

УДК 538.951:66-933.6:66-936.4  
DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-20-33

## Особенности акустической эмиссии, сопровождающей работу механических активаторов гидродинамических процессов в стесненных условиях

*И. И. Растегаева*, Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

*И. А. Растегаев*, кандидат физико-математических наук,  
Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия  
*Д. Л. Мерсон*, доктор физико-математических наук, профессор,  
Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

*Для оценки возможности применения метода акустической эмиссии в направлении подбора активаторов гидродинамических процессов роторных аппаратов (установок) обработки жидких сред в стесненных условиях проведены экспериментальные исследования гидродинамических и акустических эффектов, сопровождающих два основных режима их применения: первый – работа в режиме циклического изменения частоты вращения активатора, второй – работа в режиме фиксированной частоты вращения активатора. В исследованиях использованы семь форм гидродинамических активаторов трех типов (лопастной, турбинный и дисковый) и роторно-импульсный аппарат, применяющийся для обеззараживания смазочно-охлаждающих жидкостей.*

*С помощью обычной и высокоскоростной видеосъемки выявлены основные гидродинамические эффекты, сопровождающие работу активатора каждого типа, которые сопоставлены с установленными акустическими эффектами и измерениями температуры и центробежного критерия Рейнольдса.*

*По результатам исследований показана возможность и установлены ограничения применения метода акустической эмиссии для сравнения эффективности активаторов и режимов обработки жидкости в роторно-импульсных аппаратах в условиях ее турбулентного движения. При стесненных условиях работы активаторов, имитированных шириной рабочей камеры, выявлен ранее не описанный в литературе пик акустической эмиссии, отличающийся от шума, сопровождающий турбулентное движение жидкости. Также установлена взаимосвязь изменения амплитуды пика акустической эмиссии со скоростью изменения оборотов вращения активаторов и скоростью прокачки среды через рабочую камеру роторно-импульсного аппарата. Полученные результаты могут быть использованы для подбора и сравнения формы активаторов гидродинамических процессов, а также для подбора и поддержания эффективного режима обеззараживания водных растворов.*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, роторные устройства, гидродинамическая обработка жидкостей, лопастные активаторы, открытая турбина, дисковые активаторы, кавитация.

### Введение

В настоящее время для изменения физико-технологических свойств различных жидких сред и растворов активно используются: роторно-перемешивающие устройства, роторно-пульсационные аппараты, роторно-импульсные аппараты (РИА) и гидродинамические насосы, которые в общем виде именуется «роторные устройства» (РУ) [1–3]. Обозначенные устройства за счет применения активаторов различного типа обеспечивают локальное высокоэнергетическое гидроимпульсное воздействие на макро-, микро- и наноуровне в гетерогенных и гомогенных жидкостях, что позволяет спровоцировать или ускорить диффузионные процессы и массообмен, химические реакции, распад веществ или их структурное преобразование, что недостижимо при обычных условиях перемешивания сред [4–7]. Однако в этих и дру-

гих работах теоретически и экспериментально показано, что режим воздействия, а значит, и результат в основном определяются формой (конструкцией) активаторов гидродинамических процессов и рабочей камеры РУ, т. к. именно они определяют условия течения и взаимодействия фаз обрабатываемых сред, которыми могут быть: жидкость – жидкость, жидкость – газ и жидкость – твердые частицы. На сегодняшний день основным способом реальной оценки эффективности обработки сред в РУ от подведенной к нему мощности остается эксперимент, т. к. даже известные теоретические методы проведения таких оценок требуют определения эмпирических коэффициентов как для каждой формы активатора и рабочей камеры РУ, так и для каждого процесса воздействия (перемешивание, аэрация, гомогенизация, диспергирование и т. д.) [8–10]. Последнее требует

понимания стадийности и масштаба протекающих гидродинамических процессов внутри рабочей камеры РУ.

Основными известными способами исследования и оценки гидродинамических процессов внутри рабочей камеры РУ являются [11–17]: визуальные методы наблюдения гидродинамических процессов в рабочей камере (фото- и видеосъемка в светлом и темном поле); методы измерения подведенной мощности (напряжение и ток на электроприводе) и мощности рассеянной на нагрев среды (температура среды) в роторной камере; акустические методы оценки шума роторной установки. Согласно этим работам, последние являются наиболее универсальными, т. к. при сопоставимой чувствительности визуальные методы труднореализуемы из-за необходимости изготовления оптически прозрачных корпусов РУ. При этом по удобству и простоте применения акустические методы сопоставимы со средствами измерения мощности и температуры, которые из-за инерционности и интегральности оценок значительно уступают визуальным и акустическим методам по чувствительности. В связи с этим акустические методы нашли широкое применение для исследования гидродинамических процессов в РУ.

При акустических исследованиях в известных нам литературных источниках использовали: измерения пульсаций давления внутри рабочей камеры (гидрофоны от 0,5 кГц до 1 МГц и датчики пульсаций давления от 2 Гц до 200 кГц); измерители вибрации вала или корпуса рабочей камеры (акселерометры от 0,1...8 Гц до 1...30 кГц); измерители внешнего шума работы роторного устройства (микрофоны и шумомеры от 10...60 Гц до 1,6...20 кГц) и акустико-эмиссионные (АЭ) измерения от 20...50 кГц до 1 МГц. При этом известно [18], что за счет использования диапазона частот, формируемых событиями малого масштабного уровня, АЭ-методы имеют наибольшую чувствительность и в ряде случаев большую помехоустойчивость измерений. Поэтому они представляются наиболее перспективными как в качестве средств исследования гидродинамических процессов внутри РУ, так и средств обратной связи для управления режимами обработки жидких сред в РУ. Однако серия работ А. Presas и соавторов [19 и др.] показывает, что форма рабочей камеры и вращение рабочей среды в ней критически влияет как на характер течения жидкой среды в РК, так и на собственные частоты колебаний активаторов, что не может не отразиться на характере АЭ, сопровождающей работу РУ. При

этом работы, исследующие АЭ при работе активаторов РУ в «стесненных» условиях (когда расстояние между активатором и стенкой рабочей камеры сопоставимо с толщиной активатора), при параллельном вращении обрабатываемой среды в рабочей камере, нам не известны.

Цель работы – изучение особенности акустического излучения, сопровождающего работу вращающихся активаторов различного типа вблизи стенок рабочей камеры с движущейся (вращающейся) обрабатываемой жидкой средой для оценки возможности применения метода АЭ в направлении выбора формы активаторов и режимов обработки жидких сред.

#### Материалы и методы исследований

Исследования проведены на экспериментальном стенде, представляющем собой уменьшенную копию (масштаб 1:2,5) промышленных РИА обеззараживания жидких сред, подробное описание которых приведено в [20]. Схема и внешний вид экспериментального стенда представлены на рис. 1, где обозначено: 1 – прозрачный (из полиметилметакрилата) корпус рабочей камеры (РК) РИА; 2 – стальной динамический активатор (табл. 1); 3 – бак с обрабатываемой средой (водопроводная или дистиллированная вода); 4 – средства видеорегистрации; 5 – пьезоэлектрический преобразователь АЭ MSAE-G (ООО «Микросенсорс АЭ», г. Саров) с акустической контактной средой Литол-24 ГОСТ 21150-87; 6 – микрофон MiC-01A (Genius, Китай); 7 – запорно-регулирующие вентили; Н – электрический насос; М – электропривод РИА (250 Вт, 6000 об/мин); ПУ – преобразовательный усилитель АЭ сигналов MSAE-FA010 (ООО «Микросенсорс АЭ», г. Саров); АЭ – система регистрации и анализа АЭ и параметрических данных, получаемых с датчика числа оборотов двигателя ( $n$ ) и датчиков температуры (термопар) жидкости на входе и выходе РК (Т).

Из схемы рис. 1 видно, что экспериментальный стенд позволяет проводить исследования при замкнутом (через бак) или разомкнутом (в режиме протока среды) контуре прокачивания среды. В настоящих исследованиях использовался замкнутый контур с одинаковым количеством среды в системе (320 мл) и два режима работы РИА: (i) равномерный набор оборотов от нуля до максимально возможных ( $n_{max}$ ), выдержка на  $n_{max}$  и сброс до нуля и (ii) обработка жидкой среды на  $n_{max}$ . В работе [21] на основании биологических исследований смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) установлено, что на данных режимах работы РИА достижим

эффект обеззараживания водных растворов от грибов и бактерий, поэтому они выбраны в настоящей работе. При изучении режима течения среды в рабочей камере использовался режим (i) и (ii), а оценка скорости нагрева заданного объ-

ема среды проводилась только на режиме (ii). Поскольку при одинаковой мощности электродвигателя величина  $n_{\max}$  зависит от сопротивления потока среды, то для различных активаторов величина  $n_{\max}$  различна.

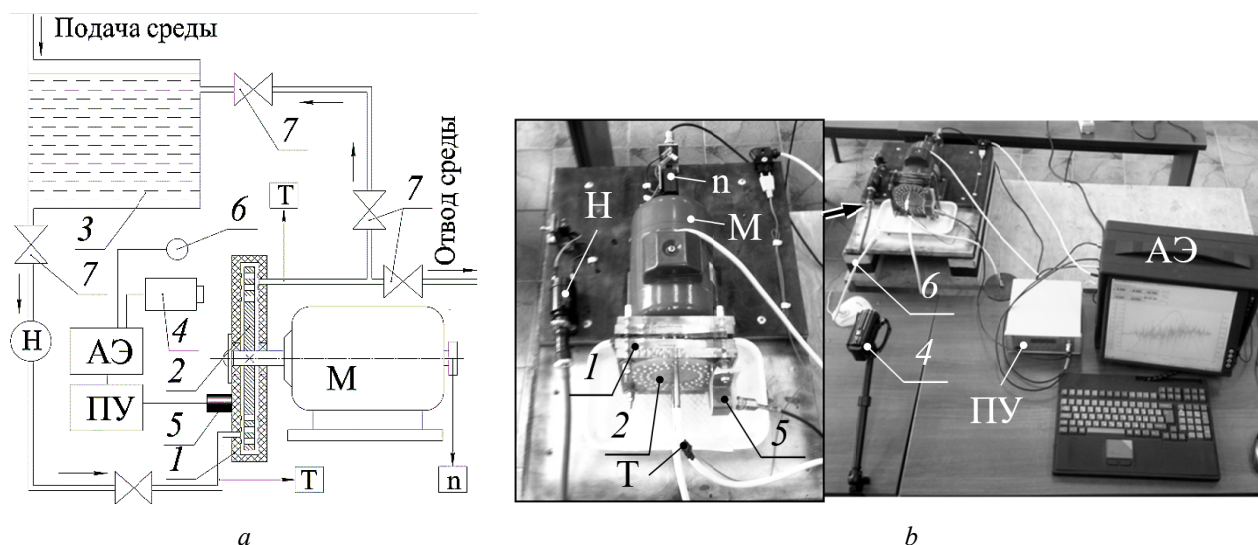


Рис. 1. Технологическая схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной роторной установки. Обозначения расшифрованы в тексте

Fig. 1. Technological scheme (a) and appearance (b) of the experimental rotary installation. The designations are deciphered in the text

При выборе формы активаторов (типы I, III, IV и V, табл. 1) предпочтение отдавалось хорошо изученным и широко используемым в промышленных роторных устройствах (РД 26-01-90-85 «Механические перемешивающие устройства. Метод расчета»), что позволяло: сопоставить полученные результаты с результатами других авторов, получить контрольные критерии для идентификации происходящих в рабочей камере (РК) процессов и проводить некоторые сравнения/обобщения. При этом для возможности изучения АЭ, сопровождающей вращение жидкости в РК, активатор типа V был сделан в половину ее габарита, что исключало вход лопастей турбины в зону статических активаторов корпуса РИА. Активатор типа II применялся для исследования влияния идущей впереди лопастей зоны сжатия на уровень и характер АЭ. Активатор типа VI (как и I) способен формировать развитые каверны, примыкающие к поверхности диска, поэтому применяется для испытания на кавитационную стойкость материалов [22]. Активатор типа VII, наоборот, в сочетании со статическими активаторами корпуса формирует множественные области локального импульсного акустического воздействия, поэтому применяется в установках обеззараживания СОЖ А. А. Викарчука и соавторов.

Форма рабочей камеры РИА представляла собой цилиндр  $\varnothing 110 \times 10$  мм, что обеспечивало зазор (стесненные условия) между плоскостью вращения активаторов и передней и задней стенкой РК, сопоставимый с толщиной активатора, а именно 3,75 мм. Зазор между торцом активаторов I–IV, VI, VII и боковой стенкой РК составлял 5,0 мм, а для V – 30,0 мм. На передней и задней стенке РК имелось три ряда статических активаторов, представляющих собой сферические головки винтов  $\varnothing 3$  мм, которые вкручивались в переднюю и заднюю стенку РК по окружности на диаметрах, аналогичных выполнению отверстий на активаторе типа VII (табл. 1). В каждом ряду располагалось 24 статических активатора. Форма рабочей камеры не менялась.






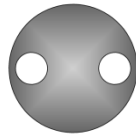
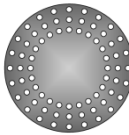
АЭ записывали с помощью двухканального комплекса ЭЯ-2 (ТГУ, г. Тольятти) в диапазоне частот 0,05...1,0 МГц при общем усилении  $10^2$  (40 дБ) с помощью интегрированных в компьютер модулей аналого-цифрового преобразования (АЦП). Для регистрации мгновенной формы АЭ-сигнала использовался 12-разрядный модуль АЦП. Сигналы АЭ записывались кадрами длительностью 4К- и 128К-отсчетов с предысторией 1/4 кадра при частоте дискретизации АЦП 6,25 и 1,5 МГц соответственно. Регистра-

ции *RMS* АЭ и параметрической информации (температура на входе и выходе кавитационной камеры, число оборотов ротора) проводилась непрерывно 14-разрядным модулем АЦП с частотой дискретизации 1 кГц. Звуковые сигналы

записывались интегрированной в ЭЯ-2 звуковой платой SB5.1 (Creative Technology Limited, Сингапур) в диапазоне частот 0,1 Гц ... 11 кГц с частотой дискретизации 48 кГц.

Таблица 1. Внешний вид, размеры и материал динамических активаторов

Table 1. Appearance, dimensions and material of dynamic activators

Тип активатора	I	II	III	IV	V	VI	VII
Общий вид							
<i>D/d</i> , мм	100,0	100,0	100,0	100,0	37,5	100,0/25,0	100,0/2,3
<i>s</i> , мм	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5/10,0	2,5	2,5
<i>h</i> , мм	11,0	11,0	11,0	11,0	12,5	–	–
Материал	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10

*D* – диаметр или высота активаторов, *d* – диаметр отверстий в активаторе, *s* – толщина активатора или ширина лопасти, *h* – длина лопасти активатора

Исследования особенности течения жидкости, а также образования и срыва вихрей проводились на РИА двумя видеокамерами (4) с разным полем наблюдения и скоростью записи. Для съемки всей рабочей зоны использовалась цифровая камера Sony HDR-CX 110E с оптикой Vario-Tessar (Carl Zeiss, Германия), обеспечивающая максимальное оптическое увеличение  $\times 25$ , разрешение  $2048 \times 1536$  px (пикселей) и скорость записи до 60 fps (кадров в секунду). Съемка локальной области рабочей камеры в зоне максимальной линейной скорости диска с активаторами проводилась с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры FASTCAM SA3 120K-M2 (Photron Limited, Англия-США) с оптической системой Zoom 6000 (Navitar, США). При этом поле наблюдения составляло  $512 \times 512$  px ( $8 \times 8$  мм), а скорость записи 6000 fps, что было достаточно для наблюдения основных процессов перемешивания жидкой среды в рабочей камере вплоть до вихреобразования.

Учитывая, что турбулентность в рабочей камере формируется за счет вращения активаторов, то для всех случаев с учетом изменения *T* и *n* рассчитывался центробежный критерий Рейнольдса (*Re<sub>c</sub>*) по известной формуле (РД 26-01-90-85):

$$Re_c = \frac{\rho n d^2}{\mu}, \quad (1)$$

где  $\rho$  и  $\mu$  – соответственно плотность ( $кг/м^3$ ) и коэффициент динамической вязкости (Па·с)

среды при ее фактической температуре (*T*), принимался по ГОСТ Р 8.983–2019; *n* – частота вращения активатора (ротора), об/с; *d* – диаметр активатора, м.

Для имитированной в работе ситуации кумулятивного действия статических и динамических активаторов определение классических оценочных параметров: *c<sub>x</sub>* – коэффициент лобового сопротивления лопасти и рабочей камеры, *k<sub>r</sub>* – коэффициент циркуляционного расхода или *K<sub>N</sub>* – критерий мощности (модифицированное число Эйлера) – не представлялось возможным, поэтому сопротивление движению для всех активаторов оценивалось через максимальное количество оборотов (*n<sub>max</sub>*), которое может быть достигнуто на максимальной мощности, подведенной к одному и тому же для них приводу.

Известно (РД 26-01-90-85 и др.), что при турбулентном режиме течения жидкости при ее перемешивании коэффициент теплоотдачи не зависит от типа активатора и определяется теплофизическими свойствами среды и влиянием на интенсивность теплообмена условий ее течения. Тогда удельное тепловыделение, показывающее затраченную мощность на нагрев (тепловую мощность) одинаковой единицы объема жидкости, заключенного непосредственно в КР (фиксируемый входным и выходным вентилем – рис. 1), можно определить из условия, что независимо от типа активаторов на максимально возможной частоте их вращения (*n<sub>max</sub>*) от электросети подводится одна и та же энергия. Поэтому эффективность активаторов по тепловы-

делению оценивалась по тепловой мощности ( $W$ ), которую рассчитывали как

$$W = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = C \cdot \frac{m \cdot \Delta T}{\Delta t} = C \cdot m \cdot v_T, \quad (2)$$

где  $\Delta Q$  – количество теплоты;  $\Delta Q = C \cdot m \cdot \Delta T$ ;  $C$  – среднее значение удельной теплоемкости воды;  $m$  – масса обрабатываемой жидкости;  $\Delta T$  – изменение температуры;  $\Delta t$  – время нагрева; скорость нагрева  $v_T = \Delta T / \Delta t$ .

Далее, связав тепловую мощность ( $W$ ) с частотой вращения ( $n$ ), получали удельное тепловыделение на каждые 1000 оборотов активатора:

$$Q_n = W \cdot t_{1000} = \frac{W \cdot 1000}{n_{\max}}. \quad (3)$$

Акустическое распознавание режимов обтекания активаторов проводилось по критерию  $\alpha$ , представляющему собой угол наклона интегрального амплитудного параметра оценки АЭ. Критерий  $\alpha$  предложен для быстроходных перемешивающих лопастных устройств в работе [23] и определяется как

$$\alpha = \frac{A_{t_{i+1}} - A_i}{A_{t_{i+1}} - t_{A_i}}, \quad (4)$$

где  $A_{t_{i+1}}$  и  $A_i$  – уровень интегрального амплитудного параметра оценки АЭ при времени записи  $t_{A_{i+1}}$  и  $t_{A_i}$  соответственно, которые принадлежат критическим точкам перелома кривой  $A(t)$ . В этой же работе показано, что в режиме непрерывного увеличения оборотов для активаторов лопастного типа  $7 \leq \alpha < 41^\circ$  соответствует турбулентному режиму обтекания лопастей жидкостью ( $Re_c < 1 \cdot 10^5$ ), а при  $\alpha \geq 41^\circ$  ( $Re_c \geq 1,0 \div 3,5 \cdot 10^5$ ) возникает и развивается за тыльной стороной лопастей активатора гидродинамическая кавитация. В качестве интегрального амплитудного параметра оценки АЭ использовался параметр – среднеквадратичное значение АЭ ( $RMS$ ):

$$RMS(t) = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_0^t A_i^2} \quad (5)$$

где  $t$  – время осреднения (0,1 с);  $a_i$  – значение амплитуды исходного сигнала  $A(N)$  в дискретной временной точке  $i$ .

Масштаб кавитационного воздействия оценивался также и по повреждениям активаторов, не имевшим место до исследований и который проявился в виде язв с коррозионным налетом

сразу после исследований при сушке активаторов на воздухе.

### Результаты исследований и их обсуждение

Стадийность помутнения воды в РК от увеличения частоты вращения активаторов в общем виде показана на рис. 2 на примере работы активатора VII. При наборе частоты вращения активаторов до 1000 об/мин вода в РК остается прозрачная, как и при невращающемся активаторе (рис. 2, а). При этом наблюдается вращение жидкости в РК без явного перемешивания потоков. Начиная со скорости вращения активатора около 1000 об/мин происходит помутнение воды в рабочей камере и начинают выделяться белесые дорожки по диаметрам статических активаторов корпуса рабочей камеры (рис. 2, б). При локальном рассмотрении белесые дорожки на кадрах видеозаписи представляют собой цепочки пузырьков. Далее с увеличением оборотов в пределах 3000...5000 об/мин помутнение воды и толщина белесых дорожек увеличиваются (рис. 2, с). Если проводится принудительная прокачка (циркуляция) воды через РК, то из-за подпора жидкости такая картина сохраняется до  $n_{\max}$ . Если скорость прокачки среды через РК недостаточна, то за счет центробежной силы жидкость выдавливается из рабочей камеры и в ее центре образуется зона, заполненная воздухом. При этом цвет жидкости резко изменяется до молочно-белого цвета с образованием вокруг активаторов на корпусе вихревых потоков (рис. 2, д). Данный режим работы РИА применим для аэрации и перемешивания жидкости и не приемлем для высокоэнергетического воздействия на нее. В связи с тем что работы проводились в направлении повышения обеззараживания СОЖ, то режим аэрации и перемешивания не исследовался, далее рассматриваются только результаты, полученные с принудительной циркуляцией воды через РК.

Из вышеизложенного можно заключить, что до 1000 об/мин на установках данного типа существенного изменения качества воды не происходит. В диапазоне 1000...3000 об/мин ожидаемо регистрируется изменение качества обрабатываемой среды за счет ее нагрева, а в диапазоне 3000...5000 об/мин при принудительной циркуляции жидкости через РК идет дополнительно интенсивная обработка среды за счет вихреобразования, а без принудительной циркуляции жидкости или подачи в камеру воздуха происходит интенсивное перемешивание жидкой и газовой сред (гомогенизация).

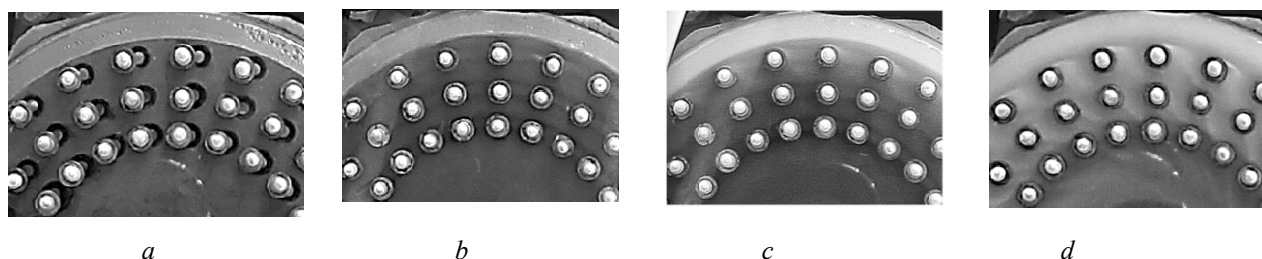


Рис. 2. Общий характер стадийности помутнения воды при частоте вращения диска с активаторами: 0 (а), 1300 (б) и 4600 (с и д) об/мин, где (а)...(с) – с принудительной циркуляцией воды через камеру, а (д) – без принудительной циркуляции воды или при подаче в камеру воздуха

Fig. 2. The general nature of the stages of turbidity of water at the rotational speed of the disk with activators: 0 (a), 1300 (b) and 4600 (c and d) rpm, where: (a) ÷ (c) – with forced circulation of water through the chamber, and (d) – without forced circulation of water or at air supply to the chamber

Основные источники АЭ и более детальный характер возмущений, вносимых активатором каждого типа при вращении в РК на  $n_{max}$ , установленные с помощью высокоскоростной съемки, показаны на рис. 3 в виде общей схемы и фрагментов их видеозаписи относительно статического активатора корпуса. На рисунках обозначено: – зона разряжения (каверна); – пузырьковая кавитация; и – зоны активатора с кавитационно-коррозионными повреждениями, возникшими при проведении исследований (не выделялись на рисунках 3e и 3f, т. к. хорошо видны по коррозионному налету); – шнуrowые вихри; – направление вращения активатора.

Согласно работам А. Я. Исакова, М. А. Промтова с соавторами и др. все установленные и показанные на рис. 3 эффекты гидродинамической природы могут быть акустическими источниками, а именно: кавитационные пузыри (активатор I и II); каверны (активатор I ÷ VI) и для всех активаторов турбулентный (вихревой) режим движения жидкости в РК. При этом жидкость в РК раскручивается, что снижает  $Re_c$ , а значит, и жесткость гидродинамических возмущений, вносимых активаторами. Однако при этом активизируется вихреобразование за статическими активаторами корпуса РИА, что хорошо видно на рис. 3, г и что также должно сопровождаться АЭ.

Исследование особенности АЭ, сопровождающей работу активаторов каждого типа (рис. 4 и 5), показало следующее: режим исследований  $ii$  ( $n = const = n_{max}$ ) сопровождается АЭ постоянного (линейного) уровня  $RMS(t)$ , который пропорционален  $n$ . Данный результат совпадает с работой [24], поэтому не обсуждается, а лишь отметим, что уровень АЭ пропорционален турбулентному шуму (а не оборотам двигателя –

см. рис. 4, h), но который связан с оборотами двигателя зависимостью типа:

$$RMS(t) = g \cdot Re_c, \quad (6)$$

где  $g$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа активатора, а  $Re_c$  – центробежный критерий Рейнольдса, учитывающий частоту вращения активаторов и нагрев среды (1). Для понимания порядка  $Re_c$  было рассчитано и приведено на рис. 4 и 5, но следует иметь в виду, что оно завышено, т. к. в (1) не учитывается разгон и скорость вращения жидкости в рабочей камере, что наблюдается как визуально, так и по видеозаписи практически с начала вращения активаторов, но специально не измерялось.

На режиме исследований  $i$  ( $n = var = [0; n_{max}] \cap [n_{max}; 0]$ ) общий характер АЭ с увеличением  $n$  также соответствует зависимости (6) с достижением максимального значения  $RMS_{p1}$  (рис. 4 и табл. 2). Аномальным в полученных результатах является появление пика  $RMS_{p2}$ , который не наблюдается при работе лопастных активаторов при отсутствии «стесненных» условий (в широких рабочих камерах). Однако близкие по виду, но меньшие по мощности, акустические эффекты известны [25] и связывались они с началом (зарождением) кавитации в отдельных областях, масштаб которой увеличивается с  $n$ . Обозначенное подтверждается тем, что пик  $RMS_{p2}$  спадает до уровня зависимости (6), т. е. до турбулентного режима обтекания активаторов, но при этом находится в противоречии тому, что пик  $RMS_{p2}$  спадает с увеличением  $n$ , т. е. с увеличением масштаба гидродинамических событий. Поскольку в диапазоне оборотов  $n_{p2}$  наблюдается увеличение помутнения жидкости (рис. 2, б и с), то можно предположить повышенные содержания воздуха в жидкости.

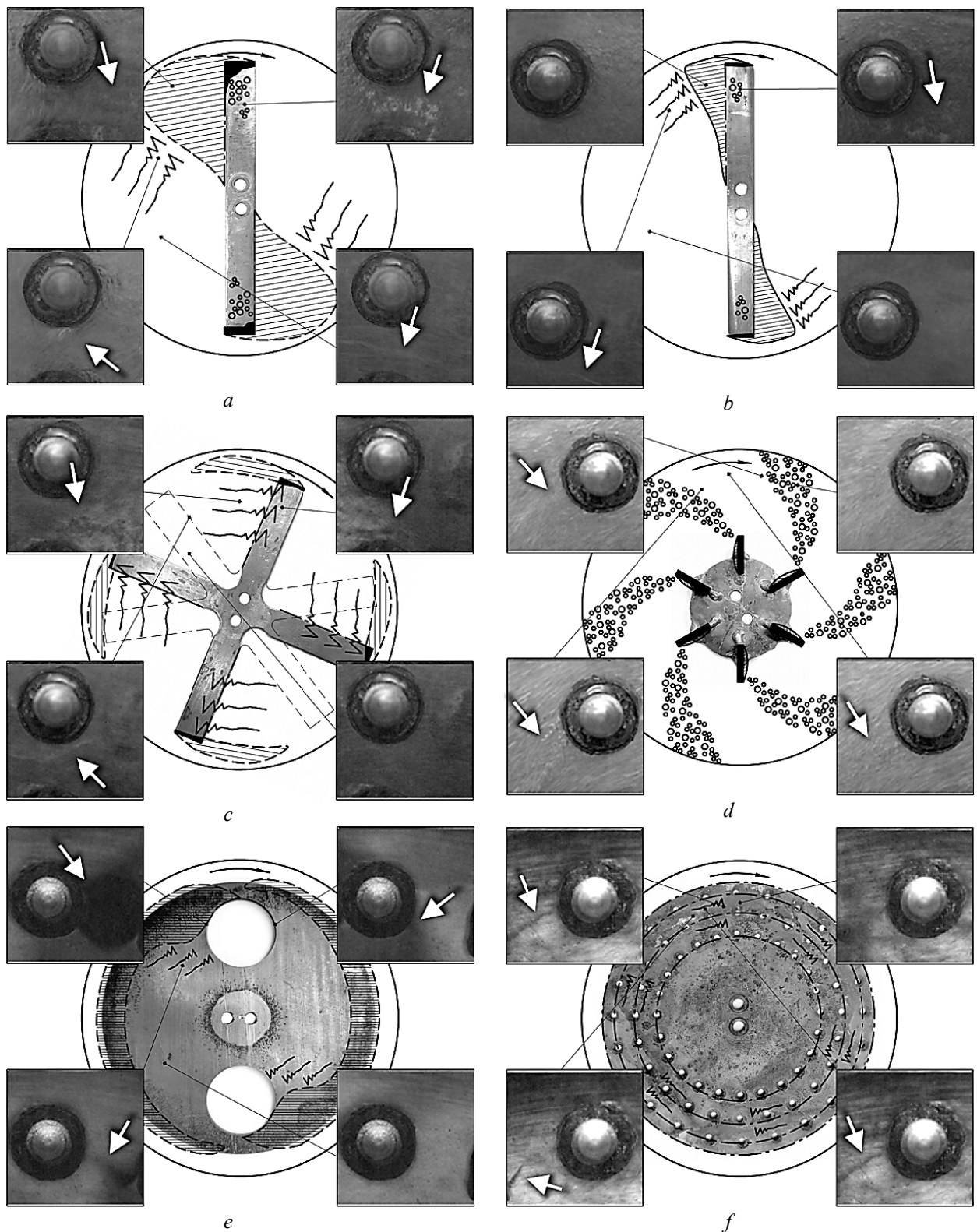


Рис. 3. Общая схема и фрагменты высокоскоростной записи гидродинамических эффектов, установленных в РПА при вращении активаторов на  $n_{max}$ : тип I с частотой 4700 об/мин (a); II – 5500 об/мин (b); III – 4500 об/мин и IV – 4100 об/мин (c); V – 5200 об/мин (d); VI – 4800 об/мин (e) и VII – 4600 об/мин (f) с принудительной циркуляцией воды через камеру

Fig. 3. General scheme and fragments of high-speed recording of hydrodynamic effects installed in a rotary pulse apparatus when the activators rotate at  $n_{max}$ : type I with a frequency of 4700 rpm (a); II – 5500 rpm (b); III – 4500 rpm and IV – 4100 rpm (c); V – 5200 rpm (d); VI – 4800 rpm (e) and VII – 4600 rpm (f) with forced water circulation through the chamber



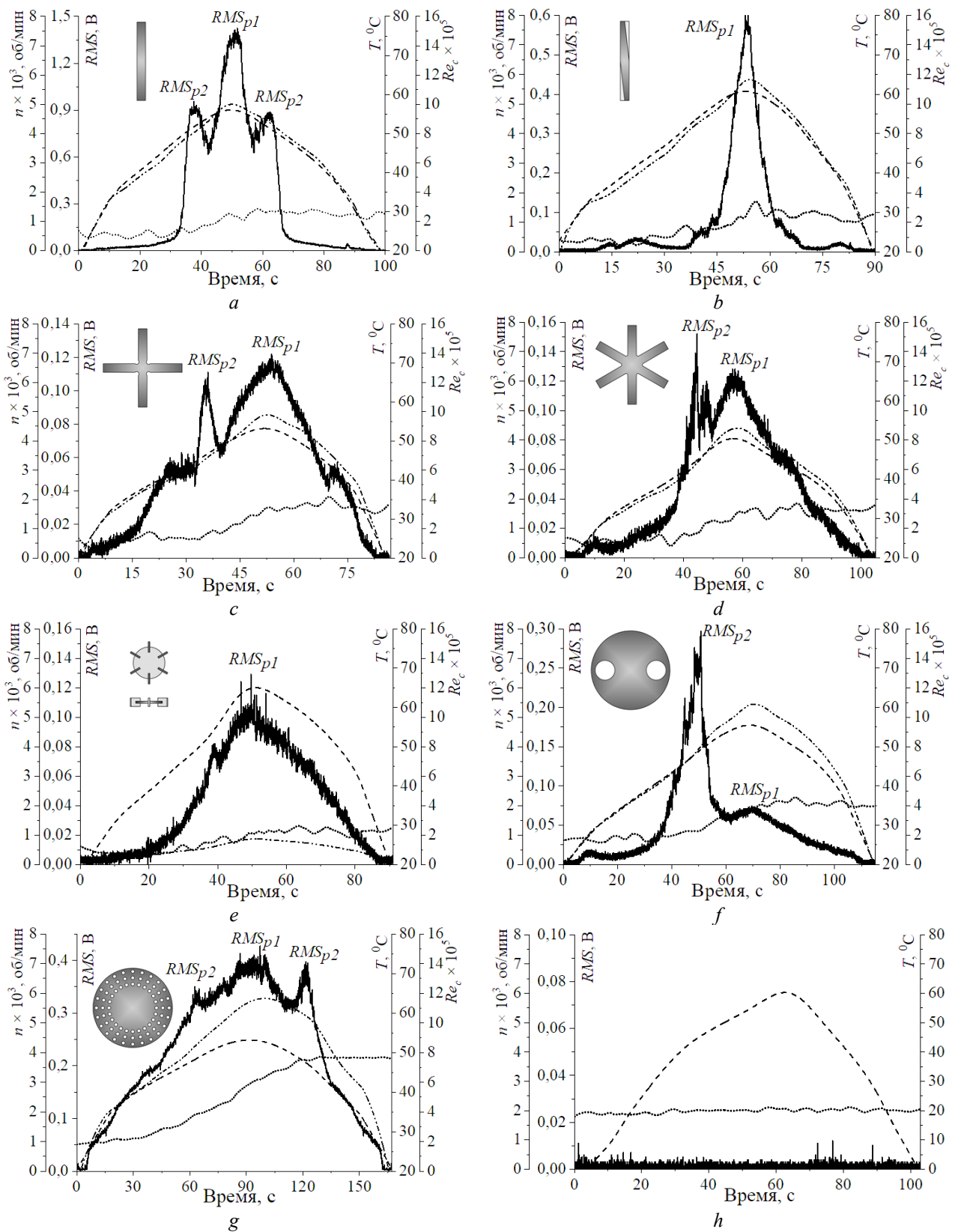


Рис. 4. Общий вид временных зависимостей: RMS АЭ (——), частоты вращения ротора  $n$  (- - -), температуры среды в рабочей камере  $T$  (.....) и число  $Re_c$  (— · —) регистрируемых при плавном разгоне и торможении активаторов различного типа (вставки) в среде воды (а-г) и в воздухе (h)

Fig. 4. General view of time dependencies: RMS of acoustic emission (——), rotor speed  $n$  (- - -), medium temperature in the working chamber  $T$  (.....) and the number of  $Re_c$  (— · —) recorded during smooth acceleration and deceleration of activators of various types (inserts) in water (a-g) and in air (h)



Согласно [26] последнее за счет снижения плотности жидкости может приводить как к повышению, так и снижению кавитационных эффектов, а значит, и сопутствующей АЭ. Однако с позиции механики снижение плотности жидкости однозначно должно сопровождаться уменьшением сопротивления движению активаторов.

Противопоставление АЭ с  $n_{\max}$  и тепловыделением в замкнутом контуре, принятых в работе за характеристику связанных с сопротивлением движению активаторов, показывает логичную корреляцию между увеличением  $n_{\max}$  и уменьшением  $W$ ,  $Q_n$ , но не коррелирует с величинами  $RMS_{p2}$  и  $RMS_{p1}$  (табл. 2). Поэтому данный экспериментальный факт косвенно подтверждает

предположение о снижении плотности жидкости, но также говорит об отсутствии связи между АЭ и процессами релаксации механической энергии за счет преобразования в тепло. Кроме этого, учитывая, что между  $RMS_{p2}$  и  $RMS_{p1}$  частота вращения активаторов изменяется ( $n_{\max}/n_{p2}$ ) в 1,1...1,5 раза; что  $d = \text{const}$  и что при быстром разгоне  $\rho$  и  $\mu$  изменяются незначительно, то по (1) получаем не критическое изменение числа  $Re_c$ , т. е. соответствующее одному и тому же или очень близкому к нему режиму обтекания активаторов. В принципе, такой же результат ожидаем и в случае пересчета числа  $Re_c$  с учетом скорости вращения жидкости в рабочей камере РИА.

Таблица 2. Сводная таблица сравниваемых параметров оценки работы активаторов РИА и сопровождающей АЭ

Table 2. Summary table of the compared parameters for evaluating the operation of rotary pulse device activators and accompanying acoustic emission

Тип	$v_T$ , °С/мин	$n_{\max}$ , об/мин	$W$ ,* Дж/с	$Q_n$ ,* Дж 1000об	$RMS_{p1}$ , В макс АЭ	$\alpha_{p1}$ **	$RMS_{p2}$ , В пик АЭ	$n_{p2} \times 10^3$ , об/мин пик АЭ	$\alpha_{p2}$ **
I	42,4±10,1	4710±14	267	3410	1,17±0,23	55,4	0,85±0,06	4,2±0,3	73,3
II	37,0±8,3	5567±11	233	2976	0,57±0,13	60,7	—	—	—
III	42,7±9,5	4533±21	269	3434	0,12±0,08	31,4	0,11±0,03	3,1±0,6	66,5
IV	42,2±8,8	4173±54	266	3394	0,12±0,08	32,8	0,14±0,05	3,2±0,4	59,9
V	21,4±6,8	5256±56	135	1721	0,11±0,08	37,1	—	—	—
VI	39,0±9,3	4884±32	246	3136	0,07±0,04	19,8	0,26±0,09	3,6±0,8	43,6
VII	45,7±11,1	4650±76	288	3675	0,41±0,09	8,81	0,37±0,05	3,7±0,2	31,3

Среднее значение и доверительный интервал определялись методом Стьюдента при уровне надежности 0,95; \* – рассчитаны по средним значениям  $v_T$  и  $n_{\max}$ ; \*\* – для результатов, показанных на рис. 4, которые близки к средним значениям, а разброс значений  $\alpha_{p1}$  и  $\alpha_{p2}$  находился в пределах  $\pm 5-8$ .

Критерий  $\alpha$ , рассчитанный по (4) для  $RMS_{p2}$  и  $RMS_{p1}$  (соответственно  $\alpha_{p2}$  и  $\alpha_{p1}$  в табл. 2), указывает на то, что кавитационный режим обтекания активаторов при  $RMS_{p1}$  только у активаторов I и II, а при  $RMS_{p2}$  у I, III, IV и VI. Однако наличие схожего АЭ-эффекта у активатора типа VII при  $\alpha_{p2} = 31,3 < 41$  (см. описание к (4)) и слабо выражены у активаторов типа II и V (рис. 4). Последнее говорит о том, что либо границы критерия  $\alpha$  необходимо корректировать для каждого типа активатора, либо пик  $RMS_{p2}$  не связан с кавитационными эффектами.

Необъяснимо с позиции гидродинамической природы АЭ пика  $RMS_{p2}$  также и частое отсутствие симметричного относительно  $RMS_{p1}$  его двойника при уменьшении  $n$  (рис. 4 и 5). Учитывая, что при сбросе  $n$  жидкость более разогрета и уже перемешана с газом, это способст-

вует возникновению гидродинамической кавитации [27]. Также установлено, что значения  $RMS_{p2}$  и  $n_{p2}$  зависят от  $dn/dt$ , т. е. скорости увеличения оборотов (рис. 5), а в работе [28] и от скорости циркуляции (прокачки) жидкости через рабочую камеру ( $dV/dt$ ). Так, при повышении  $dn/dt$  и  $dV/dt$  увеличивается  $RMS_{p2}$ , что продемонстрировано на рис. 5 для наименее эффективного активатора по критерию  $\alpha$  (табл. 2). Данный установленный факт также не однозначен с позиции объяснения связи пика АЭ  $RMS_{p2}$  с кавитационными эффектами гидродинамической природы, которые, как известно, увеличиваются при повышении частоты вращения активатора, что показано А. Я. Исаковым, М. А. Промтовым с соавторами и др., а также при снижении подпора жидкости на входе в рабочую камеру [29].

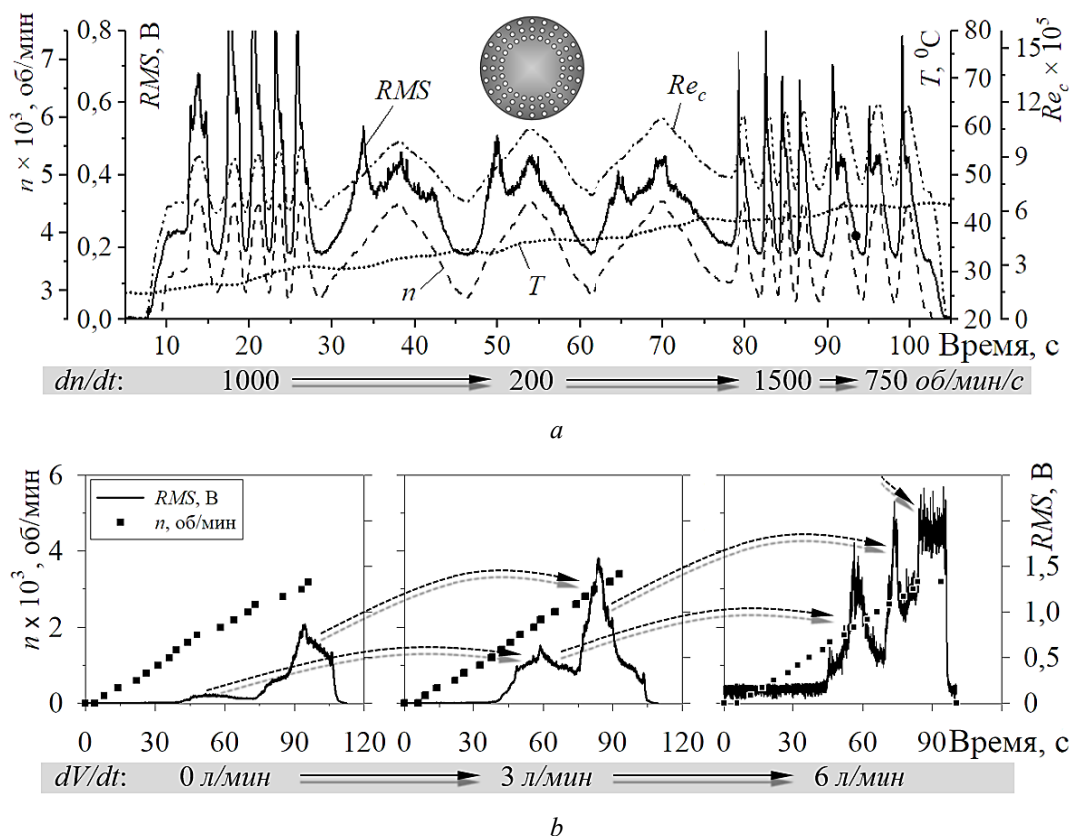


Рис. 5. Общий вид изменения RMS АЭ при  $dn/dt = var$ ,  $dV/dt = const$  (a) и  $dn/dt = const$ ,  $dV/dt = var$  (b), на примере активатора типа VII

Fig. 5. General view of changes in acoustic emission RMS at  $dn/dt = var$ ,  $dV/dt = const$  (a) and  $dn/dt = const$ ,  $dV/dt = var$  (b), using the example of a type VII activator

Таким образом, причиной появления АЭ пика  $RMS_{p2}$  могут быть как наблюдаемые гидродинамические эффекты (пузырьковая кавитация, каверна (зона разряжения), вихревая кавитация), так и известные, но не наблюдаемые в работе акустические источники, а именно: ударное обтекание лопастей в зоне сжатия перед динамическими и статическими активаторами [30] и акустическая кавитация, возникающая из-за колебаний активатора на собственных частотах [31], и установление стоячих волн в каналах рабочей камеры [32]. При этом известно [33], что акустическая кавитация представляет собой эффективный механизм концентрации энергии, т. к., согласно обозначенной работе, во время акустической кавитации относительно низкая средняя плотность энергии звукового поля трансформируется в очень высокую плотность энергии, связанную с радиально пульсирующим пузырем. В то время как гидродинамическая кавитация менее эффективна при воздействии на обрабатываемую среду. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

### Основные выводы

1. Основной (фондовый) характер изменения интегральных параметров оценки амплитуды акустической эмиссии (АЭ) соответствует зависимости  $RMS(t) = g \cdot Re_c$ , что позволяет проводить количественное сравнение эффективности активаторов и режимов обработки жидкости в роторно-импульсных аппаратах (РИА) в условиях ее турбулентного движения.
2. При стесненных условиях работы активаторов лопастного, турбинного и дискового типа имитированных шириной рабочей камеры РИА на фоне основного характера изменения интегральных параметров оценки амплитуды АЭ, подчиняющегося зависимости  $RMS(t) = g \cdot Re_c$ , обнаружено локальное изменение в виде пика проявления АЭ  $RMS_{p2}$ , не известного нам из литературных источников, посвященных акустическим исследованиям работы однотипных активаторов.
3. Локальные интегральные параметры оценки амплитуды АЭ в виде пика  $RMS_{p2}$  на некоторых режимах работы РИА также могут применяться для сравнения активаторов и установления критических режимов обработки в РИА,

но пока качественно. Переход к количественным оценкам возможен после установления конкретных источников АЭ, сопровождающих данные режимы обработки жидкости.

4. При повышении скорости приращения частоты вращения активаторов ( $dn/dt$ ) и скорости прокачки среды через рабочую камеру ( $dV/dt$ ) амплитуда АЭ пика RMSp2 увеличивается. Таким образом, путем изменения  $dn/dt$  и  $dV/dt$  с параллельным анализом АЭ возможно установить режимы обработки, при которых за один цикл набора-сброса числа оборотов ротора АЭ пик RMSp2 может проявиться два раза или один раз, но его величина гораздо выше амплитуды АЭ, сопровождающей турбулентное воздействие, подчиняющееся зависимости  $RMS(t) = g \cdot Rec$ . В связи с большим энергетическим воздействием данные режимы представляются наиболее эффективными для обеззараживания водных растворов и их возможно обнаружить, а также контролировать (поддерживать) по отслеживанию интегрального изменения АЭ.

#### Благодарности

Авторы благодарят д-ра физ.-мат. наук Анатолия Алексеевича Викарчука за инициирование работ в данном направлении и канд. физ.-мат. наук Михаила Николаевича Селезнева за помощь при подготовке и проведении высокоскоростной съемки.

#### Библиографические ссылки

1. Промтов М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика : монография. М. : Машиностроение-1, 2001. 260 с.
2. Абиев Р. Ш. Пульсационные аппараты нового поколения – энерго- и ресурсосберегающее оборудование химических производств // Химическая промышленность сегодня. 2008. № 4. С. 46–54.
3. Сафонова Е. А., Потанов А. Н., Вагайцева Е. А. Интенсификация технологических процессов производства пива при использовании роторно-пульсационного аппарата // Техника и технология пищевых производств. 2015. № 1. С. 74–81.
4. Gogate R. P. Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review // Chemical Engineering and Processing. 2008. V.47. P. 515-527. DOI: 10.1016/J.CEP.2007.09.014.
5. Banakar V.V., Sabnis S.S., Gogate P.R. et al. Ultrasound assisted continuous processing in microreactors with focus on crystallization and chemical synthesis: A critical review // Chemical Engineering Research and Design. 2022. V. 182. P. 273-289. DOI: 10.1016/j.cherd.2022.03.049.
6. Dixi D., Thanekar P., Bhandari V.M. Degradation of API pollutants using hydrodynamic cavitation and process intensification // Chemical Engineering and Processing. Process Intensification. 2022. V. 172. 108799. DOI: 10.1016/j.cep.2022.108799.
7. Промтов М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов // Вестник ТГТУ. 2008. № 14(4). С. 861–869.
8. Forte G., Alberini F., Simmons M., Stitt H.E. Use of acoustic emission in combination with machine learning: monitoring of gas-liquid mixing in stirred tanks // Journal of Intelligent Manufacturing. 2021. № 32. P. 633–647. DOI: 10.1007/s10845-020-01611-z.
9. Crouter A., Briens L. Passive acoustic emissions from particulates in a V-blender / Drug Development and Industrial Pharmacy. 2015. 41(11). P. 1809-1818. DOI: 10.3109/03639045.2015.10099 13.
10. Снявский Ю. В. Усовершенствованный метод расчета мощности перемешивающего устройства // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2018. № 4. С. 3–14. DOI: 10.17586/2310-1164-2018-11-4-3-14.
11. Boyd J.W.R., Varley J. The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes // Chemical Engineering Science. 2001. № 56. P. 1749-1767. DOI: 10.1016/S0009-2509(00)00540-6.
12. Nordon A., Carella Y., Gachagan A., Littlejohn D., Hayward G. Factors affecting broadband acoustic emission measurements of a heterogeneous reaction // The Analyst. 2006. 131(2). P. 323-330. DOI: 10.1039/B510922A.
13. Valentin D., Presas A., Egusquiza M. et al. Transmission of High Frequency Vibrations in Rotating Systems. Application to Cavitation Detection in Hydraulic Turbines // Applied Sciences. 2018. 8(3). 451. DOI: 10.3390/app8030451.
14. Escaler X., Ekanger J.V., Francke H.H. et al. Detection of Draft Tube Surge and Erosive Blade Cavitation in a Full-Scale Francis Turbine // Journal of Fluids Engineering. 2014. 137(1). 011103. DOI: 10.1115/1.4027541.
15. Чудина М. Шум как индикатор кавитации в центробежном насосе // Акустический журнал. 2003. Т. 49, № 4. С. 551–564.
16. Shi H., Li Z., Bi Y. An On-line Cavitation Monitoring System for Large Kaplan Turbines / IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2007. P. 1-6. DOI: 10.1109/PES.2007.385723.
17. Пичков С. Н., Захаров Д. А., Новицкий Э. Г. Исследование кавитационных процессов в насосном оборудовании акустическим методом // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2018. Т. 132, № 4 (123). С. 158–163.
18. Jamaludin N., Mba D. Monitoring extremely slow rolling element bearings: Part I and Part II // NDT&E International. 2002. 35(6). С. 349-366. DOI: 10.1016/S0963-8695(02)00006-3.
19. Presas A., Valentin D., Egusquiza E. et al. Influence of the rotation on the natural frequencies of a submerged-confined disk in water // Journal of Sound and Vibration. 2015. 337. P. 161-180. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.10.032.

20. Цыбускина И. И., Диженин В. В., Викарчук А. А. Кавитационно-тепловая обработка жидкостей как эффективный метод защиты от биопоражений // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 1 (9). С. 2266–2270.
21. Растегаева И. И., Диженин В. В., Викарчук А. А. Безреагентные методы обеззараживания смазочно-охлаждающих жидкостей // Вектор науки ТГУ. 2010. № 2 (12). С. 15–19.
22. Кнепп Р., Дейли Д., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974. 668 с.
23. Исаков А. Я., Исаков А. А. Кавитация в перемешивающих устройствах: монография. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2006. 206 с.
24. Там же.
25. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008. 271 с.
26. Пылаев Н. И., Эдель Ю. У. Кавитация в гидротурбинах. Л.: Машиностроение, 1974. 256 с.
27. Li W., Li E., Shi W., Li W., Xu X. Numerical Simulation of Cavitation Performance in Engine Cooling Water Pump Based on a Corrected Cavitation Model // Processes. 2020. 8. 278. DOI: 10.3390/pr8030278.
28. Оптимизация режимов обработки жидких сред в роторных устройствах на основе метода акустической эмиссии с системой обратной связи / И. И. Растегаева, И. А. Растегаев, А. А. Викарчук и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2012. № 5. С. 25–31.
29. Al-Arabi A.A.B., Selim S.M.A., Saidur R. et al. Detection of Cavitation in Centrifugal Pumps // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. 5 (10). P. 1260-1267.
30. Trivedi C. A review on fluid structure interaction in hydraulic turbines: A focus on hydrodynamic damping // Engineering Failure Analysis. 2017. V. 77. P. 1-22. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.02.021.
31. Louyot M., Nennemann B., Monette C., Gosselin F.P. Modal analysis of a spinning disk in a dense fluid as a model for high head hydraulic turbines // Journal of Fluids and Structures. 2020. 94. 102965. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2020.102965.
32. Промтов М. А., Степанов А. Ю., Алешин А. В. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата: монография. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. 148 с.
33. Червяков В. М., Юдаев В. Ф. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах: монография. М.: Машиностроение-1, 2007. 128 с.
3. Safonova E.A., Potapov A.N., Vagajceva E.A. [Intensification of technological processes of beer production using a rotary pulsating apparatus]. *Tekhnika i tekhnologiya promyshlennykh proizvodstv*, 2015, no. 1, pp. 74-81 (in Russ.).
4. Gogate R.P. [Cavitation reactors for process intensification of chemical processing applications: A critical review]. *Chemical Engineering and Processing*, 2008, vol. 47, pp. 515-527. DOI: 10.1016/J.CEP.2007.09.014.
5. Banakar V.V., Sabnis S.S., Gogate P.R. et al. [Ultrasound assisted continuous processing in microreactors with focus on crystallization and chemical synthesis: A critical review]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2022, vol. 182, pp. 273-289. DOI: 10.1016/j.cherd.2022.03.049.
6. Dixi D., Thanekar P., Bhandari V.M. [Degradation of API pollutants using hydrodynamic cavitation and process intensification]. *Chemical Engineering and Processing. Process Intensification*, 2022, vol. 172. 108799. DOI: 10.1016/j.cep.2022.108799.
7. Promtov M.A. [Prospects of application of cavitation technologies for intensification of chemical and technological processes]. *Vestnik TGTU*, 2008, no. 14(4), pp. 861-869 (in Russ.).
8. Forte G., Alberini F., Simmons M., Stitt H.E. [Use of acoustic emission in combination with machine learning: monitoring of gas-liquid mixing in stirred tanks]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021, no. 32, pp. 633-647. DOI: 10.1007/s10845-020-01611-z.
9. Crouter A., Briens L. [Passive acoustic emissions from particulates in a V-blender]. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 2015, 41(11), pp. 1809-1818. DOI: 10.3109/03639045.2015.1009913.
10. Sinyavskii Yu.V. [An improved method for calculating the power of a mixing device]. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv»*, 2018, no. 4, pp. 3-14 (in Russ.). DOI: 10.17586/2310-1164-2018-11-4-3-14.
11. Boyd J.W.R., Varley J. [The uses of passive measurement of acoustic emissions from chemical engineering processes]. *Chemical Engineering Science*, 2001, no. 56, pp. 1749-1767. DOI: 10.1016/S0009-2509(00)00540-6.
12. Nordon A., Carella Y., Gachagan A., Littlejohn D., Hayward G. [Factors affecting broadband acoustic emission measurements of a heterogeneous reaction]. *The Analyst*, 2006, 131(2), pp. 323-330. DOI: 10.1039/B510922A.
13. Valentin D., Presas A., Egusquiza M. et al. [Transmission of High Frequency Vibrations in Rotating Systems. Application to Cavitation Detection in Hydraulic Turbines]. *Applied Sciences*, 2018, 8(3), 451. DOI: 10.3390/app8030451.
14. Escaler X., Ekanger J.V., Francke H.H. et al. [Detection of Draft Tube Surge and Erosive Blade Cavitation in a Full-Scale Francis Turbine]. *Journal of Fluids Engineering*, 2014, 137(1), 011103. DOI: 10.1115/1.4027541.

15. Chudina M. [Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump]. *Akusticheskii zhurnal*, 2003, vol. 49, no. 4, pp. 551-564 (in Russ.).
16. Shi H., Li Z., Bi Y. [An On-line Cavitation Monitoring System for Large Kaplan Turbines]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp. 1-6. DOI: 10.1109/PES.2007.385723.
17. Pichkov S.N., Zakharov D.A., Novitskii E.G. [Investigation of cavitation processes in pumping equipment by acoustic method]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2018, vol. 132, no. 4(123), pp. 158-163 (in Russ.).
18. Jamaludin N., Mba D. [Monitoring extremely slow rolling element bearings: Part I and Part II]. *NDT&E International*, 2002, 35(6), pp. 349-366. DOI: 10.1016/S0963-8695(02)00006-3.
19. Presas A., Valentin D., Egusquiza E. et al. [Influence of the rotation on the natural frequencies of a submerged-confined disk in water]. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, 337, pp. 161-180. DOI: 10.1016/j.jsv.2014.10.032.
20. Tsybuskina I.I., Dizhenin V.V., Vikarchuk A.A. [Cavitation-thermal treatment of liquids as an effective method of protection against bio-contamination]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2010, vol. 12, no. 1(9), pp. 2266-2270 (in Russ.). EDN: NDYHXT.
21. Rastegaeva I.I., Dizhenin V.V., Vikarchuk A.A. [Reagentless methods of disinfection of lubricating and cooling liquids]. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2010, no. 2(12), pp. 15-19 (in Russ.).
22. Knepp R., Deili D., Khemmit F. *Kavitatsiya* [Cavitation]. Moscow, Mir, 1974, 668 p. (in Russ.).
23. Isakov A.Ya., Isakov A.A. *Kavitatsiya v peregreshivayushchikh ustroystvakh: Monografiya* [Cavitation in mixing devices: Monograph]. Petropavlovsk-Kamchatsky, KamchatSTU, 2006, 206 p. (in Russ.).
24. Ibid.
25. Sirotyuk M.G. *Akusticheskaya kavitatsiya* [Acoustic cavitation]. Moscow, Nauka, 2008, 271 p. (in Russ.).
26. Pylaev N.I., Edel' Yu.U. *Kavitatsiya v gidroturbinakh* [Cavitation in hydraulic turbines]. Leningrad, Mashinostroenie, 1974, 256 p. (in Russ.).
27. Li W., Li E., Shi W., Li W., Xu X. [Numerical Simulation of Cavitation Performance in Engine Cooling Water Pump Based on a Corrected Cavitation Model]. *Processes*, 2020, 8, 278. DOI: 10.3390/pr8030278.
28. Rastegaeva I.I., Rastegaev I.A., Vikarchuk A.A. et al. [Optimization of liquid media processing modes in rotary devices based on the acoustic emission method with feedback system]. *Pribory i sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2012, no. 5, pp. 25-31 (in Russ.).
29. Al-Arabi A.A.B., Selim S.M.A., Saidur R. et al. [Detection of Cavitation in Centrifugal Pumps] *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2011, 5(10), pp. 1260-1267.
30. Trivedi C. [A review on fluid structure interaction in hydraulic turbines: A focus on hydrodynamic damping]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, vol. 77, pp. 1-22. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2017.02.021.
31. Louyot M., Nennemann B., Monette C., Gosselin F.P. [Modal analysis of a spinning disk in a dense fluid as a model for high head hydraulic turbines]. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 94, 102965. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.102965.
32. Promtov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata: monografiya* [Methods of calculating the characteristics of a rotary pulse apparatus: monograph]. Tambov, Publishing house of FGBOU VPO "TSTU", 2015, 148 p. (in Russ.).
33. Chervyakov V.M., Yudaev V.F. *Gidrodinamicheskie i kavitatsionnye yavleniya v rotornykh apparatakh: monografiya* [Hydrodynamic and cavitation phenomena in rotary apparatuses: monograph]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2007, 128 p. (in Russ.).

\* \* \*

### Features of Acoustic Emission Accompanying the Operation of Hydrodynamic Process Mechanical Activators in Constrained Conditions

I. I. Rastegaeva, Senior Lecturer, Togliatti State University, Togliatti, Russia

I. A. Rastegaev, PhD in Physics and Mathematics, Togliatti State University, Togliatti, Russia

D. L. Merson, Dr.Sc. in Physics and Mathematics, Professor, Togliatti State University, Togliatti, Russia

*To assess the possibility of using the acoustic emission method in the direction of selecting activators of hydrodynamic processes of rotary apparatuses (machines) for processing liquid media in constrained conditions, experimental studies of hydrodynamic and acoustic effects accompanying two main modes of their application were carried out: the first is operation in the mode of activator frequency cyclic change, the second is operation in the mode of fixed activator rotation frequency. Seven forms of hydrodynamic activators of three types (vane, turbine and disk) and a rotary pulse apparatus applied for disinfection of lubricants were used in the research.*

*Using conventional and high-speed video, the main hydrodynamic effects accompanying the operation of each type of activator were identified, which were compared with the established acoustic effects and measurements of temperature and the Reynolds centrifugal criterion.*

*According to the results of the research, the possibility and limitations of using the acoustic emission method for comparing the effectiveness of activators and modes of liquid treatment in rotary pulse devices in conditions of its turbulent motion are shown. Under constrained operating conditions of activators imitated by the width of the work-*

*ing chamber, an acoustic emission peak never described in literature earlier was revealed, which differs from the noise accompanying the turbulent movement of the liquid. The relationship between the change in the amplitude of the peak of acoustic emission with the rate of change in the rotation of the activators and the rate of pumping the medium through the working chamber of the rotary pulse apparatus is also established. The results obtained can be used to select and compare the form of activators of hydrodynamic processes, as well as to select and maintain an effective mode of disinfection of aqueous solutions.*

**Keywords:** acoustic emission, rotary devices, hydrodynamic treatment of liquids, blade activators, open turbine, disk activators, cavitation.

Получено: 14.09.22

#### Образец цитирования

*Растегаева И. И., Растегаев И. А., Мерсон Д. Л.* Особенности акустической эмиссии, сопровождающей работу механических активаторов гидродинамических процессов в стесненных условиях // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Том 20, № 4. С. 20–33. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-20-33.

#### For Citation

Rastegaeva I.I., Rastegaev I.A., Merson D.L. [Peculiarities of Acoustic Emission Accompanying the Operation of Mechanical Activators of Hydrodynamic Processes in Cramped Conditions]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022, vol. 20, no. 4 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-20-33.