

ЭФФЕКТ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ШУМ ПРОТЕЗИРУЕМЫХ КЛАПАНОВ СЕРДЦА

В.А. ВОСКОБОЙНИК¹, А. РЕДАЕЛЛИ², Б. ФИОРЕ², О.Р. ЧЕРТОВ³,
А.А. ВОСКОБОЙНИК¹, А.В. ВОСКОБОЙНИК¹, Ф. ЛУКЕРИНИ²

¹ *Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, Украина*

² *Политехнический институт, Милан, Италия*

³ *Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, Киев, Украина*

Экспериментально определено влияние вязкости жидкости на гидроакустические характеристики струй, вытекающих из полузакрытого и открытого механического двухлепесткового клапана сердца. Обнаружены интегральные и спектральные характеристики гидродинамического шума струй глицеринового раствора и течения чистой воды ниже по потоку от двухлепесткового митрального клапана сердца при различном расходе жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

Самым мощным источником звуков в кровеносной системе является сердце, поскольку в нем происходит перемещение стенок желудочков, предсердий и клапанов в течение сокращений сердечной мышцы. Внутри сердце разделено перегородками на четыре камеры: два желудочка и два предсердия (левые и правые). Между ними располагаются четыре клапана: митральный, трикуспидальный, аортальный и пульмональный. Клапаны в определенный момент открываются и закрываются, формируя однонаправленное движение крови, препятствуя регургитации, то есть обратному течению крови. Натуральные сердечные клапаны состоят из тонких, гибких лепестков, которые при открывании и закрывании формируют импульсный кровяной поток. Когда лепестки сердечных клапанов повреждаются, то нередко их заменяют протезами. В США проводятся более 80 тысяч операций по пересадке сердечных клапанов ежегодно, а в мире более 300 тысяч таких операций [1, 2]. Сейчас для пересадки сердечных клапанов используются три вида протезов, а именно, механический, биопротезный, и гомотрансплантанный клапаны. В основном механические клапаны производятся в виде двухлепестковой конструкции, состоящей из пришиваемого к тканям сердца кольца, поддерживающего два подвижных лепестка [2, 3].

Традиционно звуки сердца делят на тоны, которые обусловлены закрытием клапанов, и звучат они как короткие и сильные импульсы, а также шумы в промежутках между тонами, которые имеют меньшую интенсивность и обусловлены пульсирующим струйным и вихревым движением крови [4, 5]. Поскольку тоны сердца слышны всегда и только отклонение их характеристик от нормы указывает на патологию, то появление интенсивных шумов сердечно-сосудистой системы становится сигналом нарушений нормального кровотока. Как показывают исследования, в основном шумы сердца указывают на повреждение работы клапанов желудочков.

В связи с этим существует актуальная проблема в создании надежных методов и средств диагностики работы механических клапанов сердца. Предлагается и проведены предварительные исследования с положительным результатом по использованию гидроакустической и виброакустической измерительной техники, как возможного портативного оборудования в дополнение к существующей Доплеровской эхокардиографии по диагностике тромбоза механических митральных клапанов [6–9]. В

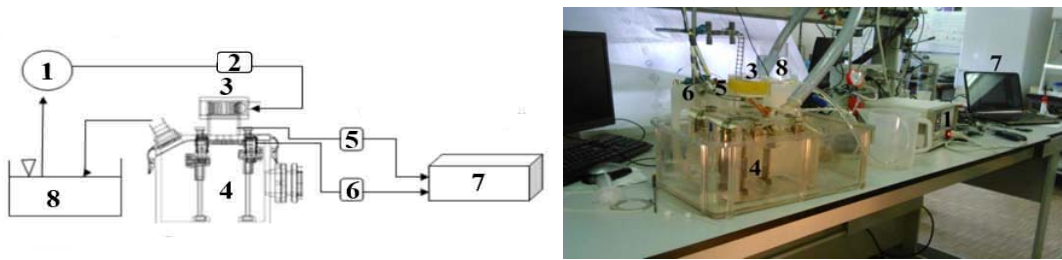


Рис. 1

роботах [8, 9] показано, що при моделюванні тромбообразования на одному из лепестков механического клапана (полузакрытый клапан), гидроакустические параметры струй, которые вытекают из отверстий клапана отличаются от тех, которые имеют место в условиях открытых лепестков клапана. Следует отметить, что в этих исследованиях в качестве рабочей среды использовалась вода, а как известно кровь представляет собой неньютоновскую жидкость, которая имеет кинематическую вязкость больше, чем чистая вода. В этой связи возникает задача выяснить влияние вязкости рабочей среды на возможность гидроакустического либо виброакустического диагностирования тромбообразования на лепестках механического двухлепесткового клапана сердца.

Цель работы – исследование влияния вязкости жидкости на гидроакустические характеристики струй, которые вытекают из полузакрытого и открытого механического двухлепесткового клапана сердца.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории динамики микро биожидкости Технического университета “Политехника ди Милано”. Физическое моделирование течения через сердечный клапан было осуществлено на механическом двухстворчатом или двулепестковом клапане фирмы Сорин биомедика (Италия) диаметром $d=25$ мм. Пересадка такого клапана производится, главным образом, в левом желудочке сердца при протезировании аортального или митрального клапана. В исследованиях механический двухлепестковый клапан находился на позиции митрального клапана между левым предсердием и камерой левого желудочка. Модель предсердия и левого желудочка была изготовлена из органического стекла и более подробно описана в работе [8]. Жидкость через входной патрубок поступала в модель предсердия или атриума. В качестве рабочей жидкости использовалась вода и водный раствор глицерина различной концентрации. Из модели атриума рабочая жидкость поступала в модель левого желудочка через механический двухлепестковый митральный клапан. Жидкость из модели левого желудочка вытекала через аортальный клапан. Внутри модели левого желудочка находились координатные приспособления для крепления и перемещения в вертикальной плоскости датчиков давления.

Поток жидкости через открытый митральный клапан разделялся на три струи – центральную и две боковые струи. В ближнем следе этих струй располагался блок датчиков пульсаций давления и абсолютного давления, которые были установлены на координатном приспособлении. Блок датчиков перемещался вдоль исследуемой струи и регистрировал поле давления или гидродинамический шум струи на различном удалении от клапана.

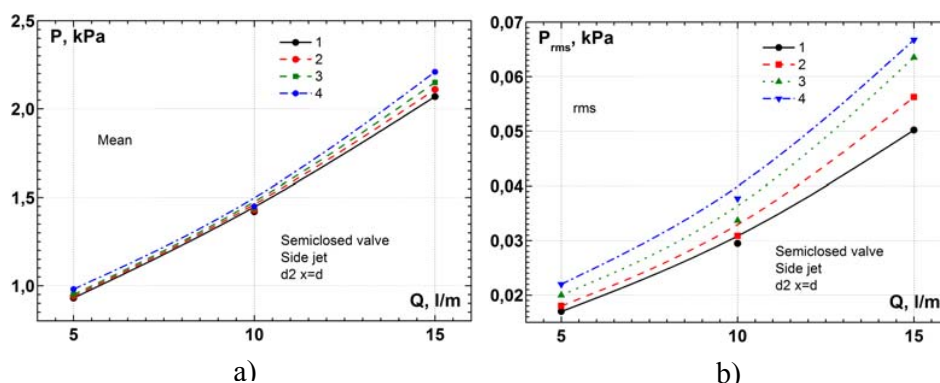


Рис. 2

В исследованиях использовалось стационарное течение рабочей жидкости через клапан сердца. Течение жидкости обеспечивалось помпой, которая подавала чистую воду либо глицериновый раствор с фиксированной скоростью через митральный клапан. Схема и фотография экспериментального стенда показана на рис. 1. Помпа (1) подавала рабочую жидкость в модель предсердия (3) и через митральный клапан в модель левого желудочка (4), а далее в открытый резервуар (8). Контроль расхода жидкости и измерения гидродинамического шума и вибраций осуществлялось датчиками 2, 5 и 6, соответственно. Регистрация, обработка и анализ результатов исследований проводилась на специализированных измерительных комплексах и компьютерах (7).

Блок датчиков давления располагался ниже по потоку от митрального клапана и перемещался вдоль касательной к исследуемым струям, вытекающим из клапана, не нарушая их структуры. Заподлицо с обтекаемой поверхностью блока датчиков было установлено 3 миниатюрные пьезокерамические датчики пульсаций давления (диаметр чувствительной поверхности $d_s=1,3$ мм), а также 2 пьезорезистивные дифференциальные датчики абсолютного давления [9, 10]. Датчики располагались в линию через один в блоке на расстоянии 5 мм вдоль исследуемой струи. Давление внутри модели атриума и левого желудочка регистрировались пьезорезистивными датчиками абсолютного давления (3 датчика), звук – 2 пьезокерамическими датчиками шумов сердца, вибрации – 2 пьезокерамическими акселерометрами, скорость – ультразвуковым измерителем скорости.

Электрические сигналы датчиков, усиленные и отфильтрованные соответствующей аппаратурой, подавались на 16-ти канальный 16-ти битный аналогово-цифровой преобразователь, который соединялся с компьютером. Одновременно регистрировались сигналы от 13 датчиков, которые измеряли поля давления, скорости, звука и вибрации, как внутри модели камеры левого желудочка и атриума, так и снаружи их. Обработка и анализ экспериментальных результатов проводились с использованием аппарата и алгоритмов математической статистики и теории вероятности [11]. Для этого использовались специализированные анализаторы фирмы Брюль и Кьер, а также персональные компьютеры.

Программа исследований включала одновременное измерение статического и пульсирующего давления вблизи центральной и боковой струи ниже по потоку от открытого и полузакрытого механического двухлепесткового сердечного клапана, внутри моделей атриума и камеры левого желудочка. Расстояние между датчиками давления (x), которые располагались в блоке датчиков, и лепестками сердечного клапана изменялось от

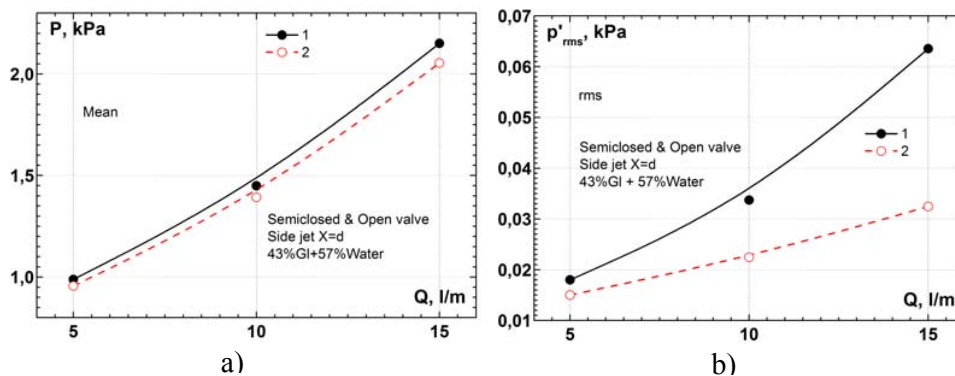


Рис. 3

7 мм до 57 мм. Расход рабочей жидкости (Q) через митральный клапан варьировался от 5 л/мин до 15 л/мин. В качестве рабочей жидкости применялась чистая вода и водный раствор глицерина различной концентрации от 35% до 43% глицерина в растворе. Кинематическая вязкость глицеринового раствора изменялась от 3,2 до 4,3 кинематической вязкости воды.

Погрешность измерений осредненных и интегральных величин не превышала 5 % (надежность 95 % или 2σ). Погрешность измерений спектральных характеристик пульсаций давления и ускорения составляла не более 2 дБ в диапазоне частот от 0,01 Гц до 1000 Гц.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2а показаны средние значения давления, а на рис. 2б представлены среднеквадратичные значения пульсаций давления вблизи боковой струи полузакрытого митрального клапана на удалении 25 мм или $x=d$ от его основания в зависимости от расхода для течения чистой воды и глицериновых растворов различной концентрации. Кривая 1 получена для течения чистой воды, которая имеет кинематическую вязкость $\nu=1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, кривая 2 - для течения раствора глицерина кинематической вязкостью $3,2\nu$, кривая 3 - для течения раствора глицерина кинематической вязкостью $3,8\nu$, кривая 4 - для течения раствора глицерина кинематической вязкостью $4,3\nu$. С увеличением расхода жидкости интегральные характеристики поля давления в ближнем следе струи ниже по потоку от полузакрытого, а также открытого (на рисунке не показано) митрального клапана увеличиваются. В условиях течения чистой воды интегральные характеристики поля давления ниже, чем в условиях течения водного раствора глицерина. С ростом концентрации глицерина в растворе увеличиваются средние давления и особенно среднеквадратичные пульсации давления. Следует отметить, что повышенные уровни среднеквадратичных значений пульсаций давления на малых расходах (см., рис. 2б) обусловлены особенностями проведения экспериментов (минимальный расход обеспечивался местным сужением входного сечения подводящего патрубка небольшого удлинения, что значительно турбулизовало поток в предсердии).

Сопоставление средних значений давления и среднеквадратичных значений пульсаций давления для условий работы полузакрытого и открытого клапана показано на рис. 3. Измерения проводились в ближнем следе боковой струи и течения раствора глицерина с кинематической вязкостью в 4,3 большей, чем кинематическая вязкость воды. Кривая 1 получена для полузакрытого клапана, а кривая 2 получена для открытого

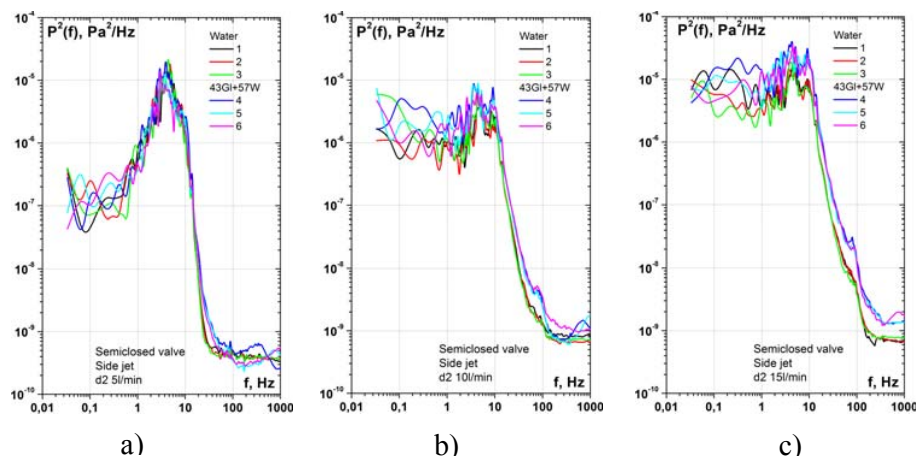


Рис. 5

клапана. Средние значения давления (рис. 3а) и среднеквадратичные значения пульсаций давления (рис. 3б) вблизи боковой струи полузакрытого клапана выше, чем вблизи боковой струи открытого клапана. С увеличением расхода глициринового раствора разница этих давлений увеличивается. Так, для расхода 15 л/мин средние давления увеличиваются почти на 5 %, а среднеквадратичные значения пульсаций давления – почти в 2 раза.

Спектральные плотности мощности пульсаций давления в ближнем следе боковой струи открытого клапана показаны на рис. 4. Спектры измерены в ближнем следе боковой струи для течения чистой воды и глициринового раствора кинематической вязкостью 4,3v. Расстояние между датчиками пульсаций давления и лепестками клапана изменялось как $x=d$ (кривые 1 и 4), $x=1,1d$ (кривые 2 и 5) и $x=1,2d$ (кривые 3 и 6). Первые три кривые измерены для течения чистой воды, а последние три кривые измерены для течения глициринового раствора. Спектральные плотности мощности пульсаций пристеночного давления измерены для расхода жидкости $Q=5$ л/мин (рис. 4а), $Q=10$ л/мин (рис. 4б) и $Q=15$ л/мин (рис. 4в). С увеличением расхода жидкости спектральные уровни гидродинамического шума увеличиваются как в области низких частот, так и в области высоких частот. Это указывает на то, что мощность или количество крупномасштабных вихревых структур (генерирующих низкочастотные пульсации давления) и мелкомасштабных вихрей, которые отрываются от лепестков клапана при течении жидкости через открытый клапан, возрастает. При этом шум, который генерируют мелкомасштабные вихри (высокочастотная часть спектра), в глицириновом растворе значительно выше (см., например, рис. 4б или рис. 4в). Для малых расходов жидкости спектры пульсаций давления в области низких частот для течения чистой воды через открытый клапан выше, чем для течения глициринового раствора. Максимальные значения пульсаций давления наблюдались на частоте $f_{\max}=3,55$ Гц для течения чистой воды и $f_{\max}=3,24$ Гц для течения глициринового раствора и расхода жидкости $Q=5$ л/мин (рис. 4а). Максимум спектральных уровней гидродинамического шума обнаружен для течения чистой воды расходом $Q=10$ л/мин на частоте $f_{\max}=3,76$ Гц и для течения глициринового раствора $f_{\max}=3,39$ Гц. Для расхода $Q=15$ л/мин (рис. 4в) $f_{\max}=4,25$ Гц (чистая вода) и $f_{\max}=3,61$ Гц (глицириновый раствор).

Спектральные плотности мощности пульсаций давления в ближнем следе боковой струи полузакрытого клапана показаны на рис. 5. Здесь обозначения кривых идентичны

рис. 4. В отличие от открытого клапана, интенсивность гидродинамического шума для максимального из исследуемых расходов жидкости через полузакрытый митральный клапан существенно выше, чем для меньших расходов жидкости (см., например, рис. 5б и рис. 5в). Значения частот, где наблюдаются максимальные уровни пульсаций давления, также изменились. Так, для расхода $Q=5$ л/мин (рис. 5а) имеем частоту $f_{\max}=4,36$ Гц (чистая вода) и $f_{\max}=3,58$ Гц (глицериновый раствор), для $Q=10$ л/мин (рис. 5б) - $f_{\max}=4,50$ Гц (чистая вода) и $f_{\max}=3,80$ Гц (глицериновый раствор) и для $Q=15$ л/мин (рис. 5в) - $f_{\max}=4,85$ Гц (чистая вода) и $f_{\max}=4,12$ Гц (глицериновый раствор).

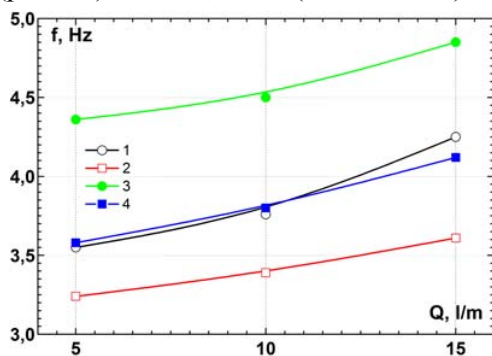


Рис. 6

глицерина кинематической вязкостью $4,3\nu$ через полузакрытый клапан. Таким образом, вблизи боковой струи в ближнем следе двухлепесткового клапана частота отрыва вихрей в (1,2...1,3) раз выше для течения чистой воды, чем для течения глицеринового раствора кинематической вязкостью $4,3\nu$.

Отношение спектральных уровней пульсаций давления в ближнем следе боковой струи течения раствора глицерина к течению чистой воды через полузакрытый механический двухстворчатый митральный клапан для различных концентраций раствора глицерина и расходов жидкости показано на рис. 7. Результаты, которые представлены на рис. 7а, измерены для расхода воды и раствора глицерина $Q=5$ л/мин, на рис. 7б – для $Q=10$ л/мин и на рис. 7в – для $Q=15$ л/мин. Кривая 1 получена для течения раствора глицерина кинематической вязкостью $3,2\nu$, кривая 2 - для течения раствора глицерина кинематической вязкостью $3,8\nu$ и кривая 3 - для течения раствора глицерина кинематической вязкостью $4,3\nu$. Для малого расхода жидкости спектральные уровни гидродинамического шума раствора глицерина ниже, чем воды в частотных диапазонах от 1 Гц до (7-8) Гц и от 100 Гц до 1000 Гц. Для более высоких расходов жидкости спектральные составляющие гидродинамического шума глицеринового раствора в ближнем следе боковой струи полузакрытого митрального клапана выше, чем чистой воды. Наибольшая разница спектральных уровней наблюдается в диапазоне частот от 10 Гц до 100 Гц. При этом с увеличением расхода жидкости и концентрации глицеринового раствора максимумы смещаются в область более высоких частот. Наибольшие отличия в (1,5-1,8) раза в спектральных составляющих гидродинамического шума раствора глицерина и чистой воды наблюдаются при максимальном расходе жидкости (см., рис. 7в).

С увеличением расхода жидкости частота максимальных уровней пульсаций давления возрастает, как показано на рис. 6, что обусловлено увеличением частоты отрыва вихревых структур от лепестков клапана с ростом скорости течения через этот клапан. Кривая 1 получена для течения чистой воды через открытый клапан, кривая 2 – для течения раствора глицерина кинематической вязкостью $4,3\nu$ также через открытый клапан, кривая 3 – для течения чистой воды через полузакрытый клапан и кривая 4 – для течения раствора

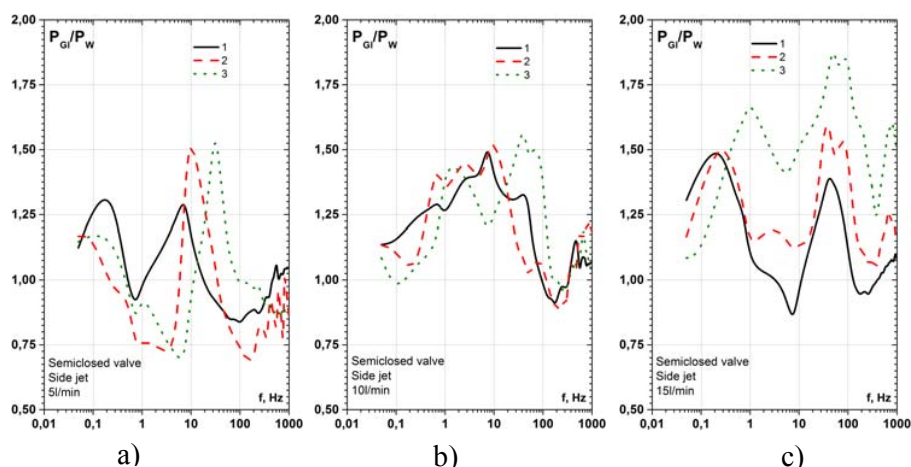


Рис. 7

ВЫВОДЫ

1. Обнаружено, что в условиях течения чистой воды интегральные характеристики поля давления ниже, чем в условиях течения водного раствора глицерина. При увеличении концентрации глицерина в растворе повышаются средние давления и особенно среднеквадратичные пульсации давления. Средние значения давления и среднеквадратичные значения пульсаций давления вблизи боковой струи полузакрытого клапана выше, чем вблизи боковой струи открытого клапана.
2. Установлено, что спектральные уровни гидродинамического шума увеличиваются как в низкочастотной области, так и в высокочастотной области с увеличением скорости течения жидкости. Это свидетельствует о том, что мощность или количество крупномасштабных вихревых структур (генерирующих низкочастотные пульсации давления) и мелкомасштабных вихрей, которые отрываются от лепестков клапана в процессе течения жидкости через открытый или полузакрытый клапан, увеличивается. Выявлено, что вблизи боковой струи в области ближнего следа двухлепесткового клапана частота отрыва вихрей для течения чистой воды в (1,2-1,3) раза выше, чем для течения раствора глицерина с кинематической вязкостью 4,3v.
3. Зарегистрировано, что спектральные уровни гидродинамического шума в непосредственной близости от боковой струи раствора глицерина ниже, чем для потока чистой воды в диапазонах частот от 1 Гц до (7-8) Гц и от 100 Гц до 1000 Гц для расхода жидкости 5 л/мин. Для более высоких расходов жидкости, протекающей через полузакрытый митральный клапан, спектральные уровни гидродинамического шума в ближнем следе боковой струи раствора глицерина наоборот выше, чем для чистой воды. Наибольшая разница спектральных уровней в (1,5-1,8) раза наблюдается в диапазоне частот от 10 Гц до 100 Гц для расхода жидкости 15 л/мин.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке по гранту EU-financed project AMMODIT (Approximation Methods for Molecular Modelling and Diagnosis Tools) - project reference: 645672, funded under: H2020-EU.1.3.3 - under the MSCA-RISE-2014 (Marie Skłodowska-Curie Research and Innovation Staff) of Program Horizon 2020.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jun B.H., Saikrishnan N., Yoganathan A.P.* Micro Particle Image Velocimetry measurements of steady diastolic leakage flow in the hinge of a St. Jude medical regent mechanical heart valve // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2014. – Vol. 42. – P. 526–540.
2. *Sotiropoulos F., Le T.B., Gilmanov A.* Fluid mechanics of heart valves and their replacements // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 2016. – Vol. 48. – P. 259–283.
3. *Kheradvar A., Groves E.M., Goergen C.J., Alavi S.H., Tranquillo R., Simmons C.A., Dasi L.P., Grande-Allen K.J., Mofrad M.R.K., Falahatpisheh A., Griffith B., Baaijens F., Little S.H., Canic S.* Emerging trends in heart valve engineering: Part III. Novel technologies for mitral valve repair and replacement // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2015. – Vol.43, № 4. – P. 858–870.
4. *Касоев С.Г.* О гидродинамической природе шумов сердечнососудистой системы // *Труды ИОФ*. – 2012. – Т.16. – С. 200–217.
5. *Лутасова Е.Е., Караськов А.М., Мешалкин Е.Н., Бакарев А.Е.* Гипотеза гидроакустической функции сердца и кровообращения // *Патология кровообращения и кардиохирургия*. – 2010. – № 1. – С. 64–69.
6. *Castilho F.M., De Sousa M.R., Mendonca A.L., Ribeiro A.L., Caceres-Loriga F.M.* Thrombolytic therapy or surgery for valve prosthesis thrombosis: Systematic review and meta-analysis // *Journal of Thrombosis and Haemostasis*. – 2014. – Vol. 12. – P. 1218–1228.
7. *Voskoboinick A., Redaelli A., Voskoboinick V., Fiore G.B., Nesteruk I., Vismara R., Lucherini F.* Hydroacoustics of the prosthetic bileaflet mitral valve // *Proc. 3rd EUMLS Conference “Mathematics for Life Sciences”*. – Rivne, Ukraine, 2015. – P. 49.
8. *Воскобойник В.А., Редаелли А., Фиоре Б., Нестерук И.Г., Воскобойник А.А., Басовский В.Г., Воскобойник А.В.* Гидроакустика механического двухстворчатого митрального клапана // *Збірник праць Акустичного симпозиуму “Консонанс-2015”*. – Київ: ІГМ НАНУ, 2015. – С. 59–65.
9. *Voskoboinick V., Redaelli A., Fiore G.B., Tereshchenko L., Voskoboinick A., Lucherini F.* Noise of the bileaflet mitral valve // *Proc. International Conference «Tarapov Readings»*, March 1–15, 2016. - Kharkov, Ukraine, 2016. – P. 7.
10. *Voskoboinick V., Kornev N., Turnow J.* Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // *Flow Turbulence Combust.* – 2013. – Vol. 90, № 4. – P. 709–722.
11. *Бендат Дж., Пирсол А.* Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.