативных сред и связана с хаосом. Уравнения, описывающие турбулентный поток, используют только усредненные параметры скорости и давления. Визуальная диагностика потоков играет особую роль в определении и анализе динамических параметров оборудования. Визуальные исследования структуры течения, вытекающей в затопленное пространство, известные из литературы, представлены на Рис. 1 [4].

На Рис. 1, а представлено ламинарное движение жидкости, в котором видны линии поперечных

структур, а в пограничном слое дискретно расположенные вихревые образования. На Рис. 1, б показан турбулентный поток, где видны крупномасштабные в продольные спиралеобразные структуры. Визуальная картина турбулентного потока, полученная Рошко в 1976 г. позволила изменить представления о турбулентности из "хаотического движения" на "детерминированный хаос" [4]. В существующих моделях турбулентных потоков размеры зарождающихся структур потока представляются безразмерными параметрами, и они учитываются исходя из размеров пограничного слоя, значение которого трудно измерить. Известные модели турбулентности не дают информации о структуре потока и не подходят для решения технических задач.

**Метод визуальной диагностики структуры потока.** В статье представлен метод визуальной диагностики структуры потока (ВДСП). Этот метод позволяет получить информацию о структуре потока, подходящую для решения прикладных задач (flow structure технология решения задач совершенствования проточных частей гидравлического оборудования — FS-технология). Высокая информативность метода ВДСП связана с использованием оптически активной жидкости (ОАЖ) оксида ванадия (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). При использовании поляризованного света по значениям оптической плотности (интенсивности белого или серого) в каждой точке потока можно выявить гидродинамические напряжения — градиенты скорости или давления. Для выполнения визуальных исследований разрабатываются и изготавливаются специальные физические модели с характерными участками проточных каналов, в которых ОАЖ перемещается с заданными параметрами по числу Рейнольда.

Процесс движения регистрируется как изображение и анализируется. Визуальные картины (изображения) характеризуют поле мгновенных значений градиентов гидродинамических параметров (скорости, давления) исходя из величин оптической плотности (интенсивности белого или серого) в каждой точке потока. То есть при расшифровке поля мгновенных значений скоростей "светлые области" характеризуют положительные градиенты ско-



рости в данной точке, "темные области" — отрицательные градиенты скорости, а полученные изображения позволяют судить о характере изменения величин скорости в каждой точке потока. На Рис. 2 представлены результаты визуальной диагностики структуры течения в затопленном пространстве, выполненные методом ВДСП [5].

Визуальные исследования в физических моделях экспериментально показали, что движение жидкостей и газов имеет устойчивую структуру. Ламинарный режим характеризуется регулярным распределением структуры в поперечном сечении (Рис. 2, а). Структура вдоль потока устойчива, а чередование светлых и темных полос говорит о волновом характере распределения пульсационных компонент скорости. Турбулентный режим характеризуется дискретными (когерентными) оптически однородными структурами и вихревыми областями в продольном разрезе потока (Рис. 2, б). Устойчивый характер структур потока во времени и пространстве позволяет ставить проблему разработки новой модели или парадигмы описания закономерностей движения жидкостей и газов на основе их устойчивой организации или структуры потоков. При проектировании оборудования или гидравлических систем целесообразно выполнять дополнительный этап проектирования, главная цель которого — совершенствование проточных частей и в первую очередь входных или выходных участков оборудования.

**FS-технология проектирования проточных частей.** Методика применения FS-технологии показана на примере разработки оптимальной проточной части поворота потока на 90°. Примеры модернизации иллюстрируются результатами визуализации структуры потоков в характерных сечениях проточных частей оборудования. На Рис. 3, а представлено изображение гидродинамической структуры в повороте потока "колено". Это поворот потока с одинаковыми внутренним и внешним углами, либо радиусами закругления.

Для характеристики оптимальности движения жидкостей либо газов введем понятие — гидродинамическая эффективность процессов движения в проточной части —  $\eta_{гд}$  гидравлического либо аэродинамического оборудования. Для этого воспользуемся известной величиной коэффициента расхода  $\mu$ , который можно рассчитать исходя из величины гидравлического сопротивления  $\zeta$ .

$$\eta_{гд} = \mu = 1 / \sqrt{1 + \zeta} = Q_p / Q_t$$

Таким образом эффективность движения жидкостей и газов в проточных частях  $\eta_{гд}$  можно характеризовать отношением реального расхода  $Q_p$  к теоретически возможному расходу  $Q_t$ . Если все сопро-

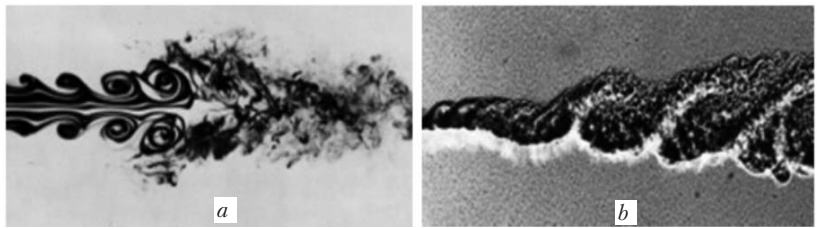


Рис. 1. Визуализация струи в затопленном пространстве  
а — визуализация дымом; б — визуализация spark методом (Рошко 1976 г.)

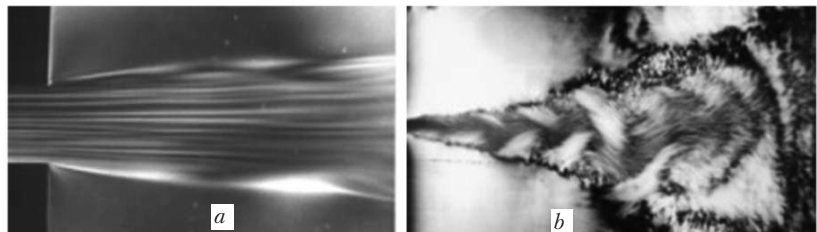


Рис. 2. Визуальная диагностика структуры потока жидкости:  
а — ламинарное движение  $Re \approx 2000$ ; б — турбулентное движение  $Re \approx 15000$

тивления в проточной части равны нулю, тогда  $Q_p = Q_t$ , а предельная гидродинамическая эффективность равна  $\eta_{гд} = 1$ , или КПД процессов движения в про-

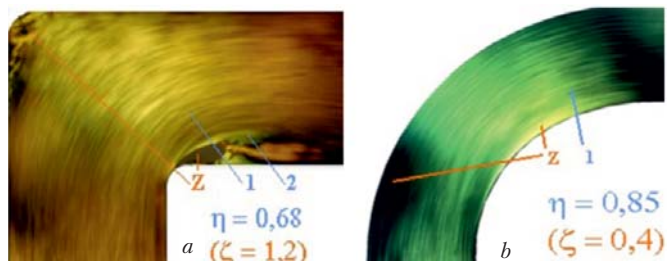


Рис. 3. Структура потока в повороте потока на 90°  
а — поворот потока "колено"; б — поворот потока "отвод"

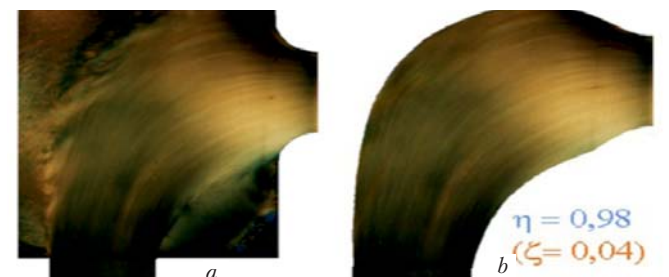


Рис. 4. Разработка оптимального поворота потока на 90°  
а — "моделирующее устройство"; б — "FST-поворот", разработанный на основе выявленной структуры потока.

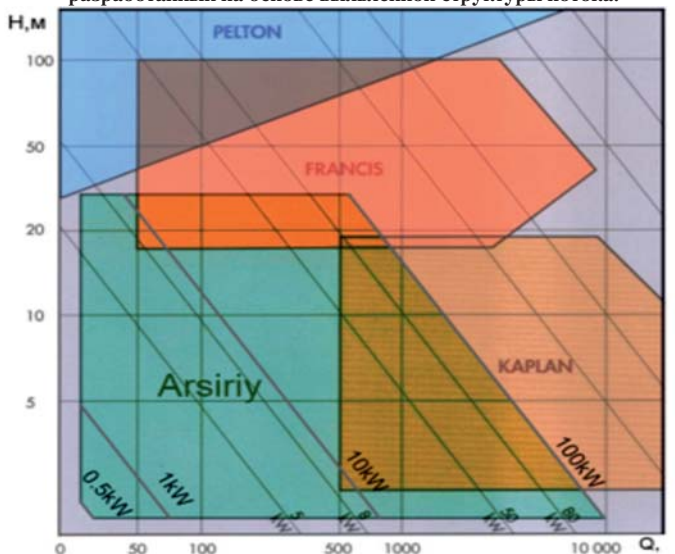


Рис. 5. Диапазон параметров работы гидротурбин.





точной части  $\text{КПД}_{\text{гд}} = 100\%$ . При величине гидравлического сопротивления  $\zeta = 1,2$  эффективность движения жидкостей либо газов в "колене" составляет  $\eta_{\text{гд}} = 0,68$ . Представленные изображения демонстрируют причины столь низкой эффективности. Диссипативные зоны отрыва потока от стенок каналов  $Z$  являются зонами максимальных потерь энергии. Хаотично расположенные поперечные структуры в виде линий тока  $1$  и продольные структуры в виде оптически однородных областей  $2$  препятствуют движению потока и существенно снижают эффективность проточной части поворота.

В сложных гидравлических системах (трубопроводах, входных и выходных элементах насосов, турбин, котлов и т.п.) для повышения их эффективности сегодня используют поворот потока "отвод", построенный радиусами из одного центра (Рис. 3, *b*). Однако в "отводе" также есть зоны потерь энергии  $Z$ , величина его гидравлического сопротивления  $\zeta = 0,4$  и эффективность не превышает  $\eta_{\text{гд}} = 0,85$ .

FST-технология позволяет существенно повысить эффективность движения в повороте. Для этого в специально разработанной "моделирующем устройстве" исследуется структура движения оптически-активной жидкости (Рис. 4, *a*) [6–8]. В модели контурно вырезаются габариты проточной части с обеспечением заданных входных и выходных размеров канала с учетом радиуса поворота потока в затопленном пространстве. Специально увеличенные размеры габаритов проточной части "черного ящика" между начальным и конечным сечениями позволяют жидкости осуществить поворот потока оптимальным образом. Полученное изображение структуры потока в "черном ящике" дает информацию для решения задачи определения оптимальных границ и геометрии поворота потока (Рис. 4, *b*).

В проточной части поворота на  $90^\circ$ , разработанного с учетом организации структуры потока, величина гидравлического сопротивления составляет  $\zeta = 0,04$ , а эффективность движения жидкостей и газов в таком повороте соответственно увеличена до  $\eta_{\text{гд}} = 0,98$ .

**Гидравлическая турбина с оптимальной структурой потока.** Среди известных гидротурбин можно выделить три проверенных временем вида Kaplan, Francis и Pelton. Каждая турбина имеет диапазон оптимальной работы. Указанные турбины имеют высокие значения эффективности [3]. Для прогнозирования и выбора турбин являются два показателями:  $H$  — напор воды перед турбиной,  $Q$  — расход воды через турбину. На основании указанных двух параметров можно ставить вопрос о прогнозировании мощности —  $N$ , которую способна обеспечить выбранная турбина. На Рис. 5 показан диапазон работы указанных типов турбин при использовании их на малых ГЭС.

Анализ оптимальных параметров работы турбин указывает, что при малых напорах  $H < 2$  метров,

не могут работать известные турбины. На графике показаны также параметры работы нового типа гидротурбины, разработанной на основе учета структуры потоков (Арсирий). Новый тип турбины испытан в лабораторных условиях и показал возможность устойчивой работы при малых напорах  $H \geq 0,5$  метра. Для испытаний в реальных условиях эксплуатации предполагается установки турбины на микро-ГЭС для апробации и доводки всех компонентов ГЭС. Новая конструкция турбины в лабораторных условиях показала  $\text{КПД} = 85\%$ . Однако, при изготовлении лабораторного образца еще не в полной мере реализованы предложения по изготовлению оптимальной проточной части рабочего колеса и входных и выходных участков.

После доводки конструкции турбины на микро-ГЭС, разработке характеристик для возможности квалифицированного выбора основного и вспомогательного оборудования ГЭС можно будет перейти к проектированию более крупных ГЭС.

**Эффективность гидравлических процессов и систем.** Совершенствование геометрии проточных частей на основе организации структуры потока обеспечивает снижение сопротивления в 5 раз и более. Поэтому структурная организация гидравлических потоков может быть основой для создания новой парадигмы "структуры потоков", которую целесообразно использовать как дополнительный этап при проектировании гидравлического оборудования и систем [9, 10, 11]. Однако, динамические процессы в проточных частях сегодня характеризуются только величинами сопротивлений, которые не сопоставимы с показателями эффективности трансформации (КПД гидротурбин, насосов, вентиляторов, компрессоров ...). Энергетические процессы можно разделить на два принципиально разных вида. В первую очередь это преобразования "трансформация" разных видов энергии в основном оборудовании энергетических систем (турбины, нагнетатели). Во вторых, это динамические процессы, которые характеризуют движение различных сред: воды, воздуха, электричества ...

Расчет КПД турбин и нагнетателей основан на том, что разработана унифицированная единица измерения [Ватт] для представления мощности  $N$  как интенсивности работы  $A/t$  [Дж/с] для разных видов энергии. Унификация единицы измерения мощности  $N$  позволяет анализировать КПД или эффективность преобразования разных видов энергии в основном оборудовании. При проектировании считается, что показателя КПД основного оборудования достаточно для оптимизации параметров. Так КПД гидротурбин коэффициент трансформации электрической энергии в гидравлическую мощность имеет величину  $\eta_{\text{тр}} = N_{\text{эл}} / N_{\text{гидр}} = 0,9$ . При этом эффективность преобразования энергии должно быть в рамках 100% или  $\eta_{\text{тр}} < 1$ . Однако, КПД турбины характеризует эффективность преобразования гид-



равлической энергии в электрическую только в самой турбине, а не в гидравлической системе в целом. Необходимо обратить внимание на то, что расчет показателя мощности также унифицирован – для разных видов энергии: гидравлической, механической, электрической, мощность вычисляется как произведение двух составляющих  $N = \Pi \times D$ : потенциала  $\Pi$  и динамической составляющей  $D$ . Для реализации возможности кардинального снижения удельных затрат энергии за счет совершенствования структуры потоков предлагается добавить к существующей оптимизации по КПД основного оборудования методы анализа эффективности динамических процессов. Коэффициент гидродинамической эффективности  $\eta_{гд}$  может характеризовать качество реализации динамических процессов как отношение динамической составляющей к исходному потенциалу  $\eta_{гд} = D/\Pi = 1/(1 + R)$ . В реальных гидравлических системах ГЭС этот показатель не превышает  $\eta_{гд} = 0,5$ . Предложенный показатель гидродинамической эффективности  $\eta_{гд}$  сопоставим с показателем эффективности трансформации энергии  $\eta_{тр}$ , поэтому можно предложить системный показатель гидравлической эффективности технологических процессов  $\eta_{сист}$ .

Из-за того, что динамические процессы имеют низкую эффективность показатель эффективности технологических процессов, имеет существенный резерв увеличения. Для повышения эффективности оборудования и технологических процессов мы предлагаем дополнительный этап проектирования гидравлических систем – совершенствование проточных частей с выполнением системного анализа эффективности. Геометрия каналов или проточных частей должна формировать такую структуру потоков, которая обеспечит: высокое качество процессов; снижение затрат энергии; устранил причины шума, вибрации ...

**Выводы.** Эксплуатация энергетического оборудования имеет ряд серьезных проблем. Большинство из этих проблем прямо или косвенно связаны с сложной, а иногда и примитивной геометрией частей. Основной причиной этих проблем является оптическая прозрачность жидкостей и газов, поэтому их структура потока недоступна для изучения. Поэтому современное оборудование имеет низкую эффективность из-за значительных потерь энергии для преодоления гидравлического сопротивления.

Метод визуальной диагностики структуры потока позволил обнаружить неизвестную информацию о законах движения жидкостей и газов. Новая модель "структуры потока" заменяет старую модель "турбулентности", где хаос и "усредненные парамет-

Энергия $E \Rightarrow$ Работа $A$ [Джс] $\Rightarrow$ Мощность $N = A/t$ [Вт] = [Джс/с]	
Трансформация энергии	Динамические процессы
Мощность $N = P \times D$ [Вт]	$D < P$
$N_{эл} = U \times I$ [Вт]	$I = U/R = \eta_{эд} U$ $\eta_{эд} = I/R = I/U$
$N_{гидр} = Hg \times Q$ [Вт]	$QV? \eta_{эд} 2gHS = 2gHS/(1+R)$
$\eta_{мп} = N_{гидр}/N_{эл} = 0,85$	$\eta_{эд} = I/(1+R) = QV/2gHS = 0,5$
$\eta_{сист} = \eta_{мп} \times \eta_{эд} = 0,9 \times 0,5 = 0,45$	

ры" являются препятствием для решения проблем. Используя визуально выявленные законы организации структуры потока, улучшая проточные части, мы можем разработать новое или улучшить существующее оборудование с возможностью достижения нового уровня эффективности, улучшить акустические, вибрационные и других характеристики.

Для реализации проектов совершенствование оборудования разработаны новые показатели эффективности оборудования и систем, которые позволят стимулировать повышение эффективности оборудования и процессов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Brian J. Cantwell. Organised motion in turbulent flow – Ann. Rev. Fluid Mech. – 1981. – v. 13. – P. 457 –515.
2. Idelchik I.E., Shteynberg M.O. Handbook of hydraulic resistance. Engineering. – 672 s.
3. Справочник конструктора гидротурбин // под редакцией Ковалева Н.Н. Машиностроение. – 304 с.
4. Van Dyke An album of fluid motion. – Stanford, California: The Parabolic Press.
5. Arsiry V.A. Improvement of main and auxiliary equipment of heat and nucleus energy on the base of the diagnostics of the streams. The dissertation of Doctor of the Technique science. Odessa National Polytechnic University, Odessa 2004 [www.disslib.org/sovershenstvovanye-oborudovanyja-teplovykh-y-jadernykh.html](http://www.disslib.org/sovershenstvovanye-oborudovanyja-teplovykh-y-jadernykh.html)
6. PST 5.812.423 USA Method of determining for working media motion and designing flow structures for same // Maisotsenko V. S., Arsiry V. A. Publ. 22.09.1998.
7. PST 5.838.587 USA Method of restricted space formation for working media motion. // Maisotsenko V. S., Arsiry V. A. Publ. 07117.1998.
8. Trzeciak W., Zozulinski S. DA-253 One-Stage Radiaj Blowers – Design and Work Characteristics. Pabl Lodz Polytechnick., 1995, P. 341 – 348.
9. Арсирій В.А. Арсирій О.О. Смирнова В.О. Повышение производительности котлов за счет снятия ограничений мощности по тяге и дутью//Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування.
10. Бутенко А.Г., Смык С.Ю. Підвищення коефіцієнта корисної дії центрального ежектора за неоптимальних режимів роботи. "Науковий вісник Національного гірничого університету". – Дніпропетровськ, 2015. – № 2. – С. 57–61.
11. Mazurenko A.S., Arsiry V.A. (2005) Improving the efficiency of turbine installations by improving the flow parts of pipes // Bulletin NTU "ChPI".

© Арсирій В.А., Ковальчук Ю.Г., Григоров І. В., 2018