



Структура течения и периодические процессы в дискообразной вихревой камере гидродинамического кавитатора

Е. Г. Иванов[✉], И. Л. Воротников, А. В. Пасин,
А. В. Седов, М. В. Ошурков

Нижегородский государственный
агротехнологический университет
(г. Нижний Новгород, Российская Федерация)

✉ ivanov.e.g@mail.ru

Аннотация

Введение. Суть акустико-кавитационных процессов состоит в том, что через жидкость пропускают звук с давлением во фронте волны более 3 бар, что вызывает местные разрывы жидкости в вакуумметрическую фазу волны и их коллапс – в манометрическую. Противоположные стенки каждой каверны при их коллапсе сближаются со скоростью, превышающей две скорости звука, за счет чего достигается высокая плотность энергии в точке встречи. Новизна настоящей работы подтверждается результатами периодически воспроизводимого информационно-патентного анализа, а также полученными четырьмя патентами на изобретения по рассматриваемой теме. **Цель исследования.** Повышение акустико-кавитационных качеств дискообразной вихревой камеры, используемой в качестве жидкостного свистка.

Материалы и методы. В работе использованы числовое моделирование течений в среде FlowVision, экспериментальное определение скоростей потоков трубкой Пито, метод пленок, снятие амплитудно-частотной характеристики программой SpectraPLUS 5.0, визуализация потоков и процессов на оптически прозрачных устройствах методом красящих индикаторов в стробоскопическом освещении скоростной видеосъемкой.

Результаты исследования. Выявлено корректирующее действие пульсаций насоса $f = 300$ Hz на механизм звукообразования. Дискообразность устройства, обуславливающая ограждение входного потока в поперечном сечении с трех направлений, способствует созданию более выразительного акустического сигнала, образованию двух сопряженных торовых вихрей вдоль обечайки, что обеспечивает однородность окружного течения, затухание продольных высокочастотных колебаний $f = 200$ kHz, создание периодических зон повышенного давления вдоль обечайки. Сосредоточенный тангенциальный вход в устройство обуславливает центральную асимметрию течений в нем и ряд процессов, создающих акустический шум.

Обсуждение и заключение. Частота полезного акустического сигнала в вихревой камере пропорциональна скорости транзитного потока, а амплитуда – размерам устройства. Вместе с полезным сигналом, созданным взаимодействием окружной и входной частей транзитного потока, в устройстве создаются шумы близких частот. Другие источники шумообразования обусловлены наличием сосредоточенного тангенциального входа. Образование двух торовых сопряженных вихрей вдоль обечайки может быть использовано как средство управления процессом взаимодействия частей транзитного потока. Дискообразная вихревая камера сочетает в себе функции звукообразования и возможности создания центробежного поля, что расширяет ее технологические возможности.

© Иванов Е. Г., Воротников И. Л., Пасин А. В., Седов А. В., Ошурков М. В., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: дискообразная вихревая камера, вода, кавитация, потоки жидкости, звук, частота звука, акустический сигнал

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Структура течений и периодические процессы в дискообразной вихревой камере гидродинамического кавитатора / Е. Г. Иванов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 444–460. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.444-460>

Flow Structure and Periodic Processes in a Disc-Shaped Vortex Chamber of a Hydrodynamic Cavitizer

E. G. Ivanov[✉], I. L. Vorotnikov, A. V. Pasin,
A. V. Sedov, M. V. Oshurkov

*Nizhny Novgorod State Agrotechnological University
(Nizhny Novgorod, Russian Federation)*

[✉] ivanov.e.g@mail.ru

Abstract

Introduction. The essence of the acoustic – cavitation processes is that the liquid is passed through sound with a pressure at the wave surface of more than 3 bar that causes local breaks of the liquid in the vacuum phase of the wave and the collapse in the manometric phase. The opposite walls of each cavern in the collapse approach at a speed exceeding two speed of sound, due to which a high energy density is achieved at the meeting point, and what is especially valuable is the mutual transitions of energies from one form to another, unattainable under normal conditions, and, moreover, as inside cavitation area and near it. The novelty of the work is confirmed by the results of a periodic information and patent analysis, and by four patents received for inventions on the topic under consideration.

Aim of the Study. The study is aimed at improving the acoustic-cavitation qualities of a disk-shaped vortex chamber used as a liquid whistle.

Materials and Methods. In the study, there were used numerical modeling of flows in the FlowVision program, experimental determination of flow rates using a pitot tube, film method, removal of frequency response using SpectraPLUS 5.0, and visualization of flows and processes on optically transparent devices by the method of color indicators in stroboscopic lighting high-speed video shooting.

Results. The mechanism of sound generation and noise in the flow transiting through the device has been found. The corrective effect of pump pulsations $f = 300$ Hz on the sound generation mechanism was revealed. The disc-shaped character of the device, which encloses the input flow in cross section from three directions, contributes to creating a more expressive acoustic signal, forming two conjugate torus vortices along the shell that ensures uniformity of the circumferential flow, attenuation of longitudinal high-frequency oscillations $f = 200$ kHz, and the creation of periodic zones of increased pressure along the shell. The concentrated tangential entrance to the device determines the central asymmetry of the flows in it and a number of processes that create acoustic noise.

Discussion and Conclusion. The frequency of the useful acoustic signal in the vortex chamber is proportional to the speed of the transit flow, and the amplitude is proportional to the dimensions of the device. Along with the useful signal created by the interaction of the peripheral and input parts of the transit flow, noise of similar frequencies is created in the device. Other sources of noise generation are due to the presence of a concentrated tangential input. The formation of two conjugate torus vortices along the shell can be used as a means of controlling the process of interaction between parts of the transit flow. The disc-shaped vortex chamber combines the functions of sound generation and the ability to create a centrifugal field, which expands its technological capabilities.

Keywords: disk-shaped vortex chamber, liquid, cavitation, flows, structure, sound, frequency

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Ivanov E.G., Vorotnikov I.L., Pasin A.V., Sedov A.V., Oshurkov M.V. Flow Structure and Periodic Processes in a Disc-Shaped Vortex Chamber of a Hydrodynamic Cavitator. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):444–460. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.444-460>

Введение. Совершенствование существующих и создание новых технологических процессов целесообразно выполнять при использовании новых физических принципов действия, например, периодических акустико-кавитационных процессов. Суть этих процессов состоит в том, что при облучении воды звуковым полем в вакуумметрических фазах упругих волн образуются местные разрывы жидкости – каверны. В манометрические фазы противоположные стенки каждой каверны сближаются со скоростью, превышающей две скорости звука, за счет чего достигается чрезвычайно высокая плотность энергии в точке встречи. При этом особую ценность представляют взаимные переходы энергий из одних форм в другие, недостижимые в обычных условиях как внутри кавитационной области, так и рядом с ней.

Акустико-кавитационные технологии начали использоваться в 50-х гг. прошлого столетия. Сначала в металлургии, химической и горной промышленности, а затем еще более обширно в фармацевтической и сельскохозяйственной отраслях¹. При акустико-кавитационной обработке изменяются свойства воды. Например, при поливе водой, прошедшей обработку в кавитаторе, повышается всхожесть семян и интенсивность развития из них растений как за счет их непосредственной обработки в кавитаторе, так и за счет их последующего полива. Другим достоинством кавитационной обработки является возможность изменять концентрацию солей в растворах.

В предлагаемой работе рассматривается дискообразная вихревая камера, по которой отсутствует необходимая информация как по структуре потоков, так и по механизму звукообразования и источникам сопутствующих шумов.

Таким образом, целью работы является выявление и возможное усиление периодических процессов и течений, участвующих в создании необходимого акустического сигнала в дискообразной вихревой камере с тангенциальным входом и осевым выходом, а также вскрытие непроезжих процессов и их ослабление.

Обзор литературы. Создание кавитационных областей можно обеспечить кавитатором гидродинамического типа, преимущества которого состоят в том, что при его использовании можно достичь значительной мощности и существенных размеров акустического поля, следовательно, и повышения производительности любых технологических процессов. Это обстоятельство позволяет их встраивать в производственные линии без риска разрушения конструкции, как это имеет место при использовании магнитострикционных и пьезоэлектрических излучателей упругих волн.

¹ Основы физики и техники ультразвука : учебное пособие для вузов / Б. А. Агранат [и др.]. М. : Высшая школа, 1987. 352 с.

Среди акустических излучателей гидродинамического типа можно выделить излучатели на основе пластин, обтекаемых потоком жидкости, излучатели на основе периодически воспроизводящихся и разрушающихся областей отрыва на уступах, поворотах, кольцевых струй и т. д., а также излучатели на основе взаимодействия сливающихся под углом потоков. Наименее изученным является акустический излучатель на основе взаимодействия потоков – он же составляет основу рабочего процесса дискообразной вихревой камеры с тангенциальным входом и центральным осевым выходом.

Особым достоинством такого излучателя является вихревой характер течения в нем, что важно, например, при необходимости одновременной сепарации компонентов рабочей среды наряду с ее кавитационной обработкой [1].

Вихревые камеры используются в промышленности с 30-х гг. прошлого столетия как самостоятельные устройства (вихревые камерные экстракторы осадка [2]; усилители сигналов в пневмонике; жидкостные свистки), а также как устройства, составляющие основу для других изделий (гидроциклоны [3; 4]; вихревая труба Ранка-Хилша при работе на газовых средах² [5; 6]; теплогенераторы Потапова для работы на жидкостях [7]).

В рассматриваемом качестве вихревая камера представляется как генератор акустических колебаний в жидкости. В промышленности имеются и другие устройства, создающие акустическое поле в жидкости, например, конические кавитационные устройства [8; 9], которые являются фрагментами трубы Вентури, а также размещенные на корпусе активные элементы [10], конструкции с использованием суперкавитирующих полостей [11], устройства, генерирующие кавитацию за счет потока, протекающего через перфорированные ограждения [12]. Конструкции рассмотренных устройств имеют протяженные размеры и требуют высоких скоростей жидкости, что обуславливает высокую металлоемкость и гидравлические потери.

В вихревой камере упругие колебания зарождаются от столкновения двух фрагментов одного потока – тангенциального входного и ранее вошедшего окружного – внутри камеры, что делает данное устройство компактным и малозатратным с точки зрения гидравлики.

Многие публикации по вихревым камерам касаются только вопросов сепарации многофазных жидкостей [3; 4]. В них рабочий процесс вихревой камеры обобщен с течением в продолжающемся объеме в виде конического пространства, что значительно видоизменяет структуру течений внутри вихревой камеры.

В работах [5; 13] представлена конструкция, в наибольшей степени соответствующая исследуемой вихревой камере, однако в них рассматривается камера в совокупности с цилиндрическим корпусом, а внимание акцентируется больше на течениях в самом корпусе. При этом рабочей средой является не вода, а газы, что исключает протекание кавитационных процессов.

Среди публикаций, посвященных вихревым камерам, работающим на воде, можно назвать достойные работы с точки зрения действующей совокупности

² Xue Y. The Working Principle of a Ranque-Hilsch Vortex Tube // School of Mechanical Engineering. The University of Adelaide South. Australia, 2012. 139 p. URL: <https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/bitstream/2440/82139/8/02whole.pdf> (дата обращения: 11.04.2024).

физических процессов [14; 15] по установлению структуры потоков в вихревой камере, однако они посвящены устройству с протяженным в направлении оси вращения объемом, где также недостаточно акцентирована область взаимодействия конкурирующих потоков.

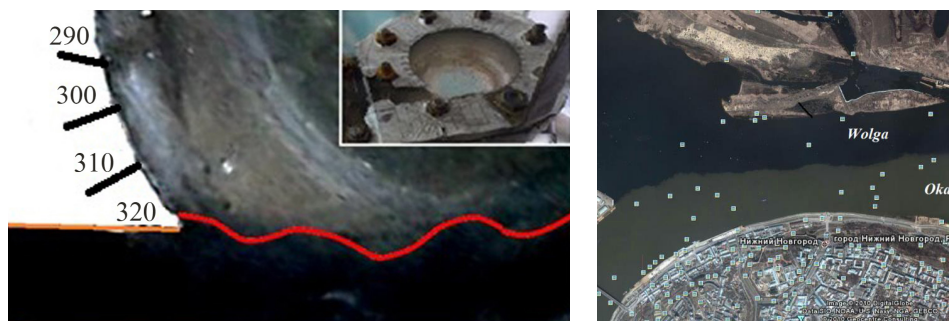
Механизм звукообразования в вихревых камерах не раскрыт в печати с позиций взаимодействия потоков. В литературе имеются отдельные публикации по гидродинамической акустической кавитации [16], но не в вихревой камере, а по динамике акустических волн [17] и механизму суперкавитации [11]. Вместе с тем, при использовании ранее аналогичных вихревых камер в пневмонике в качестве усилителей сигнала у них обнаружился серьезный недостаток – повышенный уровень акустических шумов, что с одной стороны, способствует созданию акустического поля высокой напряженности, а с другой – требует сепарации из всего воспроизводимого спектра только необходимых частот.

Материалы и методы. В соответствии с поставленной целью повышения эффективности рабочего процесса вихревой камеры путем усиления упругих колебаний требуемых частот и ослабления остальных следует выявить структуру течений в вихревой камере и обосновать роль каждого из них с оценкой диапазонов воспроизводимых ими частот.

Поскольку в рабочем процессе вихревой камеры присутствует совокупность различных физических явлений (течения, распространение акустических волн, механические вибрации, кавитация, физические поля и т. д.), появилась необходимость использования арсенала различных по содержанию методов исследования.

Для установления структуры течений и мест протекания кавитации авторами использовались различные теоретические (числовое моделирование в среде FlowVision; расчет скоростей течений на основе хрестоматийных положений гидромеханики) и экспериментальные подходы (метод пленок для установления зон проявления кавитации; визуализация потоков с помощью красящих растворов на низконапорном стенде вихревой камеры; метод скоростной видеосъемки на реальной конструкции вихревого кавитатора; определение скоростей отдельных элементов потоков с использованием трубки Пито и регистрирующих манометров класса точности 0,4; визуализация в стробоскопическом освещении на оптически прозрачных моделях; компьютерная программа Spectrum и студийный акустический микрофон для снятия амплитудно-частотных характеристик (АЧХ); виброизмерительная аппаратура; аппаратура для измерения напряженности магнитного поля вокруг кавитационных областей).

Результаты исследования. Инициатором всех процессов, протекающих в дискообразной вихревой камере, является взаимодействие входного тангенциального потока с ранее вошедшей окружной его компонентой, совершившей почти полный оборот вдоль обечайки. В этом случае из-за периодического взаимного обжатия конкурирующих потоков создаются фронты давлений (рис. 1), при прохождении которых через внутренний объем вихревой камеры создается кавитация (рис. 2).



Р и с. 1. Образование упругих волн от слияния под углом двух потоков:
 а) в вихревой камере (на специальном стенде с введением красящего раствора-визуализатора);
 б) при слиянии гигантских потоков рек Оки и Волги

F i g. 1. Formation of elastic waves from the merger at an angle of two flows:
 а) in a vortex chamber (on a special stand with the introduction of a coloring solution-visualizer);
 б) at the confluence of the giant streams of the Oka and Volga rivers

Источник: а) снимок сделан при исследовании взаимодействия входного и окружного потоков (автор Е. Г. Иванов, 22.09.2023); б) снимок сделан в приложении Google Карты.

Source: а) the snapshot is made in studying the interaction of input and circumferential flow (author E.G. Ivanov, 22.09.2023); б) the snapshot is made in the Google Maps app.



Р и с. 2. Визуализация проявления акустико-кавитационных процессов от конкурентных сливающихся потоков методом пленок

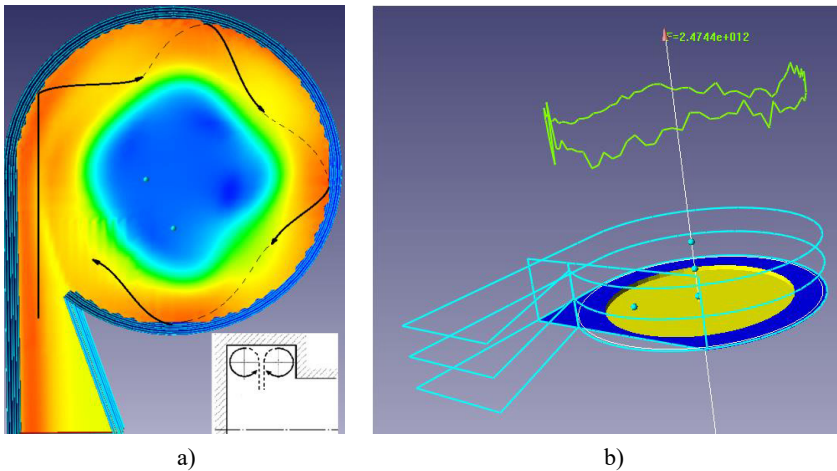
F i g. 2. Visualization of the manifestation of acoustic-cavitation processes from competitive merging flows using the film method

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены авторами.

Source: hereinafter in this article all figures are drawn up by the authors.

При этом стоит отметить, что энергия упругого сигнала очень мала по сравнению с энергией потоков, образующих сигнал. В акустических излучателях гидродинамического типа она не превышает $6 \cdot 10^{-3}$.

³ Основы физики и техники ультразвука.



Р и с. 3. Распределение давления по объему вихревой камеры и наглядная интерпретация двух сопряженных торовых вихрей вдоль обечайки корпуса, полученных с помощью программного комплекса FlowVision:
 а) линии тока окружного вихревого потока; б) распределение давлений вдоль обечайки корпуса от воздействия на него торовых вихрей

Fig. 3. Pressure distribution throughout the volume of the vortex chamber and a visual interpretation of two conjugate torus vortices along the body shell, obtained using the FlowVision software package:
 a) streamlines of the circumferential vortex flow; b) distribution of pressure along the shell of the housing due to the influence of torus vortices on it

По мере дальнейшего прохождения вошедшего потока его структура на окружном участке подвергается «эффекту поворота» с образованием двух сопряженных торовых вихрей (рис. 3), которые взаимодействуют с обечайкой путем рикошета в четырех точках, обуславливая местное повышение давления. Частота вращения жидкости в торовом вихре $n_{\text{тор}}$ может быть определена из выражения:

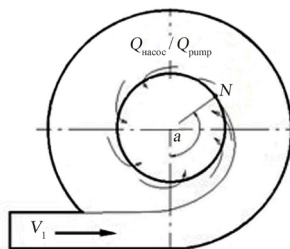
$$n_{\text{тор}} \cong \frac{2V_1}{\pi R},$$

где V_1 – входная скорость потока в вихревую камеру, м/с; R – радиус обечайки вихревой камеры, м.

Таким образом, каждая неоднородность параметров потока будет создавать шум с частотой пропорциональной числу соударений об обечайку в течение времени нахождения в рабочем объеме, то есть $f \cong 420 \text{ Hz}$.

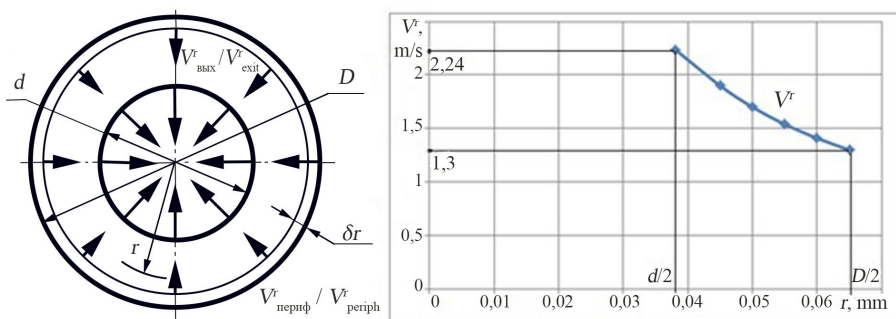
Рассматриваемые сопряженные торовые вихри способствуют перемешиванию и однородности параметров потока в радиальном направлении, а также обуславливают дополнительные затраты энергии на их поддержание.

По мере дальнейшего движения в потоке за счет гидравлических сопротивлений от деформации при повороте, его скорость падает, что приводит к увеличению поперечного сечения, и на угловой величине α (рис. 2, 4) его внутренняя граница достигает точки входа в центральное осевое отверстие, после которой он стекает в центральное осевое отверстие по всей длине окружности.



Р и с. 4. Конфигурация транзитного течения в вихревой камере
F i g. 4. Configuration of transit flow in the vortex chamber

Следует отметить, что у этого потока должна возрасти радиальная составляющая скорости по условию постоянства расходов в районе обечайки $V_{\text{периф}}^r = \frac{Q}{\pi D b}$ и у горловины центрального осевого отверстия $V_{\text{вых}}^r = \frac{Q}{\pi d b}$ по закономерности, изображенной на рисунке 5.



а) б)
Р и с. 5. Закономерность изменения осредненной радиальной составляющей скорости рабочей среды вдоль радиуса вихревой камеры:
а) схема осредненного радиального течения от $V_{\text{периф}}^r$ до $V_{\text{вых}}^r$;
б) закономерность изменения радиальной скорости осредненного радиального течения

F i g. 5. The pattern of changes in the averaged radial component of the velocity of the working medium along the radius of the vortex chamber:
а) diagram of the averaged radial flow from V_{periph}^r to V_{exit}^r ;
б) the pattern of changes in the radial velocity of the averaged radial flow

Радиальная составляющая скорости (рис. 5) определяется выражением:

$$V^r = \frac{Q}{2\pi b r},$$

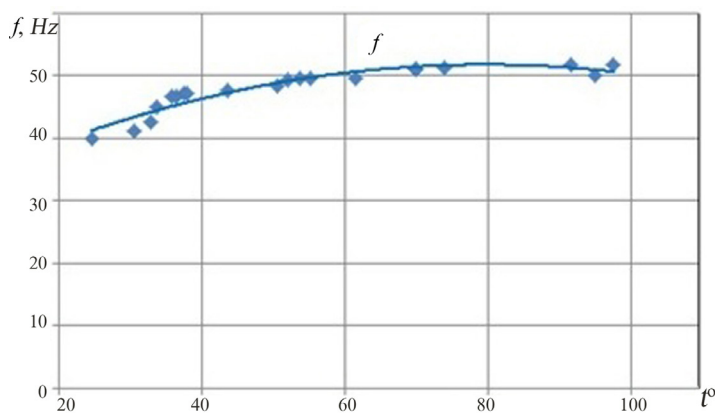
где Q – подача насоса кавитатора, м³/с; b – толщина вихревой камеры, м; D – диаметр вихревой камеры, м; d – диаметр выходного осевого отверстия вихревой камеры, м; r – текущий радиус вихревой камеры, м.

Однако по причине того, что в реальной конструкции вихревой камеры отсутствует симметрия потоков (рис. 4) вследствие наличия тангенциального входа, радиальная составляющая неравномерна по окружности, что объясняет создание акустического шума с частотой, определяемой частотой вращения рабочей среды на радиусе кромки центрального выходного отверстия. Представим это в виде формулы:

$$f = \frac{V_{\text{окр}}}{\pi d} = 40 \div 55 \text{ Hz},$$

где f – частота вращения рабочей среды на радиусе кромки центрального выходного отверстия, Hz; $V_{\text{окр}}$ – окружная скорость вблизи кромки центрального выходного отверстия, м/с.

Окружная скорость $V_{\text{окр}}$ рассчитывается по скоростному напору, определенному экспериментально, что дало основание для расчета частоты создаваемых упругих волн (рис. 6).

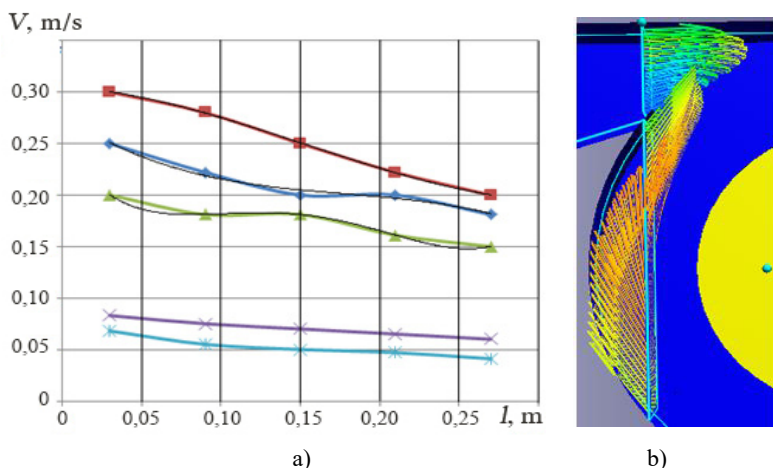


Р и с. 6. Частота упругих колебаний в жидкости, вызванных неравномерностью в окружном направлении радиальной составляющей скорости транзитного потока при различных температурных режимах

F i g. 6. Frequency of elastic vibrations in a liquid caused by unevenness in the circumferential direction of the radial component of the transit flow velocity at different temperature conditions

Зависимость $f(t^\circ)$ на режимах невысоких температур (23–78 °C) имеет восходящий характер вследствие повышения скорости течений в вихревой камере из-за снижения плотности рабочей жидкости. В этом случае плотность жидкости объясняет снижение момента на валу питающего насоса. Далее повышается частота вращения рабочего колеса в пределах диапазона скольжения приводного асинхронного двигателя, что и вызывает рост сначала подачи насоса, а затем и скоростей в структуре потоков. Однако при достижении температур $t = 70 - 80$ °C рабочая жидкость (вода) становится более склонной к разрыву сплошности, наступают кавитационные процессы в питающем насосе, что снижает его подачу, скорость потоков, частоту упругих возмущений в выходном расходном потоке.

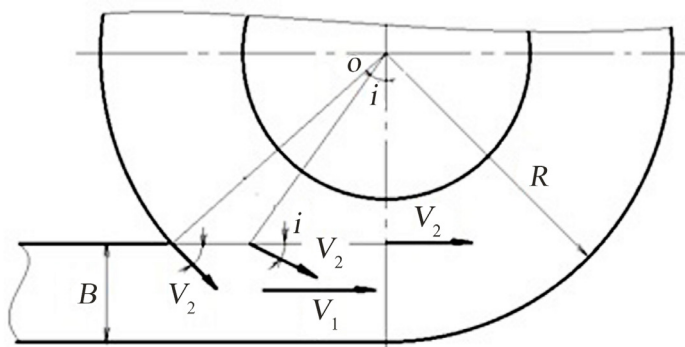
Так, снижение интенсивности окружной части потока происходит из-за двух вышеперечисленных обстоятельств – сопряженных торовых вихрей и распределенных по длине окружности выходного отверстия стоков (рис. 7).



Р и с. 7. Интерпретация снижения интенсивности окружной части потока, полученная:
 а) на стенде с красящим раствором-визуализатором (рис. 1);
 б) числовым моделированием в среде FlowVision

Fig. 7. Interpretation of the decrease in the intensity of the flow circumferential part, obtained:
 а) on a stand with a coloring solution-visualizer (Fig. 1);
 б) by numerical modeling in the FlowVision program

Входящий в вихревую камеру поток вначале отжимается окружным течением к периферии (рис. 4) и не участвует в создании транзитного расхода. На этом секторе потоки взаимодействуют, создавая как полезный акустический сигнал (рис. 1), так и шумы всех мод.



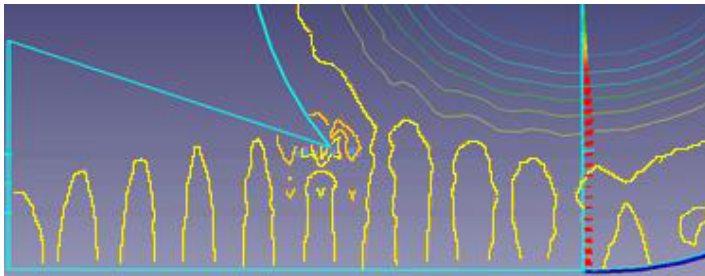
Р и с. 8. Схема взаимодействия входного V_1 и окружной V_2 фрагментов на входе в вихревую камеру

Fig. 8. Scheme of interaction of the input V_1 and circumferential V_2 fragments at the entrance to the vortex chamber

Появление шумов при взаимодействии потоков вызвано тем, что отдельные элементы потоков имеют разные углы взаимодействия ($\arccos \frac{R-B}{R} \geq i \geq 0$) при их слиянии, а также разные энергии линий тока окружного потока, что обуславливает дисгармоничность получаемого акустического сигнала и генерирование шумов близких частот (рис. 8, 1а).

С целью получения близких значений параметров сливающихся потоков авторами настоящего исследования предложены техническое решение, предполагающее предварительное разделение потока после насоса на два равнозначных с последующим их симметричным слиянием [18], и вихревая камера с другим видом взаимодействия потоков. Для исключения неравномерности энергии отдельных линий тока авторы предлагают установить между потоками в районе их взаимодействия различные виды прокладок [19].

Периодическое обжатие входного потока окружным, создающее периодическую структуру последующего течения, обуславливает чередующиеся области повышенного и пониженного давлений с последующим взаимодействием фронтов повышенных давлений и периодической сменой знака давлений в этих областях (рис. 9).



Р и с. 9. Интерпретация периодичности давлений во входящем потоке от его взаимодействия с окружным (получена числовым моделированием в среде FlowVision)

F i g. 9. Interpretation of the periodicity of pressure in the incoming flow from its interaction with the surrounding one (obtained by numerical modeling in the FlowVision program)

Этот процесс также создает акустический шум в диапазоне частот:

$$f_4 = \frac{4c f_c}{V_1} \cong 200 \text{ kHz},$$

где f_c – расчетная частота вихревой камеры, Hz; V_1 – скорость входного потока, m/s; c – скорость звука в воде, m/s.

Следующим источником звукообразования является область отрыва потока от глухой торцевой стенки вихревой камеры, которая состоит из двух частей – центральной постоянной, заполненной продуктами дегазации и паром, и кольцевой мерцающей с частотой $f_3 \cong 10 \text{ Hz}$ (рис. 10).



Р и с. 10. Визуализация области отрыва потока через оптически прозрачную глухую торцевую стенку вихревой камеры

F i g. 10. Visualization of the flow separation region through the optically transparent solid end wall of the vortex chamber

В итоге выявленные источники создают акустические сигналы, АЧХ которых представлена на рисунке 11.



Р и с. 11. АЧХ вихревого кавитатора с насосным агрегатом

F i g. 11. AFC of a vortex cavitator with a pumping unit

Согласно АЧХ исследуемой вихревой камеры можно констатировать, что амплитуда упругих колебаний в диапазоне $f = 1\text{--}3\text{ kHz}$ (требуемые частоты) не превышает амплитуды колебаний насосного агрегата $f_p = 50\text{ Hz}$ и пульсаций в насосе от взаимодействия каждой его лопасти с языком корпуса $f = z \cdot n = 300\text{ Hz}$, что говорит о необходимости совершенствования устройства по отмеченным направлениям.

Обсуждение и заключение. Специфика конструкции дискообразной вихревой камеры с тангенциальным входом и осевым центральным выходом отражается на особенностях ее рабочего процесса.

Ограждение входного потока с трех направлений – обечайкой по периферии, торцовыми крышками корпуса по бокам – создает более выразительный и полезный акустический сигнал при взаимодействии окружающей и входящей компонент потока, способствует образованию двух сопряженных торковых вихрей в продольном направлении. Они обеспечивают большую однородность течения на криволинейной траектории за счет перемешивания в радиальном направлении, затухание продольных колебаний во входном потоке при достижении им криволинейного участка.

Сосредоточенный тангенциальный вход обозначает центральную асимметрию течений в вихревой камере и значит ряд процессов, обуславливающих акустический шум: от неравномерности радиальной составляющей выходного течения по окружному направлению; от образования двух сопряженных торковых вихрей в продольном направлении, обеспечивающих последовательные биения по обечайке корпуса; от периодического отрыва, образованного в центральной части глухой торцовой крышки.

Взаимодействие входной и окружающей компонент расходного потока, кроме полезного акустического сигнала, создает акустический шум вследствие разных условий взаимосвязи линий тока.

Наиболее выразительным звуковым источником в рабочем процессе вихревой камеры при ее работе с центробежным насосом являются пульсации от взаимодействия лопастей рабочего колеса с языком корпуса насоса с частотой $f = 300$ Hz.

Установлен механизм образования упругой волны в дискообразной вихревой камере – взаимодействие двух частей одного потока: входного тангенциального и предыдущей его части, уже совершившей почти полный оборот вдоль обечайки. Выявлена дисгармоничность получаемого акустического сигнала вследствие разных условий взаимодействия входной и окружающей частей потоков как на разных радиусах вихревой камеры, так и за счет разных скоростей элементов окружного потока. Также установлено корректирующее влияние пульсаций силового насоса с частотой 300 Hz на образование полезных упругих волн. В пределах каждого периода пульсаций укладывается несколько циклов (пропорционально скорости) взаимодействия входного и окружного потоков.

Выявлена структура потоков в вихревой камере, состоящая из торковых сопряженных вихрей в окружном потоке,двигающемся вдоль обечайки вихревой камеры; переменной радиальной составляющей скорости расходного потока в направлении центрального выходного отверстия; асимметрии структуры вышеназванных потоков, обусловленных наличием входного тангенциального патрубка.

Обнаружены источники акустических шумов: при генерации полезного акустического сигнала за счет разных условий взаимодействия входной и окружающей частей потоков как из-за разных углов слияния их частей, так и за счет разных энергий отдельных линий тока окружного потока; шумов в выходящем из вихревой камеры вихревом потоке с $f = 40\text{--}55$ Hz, образованных вследствие неравномерности по окружности радиальной составляющей скорости расходного потока; в окружном потоке с $f = 200$ kHz, возникающем за счет периодического сжатия и растяжения последовательно расположенных чередующихся разреженных и сжатых участков, порожденных от взаимодействия входного и окружного потоков; от пульсаций

параметров потока из силового насоса с частотой $f = z \cdot n = 300$ Hz; от вибраций двигателя и элементов системы привода с частотой $f = 50$ Hz.

Предложены конструктивные мероприятия по усилению полезных акустических сигналов за счет установки подвижной прокладки в плоскости взаимодействия окружного и входного потоков и за счет замены вихревой камеры камерой с организацией взаимодействия двух пересекающихся идентичных потоков с возможностью изменения угла их взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sivakumar M., Tang S. Y., Tan Kh. W. Cavitation Technology – A Greener Processing Technique for the Generation of Pharmaceutical Nanoemulsions // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014. Vol. 21, Issue 6. P. 2069–2083. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.025>
2. Athar M., Srotriya S. Velocity Distribution in Vortex Chamber at High Water Abstraction Ratio // *Hydrologic Modeling*. 2018. Vol. 81. P. 459–473. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_32
3. Desander Mini-Hydrocyclones Applied to the Separation of Microspheres and Sand in Non-Newtonian Fluid: Efficiencies and Drag Analysis / D. G. Alves [et al.] // *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 234. Article no. 116131. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116131>
4. Study on Multi-Component Particle Behavior in a Hydrocyclone Classifier Using Experimental and Computational Fluid Dynamics Techniques / M. Padhi [et al.] // *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 229. Article no. 115698. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115698>
5. Investigation on Temperature Separation and Flow Behaviour in Vortex Chamber / Y. Matsuno [et al.] // *Journal of Thermal Science*. 2015. Vol. 24. P. 149–154. <https://doi.org/10.1007/s11630-015-0767-1>
6. Experimental Study on Temperature Separation in Vortex Chamber / Sh. Matsuo [et al.] // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 105. P. 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.073>
7. Теплогенератор и устройство для нагрева жидкостей : патент 2045715 Российская Федерация / Потапов Ю. С. ; заявл. 26.04.1993 ; опубл. 10.10.1995. URL: <https://allpatents.ru/patent/2045715.html> (дата обращения: 11.04.2024).
8. Способ работы эжекторной тепловыделяющей установки : патент 2127832 Российская Федерация / Фисенко В. В. № 97103798/06 ; заявл. 12.03.1997 ; опубл. 20.03.1999.
9. Способ преобразования электрической энергии в тепловую в эжекторно-вихревой установке : патент 2253047 Российская Федерация / Мамаев А. Н. № 2002132569/06 ; заявл. 04.12.2002 ; опубл. 20.08.2004.
10. Min J. C., Ki K. C., Gyu P. W. Cavitation Device of Underwater Moving Body and Underwater Moving Body Having the Same : patent 2013298819 USA. № US 8,881,667 B2 ; application 13.08.2012 ; publication 11.11.2014. URL: <https://patents.google.com/patent/US8881667B2/en> (дата обращения: 11.04.2024).
11. Karn A., Arndt R. E. A., Hong J. An Experimental Investigation into Supercavity Closure Mechanisms // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 789. P. 259–284. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.680>
12. Rade V. Cavitation Generation : patent 2015001315 Great Britain. № WO2015001315A2 ; application 02.07.2013 ; publication 01.08.2015. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2015001315A2/en> (дата обращения: 11.04.2024).
13. Rafiee S. E., Sadeghiazad M. M. Three-Dimensional CFD Simulation of Fluid Flow inside a Vortex Tube on Basis of an Experimental Model – the Optimization of Vortex Chamber Radius // *International Journal of Heat and Technology*. 2016. Vol 34, No. 2. P. 236–244. <https://doi.org/10.18280/ijht.340212>
14. Akhmetov D. G., Akhmetov T. D. Flow Structure in a Vortex Chamber // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016. Vol. 57, Issue 5. P. 879–887. <https://doi.org/10.1134/s0021894416050151>

15. Akhmetov D. G., Akhmetov T. D., Pavlov V. A. Flow Structure in a Ranque-Hilsch Vortex Tube // *Doklady Physics*. 2018. Vol. 63. P. 235–238. <https://doi.org/10.1134/s1028335818060010>
16. Mechanism and Dynamics of Hydrodynamic-Acoustic Cavitation (НАС) / P. Wu [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 49. P. 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.021>
17. Numerical Simulation of Single Bubble Dynamics under Acoustic Standing Waves / S. Qiu [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 49. P. 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.006>
18. Гидродинамический кавитатор : патент 2588298 Российская Федерация / Иванов Е. Г. № 2015104721 ; заявл.12.02.2015 ; опубл. 27.04.2016.
19. Теплогенератор : патент 2594394 Российская Федерация / Иванов Е. Г., Самоделкин А. Г. № 2014134116 ; заявл.19.08.2014 ; опубл. 10.03.2016.

REFERENCES

1. Sivakumar M., Tang S.Y., Tan Kh.W. Cavitation Technology – A Greener Processing Technique for the Generation of Pharmaceutical Nanoemulsions. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2014;21(6):2069–2083. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.025>
2. Athar M., Srotriya S. Velocity Distribution in Vortex Chamber at High Water Abstraction Ratio. *Hydrologic Modeling*. 2018;81:459–473. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5801-1_32
3. Alves D.G., Teodoro da Silva J.T., Quintino D.B. Ataide C.H. Desander Mini-Hydrocyclones Applied to the Separation of Microspheres and Sand in Non-Newtonian Fluid: Efficiencies and Drag Analysis. *Separation and Purification Technology*. 2020;234:116131. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116131>
4. Padhi M., Mangadoddy N., Sreenivas T., Vakamalla T.R., Mainza A.N. Study on Multi-Component Particle Behavior in a Hydrocyclone Classifier Using Experimental and Computational Fluid Dynamics Techniques. *Separation and Purification Technology*. 2019;229:115698. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115698>
5. Matsuno Y., Fukushima Y., Matsuo Sh., Hashimoto T., Setoguchi T., Kim H.D. Investigation on Temperature Separation and Flow Behaviour in Vortex Chamber. *Journal of Thermal Science*. 2015;24:149–154. <https://doi.org/10.1007/s11630-015-0767-1>
6. Matsuo Sh., Matsuno Y., Fukushima Y., Mamun M., Hashimoto T., Setoguchi T., et al. Experimental Study on Temperature Separation in Vortex Chamber. *Procedia Engineering*. 2015;105:464–471. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.05.073>
7. Potapov Yu.S. [Heat Generator and Device for Heating Liquids]. Patent 2045715 Russian Federation. 1995 October 10. (In Russ.) Available at: <https://allpatents.ru/patent/2045715.html> (accessed 11.04.2024).
8. Fisenko V.V. [The Method of Operation of the Ejector Heat Generating Unit]. Patent 2127832 Russian Federation. 1999 March 20. (In Russ.)
9. Mamaev A.N. [A Method for Converting Electrical Energy into Thermal Energy in an Ejector-Vortex Installation]. Patent 2253047 Russian Federation. 2004 August 20. (In Russ.)
10. Min J.C., Ki K.C., Gyu P.W. Cavitation Device of Underwater Moving Body and Underwater Moving Body Having the Same. Patent 2013298819 USA. 2014 November 11. Available at: <https://patents.google.com/patent/US8881667B2/en> (accessed 11.04.2024).
11. Karn A., Arndt R.E.A., Hong J. An Experimental Investigation into Supercavity Closure Mechanisms. *Journal of Fluid Mechanics*. 2016;789:259–284. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.680>
12. Rade V. Cavitation Generation. Patent 2015001315 Great Britain. 2015 August 1. Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2015001315A2/en> (accessed 11.04.2024).
13. Rafiee S.E., Sadeghiazad M.M. Three-Dimensional CFD Simulation of Fluid Flow Inside a Vortex Tube on Basis of an Experimental Model – the Optimization of Vortex Chamber Radius. *International Journal of Heat and Technology*. 2016;34(2):236–244. <https://doi.org/10.18280/ijht.340212>

14. Akhmetov D.G., Akhmetov T.D. Flow Structure in a Vortex Chamber. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2016;57(5):879–887. <https://doi.org/10.1134/s0021894416050151>
15. Akhmetov D.G., Akhmetov T.D., Pavlov V.A. Flow Structure in a Ranque-Hilsch Vortex Tube. *Doklady Physics*. 2018;63:235–238. <https://doi.org/10.1134/s1028335818060010>
16. Wu P., Bai L., Lin W., Wang X. Mechanism and Dynamics of Hydrodynamic-Acoustic Cavitation (HAC). *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;49:89–96. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.07.021>
17. Qiu S., Ma X., Huang B., Li D., Wang G., Zhang M. Numerical Simulation of Single Bubble Dynamics under Acoustic Standing Waves. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;49:196–205. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.08.006>
18. Ivanov E.G. [Hydrodynamic Cavitator]. Patent 2588298 Russian Federation. 2016 April 27. (In Russ.)
19. Ivanov E.G., Samodelkin A.G. [Heat Generator]. Patent 2594394 Russian Federation. 2016 August 20. (In Russ.)

Об авторах:

Евгений Геннадьевич Иванов, кандидат технических наук, доцент, доцент Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7105-3909>, ivanov.e.g@mail.ru

Игорь Леонидович Воротников, доктор экономических наук, профессор, ректор Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3631-8275>, vorotnikov.i@nnsaa.ru

Александр Валентинович Пасин, доктор технических наук, профессор, профессор Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0797-4743>, pasin_av@mail.ru

Александр Валерьевич Седов, магистрант Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3460-7420>, с.с.с.p.sedov@yandex.ru

Максим Викторович Ошурков, кандидат технических наук, доцент, доцент Нижегородского государственного агротехнологического университета (603107, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр-т Гагарина, д. 97), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5132-6440>, m.oshurkov@nnsaa.ru

Заявленный вклад авторов:

Е. Г. Иванов – научное руководство, подготовка текста.

И. Л. Воротников – общее руководство проектом, анализ и дополнение текста статьи.

А. В. Пасин – поиск аналитических материалов в отечественных и зарубежных источниках.

А. В. Седов – верстка и форматирование работы.

М. В. Ошурков – сбор данных и доказательств, проведение экспериментов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 26.02.2024; поступила после рецензирования 25.04.2024;
принята к публикации 06.05.2024*

Authors the contribution:

Evgeni G. Ivanov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7105-3909>, ivanov.e.g@mail.ru

Igor L. Vorotnikov, Dr.Sci. (Econ.), Professor, Rector of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3631-8275>, vorotnikov.i@nnsaa.ru

Aleksander V. Pasin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0797-4743>, pasin_av@mail.ru

Alexander V. Sedov, Master's Student of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3460-7420>, c.c.c.p.sedov@yandex.ru

Maksim V. Oshurkov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Nizhny Novgorod State Agrotechnological University (97 Prospekt Gagarina, Nizhny Novgorod 603107, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5132-6440>, m.oshurkov@nnsaa.ru

Authors contribution:

E. G. Ivanov – research supervision, writing of the draft.

I. L. Vorotnikov – managing the research project, analyzing and supplementing the text.

A. V. Pasin – searching for analytical materials in Russian and international sources.

A. V. Sedov – making the layout and the formatting of the article.

M. V. Oshurkov – collecting data and evidence, implementation of experiments.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 26.02.2024; revised 25.04.2024; accepted 06.05.2024