

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА ГИДРОТУРБИН В УСЛОВИЯХ ЧАСТО МЕНЯЮЩИХСЯ РЕЖИМНЫХ ФАКТОРОВ

Георгиевская Евгения Викторовна

Специальность 2.5.10 – «Гидравлические машины, вакуумная,
компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы»



<https://yandex.ru/images/search?text=аварии%20на%20ГЭС&noreask=1&lr=2>



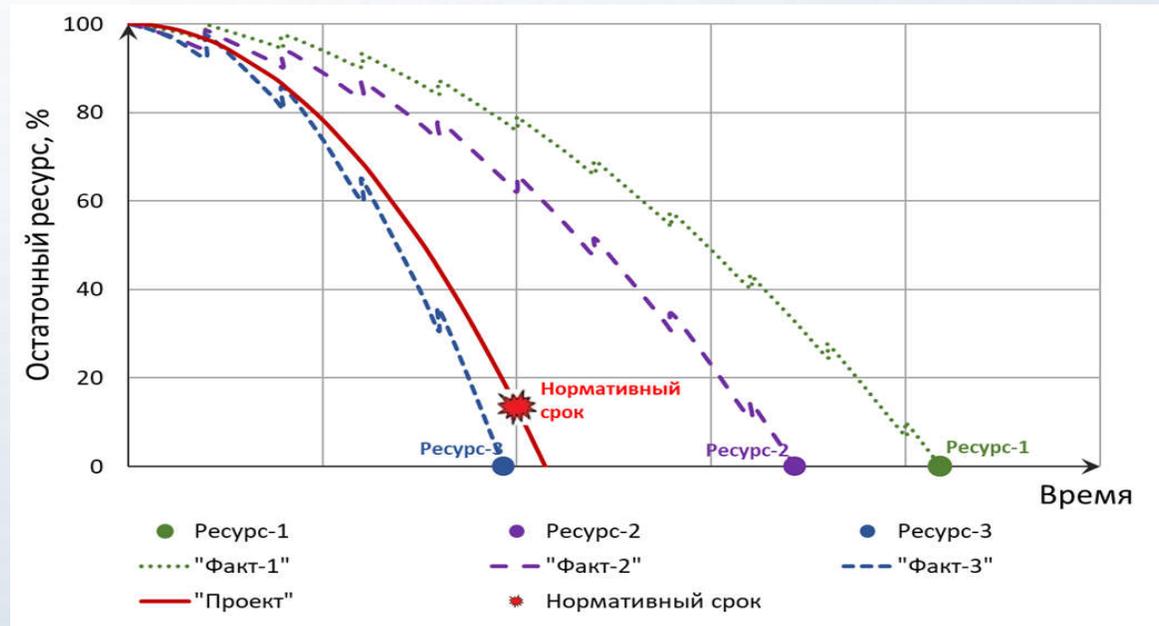
D. Frunzăverdel, S. Muntean, G. Mărginean, V. Câmpiani, L. Marşavina, R. Terzi, V. Şerban. Failure analysis of a Francis turbine runner // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2010. Vol. 12. P. 012115.



Фотии С.В. Определение причин и характера разрушения луча крестовины рабочего колеса гидроагрегата №3 Зейской ГЭС // IX НТК «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии». Санкт-Петербург. 2015.



- ❑ Проектный срок службы гидротурбин (ГТ) не учитывает тип, конструктивное исполнение, технические параметры, массогабаритные характеристики, скорость вращения, условия эксплуатации и индивидуальные особенности ГТ
- ❑ Отсутствует нормативная база по оценке остаточного ресурса ГТ на стадии эксплуатации
- ❑ Невозможность создания релевантной статистической базы для прогнозирования ресурсных отказов в условиях фактической эксплуатации
- ❑ Необходимость расширения эксплуатационного диапазона ГТ для обеспечения гарантий регулирования частоты электрического тока и перетоков активной мощности
- ❑ Стоимость обслуживания и аварийность ГТ увеличивается с ростом срока эксплуатации



Необходимость обеспечения надежной и безопасной эксплуатации гидротурбин в условиях длительной эксплуатации при значительном расширении эксплуатационного диапазона

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель: научное обоснование развития теории и разработка методологии прогнозирования индивидуального ресурса гидротурбин при длительной эксплуатации на ГЭС в условиях часто меняющихся режимных факторов

Задачи:

1. Обобщение и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, опубликованных в научной печати.
2. Исследование кинетики доминирующих механизмов ресурсных отказов элементов ГТ в условиях длительной фактической эксплуатации. Анализ воздействий, влияющих на изменение ресурса ГТ во времени эксплуатации.
3. Разработка многофакторных критериев предельного состояния ресурсопределяющих элементов ГТ и соответствующих коэффициентов запаса, позволяющих прогнозировать индивидуальный ресурс ГТ с учетом обнаруженных эксплуатационных дефектов и в зависимости от фактической наработки в каждом режимном диапазоне.
4. Анализ и совершенствование алгоритмов распознавания потенциальных дефектов ресурсопределяющих элементов ГТ в условиях эксплуатации на ГЭС, разработка новых диагностических признаков и принципов контроля, мониторинга и диагностики технического состояния ГТ после длительной эксплуатации.
5. Математическое моделирование и численные исследования зависимости гидромеханических процессов при эксплуатации ГТ от особенностей конструктивного исполнения и режимных факторов. Изучение динамики процессов деградации ресурсопределяющих узлов ГТ с позиций модального анализа, теории упругости и механики разрушения.
6. Разработка аналитического аппарата и алгоритма прогнозирования индивидуального ресурса ГТ в условиях часто меняющихся режимных факторов с учетом влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных параметров.
7. Разработка комплекса прикладных расчетно-экспериментальных методов оценки индивидуального ресурса ГТ и инженерных алгоритмов прогнозирования изменения технического состояния ГТ для больших сроков эксплуатации.
8. Разработка программного средства для эффективного сценарного прогнозирования индивидуального ресурса ГТ в зависимости от возможных условий эксплуатации.

1. Сформулирована концепция системного подхода к прогнозированию индивидуального ресурса ГТ с учетом влияния конструктивно-технологических особенностей, фактических режимов эксплуатации, обнаруженных эксплуатационных дефектов и влияния коррозионно-активной среды
2. Разработана двухкритериальная схема оценки ресурса ГТ из условия обеспечения усталостной прочности и трещиностойкости, позволяющая прогнозировать ресурс ГТ после длительной работы в широком эксплуатационном диапазоне, учитывая влияние эксплуатационных дефектов и высокочастотных нагрузок
3. Предложены новые диагностические признаки для поиска усталостных трещин в ресурсоопределяющих узлах ГТ на ранней стадии развития
4. Установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния и индивидуального ресурса ГТ после длительной эксплуатации в зависимости от конструктивного исполнения, технологических особенностей, режимов работы гидроагрегата и качества проведенных восстановительных ремонтов
5. Разработаны новые инженерные подходы к расчетной оценке статических и динамических напряжений во всем эксплуатационном диапазоне (энергетический метод, обратный метод, динамический отклик по собственным частотам), позволяющие отказаться от натурного эксперимента и сложных расчетов с использованием пространственных мультидисциплинарных математических 3D-моделей, описываемых нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных
6. Разработан алгоритм прогнозирования ресурса ГТ с учетом индивидуальных конструктивно-технологических особенностей и специфики режимов использования ГТ
7. Разработаны принципы перехода на цифровые технологии при прогнозировании индивидуального ресурса уникального оборудования с помощью цифрового двойника матричного типа и демонстрационная версия программного средства, реализующего методологию прогнозирования индивидуального ресурса ГТ в зависимости от возможных сценариев эксплуатации («Режимный ресурсный калькулятор»)

Новизна полученных результатов подтверждена двумя патентами.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Теоретическая значимость: разработка комплекса объединенных общей методологией научных подходов к оценке предельного состояния, критериям и условиям прогнозирования ресурса надежной и безопасной эксплуатации гидротурбин при длительных сроках эксплуатации с учетом влияния конструктивно-технологических особенностей, фактических режимов работы, обнаруженных эксплуатационных дефектов.

Результаты могут быть использованы в качестве теоретической базы при проектировании новых гидротурбин, предназначенных для эксплуатации в широком режимном диапазоне, а также при разработке новых нормативных документов по прогнозированию индивидуального ресурса ГТ с учетом влияния режимных факторов.

Практическая ценность:

1. Повышение достоверности прогноза индивидуального ресурса, снижение рисков возникновения ресурсных отказов за счет учета фактических конструктивно-технологических, эксплуатационных и ремонтных факторов
2. Унификация методов прогнозирования индивидуального ресурса ГТ в условиях фактической эксплуатации и переход от субъективной экспертной оценки к прикладным расчетно-экспериментальным методам прогнозирования ресурса ГТ
3. Возможность учета влияния обнаруженных эксплуатационных дефектов, не препятствующих дальнейшей эксплуатации
4. Планирование сроков и объемов восстановительного ремонта, оптимизация эксплуатационных и ремонтных расходов за счет перехода к планированию ремонтов по техническому состоянию на базе индивидуального прогноза ресурса ГТ и ожидаемых режимов использования оборудования
5. Повышение эффективности работы оборудования за счет совершенствования систем диагностики и выбора оптимальной стратегии его использования на базе сценарного прогнозирования
6. Обоснование управленческого решения о необходимости замены ГТ по критерию исчерпания ресурса
7. Возможность привлечения к прогнозированию индивидуального ресурса ГТ широкого круга специалистов эксплуатирующих организаций и управляющих компаний, не являющихся экспертами в области оценки ресурса, с помощью разработанного программного средства, реализующего разработанную методологию

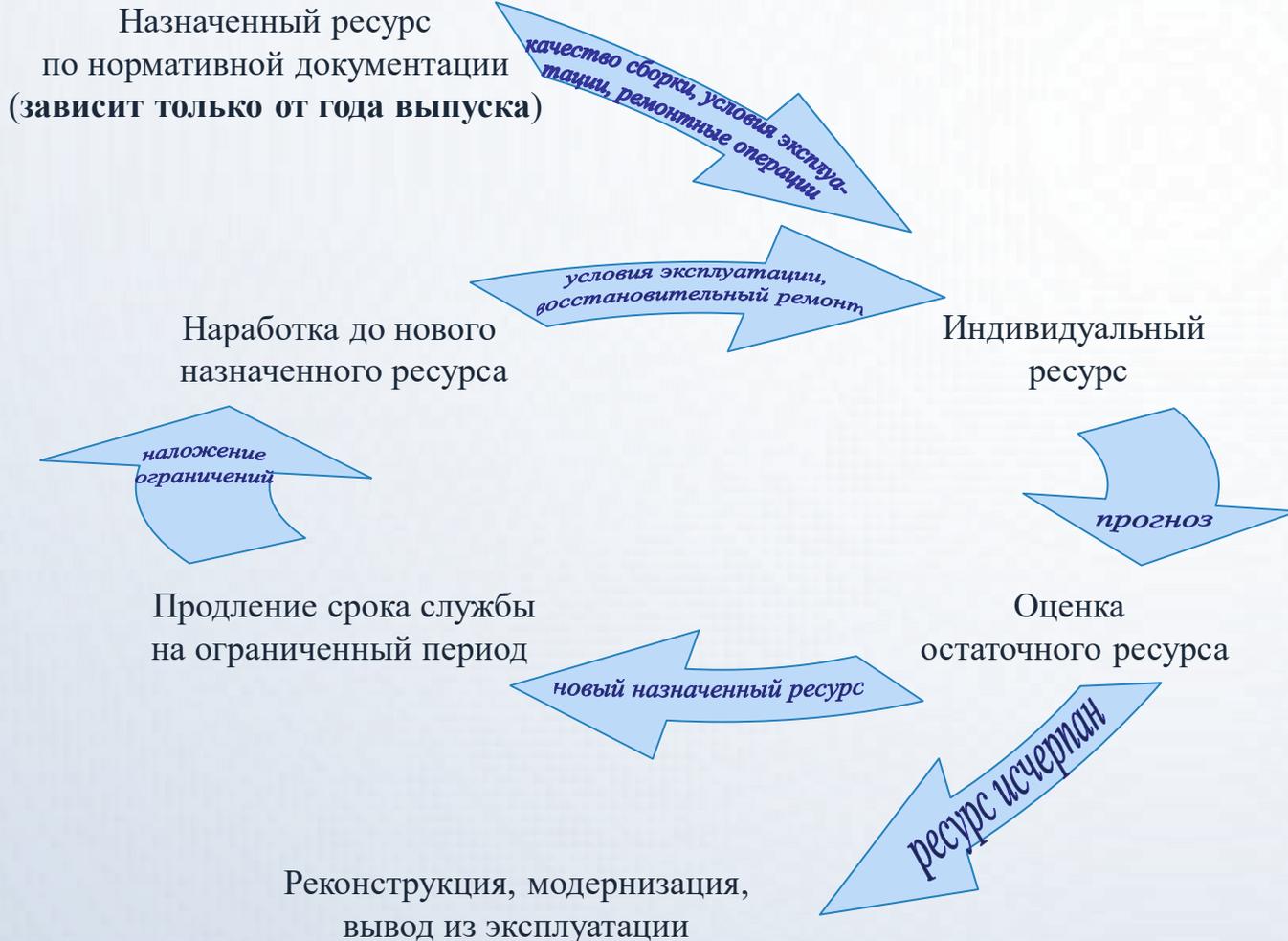
ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

- ❑ Обзор и анализ опубликованных результатов теоретических и экспериментальных исследований
- ❑ Формирование и реализация концепции системного подхода к прогнозированию индивидуального ресурса ГТ с учетом влияния конструктивно-технологических особенностей, фактических режимов эксплуатации и обнаруженных эксплуатационных дефектов
- ❑ Разработка двухкритериальной схемы оценки ресурса ГТ в условиях часто меняющихся режимных факторов, учитывающей влияние эксплуатационных дефектов и высокочастотных нагрузок
- ❑ Анализ возможностей существующих систем диагностики ГТ на базе численного моделирования влияния усталостных трещин на динамические характеристики ГТ и разработка новых диагностических признаков
- ❑ Участие в разработке программ натурных испытаний и измерений, анализ и систематизация результатов натурных экспериментальных исследований ГТ
- ❑ Разработка требований к компьютерным моделям ГТ, численные исследования гидромеханических процессов при эксплуатации ГТ, анализ динамики процессов деградации ресурсоопределяющих узлов ГТ в зависимости от режимных факторов
- ❑ Разработка и верификация новых инженерных подходов к расчетной оценке напряженно-деформированного состояния и ресурса ГТ во всем эксплуатационном диапазоне
- ❑ Разработка аналитического аппарата и алгоритма прогнозирования индивидуального ресурса ГТ в условиях многофакторного многочастотного нагружения
- ❑ Разработка концепции цифрового двойника матричного типа и принципов перехода на цифровые технологии для прогнозирования индивидуального ресурса уникального оборудования, формирование индивидуальных цифровых двойников для ряда крупных гидротурбин (более 10), проведение ресурсных расчетов при различных сценариях эксплуатации ГТ и сравнительный анализ результатов

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Концепция системного подхода к прогнозированию индивидуального ресурса ГТ.
2. Оценка ресурса ГТ в условиях фактической эксплуатации по критериям обеспечения усталостной прочности и трещиностойкости. Роль высокочастотных нагрузок.
3. Ограничения существующих систем контроля, мониторинга и диагностики ГТ в части идентификации трещин и обоснование новых диагностических признаков. Обоснование ремонтов по техническому состоянию с позиций индивидуального ресурса ГТ.
4. Результаты исследований зависимости гидромеханических процессов и процессов деградации при длительной эксплуатации ГТ от конструктивного исполнения, технологических особенностей, режимов работы гидроагрегата и качества проведенных восстановительных ремонтов.
5. Прикладные расчетно-экспериментальные методы определения статической и динамической составляющей напряжений в ресурсопределяющих элементах во всем эксплуатационном диапазоне. Верификация результатов.
6. Методология количественной оценки ресурса и алгоритмы прогнозирования индивидуального ресурса ГТ в условиях часто меняющихся режимных факторов. Учет индивидуальных особенностей и эксплуатационных дефектов.
7. Принципы построения цифрового двойника матричного типа для уникального оборудования на примере ГТ.
8. Анализ результатов использования «Режимного ресурсного калькулятора» при сценарном прогнозировании индивидуального ресурса ГТ в зависимости от возможных условий эксплуатации и выбор оптимальной стратегии использования оборудования.

БАЗОВАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ



Ресурсоопределяющие узлы ГТ:

рабочее колесо, вал

ГОСТ Р 27.102-2021, СТО 70238424.27.010.001-2008:

Ресурс – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние

Ресурс индивидуальный – назначенный ресурс конкретного объекта, определенный с учетом фактических свойств металла и условий его эксплуатации

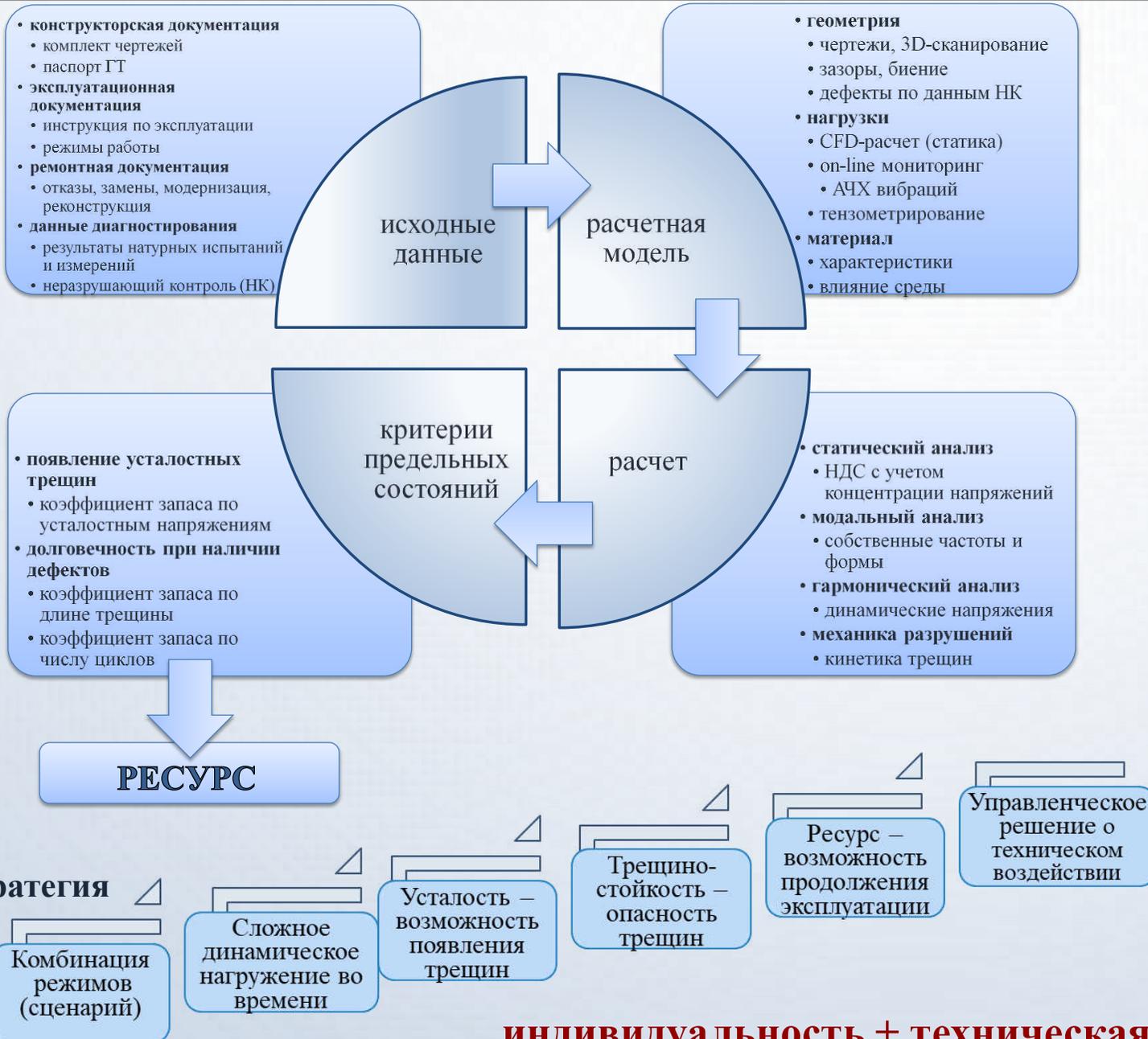
Ресурс остаточный – суммарная наработка объекта от момента последнего контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние

Состояние предельное – состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна...

В данной работе:

Предельное состояние ГТ = Ресурсный отказ
(Физический износ хотя бы одного ресурсоопределяющего узла)

КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА



Структура

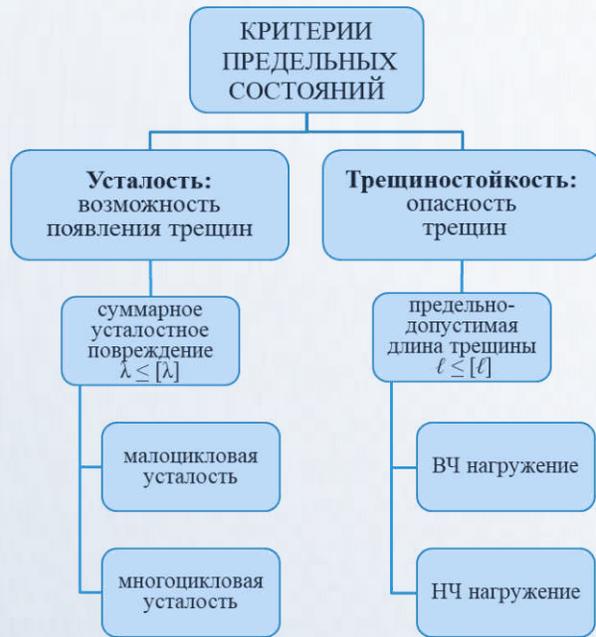


Принципы

- Индивидуальность
- Расчетно-экспериментальные подходы с использованием количественных ресурсных параметров
- Учет фактического технического состояния и фактических режимов работы
- Ресурс турбины = Ресурс ресурсоопределяющего узла
- Однозначное соответствие «предельное состояние – критерий разрушения – ресурсный параметр – коэффициент запаса»

индивидуальность + техническая возможность + низкая стоимость

ОЦЕНКА РЕСУРСА ГТ – ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД

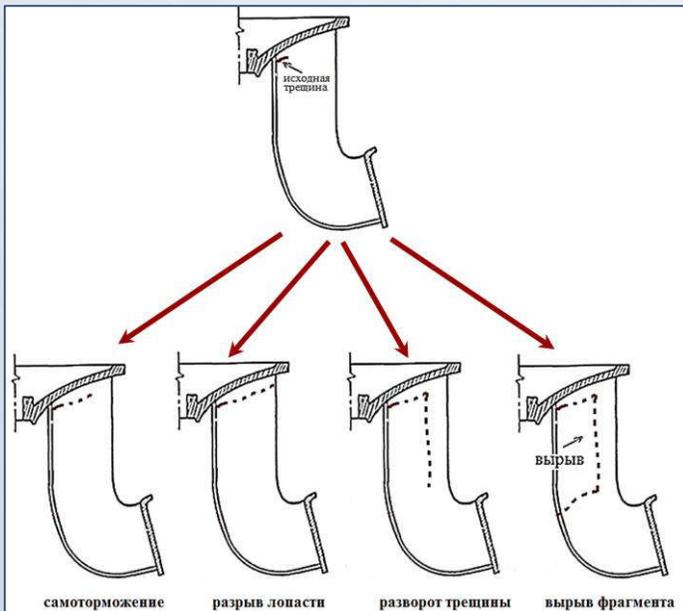


$$\lambda_{\Sigma}(T) = \sum_{i=1}^m \lambda_i(T), \quad \lambda_i(T) = \frac{[n_{\sigma}(i)]}{n_{\sigma}(i)}$$

$$n_{\sigma}(i) = \frac{\sigma_{-1}^N \left(1 - \frac{\sigma_m + \sigma_{ост}}{\sigma_{\sigma}} \right)}{\sigma_a}$$

или

$$n_{\sigma}(i) = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a \left(1 + \sigma_{-1} \frac{\sigma_m + \sigma_{ост}}{\sigma_a} \right)}$$



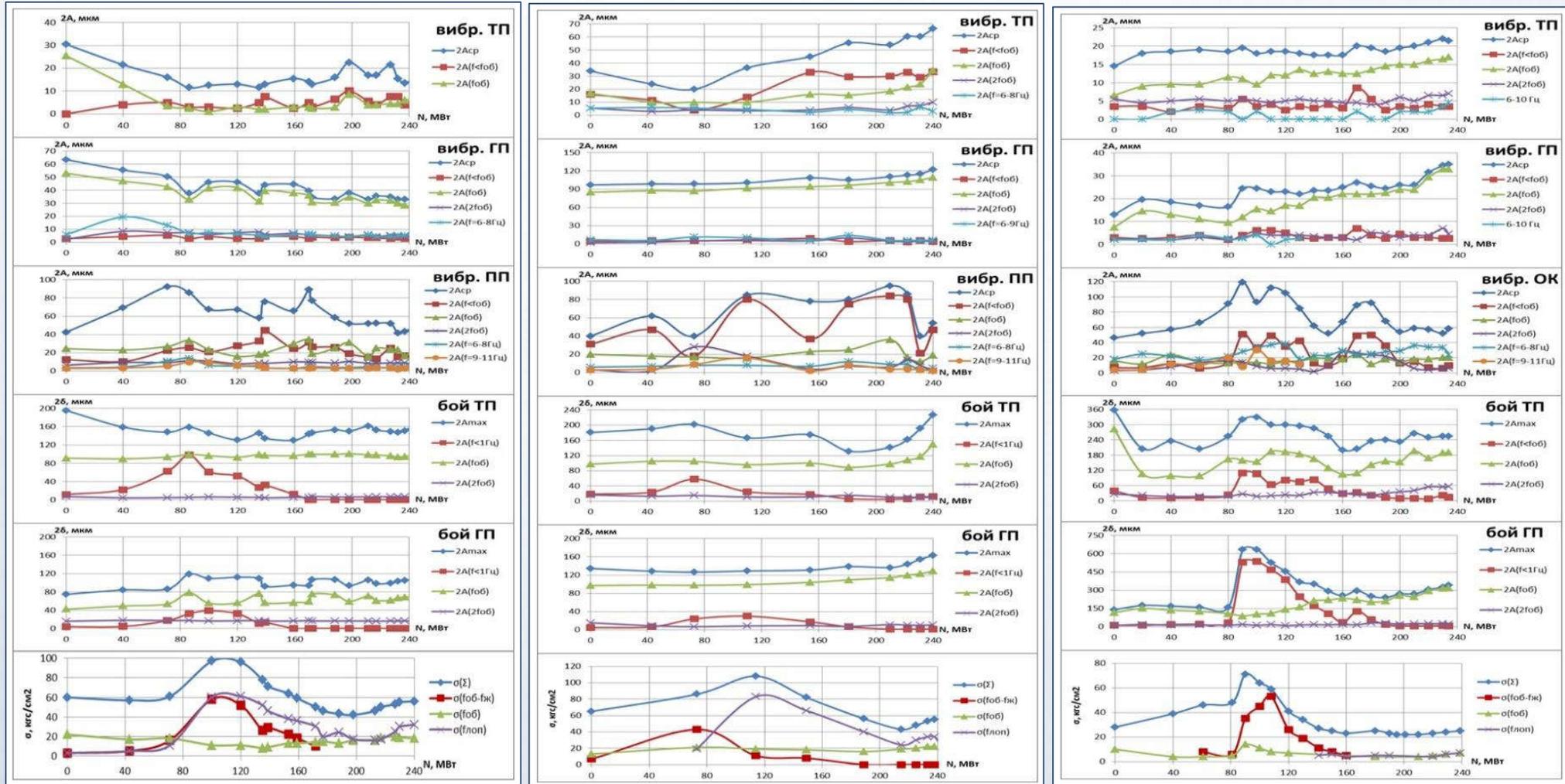
Характеристика	Условие усталостного разрушения	
	зарождение усталостных макротрещин	распространение усталостных макротрещин
Ресурсный параметр	суммарное накопленное усталостное повреждение $\lambda_{\Sigma}(T) = \sum_{i=1}^m \lambda_i(T)$,	фактическая или расчетная длина трещины $\ell = \int_{\ell_0}^{\ell} C \Delta K^n dN$
Критерий ПС	зарождение трещин в результате накопления предельно допустимой величины усталостного повреждения $[\lambda_{\Sigma}]$	достижение трещиной предельно-допустимой длины $[\ell]$
Уравнение ПС	$\lambda_{\Sigma} = [\lambda_{\Sigma}] = 1$	$\ell = [\ell] = \min\{\ell(K_c)/[n_{\ell}], \ell([K_c])\}$
Коэффициенты запаса	по напряжениям для каждого режимного блока: - проектные режимы (в соответствии с отраслевыми нормами): $[n_{\sigma}] = 1,6$ (для ПЛ), $[n_{\sigma}] = 1,2$ (для РО) - непроjektные режимы – повышенные коэффициенты запаса, отражающие неопределенность величин внешних нагрузок	- по вязкости разрушения материала K_c $[K_c] = K_c/[n_K], [n_K] = 1,5$ - по длине трещины ℓ $[n_{\ell}] = 2,2$

Основные достоинства:

- Многофакторность
- Учет многочастотности нагружения
- Учет режимных параметров
- Учет эксплуатационных дефектов

ОГРАНИЧЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ

Эксперимент



ГЭС1 ГА10 →

конструктивно
одинаковые

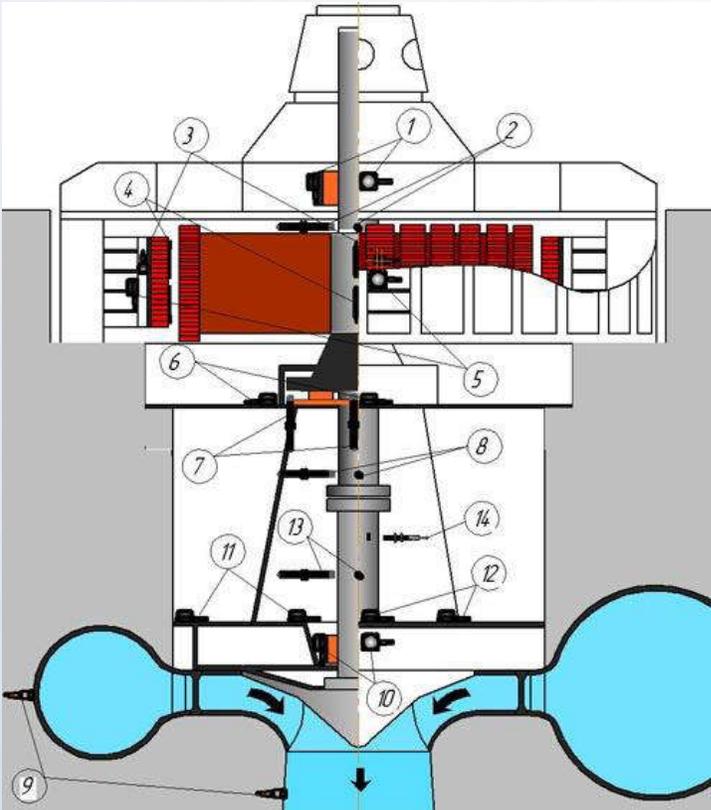
← ГЭС1 ГА11

ГЭС2 ГА3
(близкие тех. параметры)

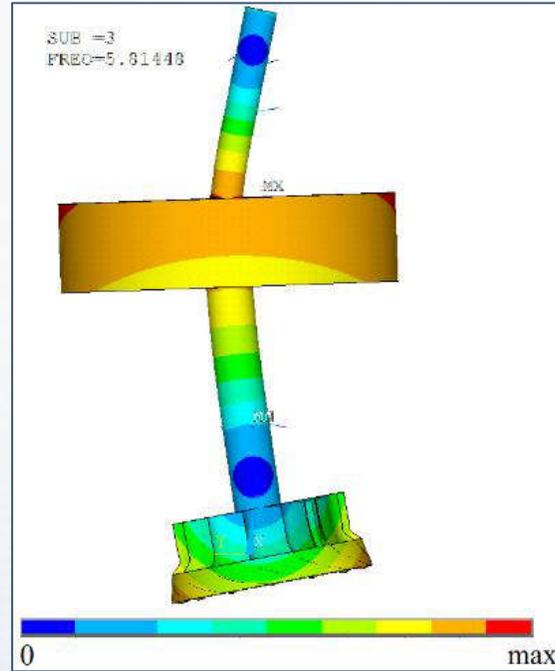
Невозможно прогнозировать ресурс по результатам вибромониторинга

ОГРАНИЧЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, МОНИТОРИНГА И ДИАГНОСТИКИ

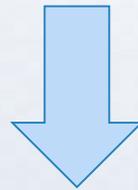
Расположение датчиков



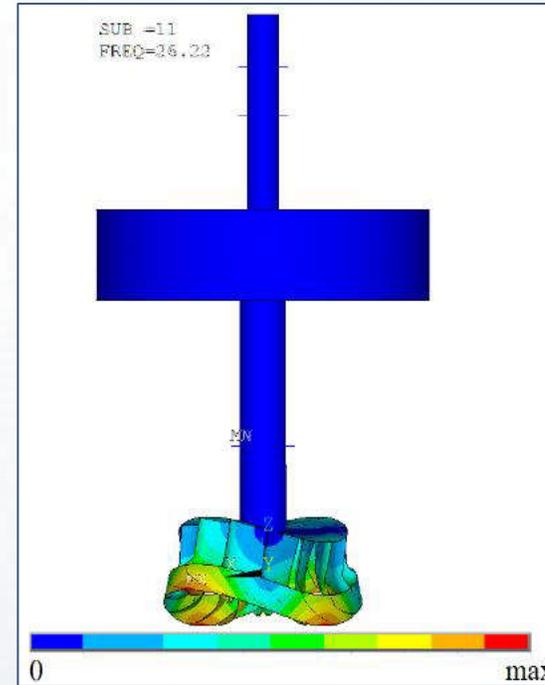
http://www.diamech.ru/images/almaz_ges_457.jpg



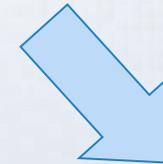
изгибные колебания вала



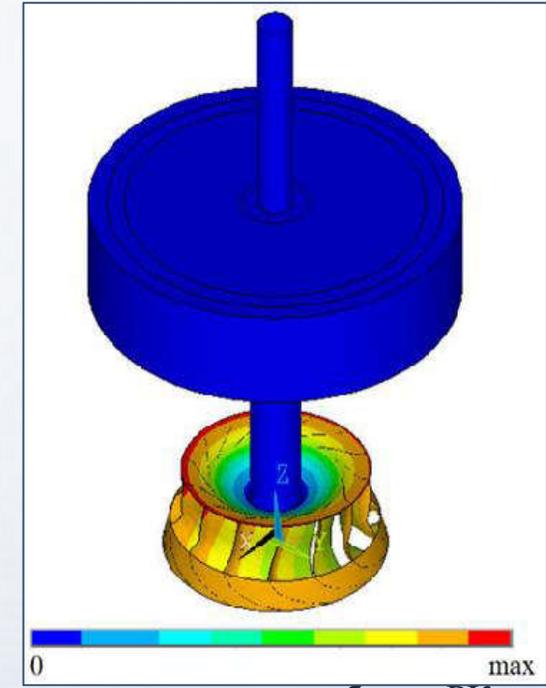
НДС РК можно связать с перемещениями вала



изгибные колебания РК



НДС РК нельзя связать с перемещениями вала



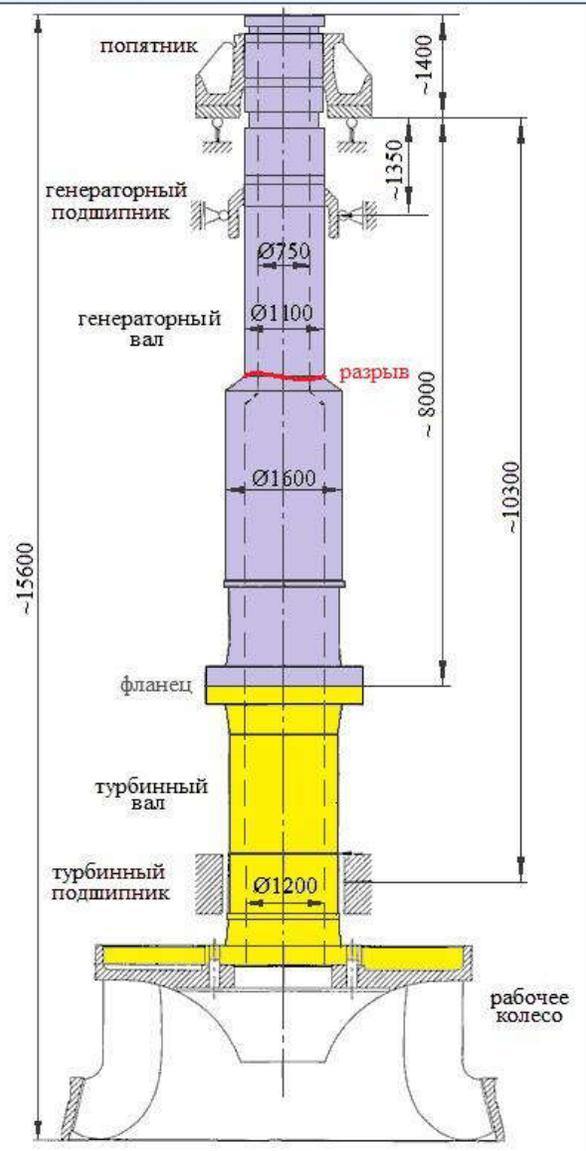
крутильные колебания РК



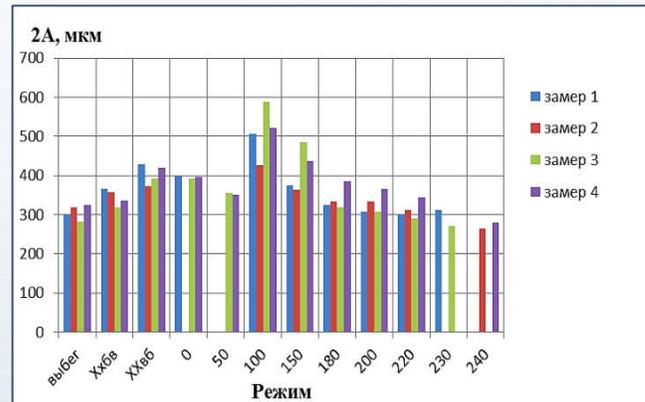
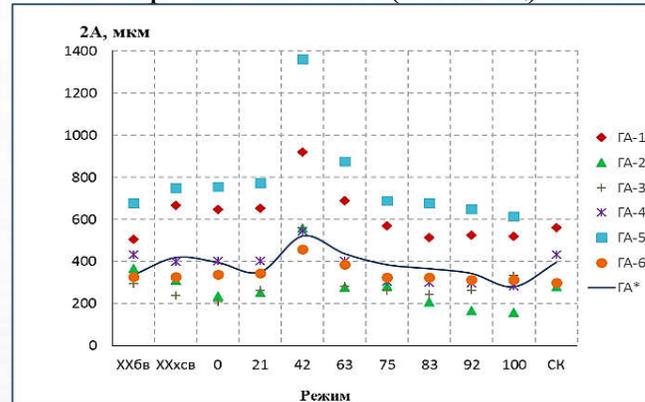
Невозможно использовать системы вибромониторинга для идентификации трещин на РК

НОВЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК

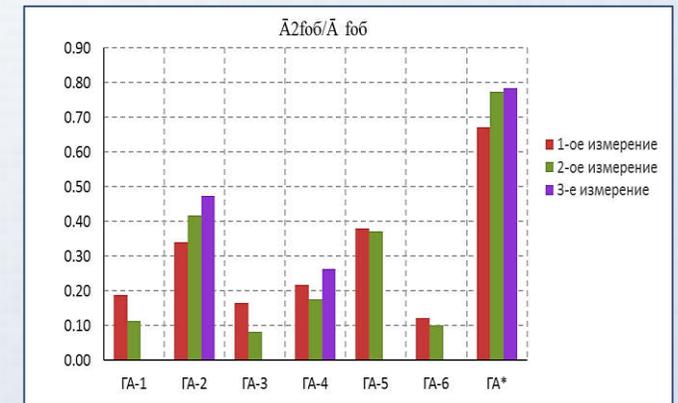
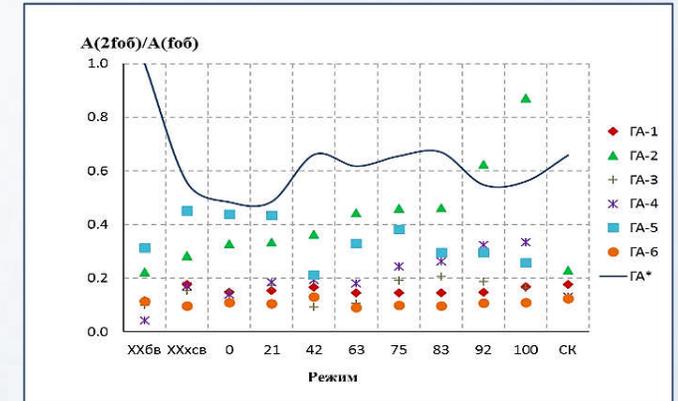
Вибродиагностика



Штатный вибромониторинг –
размах биения (0÷20 Гц)



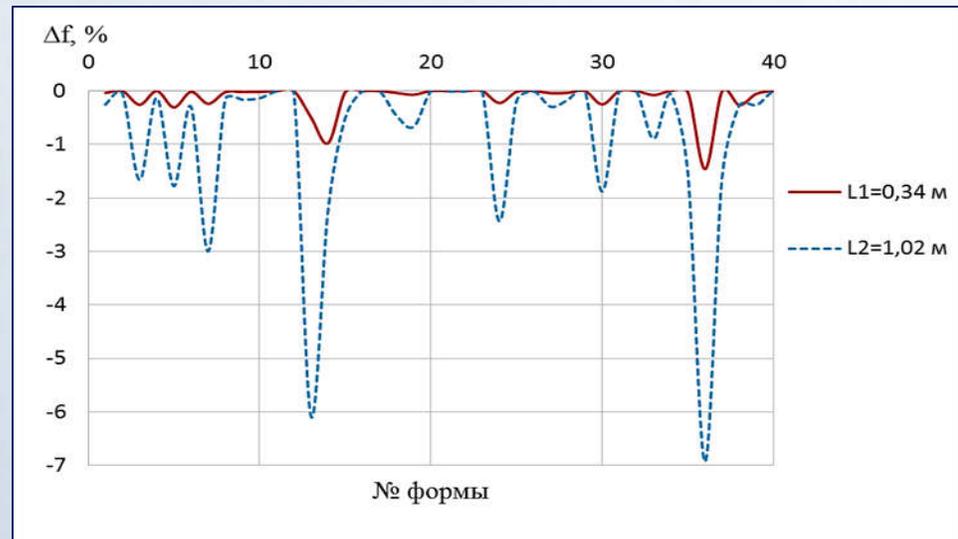
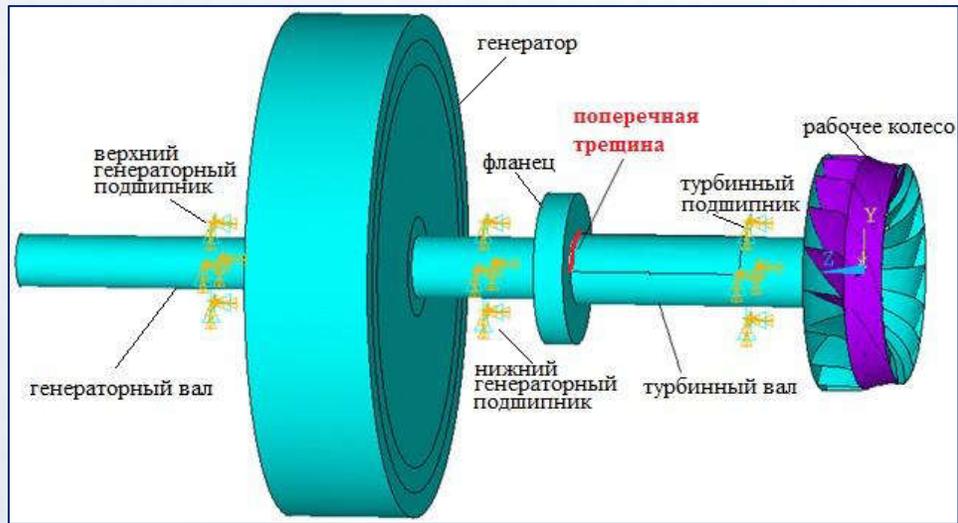
Новый диагностический
признак $A(f_{2\omega})/A(f_{\omega})$



$\uparrow A(f_{2\omega})/A(f_{\omega})$ с ростом трещины

Существующие алгоритмы обработки данных систем вибромониторинга не подходят для идентификации трещин на валах ГА. Новый диагностический признак позволяет выявлять трещины на ранних стадиях их развития

НОВЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ПРИЗНАК



№ формы	Трещин на валу нет частота f, Гц	Трещина на валу L1=0,34 м		Трещина на валу L2=1,02 м	
		частота f, Гц	Δf, %	частота f, Гц	Δf, %
		1	8,96	8,96	-0,036
2	8,96	8,96	-0,002	8,96	-0,040
3	10,6	10,5	-0,256	10,4	-1,658
4	10,6	10,6	0,000	10,5	-0,123
5	12,8	12,8	-0,305	12,6	-1,775
6	12,8	12,8	-0,016	12,8	-0,289
7	17,6	17,6	-0,238	17,1	-2,996
8	28,1	28,1	-0,021	28,0	-0,150
9	31,7	31,7	-0,019	31,7	-0,158
10	31,7	31,7	-0,016	31,7	-0,132
11	42,3	42,3	0,000	42,3	0,000
12	42,3	42,3	0,000	42,3	0,000
13	55,2	54,9	-0,491	51,8	-6,076
14	57,2	56,6	-0,976	55,9	-2,236
15	57,2	57,2	-0,021	56,9	-0,506

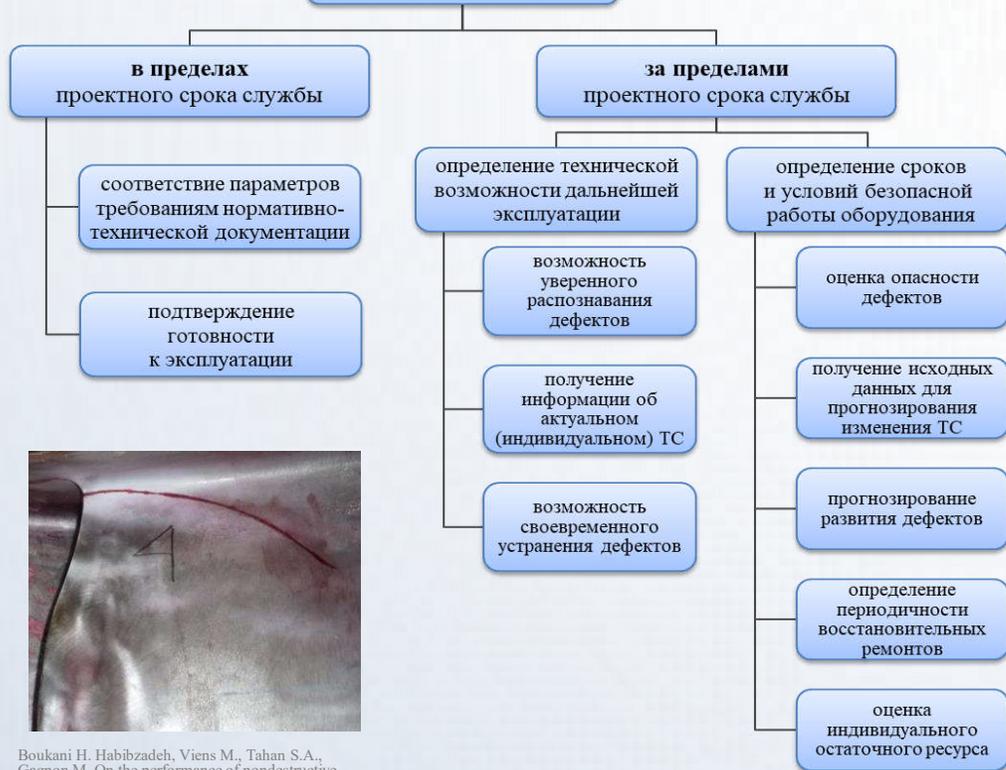
Новый диагностический признак: сдвиг частот осевых колебаний и «раздвоение» парных частот изгибных колебаний

Влияние трещины на валу на собственные частоты ГА

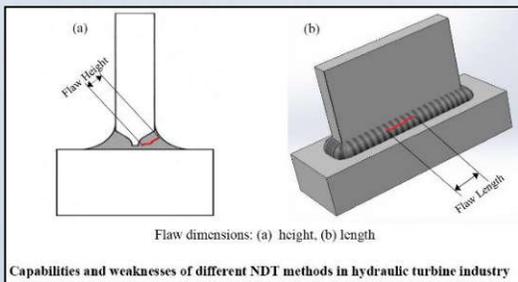
Позволяет выявлять трещины на валах ГА на ранних стадиях их развития

РЕМОНТЫ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

Цели диагностики ГТ



Boukani H, Habibzadeh, Viens M., Tahan S.A., Gagnon M. On the performance of nondestructive testing methods in the hydroelectric turbine industry // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22. № 1. Pp. 12018-12025(8)



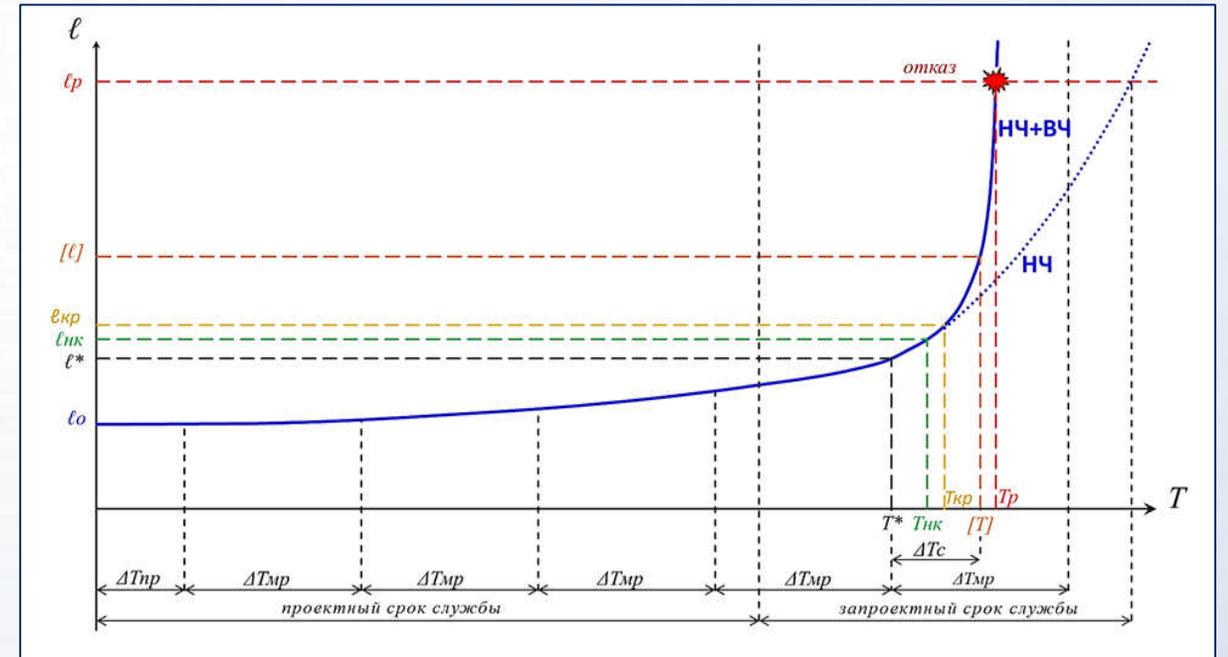
Capabilities and weaknesses of different NDT methods in hydraulic turbine industry

Boukani H, Habibzadeh, Viens M., Tahan S.A., Gagnon M. On the performance of nondestructive testing methods in the hydroelectric turbine industry // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2014. Vol. 22. № 1. Pp. 12018-12025(8). doi:10.1088/1755-1315/22/1/012018

Объем и методы неразрушающего контроля (НК)



Влияние кинетики трещины на периодичность ремонтов

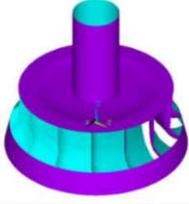
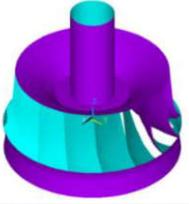


НЧ – рост трещины от НЧ-нагрузок, НЧ+ВЧ – рост трещины с учетом ВЧ-нагрузок; T^* – дата обследования, $\Delta T_{нр}$ – приработочный период; $\Delta T_{мр}$ – стандартный межремонтный период; ΔT_c – период подрастания трещины до предельно допустимой длины l (здесь $\Delta T_c < \Delta T_{мр}$), $T_{НК}$, $T_{крит}$, T_p [T] – время достижения трещиной соответственно порога чувствительности методов НК ($l_{НК}$), критической длины $l_{крит}$, предельно допустимой длины l , T_p – момент разрушения (отказ)

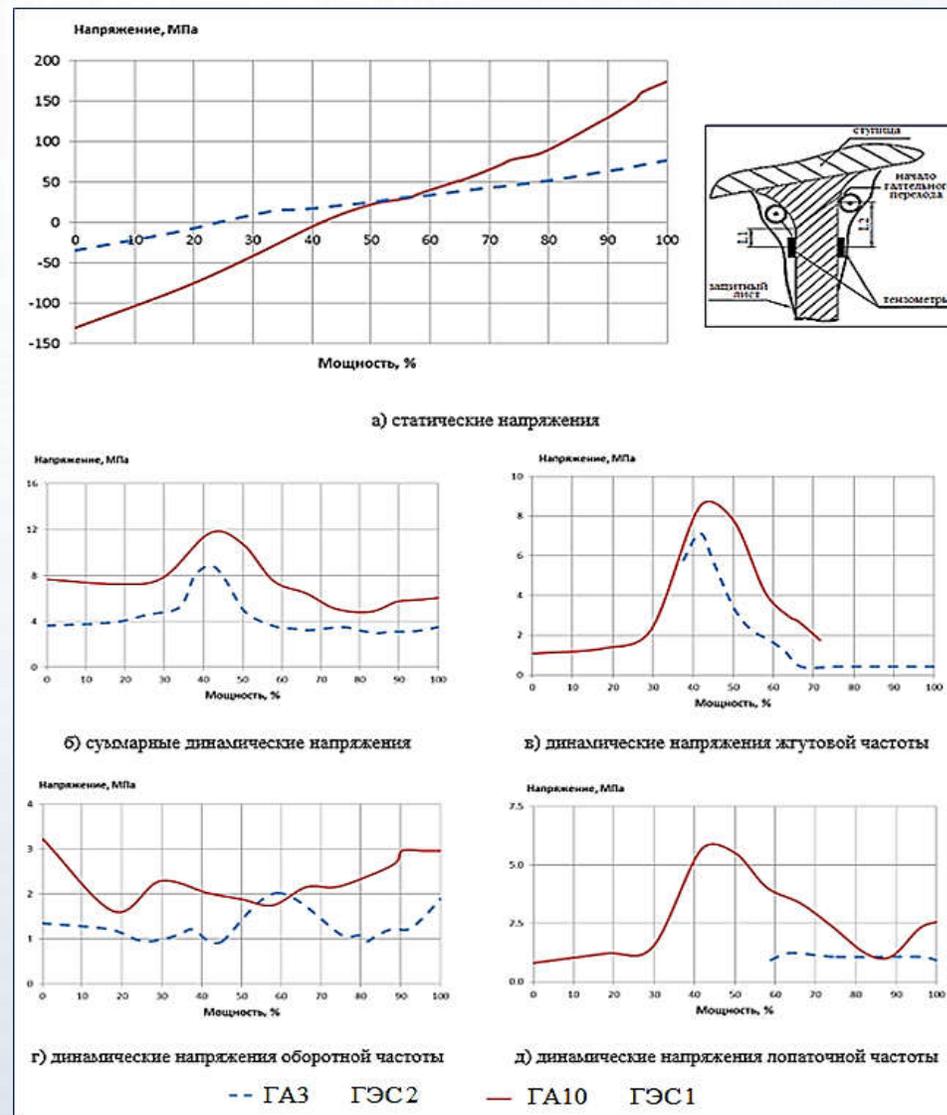
Учет эксплуатационных дефектов и их опасности. Прогнозирование сроков диагностики с учетом чувствительности методов и средств НК

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние глобальной и локальной геометрии на уровень нагруженности РК и ресурс

Параметр	ГАЗ ГЭС2	ГА10, ГА11 ГЭС1
Напор расчетный, м	96	86
Мощность ном., МВт	240	245
Диаметр РК, мм	5500	5500
n, об/мин	125	125
Тип РО турбины	662-ВМ-550	100/810-В-550
Кол-во лопастей, Z _л	14	16
Рабочее колесо		
Кол-во лопаток НА, Z _{НА}	24	20

Статическое напряжение, МПа						
	ГАЗ ГЭС2		ГА10 ГЭС1		ГА11 ГЭС1	
	XX	N _{ном}	XX	N _{ном}	XX	N _{ном}
min	-46	16	-107	116	90	-19
max	-9	65	-69	149	149	42
среднее	-32	39	-89	130	118	19
Разброс по лопастям, %	117	124	43	25	39	145



Близкие по техническим параметрам РК имеют качественно и количественно отличающиеся распределения статических и динамических напряжений

↓

ресурс ГАЗ ГЭС2 в ~1,5 раза больше, чем ГА10 ГЭС1

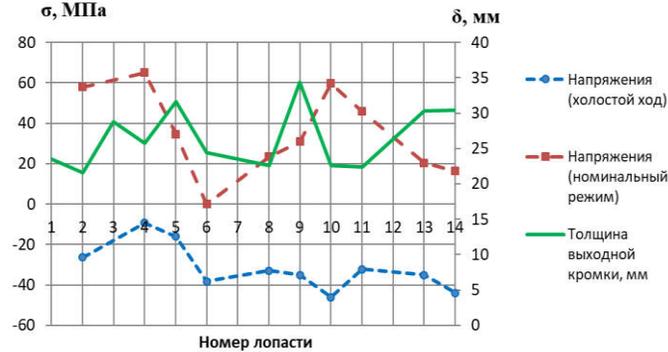
Статические и динамические напряжения в РК определяются не только конструктивным исполнением ГТ. Разброс по лопастям одного РК может достигать 150% и более

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статические напряжения – влияние толщины лопасти

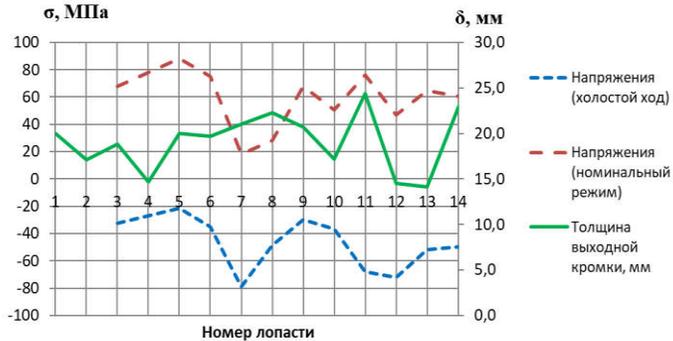
выходные кромки

Корреляция между толщиной лопасти и напряжением при XX(0) и 100% мощности

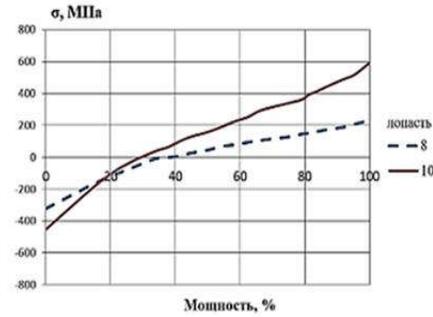


ГА-3 ГЭС2

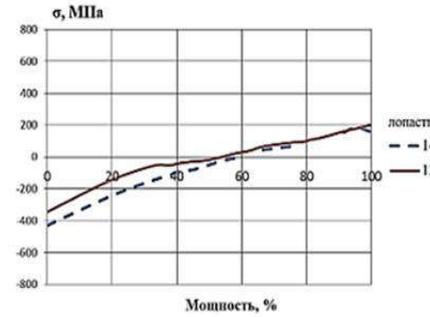
Корреляция между толщиной лопасти и напряжением при XX(0) и 100% мощности



ГА-4 ГЭС2

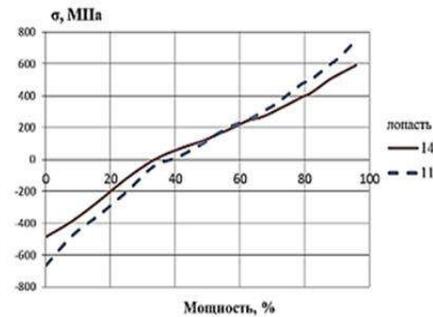


а) толщина выходной кромки
обоих лопастей 22,6 мм

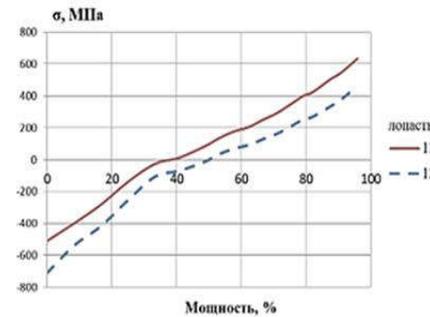


б) толщина выходной кромки:
лопасть 14 – 30,4 мм, лопасть 13 – 30,3 мм

ГАЗ ГЭС2



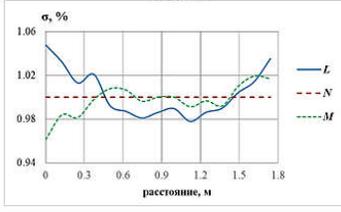
в) толщина выходной кромки:
лопасть 14 – 23,0 мм, лопасть 11 – 24,4 мм



г) толщина выходной кромки:
лопасть 13 – 14,1 мм, лопасть 12 – 14,5 мм

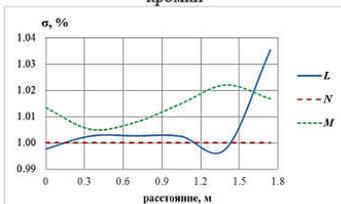
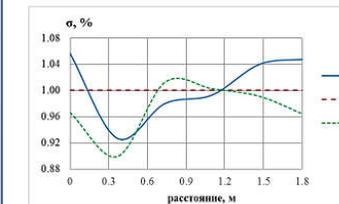
ГА-4 ГЭС2

Параметр (ГЭС-3)	Профиль		
	L	N	M
толщина выходной кромки, мм	16.6	24.0	28.3
толщина в толстой части лопасти, мм	97.9	105.1	113.7
отклонение толщины выходной кромки от чертежа, %	-30.6	0.0	18.1
отклонение толщины в толстой части лопасти от чертежа, %	-6.9	0.0	8.2



в) максимальные нормированные статические напряжения в РК

г) распределение нормированных статических напряжений вдоль выходной кромки

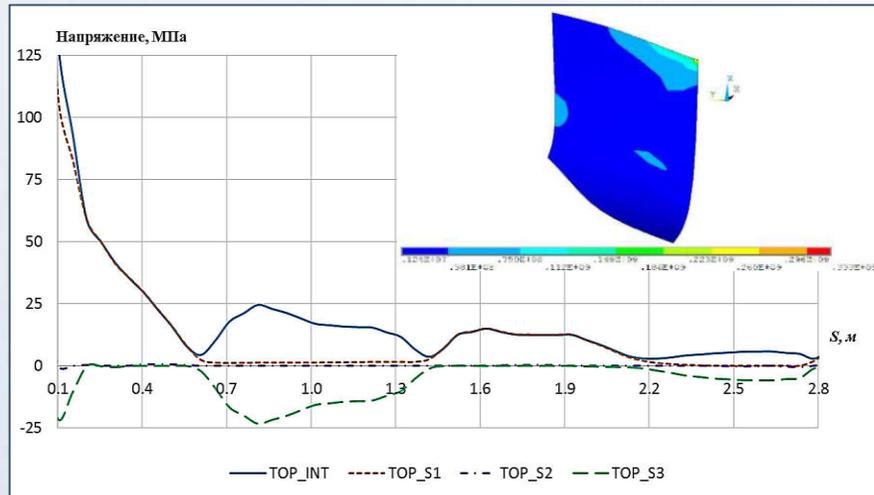


Изменение толщины лопасти на 30% (при допускаемом значении $\pm 15\%$) приводит к $\Delta\sigma_{ст} \sim 5-7\%$

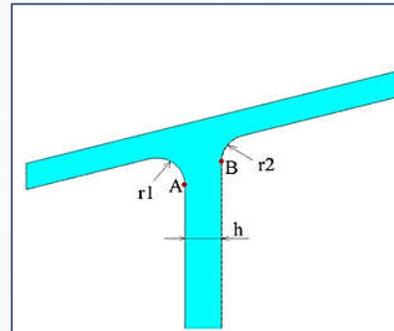
Нет корреляции между толщиной лопасти и уровнем максимальных статических напряжений.

Разнотолщинность лопастей не объясняет разброс напряжений в идентичных точках РК

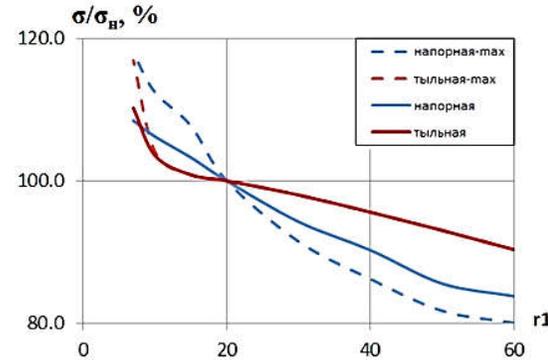
Статические напряжения - влияние галтелей



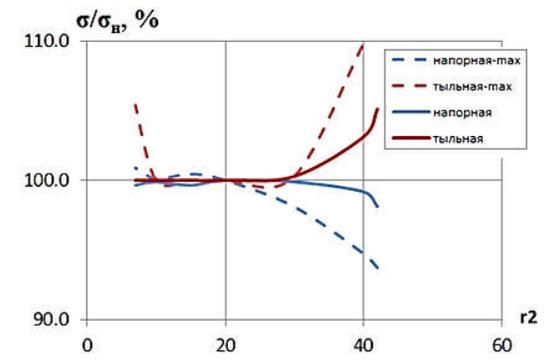
Распределение статических напряжений в лопасти вдоль выходной кромки



а) расчетная модель



б) зависимость напряжений от радиуса галтели r_1 ($r_2 = 20$ мм)



в) зависимость напряжений от радиуса галтели r_2 ($r_1 = 20$ мм)

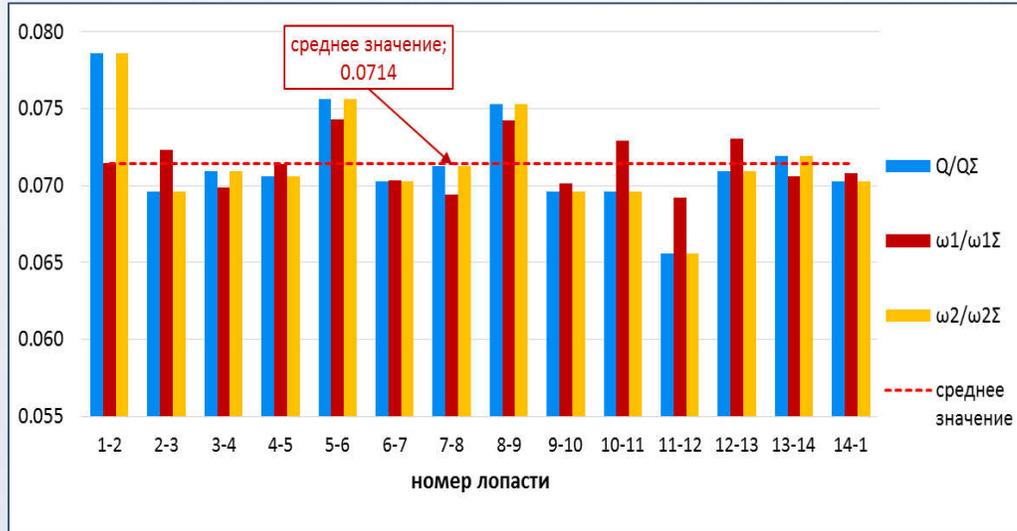
σ_H – величина напряжений при номинальном радиусе 20 мм

Положение точки максимума напряжений зависит от соотношения радиусов галтелей на напорной и тыльной сторонах лопасти

Локальная геометрия галтельного перехода в зоне приварки лопасти может изменить уровень местных напряжений до 20%

Отклонения радиусов галтельных переходов лопастей не могут быть основной причиной значительного разброса напряжений в идентичных точках РК

Статические напряжения – влияние неравномерности лопастной решетки



Доля расхода через межлопастной канал (Q) и доли площадей сечения на входе (ω_1)/выходе (ω_2) в РК (ГА3 ГЭС2)



Преимущественное влияние на величину расхода в данном межлопаственном канале оказывают расстояния в свету между лопастями **на выходе**



Отклонение расстояния в свету на выходе лопастей от среднего значения на 10% (при допуске от минус 3% до плюс 5%) соответствует $\Delta\sigma_{ст} \sim 10\%$

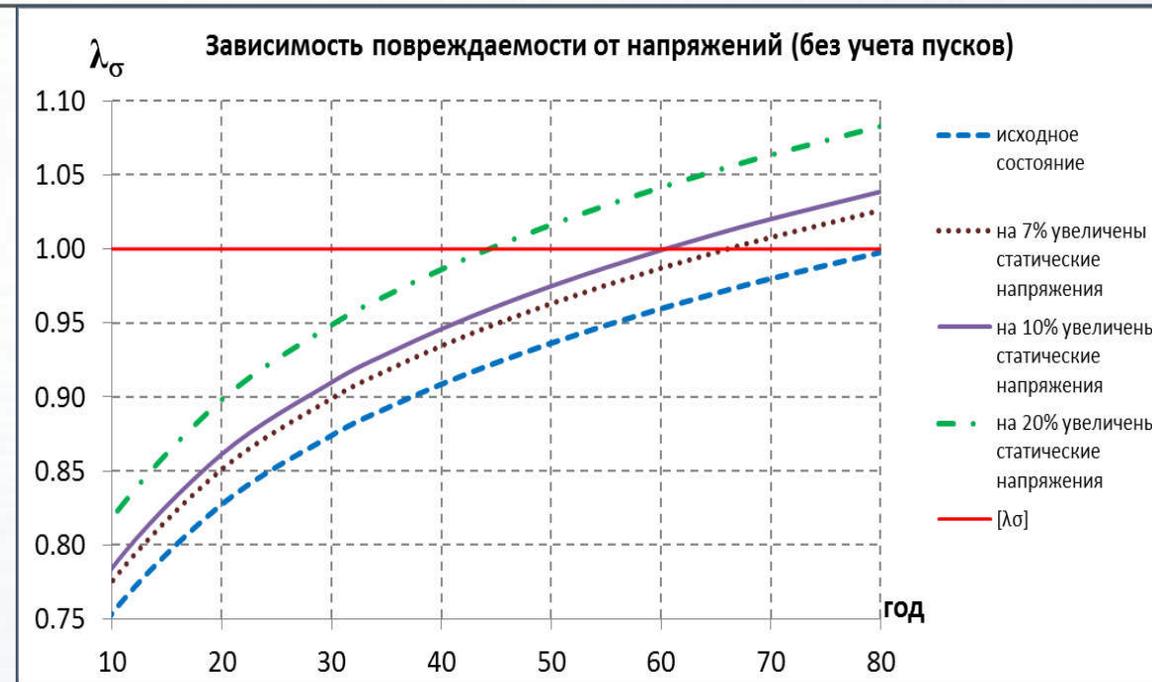
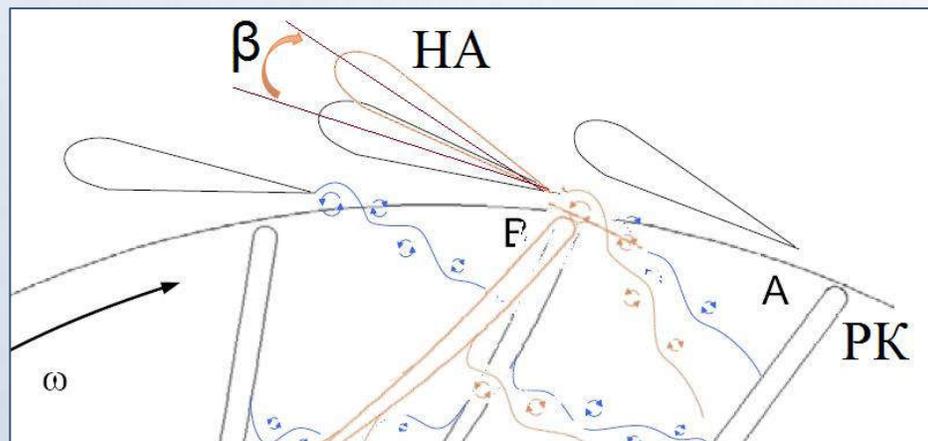
Неравномерность лопастной решетки не может быть основной причиной значительного разброса напряжений в идентичных точках РК

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Влияние геометрии на ресурс (ИТОГИ)

Параметр (отклонение в %)	max $\Delta\sigma_{ст}$ %	max $\Delta\lambda^*$, %	max ΔT^* , лет	
Толщина (± 30)	7	2.8	15	
Расстояние между лопастями (± 10)	10	4.1	20	
Галтель (-50/+300)	20	8.5	35	
Угол установки лопастей (± 10)	>40	>18	>50	
Положение тензодатчика	20	8.5	35	
Измеренные напряжения- статика	ГА10 ГЭС1	25	5.3	33
	ГА3 ГЭС2	124	73.7	105

* - базовый режим без учета пусков



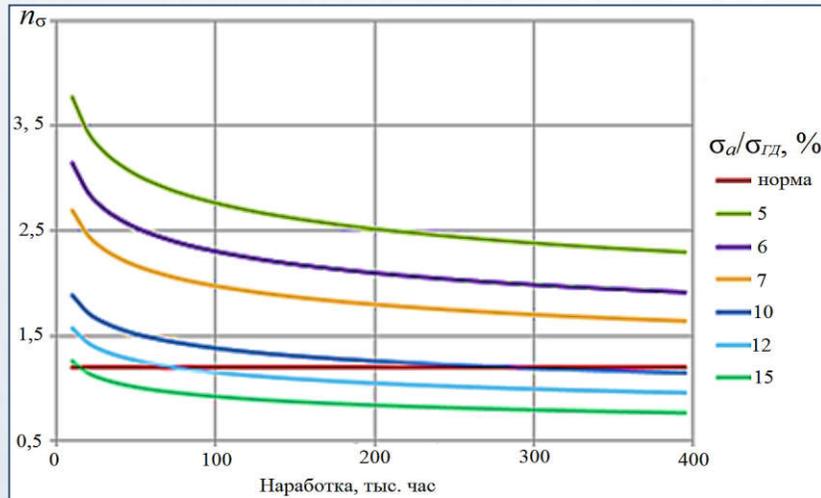
Учет влияние угла установки лопастей **объясняет фактический разброс напряжений**

Замер угла установки лопасти обычно не входит в стандартный объем измерений при оценке тех. состояния и ресурса РК

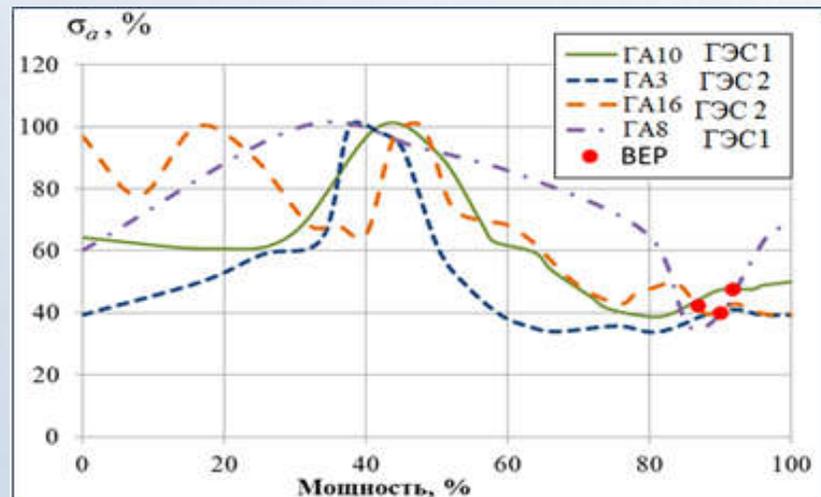
Для корректной оценки ресурса необходим учет фактической геометрии и перераспределения характеристик потока по межлопастным каналам РК

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Динамические напряжения



Влияние уровня динамических напряжений на ресурс ГТ (базовый режим без учета пусков)



Изменение динамики по режимам

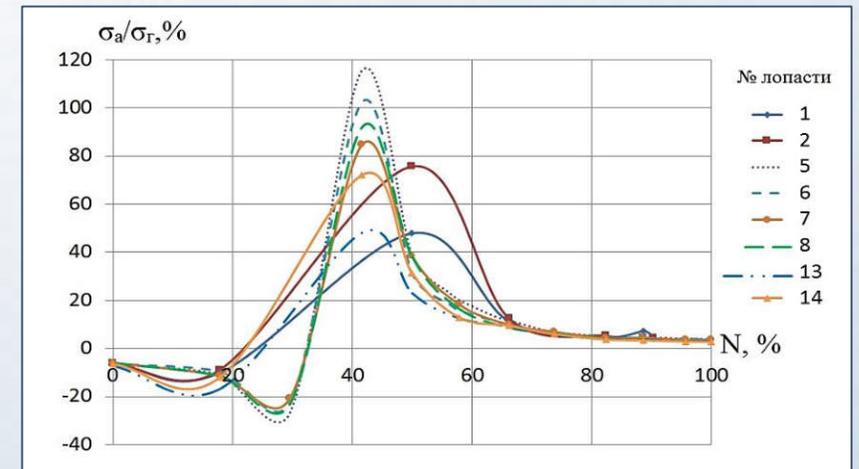
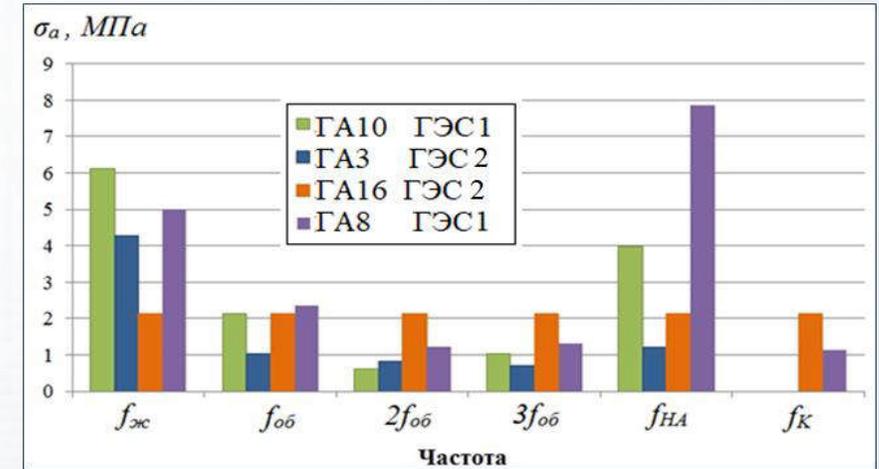
Изменение амплитуды относительных динамических напряжений на 2% приводит к изменению ресурса на ~100 тыс. час (> 10 лет)

Динамические напряжения существенно влияют на ресурс и значительно отличаются не только для конструктивно идентичных ГТ, но и для разных лопастей одного РК

Динамические напряжения определяют ресурс для конкретной ГТ:

- амплитуда зависит от режима работы ГА
- максимальные амплитуды достигаются не на режиме номинальной мощности
- частотный спектр зависит от режима работы ГА

Частотный диапазон

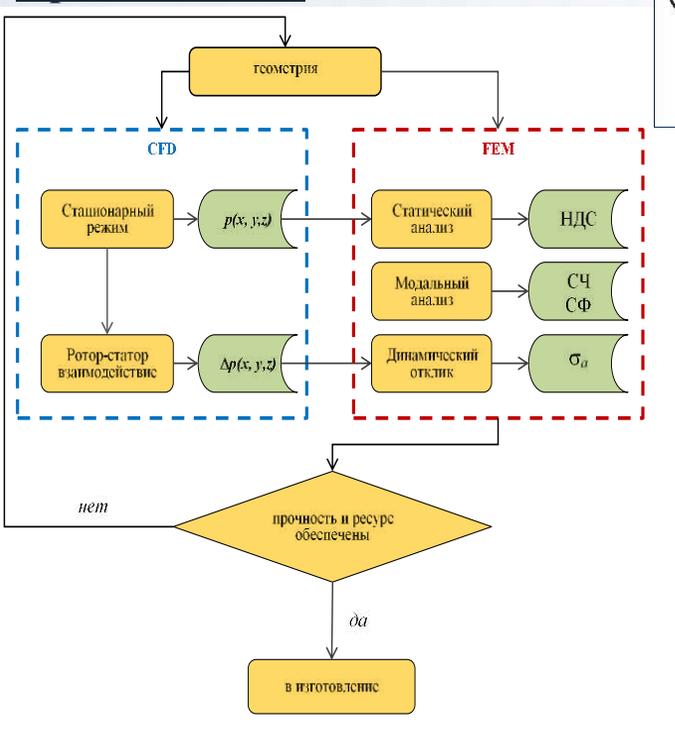


Результаты тензометрирования на одном РК (ГА3 ГЭС2)

ПРИКЛАДНЫЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Динамические напряжения

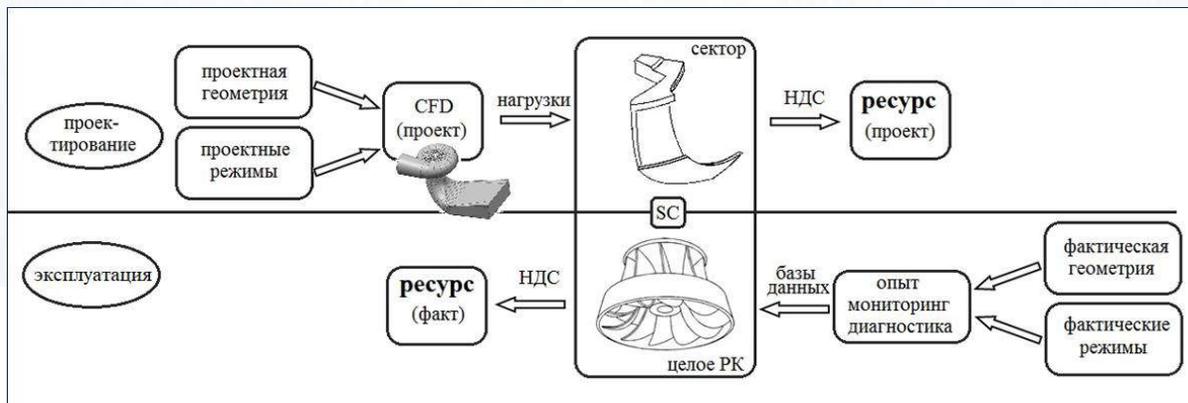
Прямая задача



Сложно! Дорого! Долго!

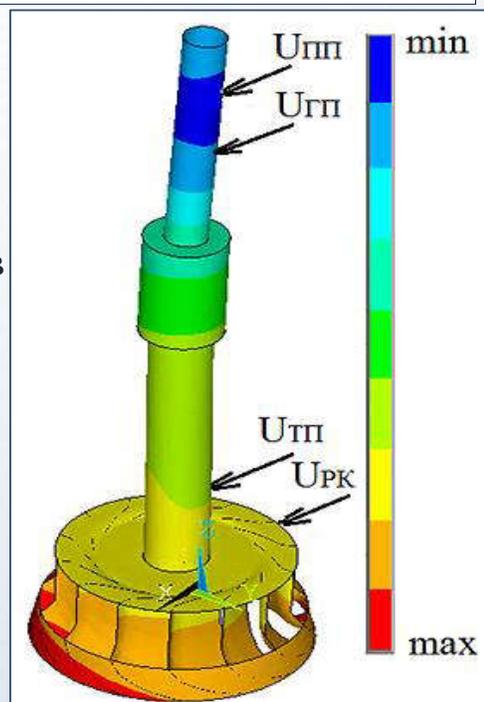
Не учитывает особенности геометрии.

Оправдано на этапе проектирования



Перспективно на стадии эксплуатации:

- учет индивидуальности
- учет переходных режимов

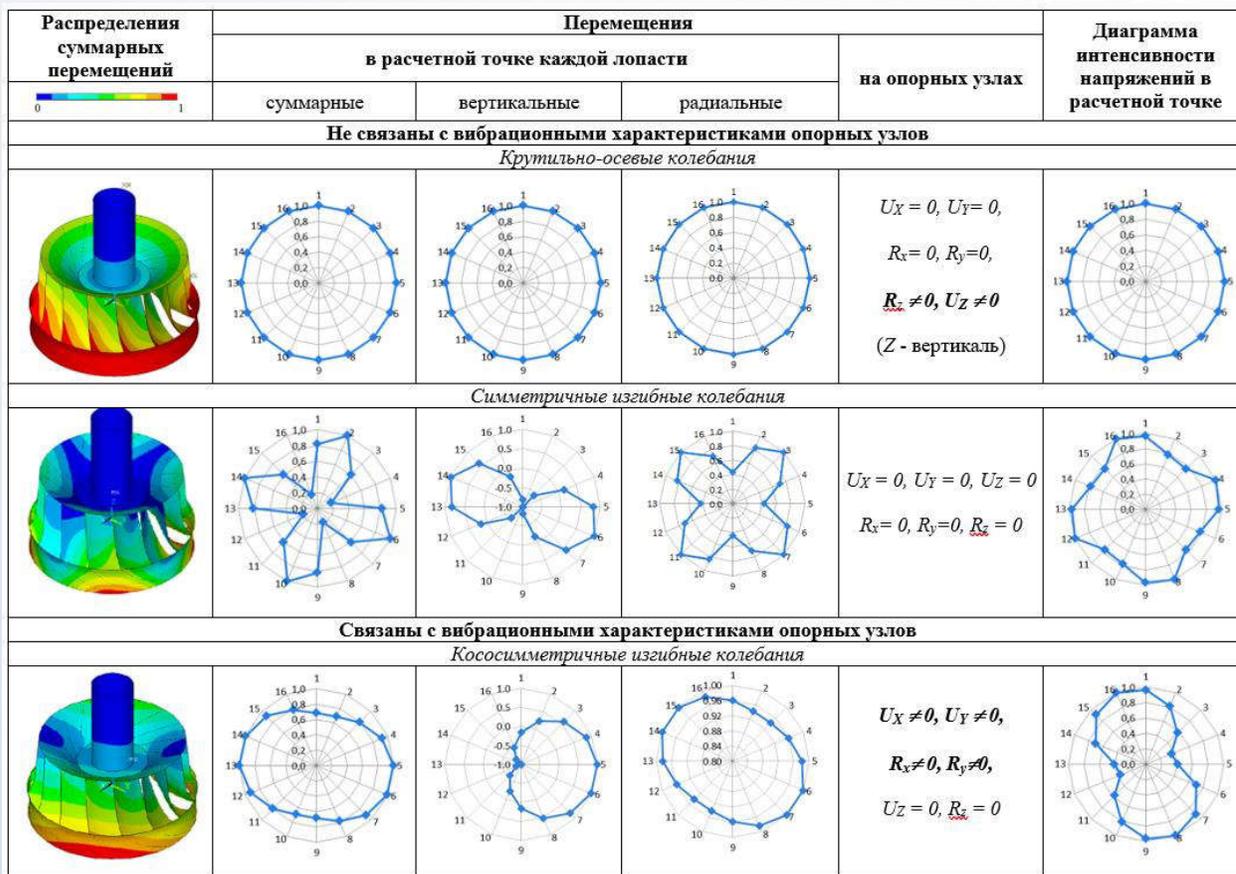


Обратная задача

- 1
 - ω_i (СЧ) и (СФ):
 - $\{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i = 1$
- 2
 - Коэффициенты участия:
 - $\gamma_i = \{\Phi\}_i^T [M] \{D\}$
- 3
 - Эффективная масса:
 - $M_{ei} = \frac{\gamma_i^2}{\{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i}$
- 4
 - Коэффициенты моды A_i :
 - $A_i \sim \gamma_i \{r\}_i = \omega_i A_i \{\Phi\}_i$

Определение динамических напряжений без решения междисциплинарной пространственной нестационарной задачи (гидродинамика + прочность)

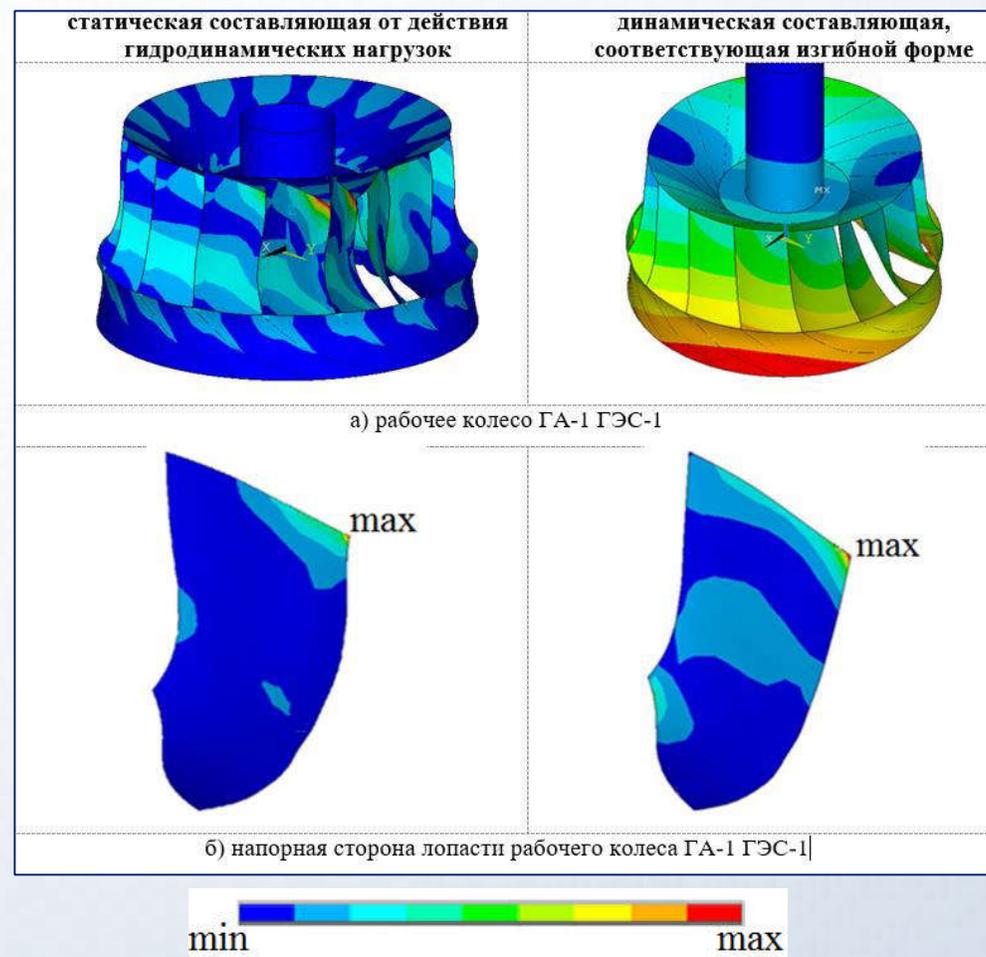
Динамические напряжения – РО ГТ



СФ на воздухе и в воде идентичны

Достаточно определить коэффициент пересчета частоты

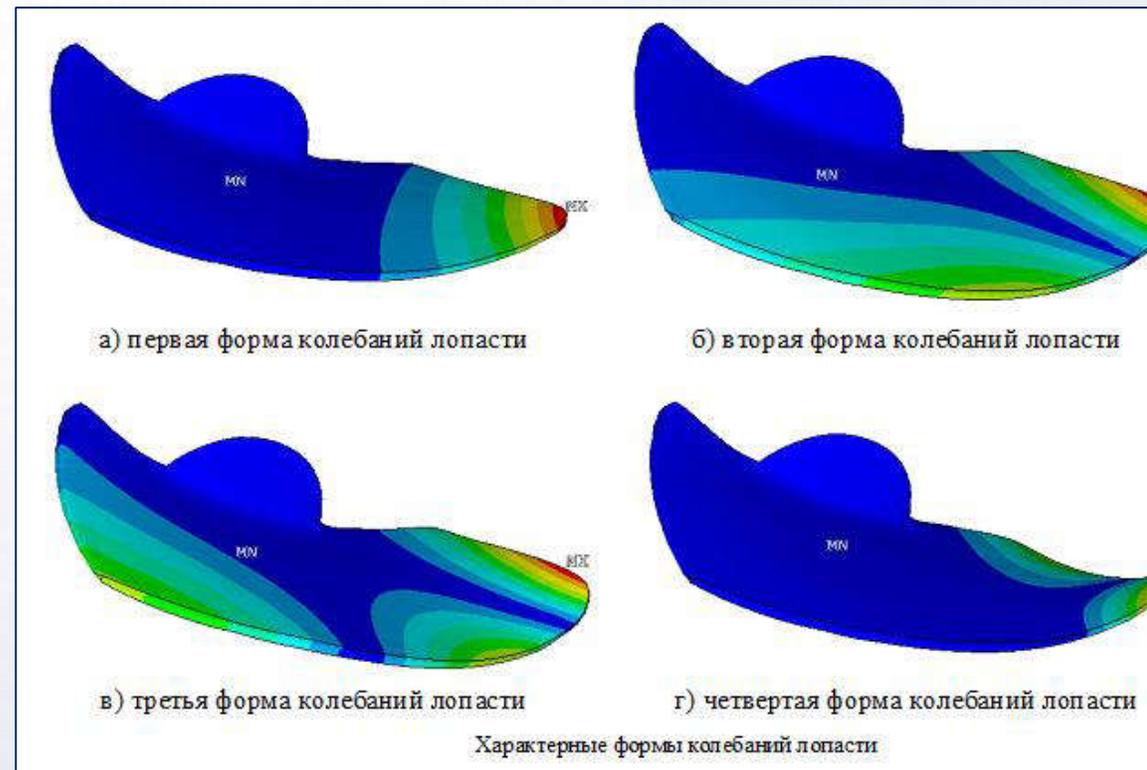
Разброс динамических напряжений объясняется возбуждением соответствующей СФ. Максимальные динамические напряжения в лопастях РО РК на СЧ могут отличаться в 3-5 раз



ПРИКЛАДНЫЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Динамические напряжения – ПЛ ГТ

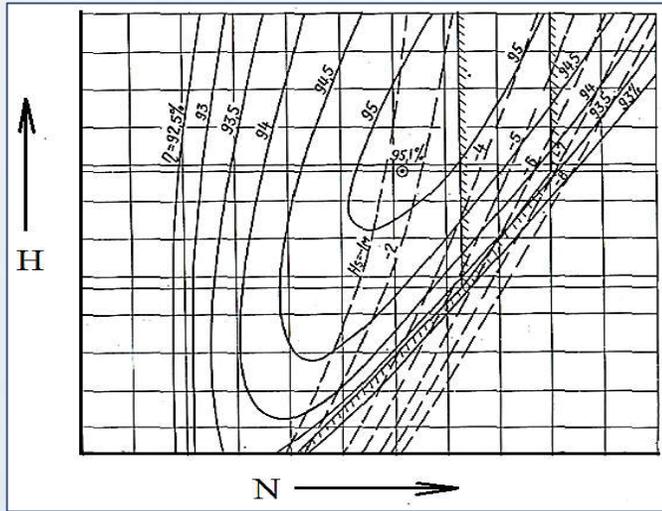
№ формы РК	Частота, Гц	Распределение по лопастям	№ формы РК	Частота, Гц	Распределение по лопастям
<i>Первая форма лопасти $\Delta f = 4,0\%$</i>			<i>Третья форма лопасти $\Delta f = 2,0\%$</i>		
1	60.7		13	127.5	
2	62.1		14	128.2	
3	62.4		15	128.3	
4	62.7		16	128.7	
5	62.7		17	129.2	
6	63.2		18	130.1	
<i>Вторая форма лопасти $\Delta f = 1,7\%$</i>			<i>Четвертая форма лопасти $\Delta f = 5,2\%$</i>		
7	96.2		19	150.5	
8	96.7		20	151.4	
9	96.8		21	151.5	
10	97.2		22	154.7	
11	97.3		23	156.0	
12	97.9		24	158.5	



Разброс СЧ лопастей одного РК составляет $\sim 2,5$ Гц

Разница в динамических напряжениях в разных лопастях ПЛ РК объясняется возбуждением соответствующей СЧ

Динамические напряжения

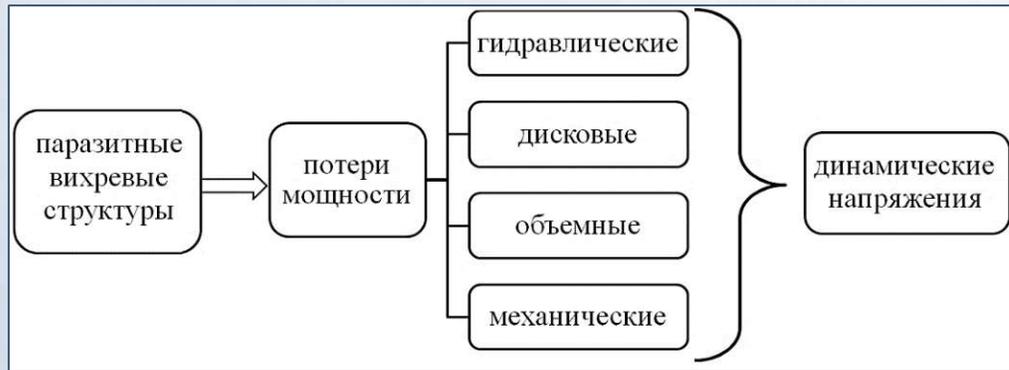
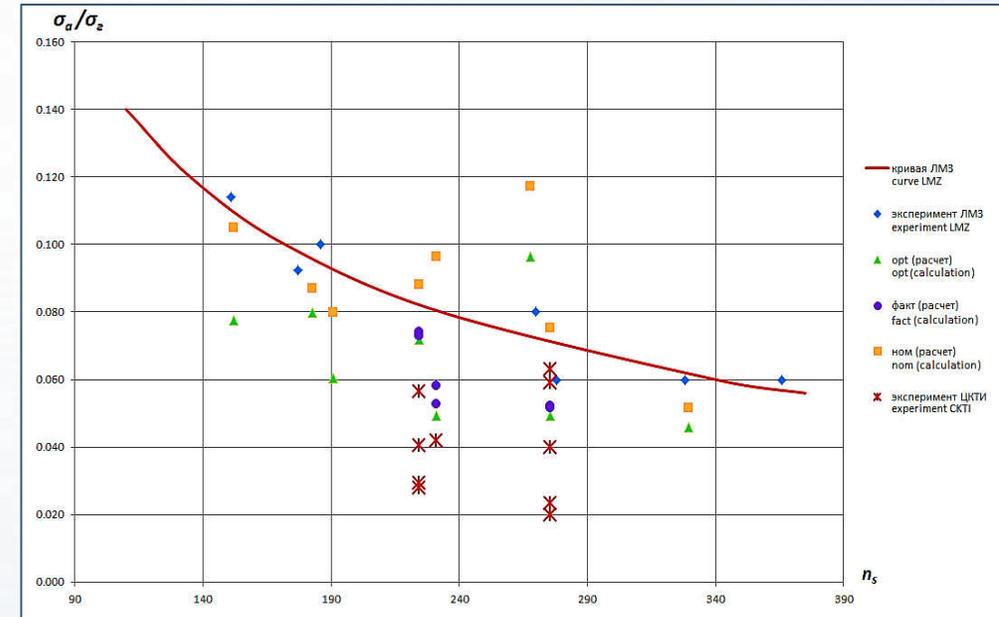


Пример эксплуатационной характеристики

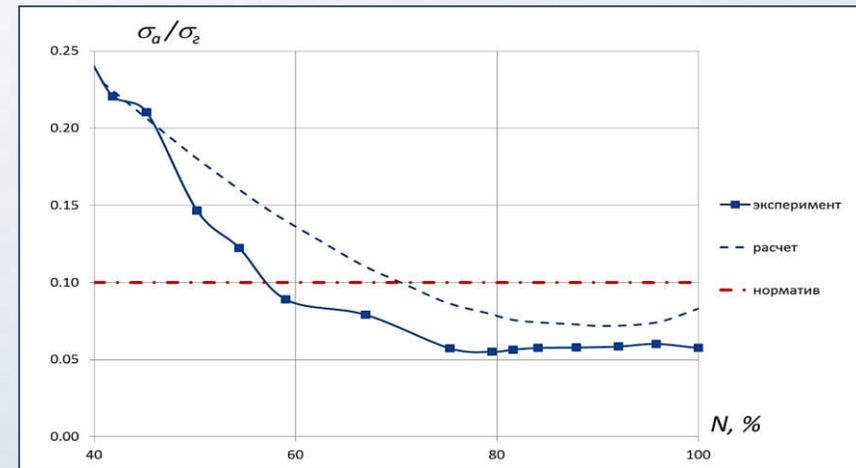
$$\Delta N_i = \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} N_i$$

$$\sigma_a = \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} \sigma_2$$

Энергетический метод

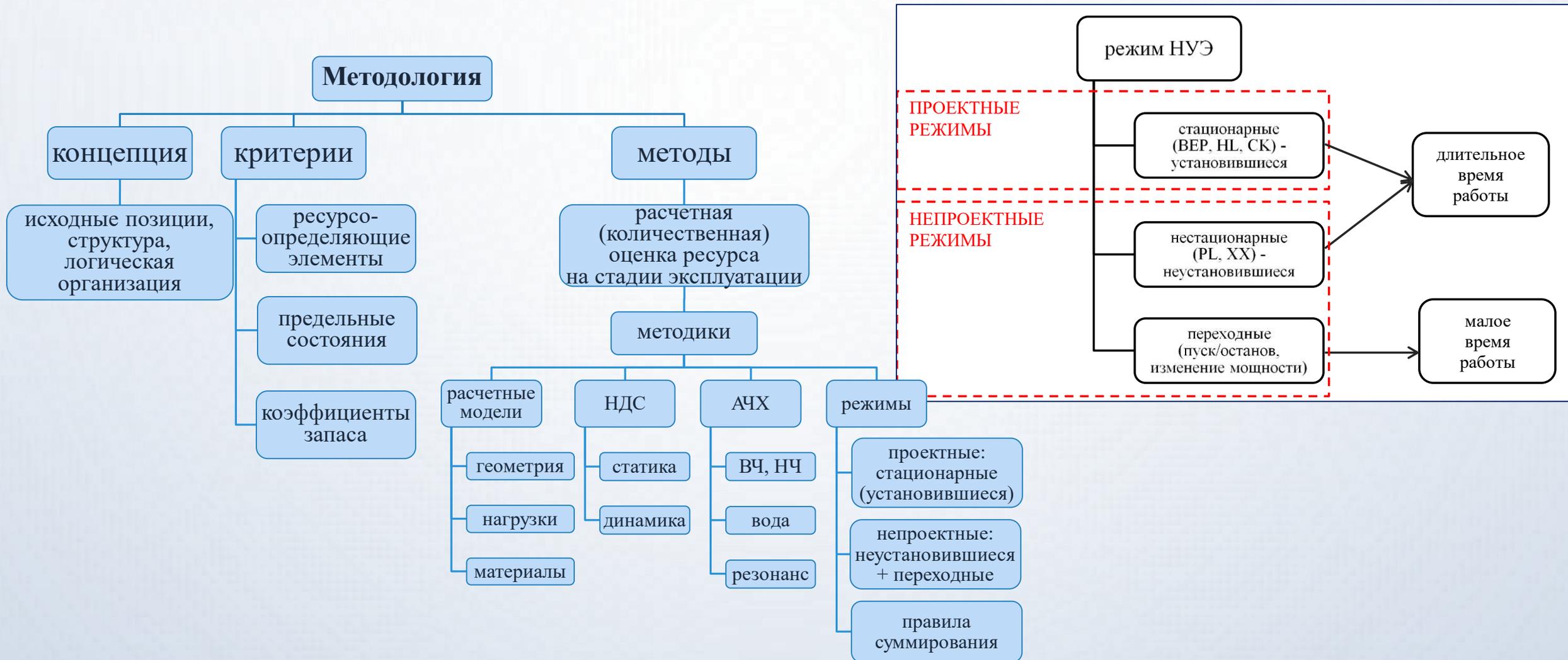


Механизм появления динамических напряжений



Динамические напряжения могут быть интегрально оценены из энергетических соображений (оценка сверху) – не требуется сложный гидродинамический расчет

МЕТОДОЛОГИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РЕСУРСА



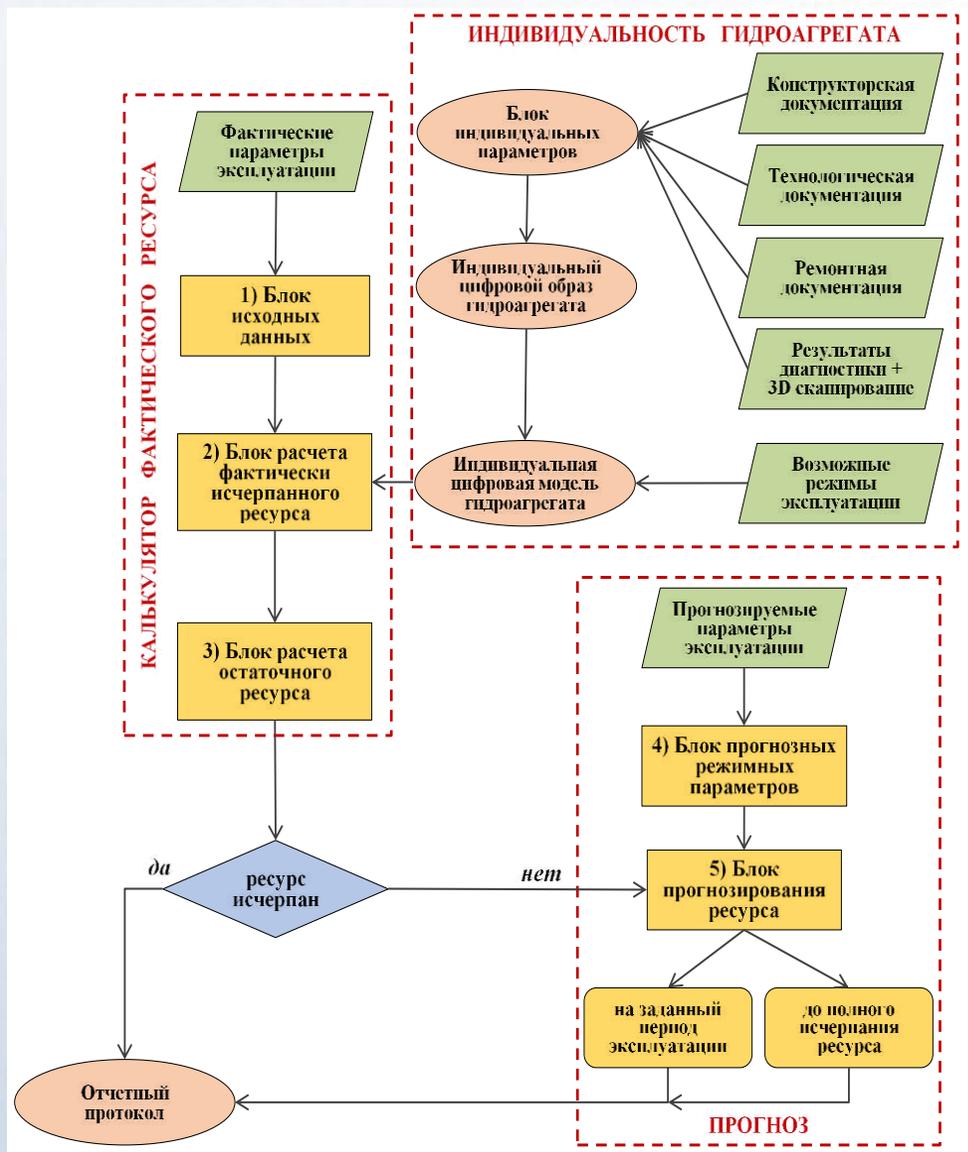
Решаемая проблема: создание единого системного подхода к оценке и прогнозированию ресурса ГТ в условиях фактической эксплуатации

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА (УСТАЛОСТЬ)

1. Расчет статических нагрузок в идеальном состоянии для режима номинальной мощности
2. Оценка неравномерности распределения нагрузок в межлопастных каналах
3. Перерасчет статических нагрузок с учетом неидеальности решетки обтекаемых профилей
4. Учет локальных геометрических особенностей лопастной системы (разнотолщинность, галтели)
5. Расчет НДС (статика) для режимов ХХ и номинальной мощности с учетом индивидуальной геометрии РК и особенностей обтекания
6. Определение НДС РК (статика) во всем диапазоне режимов эксплуатации
7. Формирование режимных блоков
8. Определение частотного диапазона внешних нагрузок
9. Модальный анализ ГА без учета присоединенной массы жидкости
10. Определение собственных частот и форм на воздухе и в воде в диапазоне действия внешних нагрузок
11. Определение относительных динамических напряжений на частотах, близких к резонансным
12. Определение интегральной величины динамических напряжений энергетическим методом
13. Определение динамических напряжений обратным методом по виброотклику
14. Корректировка результатов натурных экспериментов (при наличии) с учетом местоположения датчика и неучтенных погрешностей тензометрирования
15. Нормирование относительных динамических напряжений на базе пп.11-14
16. Расчет повреждаемости за весь период эксплуатации с учетом переходных и пусковых режимов
17. Оценка усталостной прочности и расчет остаточного ресурса

Алгоритм реализован в программном продукте

Режимный ресурсный калькулятор

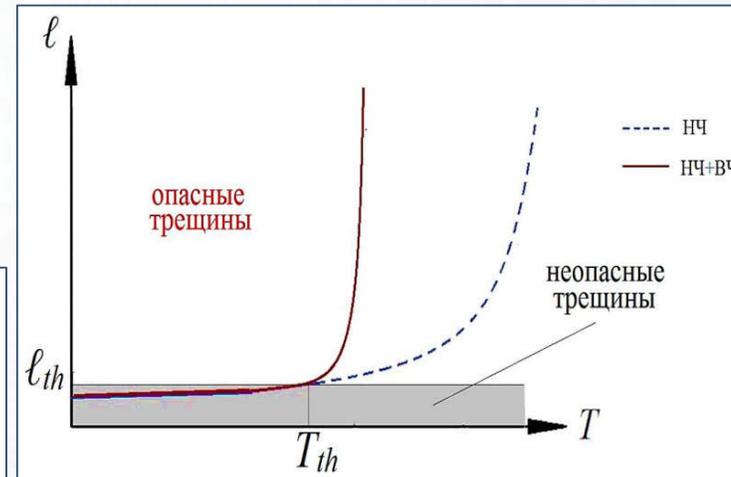
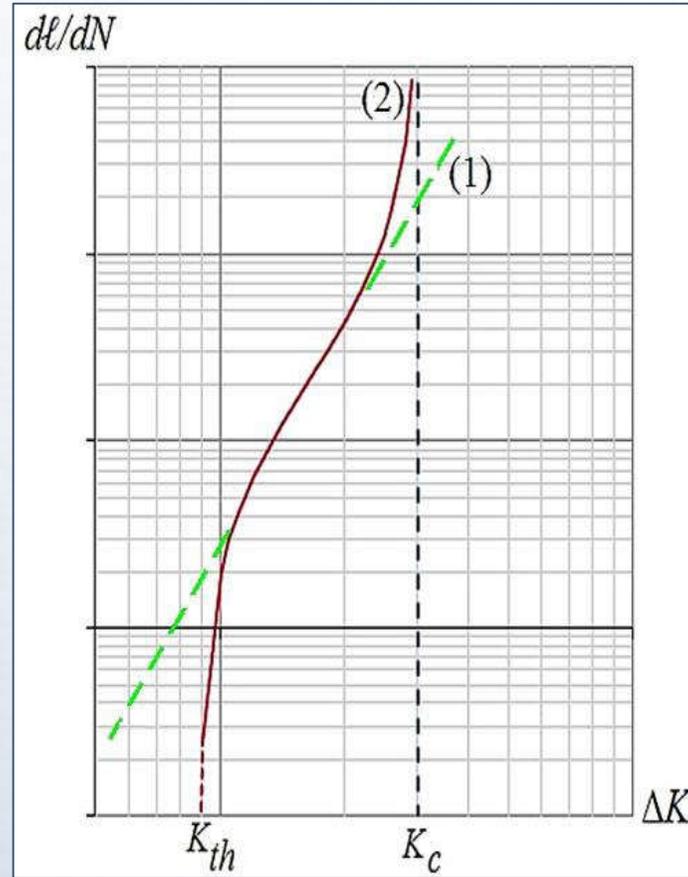


Условия	Фрагмент сводной информации по ресурсным характеристикам		
$\lambda_{\sigma} < [\lambda_{\sigma}]$ $\lambda_{кр} < [\lambda_{\sigma}]$	<i>Результаты расчета</i>		
	<i>фактические данные</i>		
	фактическое накопленное усталостное повреждение	λ_{σ}	0.952
	остаточное усталостное повреждение	$\lambda_{ост}$	0.048
	исчерпанный ресурс, %		95.2%
	<i>прогноз</i>		
	прогнозируемое к следующему КР повреждение	$\lambda_{кр}$	0.973
	остаточный ресурс, %		4.8%
остаточный ресурс, год	$T_{ост}$	16.59	
остаточный ресурс, тыс. час	$t_{ост}$	79.6	
$\lambda_{\sigma} < [\lambda_{\sigma}]$ $\lambda_{кр} \geq [\lambda_{\sigma}]$	<i>Результаты расчета</i>		
	<i>фактические данные</i>		
	фактическое накопленное усталостное повреждение	λ_{σ}	0.989
	остаточное усталостное повреждение	$\lambda_{ост}$	0.011
	исчерпанный ресурс, %		98.9%
	<i>прогноз</i>		
	прогнозируемое к следующему КР повреждение	$\lambda_{кр}$	РЕСУРС ИСЧЕРПАН
	остаточный ресурс, %		1.1%
остаточный ресурс, год	$T_{ост}$	3.12	
остаточный ресурс, тыс. час	$t_{ост}$	15.0	
$\lambda_{\sigma} \geq [\lambda_{\sigma}]$	<i>Результаты расчета</i>		
	<i>фактические данные</i>		
	фактическое накопленное усталостное повреждение	λ_{σ}	РЕСУРС ИСЧЕРПАН
	остаточное усталостное повреждение	$\lambda_{ост}$	РЕСУРС ИСЧЕРПАН
	исчерпанный ресурс, %		100.0%
	<i>прогноз</i>		
	прогнозируемое к следующему КР повреждение	$\lambda_{кр}$	РЕСУРС ИСЧЕРПАН
	остаточный ресурс, %		0.0%
остаточный ресурс, год	$T_{ост}$	РЕСУРС ИСЧЕРПАН	
остаточный ресурс, тыс. час	$t_{ост}$	РЕСУРС ИСЧЕРПАН	

АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА (ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ)



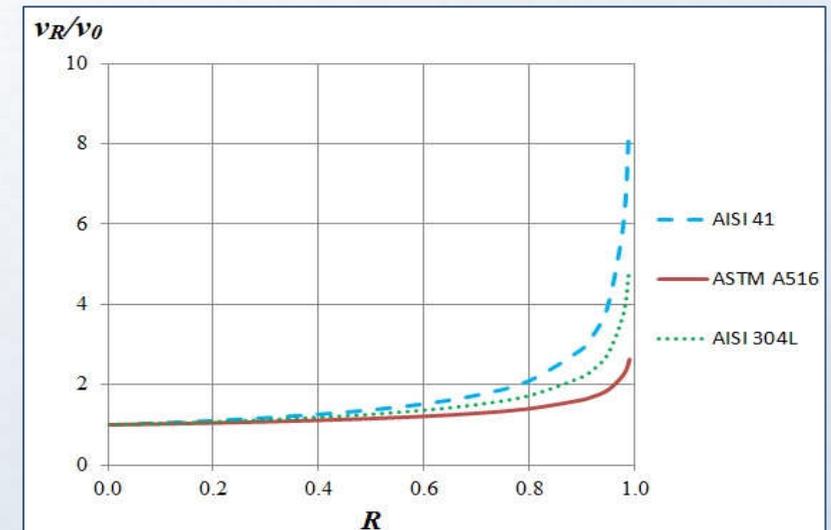
Трещина становится опасной, когда на ее развитие начинают влиять ВЧ нагрузки



$$\frac{d\ell}{dN} = C \cdot \Delta K^n$$

$$\Delta K^{ВЧ} \geq K_{th}$$

$$\ell_{th} = \ell(K_{th})$$



Влияние R на скорость роста трещины

Ресурс определяется предельно-допускаемой длиной трещины

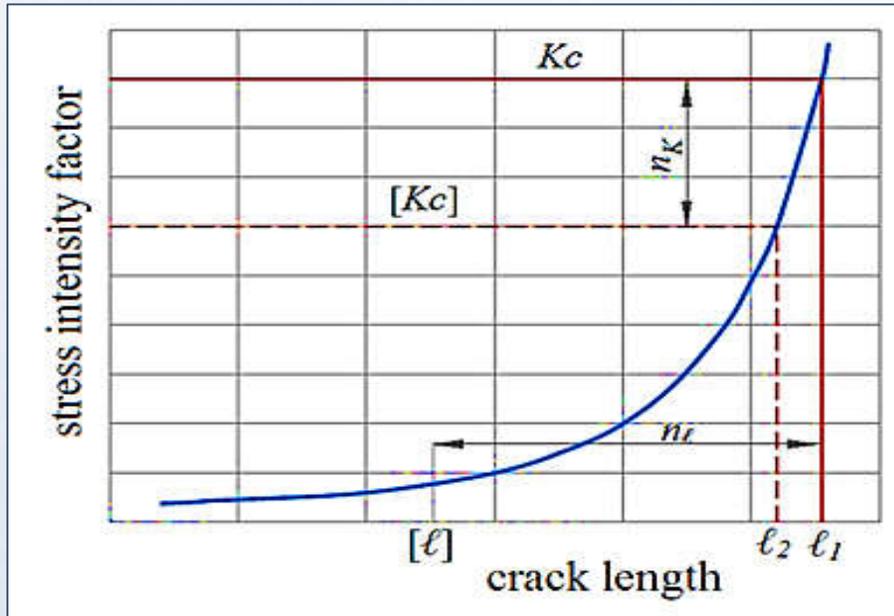
АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА (ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ)

1. Определение характеристик трещиностойкости материала K_C и K_{th} .
2. Определение спектрального состава и амплитуды внешних нагрузок/внутренних напряжений.
3. Выделение ВЧ и НЧ составляющих.
4. Расчетное моделирование трещин с учетом опыта эксплуатации и диагностирования (аналитика+ FEA).
5. Определение напряженного состояния рассматриваемого элемента, в том числе локального в зоне вершины трещины.
6. Построение расчетной зависимости размаха КИН от длины трещины $\Delta K(\ell)$ от действия ВЧ-нагрузок.
7. Определение длины трещины, соответствующей пороговому значению КИН - $\ell_{th} = \ell(K_{th})$.
8. Построение расчетной зависимости $K(\ell)$ от действия эксплуатационных нагрузок.
9. Определение допускаемой длины трещины $[\ell]$ из условия трещиностойкости.
10. Определение допускаемого подрастания трещины (ресурс в терминах длины трещин):

$$\Delta \ell = \ell_{th} - \ell(t).$$

11. Определение допускаемого количества циклов $[N]$ или допускаемого времени эксплуатации $[T]$ до достижения трещиной допускаемой длины: $[N] = N([\ell])$ или $[T] = T([\ell])$.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА – РЕЗУЛЬТАТЫ (ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ)



$$[\ell] = \min\{\ell_1/n_c; \ell_2\}$$

$$n_c = 2.0 \div 2.5$$

$$\ell_1 = \ell(K_c)$$

$$\ell_2 = \ell([K_c])$$

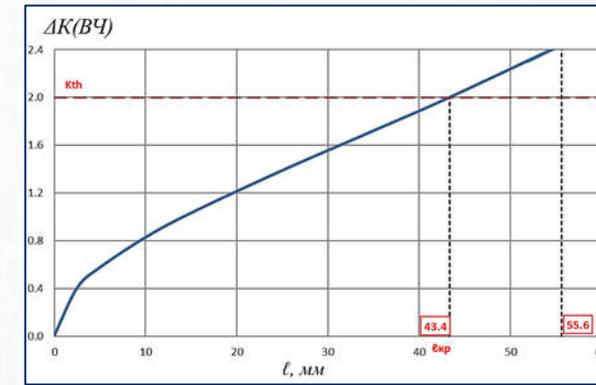
$$[K_c] = K_c/n_K$$

$$n_K = 1.5$$

$$[N] = N([\ell])$$

ИЛИ

$$[T] = T([\ell])$$



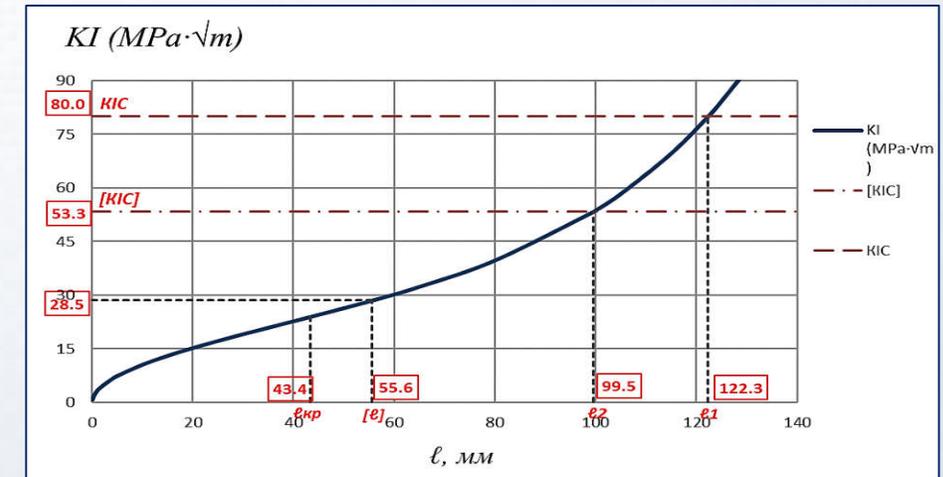
$$\sigma_{cr} = 150 \text{ МПа}^{(1)}$$

$$\sigma_a = 9.1 \text{ МПа}^{(1)}$$

$$K_{th} = 2 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}^{(2)}$$

$$K_C = 80 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}^{(3)}$$

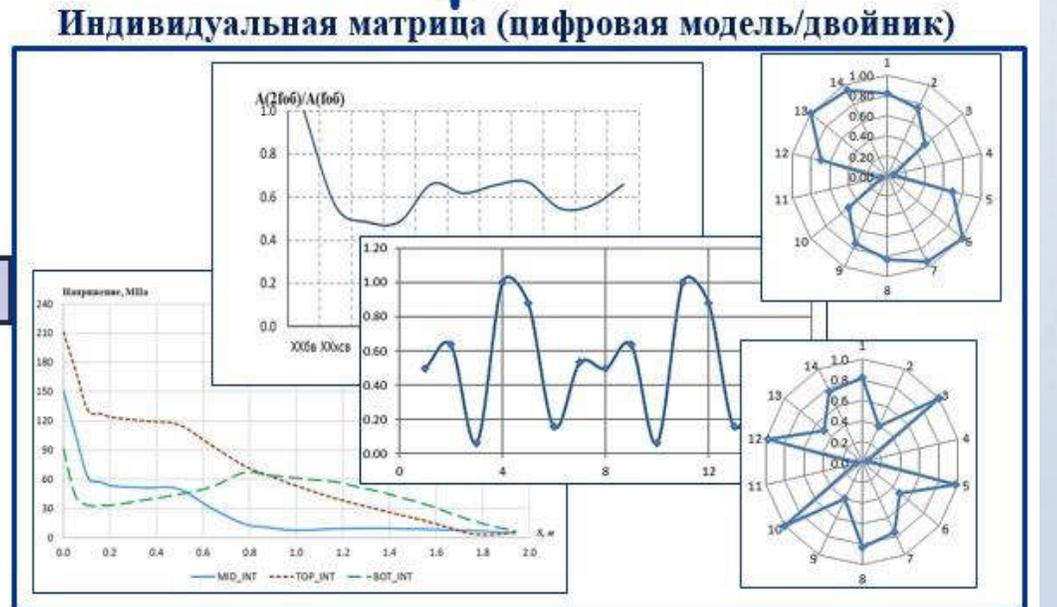
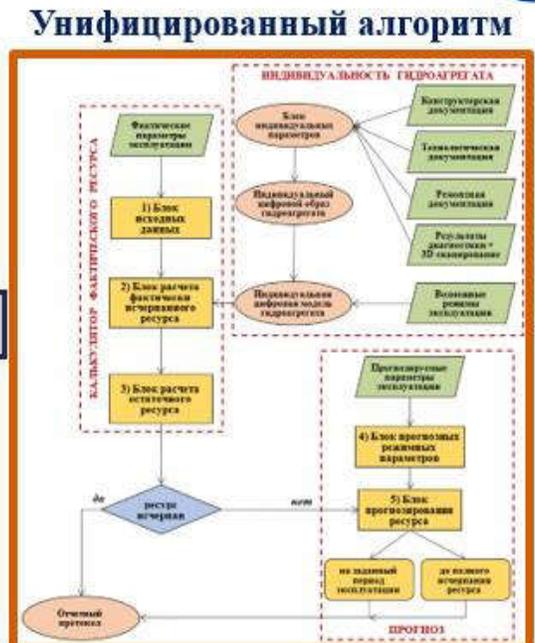
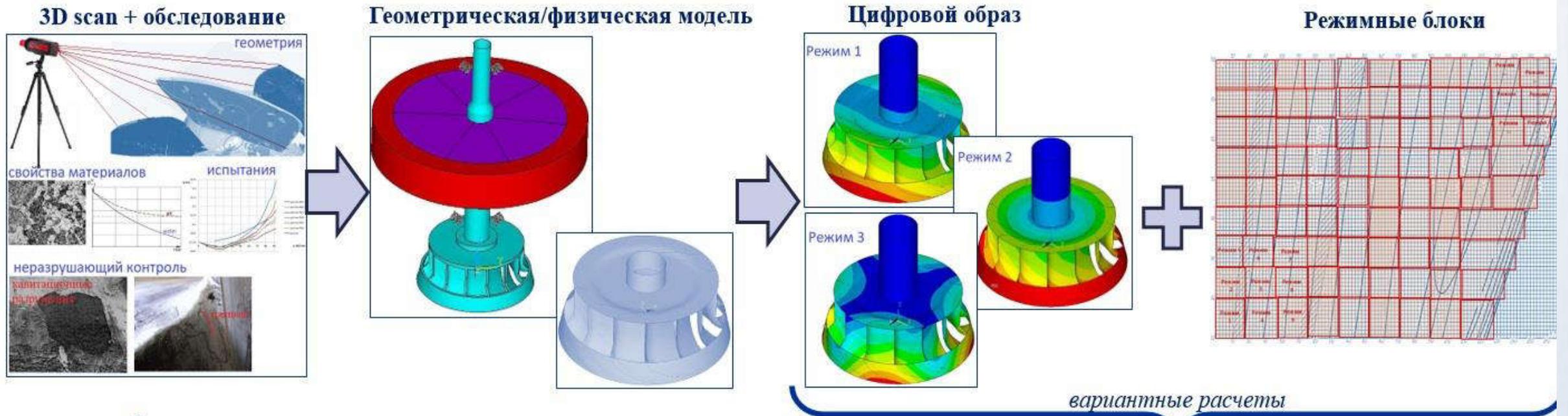
Параметр	Обозначение	Значение
Начальный дефект, мм	ℓ_0	3
Критическая длина трещины, мм	ℓ_{cr}	87.3
Начало быстрого роста трещины, мм	ℓ_{th}	44.4
Допускаемое подрастание, мм	$\Delta \ell$	42.9
Продолжительность подрастания (циклы)	ΔN	$9.3 \cdot 10^8$
Продолжительность подрастания (время), час	ΔT	6 230
Продолжительность медленного роста трещины (циклы)	N_m	$\sim 1.1 \cdot 10^{10}$
Продолжительность медленного роста трещины (время), час	T_m	$\sim 71\ 139$



К определению пороговой и критической длин трещины

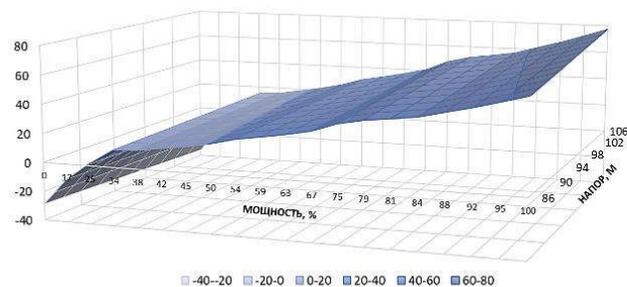
Возможность перехода от регламентных ремонтов
к ремонтам по фактическому техническому состоянию

ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК МАТРИЧНОГО ТИПА (ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ)

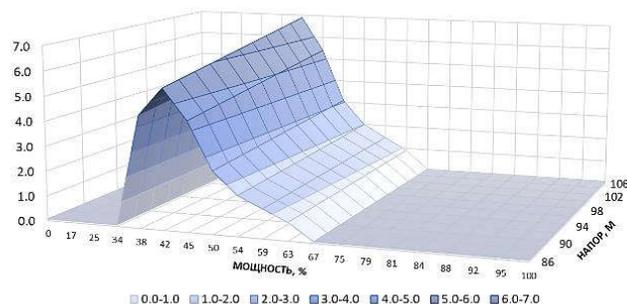


ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК МАТРИЧНОГО ТИПА (РЕАЛИЗАЦИЯ)

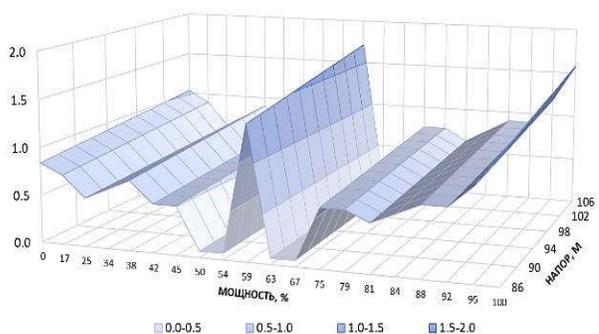
Статические напряжения, МПа



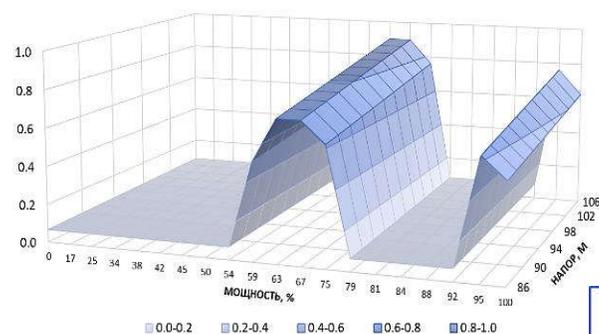
Динамические напряжения (жгутовая пульсация), МПа



Динамические напряжения на оборотной частоте, МПа



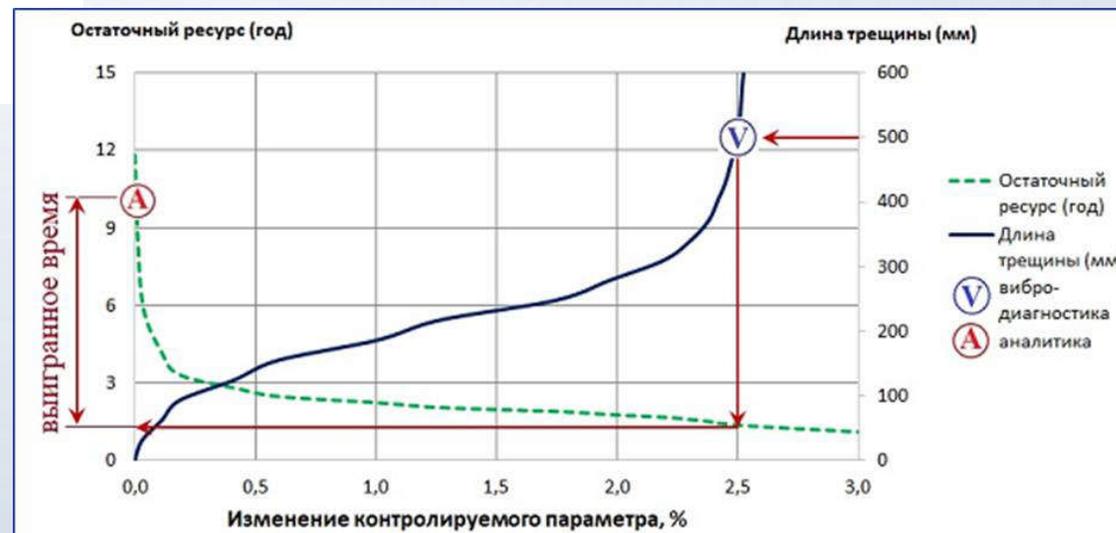
Динамические напряжения на лопаточной частоте, МПа



Напор (м)	Наработка (ч)													Итого (при одинаковом напоре)	
	1387	2251	5210	161	3573	805	2251	709	841	5820	2325	6520	744		
105	1387	2251	5210	161	3573	805	2251	709	841	5820	2325	6520	744	32597	
104	328	524	1519	709	1514	965	4232	1797	2106	12681	7288	12430	4318	50411	
103		322	1286	953	231	744	2835	1449	814	12262	7744	5911	1096	37733	
102	148	148	зона низких КПД				148		оптимальная зона	593	4001	4350	3065	741	13194
101	62	195	КПД				286	1446	1974	10810	6974	3863	1912	27584	
100	195	224	163		101		202	471	307	7439	4490	1991	1559	17142	
99	101				101			101	303	2825	1002	1917	202	6552	
98		61					202	303	303	101	6962	1715	2119	706	12472
97															
Итого (при одинаковой мощности)	2221	3725	8178	1823	7668	2716	10257	6276	7039	62800	35888	37816	11278	197685	

Режимные блоки

Графическая интерпретация фрагмента ЦД ГА матричного типа



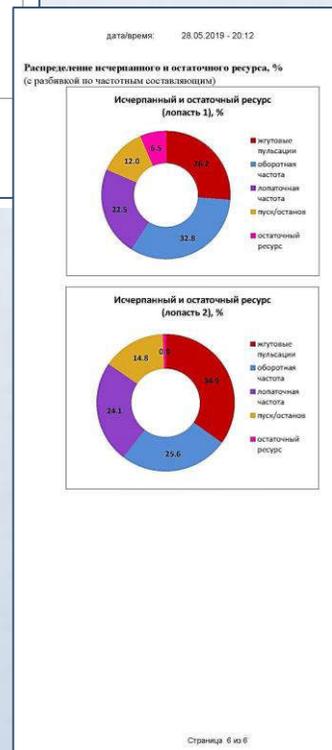
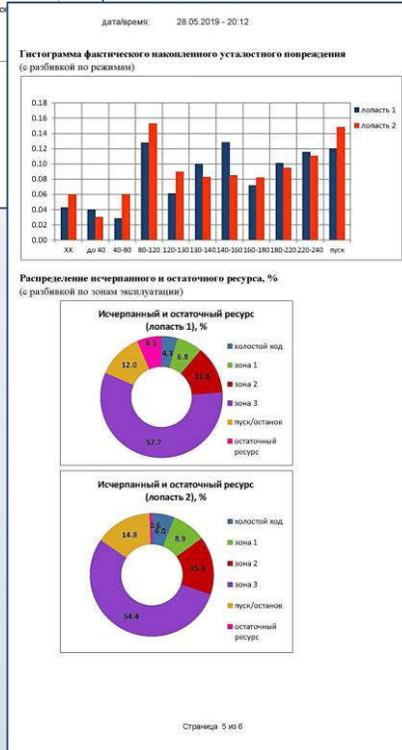
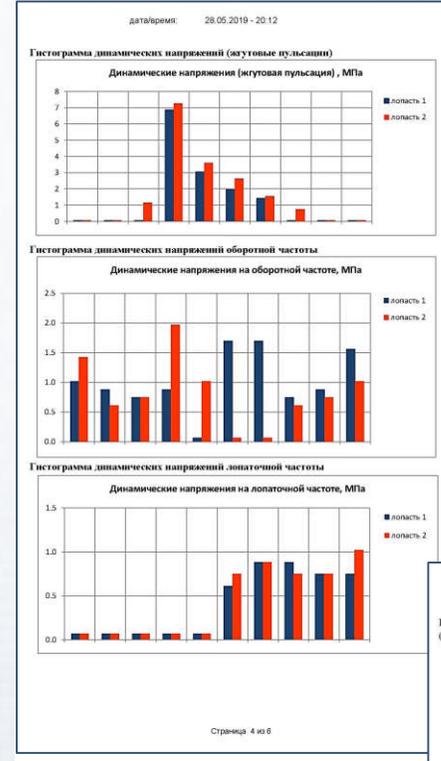
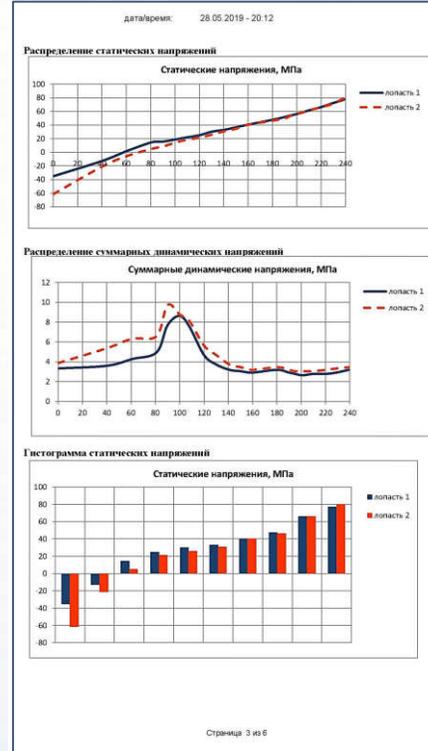
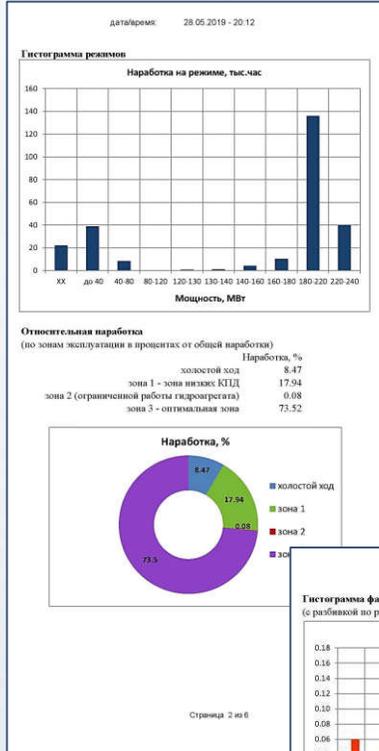
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА – РЕЗУЛЬТАТЫ (УСТАЛОСТЬ)

дата/время: 28.05.2019 - 20.12

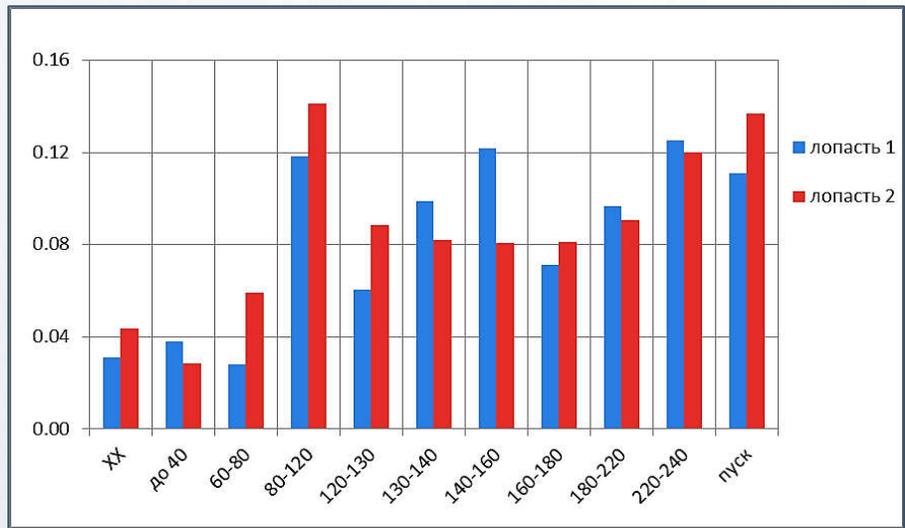
Протокол результатов
стандционный номер

параметр	ГАЗ	
	обозначение	величина
Исходные данные		
номинальная мощность (МВт)	$N_{ном}$	220
частота вращения ГАЗ (1/с)	f_{rot}	2,08
количество лопастей рабочего колеса (шт.)	$Z_{лр}$	14
количество лопаток направляющего аппарата (шт.)	$Z_{НА}$	24
общее количество лет эксплуатации	$T_{обс}$	48,3
общая наработка (час)		261 117
в том числе в динамике мощностей (МВт)		
зона 1 - зона низких КПД	X_{X1}	22 110
	до 40	38 654
	40-80	8 180
зона 2 (ограниченной работы гидроагрегата)	80-120	200
	120-130	716
	130-140	1 000
зона 3 - оптимальная зона	140-160	4 000
	160-180	10 257
	180-220	136 000
	220-240	40 000
количество пусков/остановов	N	6 000
максимальный напор (м)	H_{max}	106
материал лопастей		сталь 06Х12Н1ЗД
предел прочности материала лопасти, МПа	σ_y	858
остаточные напряжения, МПа	$\sigma_{ост}$	100
срок до следующего КР*, год	$T_{кр}$	7
Результаты расчета		
фактические данные		
угловая частота, Гц	$f_{уг}$	0,46
лопаточная частота, Гц	$f_{л}$	29,1
лопаточная частота, Гц	$f_{лр}$	49,9
частота жгутовых пульсаций на рабочем колесе, Гц	$f_{жг} = f_{уг}$	1,62
средняя наработка в год, час	$T_{ср}$	5406
фактическое накопленное усталостное повреждение	$\lambda_{фак}$	0,994
остаточное усталостное повреждение	$\lambda_{ост}$	0,006
исчерпанный ресурс, %		99,4%
прогноз		
прогнозируемое к следующему КР* повреждение	$\lambda_{кр}$	РЕСУРС ИСЧЕРПАН
остаточный ресурс, %		0,6%
остаточный ресурс, год	$T_{ост}$	1,81
остаточный ресурс, тыс. час	$t_{ост}$	9,8
* КР - капитальный ремонт		
Для справки: мощность выходной энергии у статора рабочего колеса (мВт)		
	лопасть 1	21,6
	лопасть 2	22,6

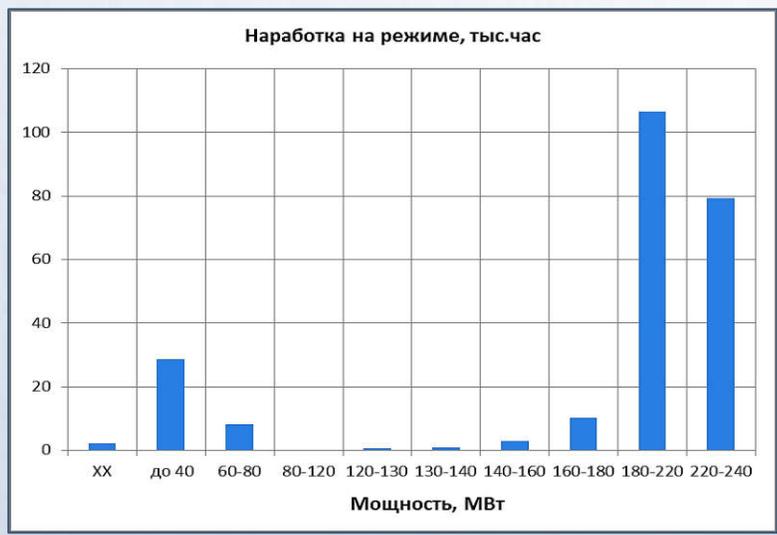
Страница 1 из 6



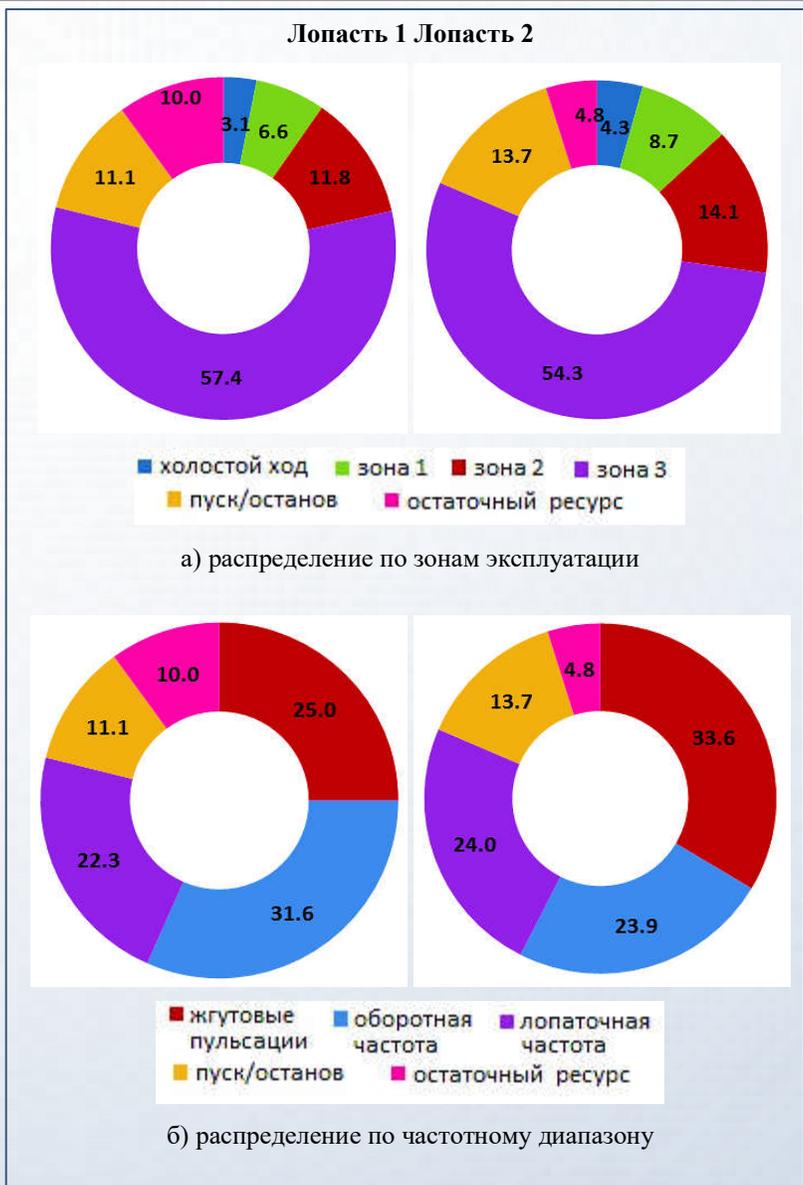
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА – РЕЗУЛЬТАТЫ (УСТАЛОСТЬ)



Гистограмма накопленного усталостного повреждения



Гистограмма режимов



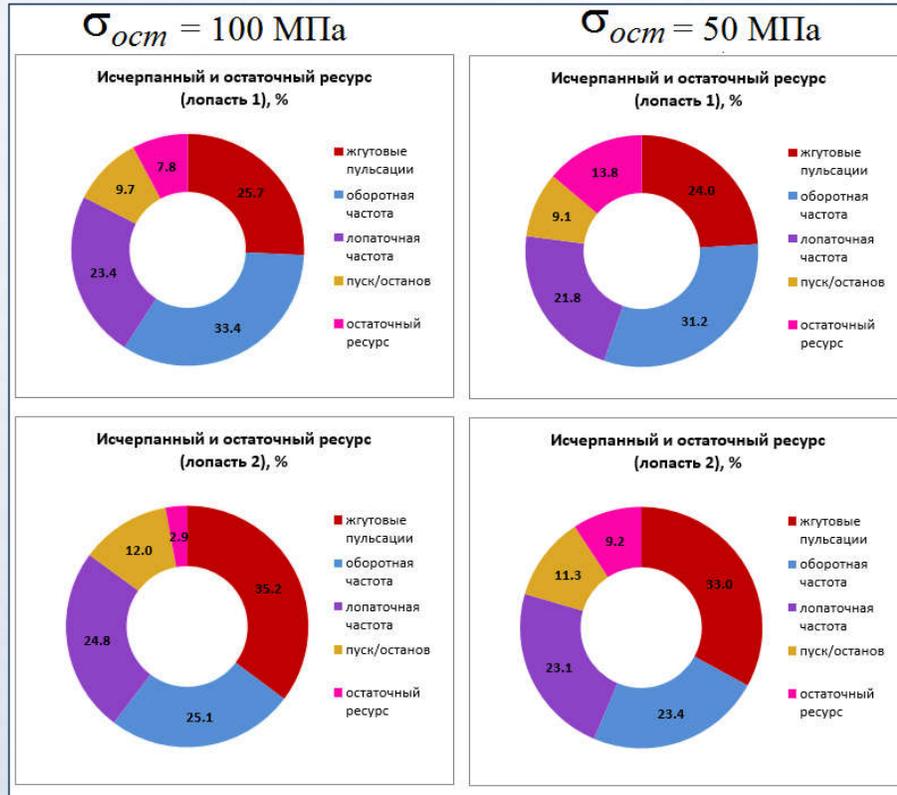
а) распределение по зонам эксплуатации

б) распределение по частотному диапазону

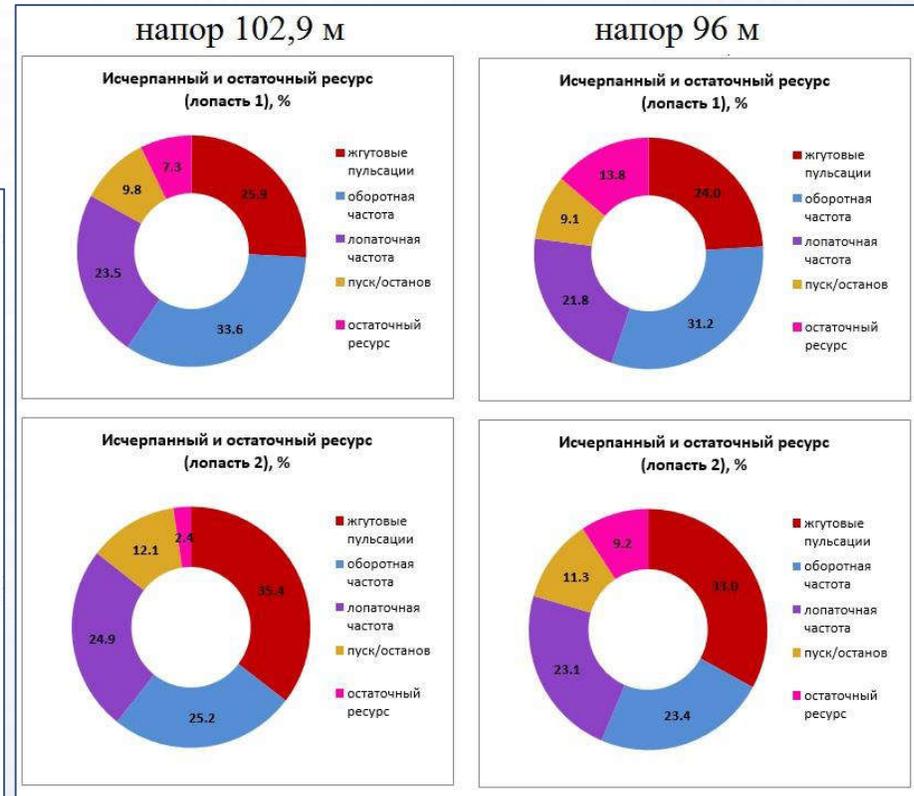
Исчерпанный и остаточный ресурс (%)

Возможность прогноза влияния режимных факторов (мощность) на ресурс ГТ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА – РЕЗУЛЬТАТЫ (УСТАЛОСТЬ)



Влияние остаточных напряжений

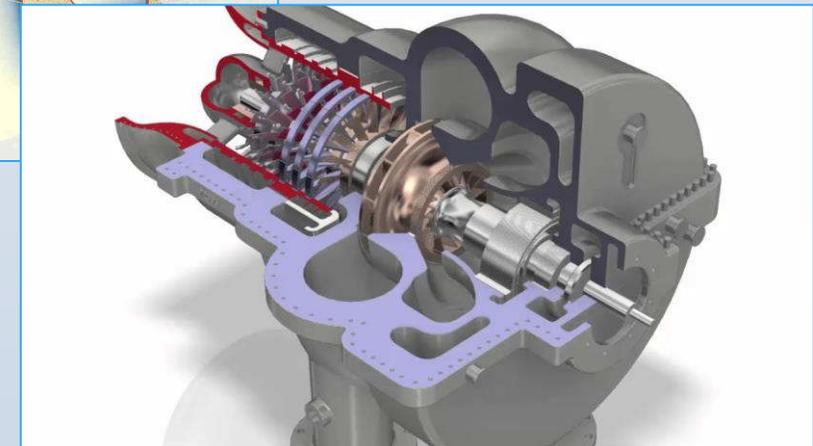
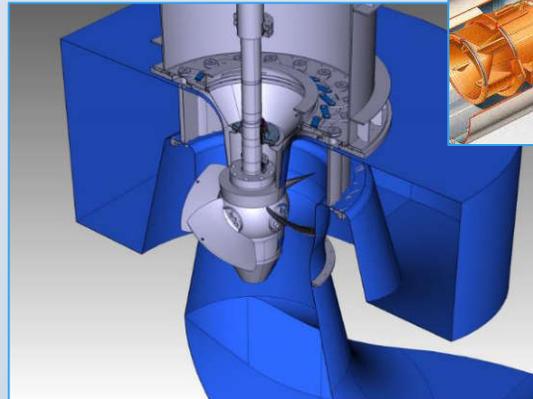
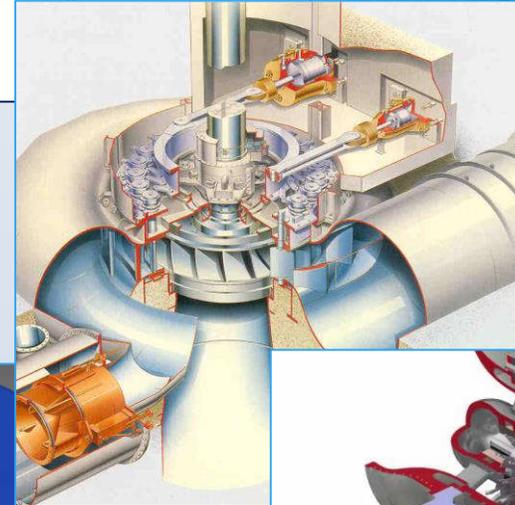
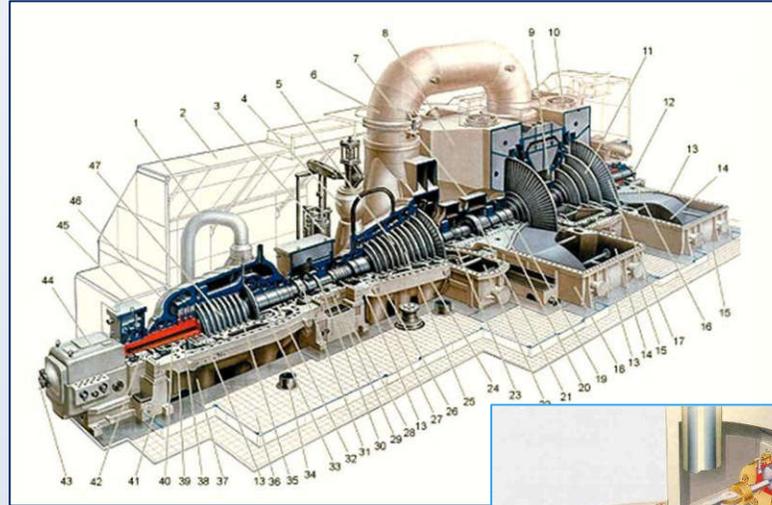


Влияние напора

Возможность прогноза влияния режимных факторов (напор) и качества изготовления и ремонта (остаточные напряжения) на ресурс ГТ

ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

- ✓ Индивидуальность
- ✓ Переменные режимы эксплуатации
- ✓ Длительный срок использования
- ✓ Большие размеры
- ✓ Высокая стоимость
- ✓ Длительный цикл изготовления ресурсопределяющих узлов
- ✓ Катастрофические последствия при аварии
- ✓ Низкий уровень оцифровки информации



ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В рамках единого системного подхода к проблеме оценки и прогнозирования индивидуального ресурса гидротурбин в условиях фактической эксплуатации разработаны методология и комплекс методов оценки предельного состояния и принципов контроля, мониторинга и диагностики состояния ресурсоопределяющих узлов ГТ, которые позволяют научно аргументировать возможность, условия и сроки обеспечения надежной эксплуатации гидротурбин с имеющимися эксплуатационными дефектами в условиях часто меняющихся режимных факторов.
2. Разработана двухкритериальная схема оценки ресурса ГТ по условиям обеспечения усталостной прочности и трещиностойкости, позволяющая прогнозировать ресурс ГТ после длительной работы в широком эксплуатационном диапазоне, учитывая влияние конструктивно-технологических особенностей, специфику режимов использования оборудования и влияние эксплуатационных дефектов.
3. Предложен комплекс мер по изменению принципов контроля, мониторинга и диагностики технического состояния ГТ после длительной эксплуатации в целях раннего выявления признаков начинающегося разрушения:
 - корректировка алгоритмов обработки регистрируемых вибросигналов с акцентом на тренды изменения относительного вклада частотных составляющих на базе предложенных новых диагностических признаков;
 - оптимизация методов, объемов и периодичности контроля технического состояния ГТ на базе полученных индивидуальных ресурсных оценок.
4. Получены количественные оценки влияния конструктивного исполнения, технологических особенностей, режимов работы гидроагрегата и качества проведенных восстановительных ремонтов на напряженно-деформированное состояние и индивидуальный ресурс ГТ после длительной эксплуатации.
5. Разработаны новые инженерные методы расчетной оценки статической и динамической составляющей напряжений во всем эксплуатационном диапазоне, позволяющие отказаться от натурного эксперимента и сложных расчетов с использованием пространственных мультидисциплинарных математических 3D-моделей.
6. Разработан алгоритм прогнозирования ресурса ГТ с учетом индивидуальных конструктивно-технологических особенностей и специфики режимов использования ГТ, реализованный в демонстрационном программном средстве «Режимный Ресурсный Калькулятор», позволяющем прогнозировать индивидуальный ресурс ГТ в зависимости от возможных сценариев эксплуатации.
7. Разработаны концепция цифрового двойника матричного типа и принципы перехода на цифровые технологии при прогнозировании индивидуального ресурса уникального оборудования на примере крупных гидротурбин. С помощью сформированных индивидуальных цифровых двойников матричного типа для ряда крупных гидротурбин (более 10) получены новые результаты о влиянии режимных факторов на индивидуальный ресурс ГТ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Использование результатов диссертационной работы позволит:

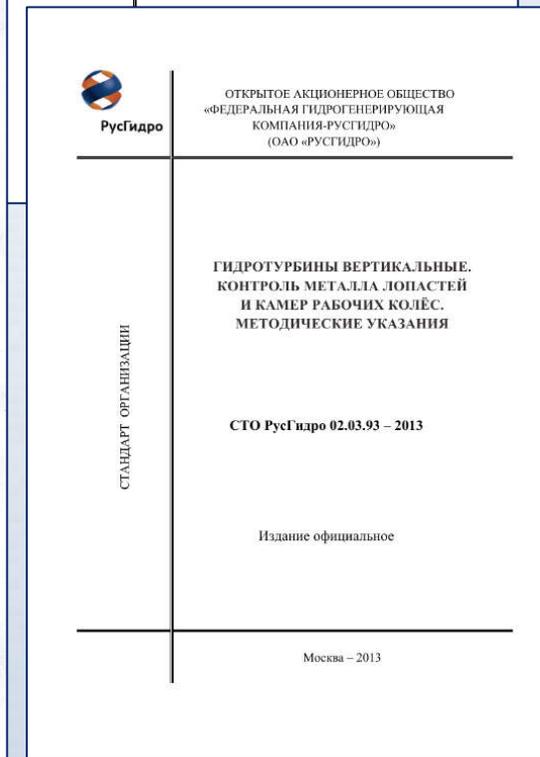
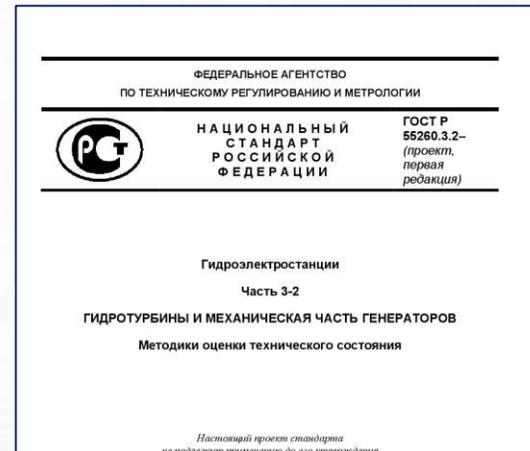
- повысить надежность и безопасность работы гидротурбин при длительных сроках эксплуатации в условиях расширенного эксплуатационного диапазона
- осуществить переход от регламентных плановых ремонтов к ремонтам по фактическому техническому состоянию
- сократить расходы на обслуживание ГТ без снижения уровня ее надежности
- обеспечить повторяемость результатов ресурсных оценок и снизить их субъективность
- расширить функционал и повысить эффективность систем вибромониторинга и вибродиагностики ГА в части ранней идентификации усталостных трещин
- построить эффективную систему управления ресурсом ГТ с учетом результатов сценарного прогнозирования и приоритетных целей собственника оборудования

Результаты могут быть использованы в качестве теоретической базы при проектировании новых гидротурбин, предназначенных для эксплуатации в широком режимном диапазоне, а также при разработке новых нормативных документов по прогнозированию индивидуального ресурса ГТ с учетом влияния режимных факторов.

Предложенные концепции и подходы могут быть адаптированы для иного энергетического оборудования, характеризующегося высокой степенью уникальности.

ВНЕДРЕНИЕ

- Разработка Стандарта ПАО «РусГидро» СТО РусГидро 02.03.93-2013 «Гидротурбины вертикальные. Контроль металла лопастей и камер рабочих колес. Методические указания»
- Разработка Стандарта ПАО «РусГидро» СТО РусГидро 02.03.107-2013 «Гидроэлектростанции. Неразрушающий контроль крепёжных элементов ответственных узлов гидроагрегатов. Методические указания»
- Переработка ГОСТ Р 55260.3.2-2013 «Гидроэлектростанции. Часть 3-2. Гидротурбины. Методики оценки технического состояния» в ГОСТ Р 55260.3.2-XXXX «Гидроэлектростанции. Часть 3-2. Гидротурбины и механическая часть генераторов. Методики оценки технического состояния»
- Разработка «Методических указаний по неразрушающему контролю крепёжных элементов ответственных узлов гидроагрегатов Филиала ПАО «РусГидро» - «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного»
- Реализация инновационного проекта «Система определения предельно допустимых значений параметров технического состояния гидротурбины фонда «Сколково» при выполнении НИОКР «Разработка и тестирование прототипа программного комплекса - системы определения предельно допустимых значений параметров технического состояния гидротурбины на примере рабочего колеса» (грант Фонда содействия инновациям (ФСИ) №3288ГС1/55639 от 27.11.2019), НИОКР «Разработка и испытания опытного образца программного комплекса - системы определения предельно допустимых значений параметров технического состояния гидротурбины» (грант ФСИ №4373ГС2/55639 от 01.12.2021 г.);
- Проведение работ по оценке технического состояния и остаточного ресурса гидроагрегатов и отдельных ресурсоопределяющих узлов на Иркутской Богучанской, Новосибирской, Усть-Илимской ГЭС, Чирюртской ГЭС.



Автор выражает глубокую признательность

- сотрудникам и руководству АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и ОАО «НПО ЦКТИ» за многолетнюю совместную плодотворную работу и помощь при проведении исследований, результаты которых использованы в диссертации
- специалистам ООО «Промгеодезия» и ООО «Промышленные измерения» за содействие в получении необходимых исходных данных по геометрии обследуемого оборудования и выполнение 3d-сканирования узлов ГТ в условиях ГЭС на высоком техническом уровне
- лично Васильеву Ю.С. и Петрене Ю.К. за помощь в постановке задачи, выборе направления и стратегии исследования, трактовке полученных результатов

**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ**

1. Патент 2721514 Российская Федерация, МПК G05B 23/00 (2006.01), СПК G05B 23/00 (2019.08). Способ оценки остаточного ресурса рабочего колеса гидротурбины на запроектных сроках эксплуатации : № 2019111714 : заяв. 07.04.2019 : опубл. 19.05.2020 / Георгиевская Е.В., Георгиевский Н.В., заявитель Георгиевская Евгения Викторовна — 12 с.
2. Патент 2756781 Российская Федерация, МПК G06Q 50/06 (2012.01), G06Q 10/04 (2012.01), СПК G06Q 50/06 (2021.08), G06Q 10/04 (2021.08). Способ долгосрочного прогнозирования индивидуального ресурса гидроагрегата в условиях часто меняющихся режимных факторов : № [2020113095](#) : заяв. 08.04.2020 : опубл. 05.10.2021 / Георгиевская Е.В., Георгиевский Н.В.; заявитель ООО «Центр конструкторско-технологических инноваций» — 19 с.
3. Георгиевская Е.В. Методология оценки и принципы управления ресурсом гидротурбин в условиях фактической эксплуатации. Изд. «Астерион», Санкт-Петербург, 2019.
4. Георгиевская Е.В. Ресурс гидротурбин - гарантия надежности и безопасности эксплуатации ГЭС. Аналитический обзор литературы / Beau Bassin, 2018.
5. Георгиевская Е.В., Башмаков А.О., Васильченко К.И. Усталостные трещины: случайность или закономерность. Гидротехника. 2023. № 1 (70). С. 2-9.
6. Георгиевская Е.В., Васильченко К.И., Штильман В.Б. Высокоточные цифровые модели лопастной системы ПЛ-турбин // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2022. Т. 304. С. 3-14.
7. Георгиевская Е.В., Чеверда В.А., Дергалев С.В. О стандартизации требований к отчетной документации по оценке технического состояния и остаточного ресурса гидроагрегатов Иркутской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2023. № 2. С. 8-14.
8. Георгиевская Е.В. преимущества векторного анализа при оценке вибрационного состояния гидроагрегатов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2022. № 5 (355). С. 199-207.
9. Георгиевская Е.В., Георгиевский Н.В. Управление жизненным циклом уникального энергетического оборудования на примере мощного гидроагрегата. В сборнике: Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста. Материалы V всероссийской НТК. Москва, 2022. С. 101-105.
10. Георгиевская Е.В. О тенденциях и перспективах цифровизации на гидротехнических сооружениях и гидроэнергетических объектах. Гидротехника. 2022. № 1 (66). С. 54-58.
11. Georgievskaja E. Predicting the fatigue life of hydraulic unit under variable operating conditions. Structural Integrity. 2022. Т. 25. С. 57-64.
12. Георгиевская Е.В., Георгиевский Н.В. Цифровой двойник гидроагрегата: Новое или хорошо забытое старое? // Гидротехника, 2021, 2(63), с. 90-93
13. Georgievskaja E. Analytical system for predicting cracks in hydraulic turbines // Engineering Failure Analysis. – 2021. [Volume 127](#). – С. 105489.
14. Georgievskaja E. Destruction of the hydraulic unit shaft: why it is possible? // Forces in Mechanics - Forces in Mechanics. – 2021. – Т. 4. – С. 100026.
15. Георгиевская Е. В. К вопросу раннего обнаружения трещин в рабочих колесах гидроагрегатов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – №. 3. – С. 40-46. DOI: [10.31857/S0235711921030044](#)
16. E. Georgievskaja, "Limitations of Modern Diagnostic and Prognostic Systems for a Hydraulic Unit's Health," (in en), Eng, Article vol. 2, no. 1, pp. 27-42, 2021-02-01 2021, doi: 10.3390/eng2010003. <https://www.mdpi.com/2673-4117/2/1/3>
17. E. Georgievskaja, "Impact of cracks on vibration parameters and lifetime of hydraulic units," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, vol. 1023, no. 1: IOP Publishing, p. 012012. doi:10.1088/1757-899X/1023/1/012012
18. Георгиевская Е.В., Георгиевский Н.В. Цифровой двойник гидроагрегата: стереотипы и «грязные данные». Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2021. Т. 299. С. 69-76.
19. Georgievskaja E «Predicting the fatigue life of hydraulic unit under variable operating conditions», Structural Integrity and Fatigue Failure Analysis; (в печати)
20. E. Georgievskaja, "Predictive analytics as a way to smart maintenance of hydraulic turbines," Procedia Structural Integrity, vol. 28, pp. 836-842, 2020.
21. Georgievskaya E. V. Assessment of Strength and Useful Life of Hydraulic Units with Partial Replacement of Equipment // Power Technology and Engineering 53(3), 641-643, 2020.
22. Георгиевская Е.В. Оценка надежности энергетического оборудования на ранних стадиях проектирования. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 4 (342). С. 150-157.
23. Georgievskaja E. Effect of cracks on dynamic parameters and lifetime of hydraulic units // Procedia Structural Integrity 22 (2019) 229–234
24. Georgievskaja E. Hydraulic turbines lifetime in terms of fracture mechanics. Engineering Failure Analysis. 2019. Т. 105. С. 1296-1305.
25. Георгиевская Е.В. Проблемы обеспечения прочности и долговечности гидроагрегатов при частичной замене оборудования. Гидротехническое строительство. 2019. № 9. С. 14-16.
26. Георгиевская Е.В. Опыт разработки и применения стандартов по контролю состояния рабочих колес и крепежных элементов гидроагрегатов. Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 291. С. 29-35.
27. Георгиевская Е.В. Возможности и недостатки современных систем диагностики гидроагрегатов. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 4-2 (336). С. 3-12.
28. Georgievskaja E. V. The application of fracture mechanics to predict the Francis hydraulic turbines lifetime. Power engineering: research, equipment, technology. 2018;20(9-10):71-78. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-71-78>
29. Георгиевская Е.В. Концепция оценки ресурса гидротурбин после длительной эксплуатации. В сборнике: Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем. материалы и доклады. 2018. С. 50-56

27. Георгиевская Е.В. Современные подходы к управлению ресурсом гидротурбин. В сб.: Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. 2018. С. 65-74.
28. Georgievskaja E. Justification of the hydraulic turbines lifetime from the standpoint of the fracture mechanics. В сб.: Procedia Structural Integrity. 2018. С. 971-975
25. Георгиевская Е.В. Применение механики разрушений для прогнозирования ресурса радиально-осевых гидротурбин. Известия высших учебных заведений.. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 71-78.
26. Абушик Г.В., Георгиевская Е.В., Левченко А.И., Гаврилов С.Н. Долговечность и ресурс агрегатов тепловых, атомных и гидроэлектростанций. Энергетик. 2018. № 2. С. 18-22.
27. Георгиевская Е.В. Экспресс-оценка динамических напряжений в элементах гидротурбин в процессе эксплуатации. Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2018. Т. 287. С. 55-62.
28. Георгиевская Е.В. Оценка долговечности гидротурбин с позиций механики разрушений. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 4-1 (330). С. 27-32.
29. Георгиевская Е.В. Планово-предупредительные и восстановительные ремонты как инструмент управления ресурсом гидроагрегатов. Гидротехника. 2018. № 1. С. 48.
30. Георгиевская Е.В. Обеспечение надежности и безопасности эксплуатации гидроагрегатов за пределами проектного срока службы. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7-8. С. 33-42.
31. Георгиевская Е.В. Причины снижения несущей способности конструктивных элементов гидротурбин при длительной эксплуатации. Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2017. № 2. С. 12-19.
32. Георгиевская Е.В. О связи вибраций и динамических напряжений в лопастной системе гидротурбин. Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 283. С. 54-65.
33. Судаков А.В., Георгиевская Е.В. Концепция "приемлемого риска" как инструмент продления ресурса гидротурбин. Тяжелое машиностроение. 2017. № 10. С. 14-17.
34. Петреня Ю.К., Георгиевская Е.В. Проблемы и перспективы оценки ресурса в гидроэнергетике. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 5. С. 3-18.
35. Васильев Ю.С., Петреня Ю.К., Георгиевская Е.В. Ресурс гидротурбин: подходы, мнения, тенденции. обзор российской литературы. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 6. С. 59-73.
36. Данюшевский И.А., Георгиевская Е.В., Гаврилов С.Н., Власова Л.Д. Об оценке прочности и ресурса энергооборудования с позиций современных возможностей. Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10. № 3. С. 237-242.
37. Георгиевская Е.В. Влияние переходных процессов на надежность и ресурс мощных турбо- и гидроагрегатов. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 3 (323). С. 22-30.
38. Васильев Ю.С., Петреня Ю.К., Георгиевская Е.В. О ресурсах гидротурбин: обзор зарубежной литературы. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 2. С. 184-204.
39. Георгиевская Е.В. Энергетический подход к оценке динамических напряжений в гидротурбинах. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 4. С. 88-97.
40. Георгиевская Е.В. Обоснование методов и сроков диагностики гидротурбин за пределами проектного срока службы. В сб.: Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ - 2016). 2016. С. 120-123.
41. Георгиевская Е.В. Влияние режимных факторов на прочность и ресурс лопастных систем мощных гидротурбин. В сборнике: Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития. Сборник научных трудов IX Международной научно-технической конференции. 2016. С. 13-20.
42. Георгиевская Е.В., Смелков Л.Л. Особенности определения динамических напряжений в лопастях мощных радиально-осевых гидротурбин. Новое в российской электроэнергетике. 2016. № 12. С. 28-43.
43. Георгиевская Е.В. Использование данных on-line мониторинга при оценке технического состояния гидроагрегата. Гидротехника. 2016. № 2. С. 6-9.
44. Георгиевская Е.В., Смелков Л.Л. Влияние особенностей изготовления и монтажа на ресурсные характеристики гидроагрегата. Академия энергетики. 2015. № 3 (65). С. 66-70.
45. Георгиевская Е.В., Смелков Л.Л. Некоторые вопросы расчетно-экспериментальной оценки надежности и безопасности эксплуатации гидрогенераторов. Гидротехника. 2015. № 1. С. 62-67.
46. Судаков А.В., Георгиевская Е.В. Проблемы нормативного и методологического обеспечения оценки прочности и ресурса гидротурбин. Гидротехническое строительство. 2014. № 2. С. 52-58.
47. Георгиевская Е.В., Смелков Л.Л. Оценка прочности и остаточного ресурса гидротурбин: проблемы и пути решения. Гидротехника. 2014. № 3. С. 35-39.
48. Гаврилов С.Н., Георгиевская Е.В., Левина С.М., Смелков Л.Л. Оценка эксплуатационной надежности гидроагрегата с помощью расчетно-экспериментальных исследований на основе сравнительного анализа отечественной и зарубежной литературы. Гидротехника. XXI век. 2011. № 2. С. 28-36.