

Тема работы:

Развитие методики оптимизационного проектирования формы проточного тракта гидравлических турбин с расширенным набором целевых функционалов и геометрических параметров.

Состав коллектива:

Лютов Алексей Евгеньевич, аспирант ММФ НГУ

Чирков Денис Владимирович, к.ф.-м.н., с.н.с. ИВТ СО РАН

Черный Сергей Григорьевич, д.ф.-м.н., директор ИВТ СО РАН

Крюков Артем Евгеньевич, аспирант ММФ НГУ

Информация о гранте:

Грант Президиума РАН «Технология оптимизационного проектирования форм проточных трактов турбомашин на основе методов математического моделирования пространственных течений жидкости в них» (№ 0316-2015-0001), 2014-2017 гг.

Научное содержание работы:

1. Постановка задачи

Целью работы являлось развитие методики автоматического проектирования и оптимизации формы проточного тракта гидравлических турбин для расширения зоны эффективной и устойчивой работы, повышения прочности и снижения металлоемкости конструкции за счет одновременной вариации формы рабочего колеса и отсасывающей трубы, а также функции распределения толщины лопасти.

2. Современное состояние проблемы

Современные практические подходы к оптимизации гидротурбин основываются на моделировании течения с помощью усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для множества различных модификаций формы проточного тракта, определяемых 20-30 варьируемыми геометрическими параметрами, с использованием эволюционных алгоритмов для поиска оптимальной геометрии. Обычная цель оптимизации – это увеличение эффективности (КПД) работы турбины в одном или нескольких режимах работы [1-4].

Как правило, оптимизируется геометрия одного рабочего колеса, так как его форма оказывает наибольшее влияние на картину течения и КПД всей установки. В последнее время предпринимаются попытки оптимизации формы отсасывающей трубы (ОТ) [5,6]. Однако, в этих работах оптимизация проводится для одной отсасывающей трубы с фиксированным рабочим колесом. В настоящей работе предлагается проводить совместную оптимизацию РК и ОТ, что позволит полноценно учесть их взаимодействие и получить варианты, недоступные при оптимизации одного РК или одной ОТ.

Обеспечение высокого запаса прочности и снижение веса рабочего колеса являются дополнительным требованием при проектировании гидротурбины. Однако, как правило, эти критерии не учитываются при автоматической оптимизации. Исключение составляют работы [7,8], где использовались упрощенные подходы для оценки прочности РК. Прочностные характеристики и вес РК решающим образом зависят от распределения

толщины лопасти. Поэтому для эффективного управления этими целевыми функционалами необходимо варьировать толщину лопасти.

- [1] Черный С.Г., Чирков Д.В., Лапин В.Н., Скороспелов В.А., Шаров С.В. Численное моделирование течений в турбомашинах. Новосибирск: Наука, 2006.
- [2] Kurosawa S., Nakamura K., 2009, “Design Optimization of a High Specific Speed Francis Turbine Using Multi-Objective Genetic Algorithm,” International Journal of Fluid Machinery and Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 102-109.
- [3] Flores E., Bornard L., Tomas L., Liu J. and Couston M., 2012, “Design of large Francis turbine using optimal methods,” Proceedings of 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems.
- [4] Enomoto Y., Kurosawa S. and Kawajiri H., 2012, “Design optimization of a high specific speed Francis turbine runner,” Proceedings of 26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems.
- [5] Marjavaara B., Lundström T., 2007, “Hydraulic Turbine Diffuser Shape Optimization by Multiple Surrogate Model Approximations of Pareto Fronts,” ASME J. Fluids Eng., 129(9), Vol. 129, pp. 1228-1240.
- [6] McNabb J., Devals C., Kyriacou S. A., Murry N., Mullins B. F., 2014, “Design Optimization of a High Specific Speed Francis Turbine Using Multi-Objective Genetic Algorithm,” International Association of Hydro-Environment Engineering and Research.
- [7] Mazzouji F, Couston M, Ferrando L, Garsia F and Debeissat F. Multicriteria optimization viscous fluid analysis – mechanical analysis. In: Proceedings of 22nd IAHR Symposium on hydraulic machinery and systems, Stockholm. 2004.
- [8] Bannikov DV, Yesipov DV, Cherny SG, Chirkov DV. Optimization design of hydroturbine rotors according to the efficiency-strength criteria. Thermophysics and Aeromechanics 17(4) 2010 pp. 613–620.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Решаемая задача оптимизационного проектирования проточного тракта гидротурбин связана с расчетом трехмерных полей течения в гидротурбине для множества вариантов геометрий. При решении задачи используется генетический алгоритм, который может быть эффективно распараллелен и также требует использования большого объема вычислительных ресурсов. Схема процесса оптимизации изображена на рис. 1.

Для успешной оптимизации формы проточного тракта важно разработать эффективную параметризацию поверхностей, с одной стороны содержащую небольшое число варьируемых параметров, с другой стороны, достаточно гибкую, чтобы обеспечить большое число допустимых форм проточного тракта. С этой целью были исследованы основные источники потерь энергии, возникающие в трубе. На основе исследования была построена параметризация ОТ, позволяющая эффективно влиять на эти потери, рис. 2. Форма ОТ задается 9 геометрическими параметрами.

В ходе оптимизации для каждого перебираемого варианта геометрии проточного тракта проводится расчет трехмерного течения в турбине в рамках уравнений Навье-

Стокса несжимаемой жидкости, осреднённых по Рейнольдсу и замкнутых стандартной $k-\epsilon$ моделью турбулентности. Уравнения решаются численно с использованием разработанного в ИВТ СО РАН программного комплекса CADRUN.

Расчёты трёхмерного поля течения в проточном тракте гидротурбины проводились в циклической постановке. В этом случае расчетная область включает один канал направляющего аппарата, один вращающийся межлопастной канал РК, и всю ОТ, рис. 3. Как правило, гидродинамические расчеты проводились для двух режимов работы гидротурбины.

Для успешного решения задачи оптимизации формы рабочего колеса по критериям КПД, прочность и металлоемкость, разработана параметризация толщины лопасти по 6 параметрам, рис. 6. Для определения прочностных характеристик РК решались уравнения упругости для одного сектора РК, содержащего одну лопасть, сектор ступицы и сектор обода, рис. 8. На лопасть, обод и ступицу действует давление, полученное в гидродинамическом расчете. Уравнения упругости решались с использованием метода конечных элементов из пакета ANSYS, установленного на кластере НГУ. В качестве прочностного целевого функционала, подлежащего минимизации, бралась величина максимальных эквивалентных напряжений на поверхности лопасти.

Для решения задачи многоцелевой оптимизации использовался генетический алгоритм MOGA. Алгоритм допускает параллельный расчет различных вариантов геометрии в пределах одного поколения. Распараллеливание осуществлялось с использованием технологии MPI. В типичных расчетах использовалось от 96 до 120 процессорных ядер.

4. Полученные результаты

Для демонстрации преимуществ одновременной оптимизации РК и ОТ проведена серия оптимизационных расчётов реальной гидротурбины, направленных на повышение КПД в широком диапазоне режимов, в которых варьировалось одно колесо, одна труба и одновременно колесо и труба. Фронты Парето проведенных оптимизаций, а так же геометрии G1 и G2, отобранные для последующего анализа, изображены на рис. 4. Видно, что при одновременной оптимизации (вариант G2) удаётся достичь в среднем на 0.3% более высокого КПД, чем при вариации одного колеса.

По результатам оптимизации для геометрий G1 и G2 сделан всесторонний анализ спроектированных проточных частей и течений в них как на уровне интегральных, так и локальных характеристик. Показаны преимущества проточных частей, спроектированных при одновременной вариации РК и ОТ. На рис. 5 показано сравнение исходной и оптимальной (G2) отсасывающих труб. Рис. 6 показывает зависимость КПД от расхода для исходного варианта РК, вариантов G1 и G2.

Преимущество разработанного подхода к оптимизации проточных частей гидротурбин заключается в учёте взаимного влияния формы колеса и трубы. На практике это означает возможность в процессе оптимизации подбирать для каждого колеса оптимальную форму трубы и наоборот. При этом автоматически решается задача выполнимости течения на различных режимах.

Методика оптимизации по критериям КПД, прочность и металлоемкость протестированы на задаче оптимизации одного из вариантов рабочего колеса для Красноярской ГЭС. Целевые функционалы: КПД на режиме неполной нагрузки (режим 1), КПД на режиме максимальной мощности (режим 2), величина максимальных напряжений

на лопасти (или единый целевой функционал прочность-металлоемкость) в режиме 2. Кроме этого ставилось ограничение на площадь кавитации на тыльной стороне лопасти в режиме 2. Для нахождения фронта Парето алгоритмом MOGA потребовалось рассчитать 60 поколений, содержащих по 120 вариантов геометрии в каждом. Один оптимизационный расчет занимает около 5 суток на вычислительном кластере НГУ.

В ходе расчетов выяснено, что добавление вариации толщины позволяет существенно поднять КПД и уменьшить максимальные напряжения. Однако, если не контролировать металлоемкость, это достигается за счет увеличения толщины, а следовательно, массы лопасти. В случае же использования составного целевого функционала (сумма относительных максимальных напряжений и относительного объема лопасти) практически такие же значения КПД и максимальных напряжений можно обеспечить при существенно меньшей металлоемкости. Снижение металлоемкости происходит в основном за счет уменьшения толщины в срединном сечении.

На рис. 9 показаны результаты одного из оптимизационных расчетов. На рисунке символами изображена проекция множества Парето на плоскость $\eta_1 - \eta_2$, где η_1 – КПД в 1-м режиме работы, η_2 – КПД во 2-м режиме работы. Символы раскрашены в цвет относительного максимального напряжения. Также на рис. 4 показаны изолинии напряжений для начального РК и варианта G60_i093, полученного в ходе оптимизации, а также сравнение распределения толщины для этих вариантов. Видно, что найдены такие формы рабочего колеса, которые обеспечивают КПД выше, чем у исходного варианта на 0.8%, напряжения и металлоемкость меньше на 12%, а взвешенная площадь области кавитации у них даже меньше, чем у исходного колеса.

Полученные результаты показывают эффективность предложенной методики оптимизации одновременно гидравлических и прочностных характеристик проточного тракта и применимость ее для решения практических задач проектирования гидротурбин.

5. Иллюстрации, визуализация результатов

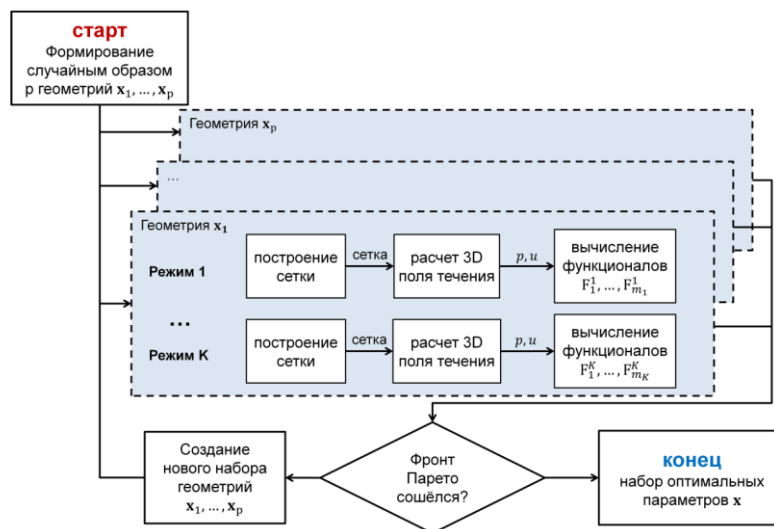


Рис. 1. Схема процесса оптимизации

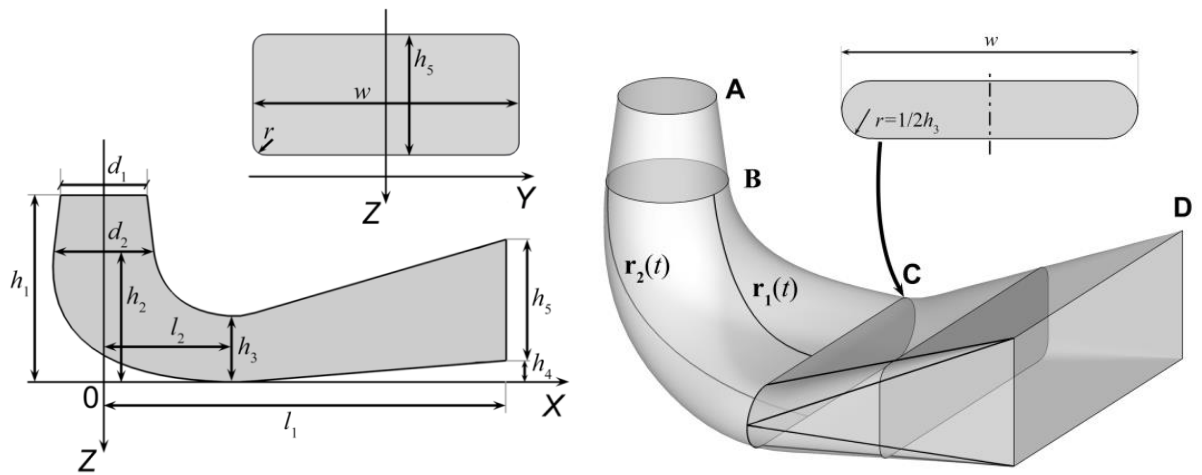


Рис. 2. Параметризация формы отсасывающей трубы.

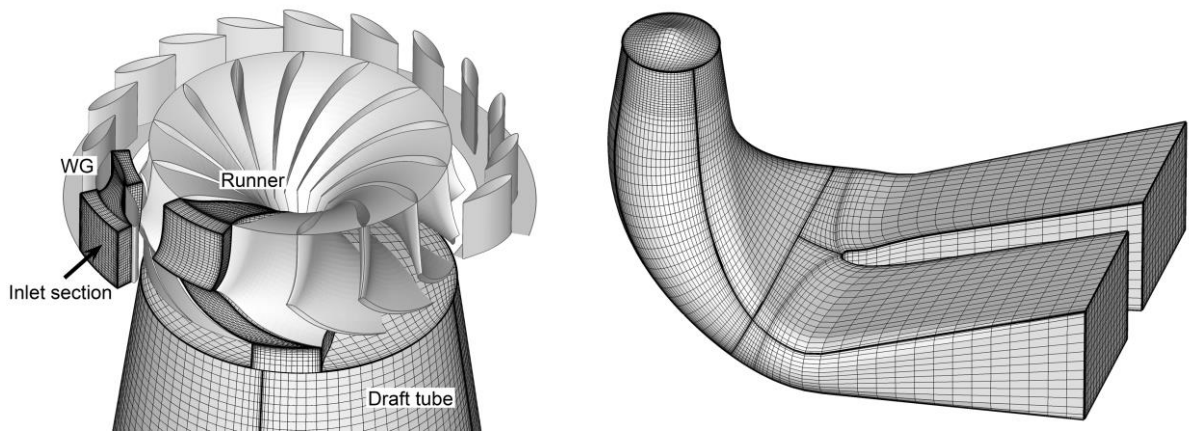


Рис. 3. Расчетная сетка в направляющем аппарате и рабочем колесе (слева) и отсасывающей трубе (справа).

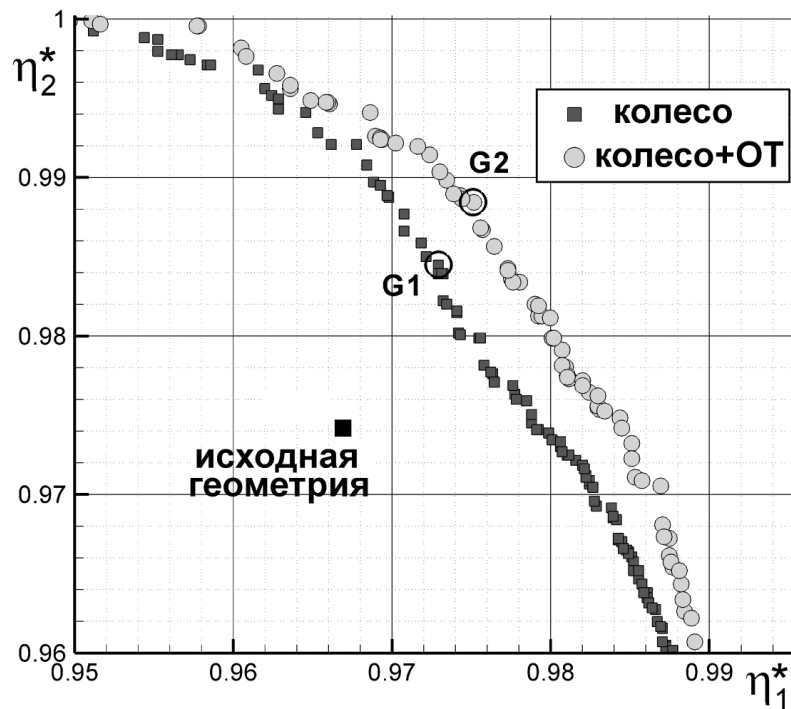


Рис. 4. Проекция полученных фронтов Парето на плоскость КПД в 1-м режиме и КПД во 2-м режиме.

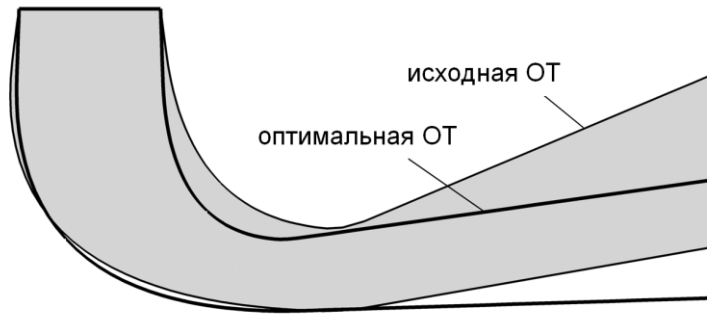


Рис. 5. Сравнение формы исходной и оптимизированной ОТ.

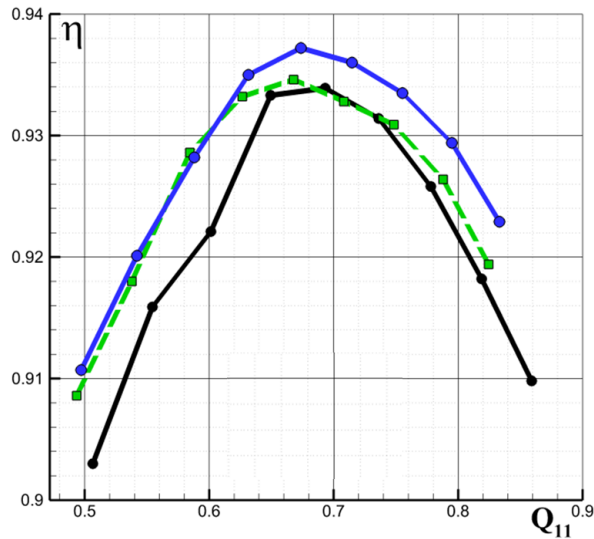


Рис. 6. Зависимость КПД турбины от расхода воды: исходная турбина (—●—), турбина с оптимизированным РК (---■---), турбина с оптимизированными РК и ОТ (—●—).

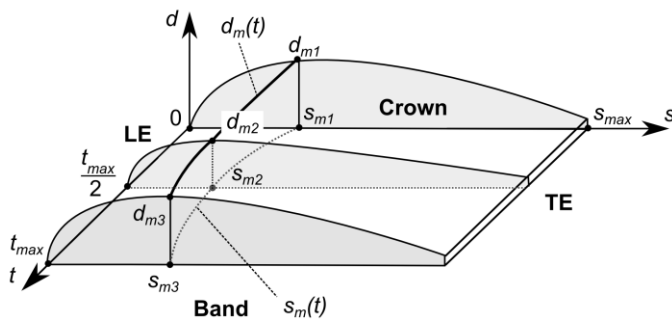


Рис. 7. Параметризация функции распределения толщины лопасти

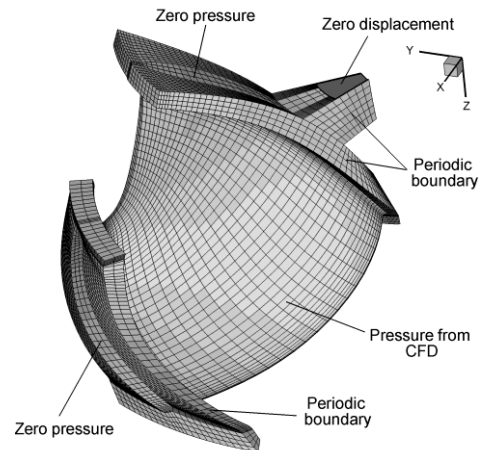


Рис. 8. Конечно-элементная сетка и граничные условия для прочностного расчета рабочего колеса.

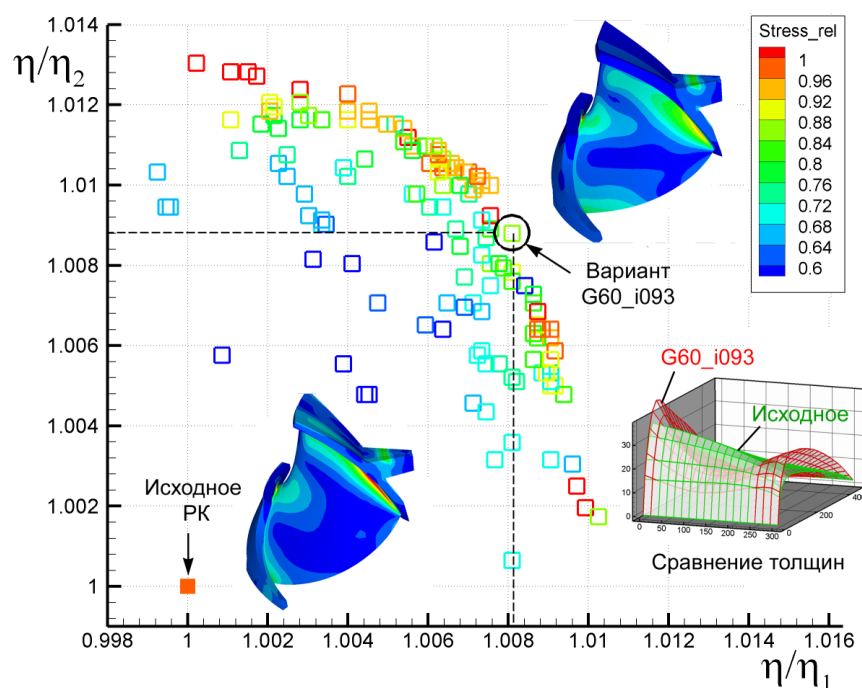


Рис. 9. Оптимизация формы РК по критериям максимизации КПД, прочности и снижения металлоемкости. Проекция фронта Парето на плоскость КПД в режиме неполной и КПД в повышенной нагрузки. Показаны распределения напряжений и сравнение толщин исходного и оптимизированного РК.

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Решение задачи оптимизации требует проведения трехмерных гидродинамических расчетов для большого числа вариантов геометрии. Поэтому успешное решение этой задачи за приемлемое время возможно лишь с использованием параллельного счета на многопроцессорном кластере. Кроме этого, для выполнения прочностных расчетов использовалось программное обеспечение ANSYS Mechanical, установленное на кластере.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Lyutov A. E., Chirkov D. V., Skorospelov V. A., Turuk P. A., Cherny S. G. Coupled Multipoint Shape Optimization of Runner and Draft Tube of Hydraulic Turbines // *ASME Journal of Fluids Engineering*. 2015, Vol. 137, No. 111302. doi: 10.1115/1.4030678. Импакт-фактор журнала JCR 2015 = 1.35.
2. Lyutov A., Kryukov A., Cherny S., Chirkov D., Salienko A., Skorospelov V. and Turuk P. Modelling of a Francis Turbine Runner Fatigue Failure Process Caused by Fluid-Structure Interaction // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2016, Vol. 49, No. 072012. doi: 10.1088/1755-1315/49/7/072012
3. Chirkov D. V., Ankudinova, A. S., Kryukov, A. E., Cherny S. G., Skorospelov V. A. Multi-objective shape optimization of a hydraulic turbine runner using efficiency, strength and weight criteria // *Structural and Multidisciplinary Optimization* 58 (2018) pp. 627–640. doi: 10.1007/s00158-018-1914-6. Импакт-фактор журнала JCR 2017 = 2.876.