

УДК 621.224

**К. А. МИРОНОВ, Ю. Ю. ОЛЕКСЕНКО****ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТИПА ВЫСОКОНАПОРНОЙ ГИДРОТУРБИНЫ ПРИ ЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

Беручи до уваги значне накладення робочих діапазонів радіально-осьових і ковшових гідротурбін (200-800 м), для конкретних проєктів, потребується проведення комплексної оцінки обґрунтування вибору типу високонапірної гідротурбіни. У даній статті описані відносні переваги агрегатів кожного типу для різних умов і робочих режимів. Крім гідравлічних параметрів, економічного обґрунтування і довговічності роботи наводиться чутливість гідротурбін до піщаної ерозії.

**Ключові слова:** ККД, ГЕС, гідротурбіна, радіально-осьова турбіна, ковшова турбіна, робоче колесо, напір.

Принимая во внимание значительное наложение рабочих диапазонов радиально-осевых и ковшовых гидротурбин (200–800 м), для конкретных проектов, требуется проведение комплексной оценки обоснования выбора типа высоконапорной гидротурбины. В данной статье описаны относительные преимущества агрегатов каждого типа для различных условий и рабочих режимов. Помимо гидравлических параметров, экономического обоснования и долговечности работы приводится чувствительность гидротурбин к песчаной эрозии.

**Ключевые слова:** КПД, ГЭС, гидротурбина, радиально-осевая турбина, ковшова турбина, рабочее колесо, напор.

Considered the comparison of energy performance and economic feasibility of high-head Francis and Pelton hydroturbine. Having regard to considerable imposition of working ranges of Francis and Pelton hydroturbines (200-800 m.), for concrete projects, realization of complex estimation of ground of type selection of high-head hydroturbine is required. In this article, comparative advantages of aggregates of every type are described for different terms and operating conditions. In addition to the hydraulic parameters, economic feasibility and durability of hydraulic turbines is sensitive to abrasion wear (sand erosion). It is proposed to extend the life with normal operation of runners used modern coatings by the spraying method.

**Keywords:** efficiency, HPP, hydroturbine, Francis turbine, Pelton turbine, runners, head.

**Введение.** В диапазоне напоров от 200-т до 800-т метров могут использоваться, как активные, так реактивные гидротурбины (ГТ) [1–3]. ГТ, преобразующие гидравлическую энергию в механическую в основном за счет потенциальной энергии потока, относятся к классу реактивных (напорноструйных). В данных ГТ давление воды в потоке на входе в рабочее колесо (РК) больше, чем на выходе из него. ГТ, преобразующие гидравлическую энергию в механическую за счет кинетической энергии потока, относятся к классу активных (свободноструйных). В этих ГТ давление в потоке на входе и выходе из РК одинаково и равно, как правило, атмосферному давлению. В данной статье будут рассматриваться активные – ковшовые (К) и реактивные – радиально-осевые (РО) ГТ [4]. На рис. 1 и рис. 2 приведены компоновки агрегатов К и РО ГТ. В табл. 1 приведены несколько типов высоконапорных ГЭС с К и РО ГТ.

Помимо гидравлических параметров, экономического обоснования и долговечности работы, на выбор во многом влияют такие факторы, как, например, чувствительность к песчаной эрозии.

За последние 30 лет произошел большой скачок в развитии технологий изготовлений как РО, так и К ГТ, и поэтому выбор типа высоконапорной ГТ необходимо проводить с учетом современных условий.

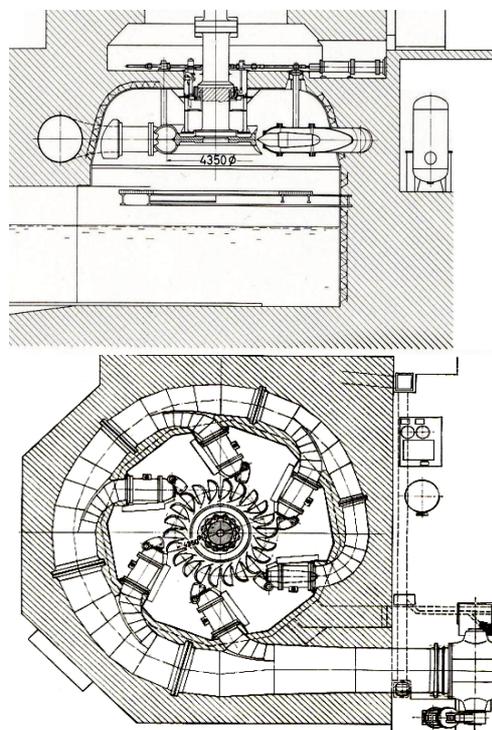


Рис. 1 – Компоновка агрегата К ГТ

Таблица 1 – Примеры различных ГЭС с РО и К ГТ

ГЭС	Тип турбины	Напор (м)	Мощность (МВт)	Частота вращения
Uri	РО	222,5	1220	333
Kalinadi	РО	347	135	375
Nathpa Jhakri	РО	433	250	300
Qiaoci	РО	550	82,1	600
Karahanjukar	РО	600	133,6	600
Мак Вэлли	К	203	31,5	240
Сан-Агагон	К	383	174,3	225
Aliyar	К	411,48	60	333
Dafa	К	514	123	300
Jinwo	К	620	143,6	375

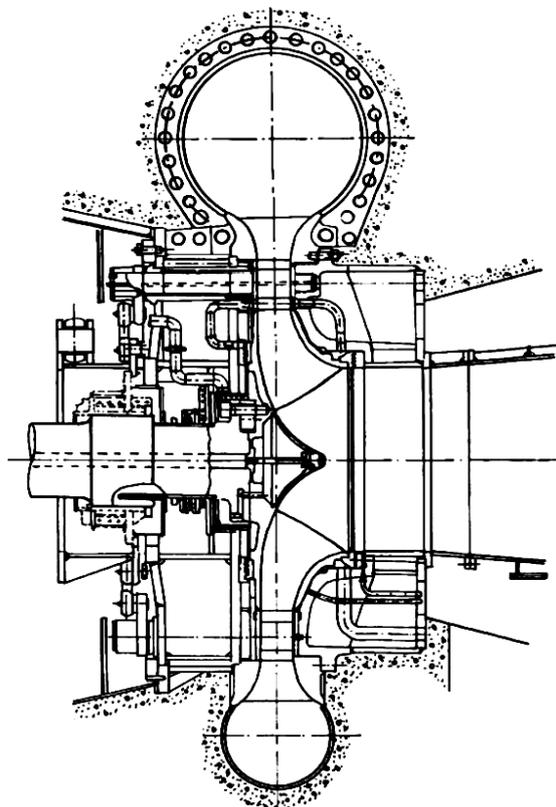


Рис. 2 – Компоновка агрегата РО ГТ

**РО ГТ.** Современные конструкции целиком основываются на усовершенствованном численном моделировании, с применением пакетов прикладных программ вычислительной гидродинамики (CFD), а также с помощью структурного анализа (FEM), как в статике, так и в динамике [5].

Вибрации при неполной нагрузке, кавитация и затрудненный доступ к покрытиям РК в отношении агрегатов с высоконапорными РО ГТ, в результате применения современных методов проектирования, уже не так актуальны.

**К ГТ.** Их конструкции все больше основываются на численном моделировании, но основной технологический скачок произошел после перехода от литых РК к кованным и, частично, сварным [6]. При современных технологиях изготовления РК для многослоповых К ГТ высокий риск образования трещин вследствие дефектов литья отсутствует, т. к. литье в последнее время не используется.

За прошедшие 15 лет существенно возросло понимание явления песчаной эрозии и применения современных покрытий для борьбы с ней [7]. Существенный скачок произошел после перехода от плазменного напыления керамики на основе оксидов к высокоскоростному газопламенному покрытию (HVOF) металлокерамикой на карбидной основе [8].

В табл. 2. приведено сравнение РО и К ГТ по разным критериям.

Таблица 2 – Критерии сравнения РО и К ГТ

Критерии сравнения	РО	К
1) Энергетические характеристики	Высокий максимальный КПД (примерно на 3 % выше, чем у К ГТ)	Довольно пологая кривая КПД, высокий КПД при частичной нагрузке
2) Первоначальные капиталовложения	Расходы на турбину (см. рис. 4); расходы на генератор меньше; машзал: меньше, но подземный; напорный трубопровод: более высокое максимальное давление	Преимущество для агрегатов небольших размеров и большого напора; машзал: больше, но возможен надземный вариант; аварийные ситуации: дефлекторный режим уменьшает гидравлический удар
3) Проблемы при эксплуатации	Высокий уровень вибрации и кавитации при частичной нагрузке (в допустимых пределах для современных конструкций); аэрация отсасывающей трубы; изменяемое осевое давление	Серьезных проблем нет; аэрация камеры; осевое давление отсутствует
4) Чувствительность к абразивному износу	Многие детали подвержены абразивному износу; сложно наносить покрытие на РК; длительный простой для ремонта; существенное падение КПД	Абразивному износу подвержены только некоторые части; легкий доступ для нанесения покрытия; кратковременный простой для ремонта; небольшое падение КПД
5) Срок службы	Относительно высокий, особенно в случае отсутствия песчаной эрозии	Высокий, благодаря применению технологии кованных РК и использованию современных покрытий

**1. Энергетические характеристики.** На рис. 3 показано сравнение КПД при постоянном напоре для РО и К ГТ:

– РО ГТ имеют преимущество при небольших изменениях расхода, больших водохранилищах, работе в пиковом режиме и в случаях, когда в машзале работает много агрегатов;

– агрегаты, снабженные К ГТ, имеют преимущество при существенных изменениях

расхода, небольших водохранилищах (русловые ГЭС) и в случаях, когда в машзале установлено небольшое количество агрегатов.

Кроме того, следует отметить, что потери напора в К ГТ выше, чем в РО. Для К ГТ теряется промежуток между осевой линией РК и уровнем нижнего бьефа ( $\approx 2,5$  м), а для РО ГТ теряется только кинетическая энергия на выходе отсасывающей трубы ( $\approx 0,5$  м). Разница в напоре ( $\approx 2$  м) составляет уже

разницу суммарного КПД станции в 1 % при напоре 200 м.

В среднем КПД у РО ГТ более чем на 3 % выше, чем у К ГТ, даже в отношении средневзвешенного КПД [3].

Некоторые ГЭС большую часть времени работают с очень маленькой нагрузкой, но обладают

способностью быстро и на большую величину повышать свою мощность (добавляя энергию в неустойчивую энергосистему). В таких случаях высокие показатели КПД агрегатов, снабженных К ГТ, при частичных нагрузках могут дать большую экономию.

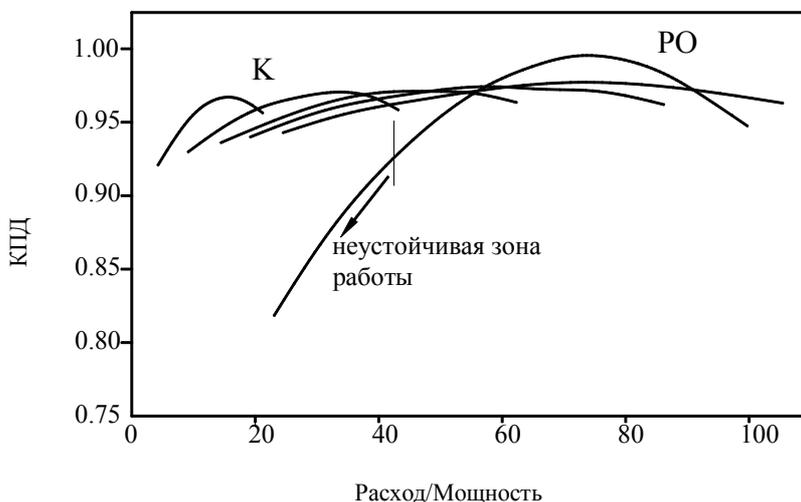


Рис. 3 – Сравнение КПД при постоянном напоре

## 2. Первоначальные капиталовложения.

Обычно при определении гидравлической компоновки ГТ акцент делается на КПД и затраты, что, естественно, приводит к повышению частоты вращения и уменьшению диаметра РК.

Затраты на строительство ГТ зависят от конкретной конструкции и принципов изготовления / выбора поставщиков.

На рис. 4 представлена оценка относительных затрат для РО и К ГТ:

– граница между предпочтительными диапазонами РО и К ГТ увеличивается с напором и мощностью;

– для напоров около 500 м РО ГТ выходят дешевле для больших агрегатов, тогда как К ГТ выходят дешевле для меньших агрегатов.

Расходы на генератор, как правило, меньше для РО ГТ, так как типичное соотношение  $n_{РО}/n_{К}$  (частота вращения РО ГТ / частота вращения К ГТ) равно, примерно, двум. Однако, преимущества РО ГТ сходят на нет при очень низкой удельной частоте вращения.

Разгонная скорость при использовании агрегата с К ГТ находится в пределах нормального диапазона, но она довольно сильно повышается при использовании РО ГТ.

Машзалы для РО ГТ значительно меньше, чем для агрегатов с К ГТ, но они должны строиться под землей со значительным заглублением ниже уровня воды нижнего бьефа. Агрегаты с К ГТ требуют машзала больших размеров, но они выполняются в наземном исполнении.

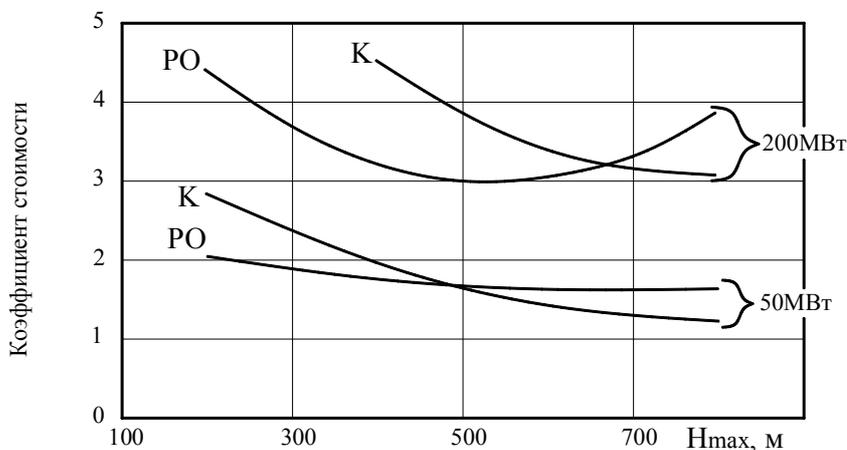


Рис. 4 – Сравнение относительных расходов на РО и К ГТ

Для сброса нагрузки агрегаты с К ГТ имеют существенное преимущество, которое заключается в том, что поток можно отвести от РК с помощью отражательных заслонок, что позволяет иглам медленно закрываться с постепенным увеличением давления в напорном трубопроводе. Для высоконапорных РО ГТ время закрытия направляющих лопаток и разгонные характеристики обычно бывают такими, что происходит довольно быстрое повышение давления в напорном трубопроводе, и иногда по причинам безопасности требуется даже установка предохранительного клапана.

В качестве общей примерной оценки можно сделать заключение, что РО ГТ обеспечивает меньшие первоначальные инвестиционные затраты в сравнении с К ГТ, за исключением случаев с небольшими агрегатами, работающими в диапазоне более высоких напоров [3].

**3. Проблемы при эксплуатации.** При очень низких нагрузках агрегаты с К ГТ работают более гладко и бесперебойно по сравнению с РО ГТ.

Для улучшения плавности и бесперебойности работы агрегатов с РО ГТ довольно часто предусматривается аэрация в отсасывающей трубе, в большинстве случаев, с самовсасыванием, а иногда – с компрессорами.

Агрегатам с многосопловыми К ГТ также требуется соответствующим образом спроектированная система самовентиляции корпуса, чтобы обеспечить достаточный зазор между РК и уровнем нижнего бьефа.

Агрегаты с К ГТ испытывают, как правило, небольшую кавитацию или не сталкиваются с ней вообще в диапазоне напоров ниже 800 м. Однако даже небольшая кавитация уже пагубна для твердого покрытия лопастей. Следовательно, как в конструкции РО, так и К ГТ, обязательно надо предусмотреть средства предотвращения комбинированного воздействия кавитации и песчаной эрозии.

Для агрегатов с РО ГТ осевое усилие варьируется в рабочем диапазоне и требует тщательного размещения средств уменьшения этих усилий. В К ГТ таких проблем нет.

**4. Чувствительность к абразивному износу (песчаной эрозии).** В агрегатах с РО ГТ от абразивного износа в воде с высоким содержанием солей страдают следующие узлы: направляющие лопатки, торцевые кольца, крышка турбины, нижние кольца, неподвижные и подвижные кольца лабиринтовых уплотнений, лопасти РК, ободья и ступицы РК.

На ремонт этих частей затрачиваются огромные усилия, включая довольно продолжительное время простоя, необходимое для демонтажа и повторной сборки. Имеется возможность нанесения твердого покрытия на все детали, кроме небольших центральных элементов РК.

В агрегатах с К ГТ абразивный износ обычно имеет место на сопловых кольцах, иглах и лопастях РК. Все эти элементы могут быть легко

демонтированы, отремонтированы и повторно собраны, и они доступны для нанесения покрытий.

Что касается снижения КПД из-за абразивного износа, то РО ГТ очень чувствительны к зазорам в лабиринтовых уплотнениях и между направляющими лопатками и кольцами.

В К ГТ потери КПД, вызванные абразивным износом, остаются небольшими пока поверхности будут шероховатыми, и пока сохраняется целостность конструкции сопел и лопастей. Современные покрытия могут продлить срок службы РК К ГТ между двумя капитальными ремонтами обычно в три и более раза [6].

**5. Срок службы.** Исходя из вышесказанного, становится очевидным, что расходы на РО ГТ в течение срока их службы выше расходов на К ГТ при использовании воды, насыщенной кремнием или солью. Довод прошедшей эпохи цельнолитых заготовок о том, что срок службы К ГТ относительно невелик в результате усталости, вызванной большим количеством циклов нагрузки в агрегатах с многосопловыми К ГТ, больше не соответствует действительности. С помощью современных технологий кованных дисков риск появления трещин, вызванных дефектами литья, устраняется, и срок службы К ГТ может быть таким же продолжительным, как и срок службы РО ГТ [7, 8].

**Выводы.** 1. Проведено сравнение высоконапорных РО и К ГТ.

2. Для случаев с чистой водой и больших водохранилищ решение с РО ГТ обычно представляется более экономически выгодным из-за низких первоначальных затрат и более высокого максимального КПД. В случае высокого содержания кремния или соли концепция К ГТ имеет явное преимущество в отношении затрат на весь срок службы. Эксплуатационная гибкость в сочетании с высоким КПД при частичных нагрузках и смягченным гидравлическим ударом при сбросе нагрузки и разгоне являются дополнительными преимуществами К ГТ.

3. Для концепции РО ГТ проблемой станет проектирование РК и оборудования для нанесения покрытий из условия, чтобы полностью собранное РК можно было покрыть напылением HVOF (технология высокоскоростного напыления) или эквивалентными высококачественными покрытиями.

#### Список литературы

1. Bissel C. Key issues for development of Pelton projects, illustration based on new and refurbishment projects in India / C. Bissel, K. Winkler, H. P. Hauser [et al.]. – Malaysia, Kuching : ASIA, 2010.
2. Миронов К. А. Выбор типа гидротурбины при проектировании высоконапорной ГЭС / К. А. Миронов, Л. К. Яковлева, А. А. Гулахмадов // Промислова гідраліка і пневматика. – № 1 (43). – Вінниця : ВНАУ, 2014. – С. 51–54.
3. Keck H. High head Francis units, compared with multi-jet Pelton units, based on recent technologies / H. Keck, M. Sallaberger, A. Heimann [et al.]. – ASIA 2008, Danang, Vietnam and Hydropower&Dams, Issue 1. – 2009.
4. Барлут В. В. Гидравлические турбины / В. В. Барлут. – Киев : Вища школа, 1977. – 360 с.

5. Keck H. Recent developments in the dynamic analysis of water turbines / H. Keck, W. Michler, Th. Weiss [et al.] // IAHR working group meeting. – Timisoara, Romania, 2007.
6. Schneebeli F. New Technology (MicroCast™) earns Acceptance / F. Schneebeli, E. Baltis, H. Keck // Sulzer Technical Review. – 1996. – № 1.
7. Krause M. Abrasion research and prevention / M. Krause, H. Grein // Sulzer Technical Review. – 1993. – № 2.
8. Keck H. Sediment Erosion in Hydraulic Turbines and Experiences with Advanced Coating Technologies / H. Keck, R. Dekumbis, M. Sick [et al.]. – New Delhi : India Hydro, 2005.
5. Keck H., et al. "High head Francis units, compared with multi-jet Pelton units, based on recent technologies." *Hydropower&Dams*. Issue 1. Vietnam, Danang: ASIA, 2009. Print.
4. Barlit, V. V. *Gidravlicheskie turbiny*. Kiev: Vishcha shkola, 1977. Print.
5. Keck H., et al. "Recent developments in the dynamic analysis of water turbines." *IAHR working group meeting*. Romania, Timisoara, 2007. Print.
6. Schneebeli, F., E. Baltis, and H. Keck. "New Technology (MicroCast™) earns Acceptance." *Sulzer Technical Review*. No. 1. 1996. Print.
7. Krause, M., and H. Grein. "Abrasion research and prevention." *Sulzer Technical Review*. No. 2. 1993. Print.
8. Keck, H., et al. "Sediment Erosion in Hydraulic Turbines and Experiences with Advanced Coating Technologies." New Delhi: India Hydro, 2005. Print.

## References (transliterated)

1. Bissel, C., et al. "Key issues for development of Pelton projects, illustration based on new and refurbishment projects in India." Malaysia, Kuching: ASIA, 2010. Print.
2. Mironov, K. A., L. K. Yakovleva, and A. A. Gulahmadov. "Vybor tipa gidroturbiny pri proektirovanii vysokonapornoy GES."

Поступила (received) 24.11.2016

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Обоснование выбора типа высоконапорной гидротурбины при ее проектировании / К. А. Миронов, Ю. Ю. Олексенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідралічні машини та гідроагрегати. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 41 (1213). – С. 79–83. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2411-3441.

**Обоснование выбора типа высоконапорной гидротурбины при ее проектировании / К. А. Миронов, Ю. Ю. Олексенко** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Гідралічні машини та гідроагрегати. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 41 (1213). – С. 79–83. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2411-3441.

**Justification of type selection of high-head hydroturbine at its design / K. A. Mironov, Yu. Yu. Oleksenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Hydraulic machinery and hydrounits. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 41 (1213). – P. 79–83. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2411-3441.

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Миронов Костянтин Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідралічні машини»; тел.: (068) 828-58-86; e-mail: cosmir@i.ua.

**Миронов Константин Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Гидравлические машины»; тел.: (068) 828-58-86; e-mail: cosmir@i.ua.

**Mironov Konstantin Anatolievich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Hydraulic Machines"; тел.: (068) 828-58-86; e-mail: cosmir@i.ua.

**Олексенко Юлія Юрївна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри «Гідралічні машини»; тел.: (063) 242-77-05; e-mail: yuliayo@ukr.net.

**Олексенко Юлия Юрьевна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры «Гидравлические машины»; тел.: (063) 242-77-05; e-mail: yuliayo@ukr.net.

**Oleksenko Yuliia Yurivna** – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Postgraduate Student at the Department of "Hydraulic Machines"; тел.: (063) 242-77-05; e-mail: yuliayo@ukr.net.