

Проф. д-р техн. наук Юрий А. ФАТЫХОВ, prof. dr hab. inż¹
 Проф. д-р техн. наук Владимир А. НАУМОВ, prof. dr hab. inż²
 Доцент канд. техн. наук Олег В. АГЕЕВ, prof. nadzw. inż¹
 Prof. dr inż Daniel DUTKIEWICZ³
 Prof. dr hab. inż Andrzej DOWGIAŁŁO⁴

¹ Кафедра пищевых и холодильных машин, механико-технологический факультет, Калининградский государственный технический университет, г.Калининград, Россия

² Кафедра водных ресурсов и природопользования, факультет промышленного рыболовства, Калининградский государственный технический университет, г.Калининград, Россия

³ Professor emeritus Katedra Procesów i Urządzeń Przemysłu Spożywczego, Politechnika Koszalińska, Polska

⁴ Morski Instytut Rybacki – Państwowy Instytut Badawczy, Polska

ВЛИЯНИЕ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ВИБРООРИЕНТИРОВАНИЕ РЫБЫ®

Wpływ charakterystyki tarcia ryb na ich orientację przestrzenną podczas procesu wibracji®

Предлагается решение дифференциального уравнения движения рыбы на виброплоскости численным методом, который дает возможность оценить путем виртуального эксперимента влияние фрикционных характеристик рыбы на динамику процесса. Установлен наиболее рациональный режим виброперемещения, разработаны рекомендации по подбору фрикционной пары «рыба-материал технологической поверхности» с коэффициентом трения в области малых значений.

Ключевые слова: рыба, фрикционные характеристики, виброориентирование.

W artykule zaproponowano rozwiązanie równania różniczkowego ruchu ryb na płaszczyźnie wibracyjnej metodą numeryczną, co umożliwia ocenę za pomocą wirtualnego eksperymentu wpływu cech tarcia ryb na dynamikę procesu. Ustalono najbardziej racjonalny tryb przemieszczania drgań, opracowano zalecenia dotyczące wyboru pary ciernej „material rybny -powierzchnia technologiczna” o współczynniku tarcia w obszarze małych wartości.

Słowa kluczowe: ryby, charakterystyki tarcia, proces wibracyjny.

ВВЕДЕНИЕ

Рост производительности рыбообрабатывающих машин ограничивается возможностями ручной ориентированной загрузки рыбы в кассеты приемного транспортера. При обслуживании машины тремя рабочими ее производительность составляет 120 рыб/мин. Основным способом механизированной загрузки рыбы является ее ориентирование на горизонтальной колеблющейся плоскости.

Способ ориентирования рыбы на виброплоскости основан на использовании следующих ее морфометрических и фрикционных свойств. У промысловых рыб веретенообразной формы центр тяжести располагается выше оси хребтовой кости и ближе к голове. Поэтому, попадая в зону загрузки виброплоскости, рыба стремится из-за возникающего момента занять устойчивое положение, ориентируясь спинкой вниз и вдоль желоба поверхности, соответствующего клиновидному профилю поперечного сечения рыбы. При определенных параметрах работы виброплоскости (круговой частоте τ амплитуде колебаний) рыбе инерционной силой сообщается ускорение, обеспечивающее устойчивое относительное ее движение головой вперед. Это связано с различием фрикционных

характеристик (коэффициентов трения) для рыбы, ориентированной в противоположных направлениях – головой или хвостом вперед. Причем, коэффициенты трения покоя и скольжения у рыбы, ориентированной хвостом вперед, существенно выше, чем их сопоставимые значения при движении головой вперед. Таким образом, в одном желобе виброплоскости образуются два потока рыбы, движущейся головой вперед, но в противоположных направлениях. При развороте одного из потоков на 180° в горизонтальной или вертикальной плоскости один желоб виброплоскости на выходе из загрузочного устройства образует два ручья с ориентированной головой вперед рыбой. В указанном алгоритме реализуется системная связь между свойствами сырья, способом выполнения технологического процесса и конструктивными особенностями загрузочных ориентирующих устройств [5].

Основной тенденцией совершенствования и конструирования загрузочных устройств является использование методов и средств мехатроники [1]. Современные системы технического зрения позволяют получить с высокой разрешающей способностью и скоростью видеокomпьютерное изображение объекта обработки, содержащее информацию о его форме и геометрических размерах. Этих

данных достаточно для того, чтобы с помощью быстродействующих управляющих и исполнительных органов правильно позиционировать рыбу в нужном направлении. В работе [2] предлагается методика и алгоритм для автоматического анализа морфометрических параметров рыбы и определения наилучших линий резания с целью обеспечения ресурсосбережения. В работе [4] исследованы различные способы сортирования и ориентирования рыбного сырья, учитывающие профили тушек, а также показаны достоинства и недостатки различных методов. Разработаны алгоритм и устройство для быстрого сортирования и ориентирования морских рыб с учетом особенностей строения тела и широким применением математических методов. Статья [8] описывает подход к анализу физико-механических характеристик различных частей тела рыбы, используемых в пищевых целях. В работе [9] предложены методики для определения морфометрических параметров рыб, которые могут использоваться при машинном сортировании, ориентировании и загрузке сырья.

Теоретический анализ движения рыбы на горизонтальной виброплоскости впервые изучался С.И.Брилем [3] и Ю.В.Поспеловым [7] в 90-х годах прошлого столетия. Из-за отсутствия компьютерных технологий исследования проводились графоаналитическим методом, носили приближенный характер и не опирались на достоверно установленный массив по фрикционным характеристикам основных видов промысловых рыб, для которых применяются машинные методы ориентирования и загрузки в приемные кассеты рыбообработывающих машин. Как показано в работе [6], графоаналитический метод анализа может привести к неверным выводам и некорректной оценке влияния параметров виброориентирования.

Целью настоящего исследования является установление методом математического и компьютерного моделирования динамики относительного движения по горизонтальной виброплоскости рыбы и влияние на параметры процесса ее фрикционных свойств.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как правило, привод виброплоскости осуществляется исполнительным механизмом по синусоидальному или близкому к нему закону. Рыба занимает в желобе виброплоскости устойчивое положение и движется с относительной скоростью с головой вперед в двух противоположных направлениях. Перед загрузкой в кассеты рыбообработывающей машины, после разворота на 180° в горизонтальной или вертикальной плоскости, каждый желоб образует два ручья с одинаковой, головой вперед ориентацией. Дифференциальное уравнение прямолинейного движения рыбы имеет вид:

$$m \cdot x = F + A \cdot m \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t), |F| = f \cdot mg \quad (1)$$

Где: m – масса рыбы

F – сила трения;

f – коэффициент трения;

ω и A – круговая частота и амплитуда колебаний виброплоскости.

Аналитическое решение второй задачи динамики тела, описываемой уравнением (1) невозможно, так как в ней не заданы зависимости коэффициентов трения от скорости и направления. На основании анализа массива существующих экспериментальных данных примем качественный вид этой зависимости, соответствующий изображенному на рис.1.

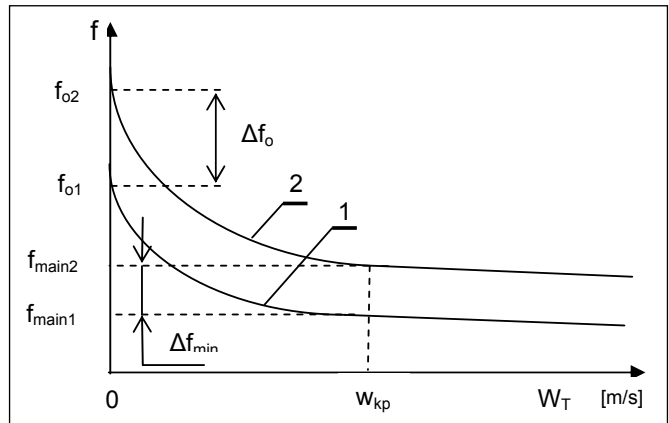


Рис. 1. Общий вид зависимости коэффициента трения рыбы от скорости движения по поверхности.

Rys. 1. Schemat ogólny zależności współczynnika tarcia od szybkości ruchu ryby po powierzchni.

Источник: Собственное исследование

Źródło: Opracowanie własne

На рис.1 выделяем две области: в первой области при изменении скорости скольжения рыбы от 0 до W_{kp} зависимости 1 (скольжение рыбы головой вперед) и 2 (скольжение рыбы хвостом вперед) коэффициенты трения изменяются от f_o до f_{min} по закону, близкому к гиперболическому. Во второй области при $W > W_{kp}$ коэффициенты трения численно различаются незначительно (в пределах 3-5%), практически не зависят от скорости и процесс направленного относительного движения по виброплоскости становится невозможным. Анализ массива экспериментальных данных по фрикционным характеристикам различных видов рыб показал, что критическое значение скорости можно принять [6] равным $0,5 \text{ м/с}$.

Решение дифференциального уравнения (1) осуществлялось численным методом в компьютерной среде MathCad. Характер зависимости 1 и 2 на рис.1 задавался по опорным точкам: коэффициентам трения покоя f_{o1} и f_{o2} и коэффициентам трения скольжения f_{min1} и f_{min2} , соответствующих значению скорости W_{kp} . Виртуальный эксперимент заключался в варьировании параметров f_{o1} , f_{o2} , f_{min1} , f_{min2} и разницы между ними $Df_o = f_{o2} - f_{o1}$; $Df_{min} = f_{min2} - f_{min1}$ при постоянных значениях w и A . При таком методологическом подходе становится возможным оценить влияние коэффициентов трения на динамику относительного движения рыбы.

Постоянные значения параметров виброплоскости $A=10 \text{ мм}$ и $w=25,0 \text{ с}^{-1}$ приняты по результатам установления рационального виброориентирования рыб среднего размера (скумбрия, ставрида), перемещающихся по поверхности из нержавеющей стали с опорными значениями коэффициентов трения: $f_{o1}=0,25$; $f_{min1}=0,18$; $f_{o2}=0,43$; $f_{min2}=0,23$ [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.2 представлена расчетная зависимость изменения относительной скорости рыбы при постоянных параметрах колебаний виброплощадки ($A=10\text{мм}$ и $w=25,0\text{с}^{-1}$) и переменные коэффициенты трения, опорные значения которых указаны в таблице 1.

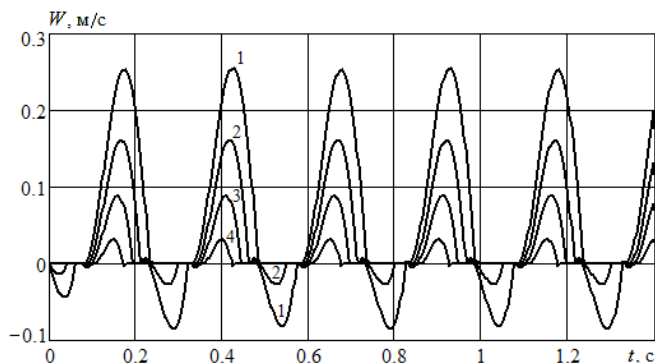


Рис. 2. Изменение относительной скорости рыбы при $A=10\text{мм}$, $w=25,0\text{с}^{-1}$ и переменных коэффициентов трения.

Fig. 2. Zmiana względnej prędkości ryb przy $A=10\text{мм}$, $w=25,0\text{с}^{-1}$ i zmiennych współczynnikach tarcia.

Источник: Собственное исследование

Źródło: Opracowanie własne

Таблица 1. Значения опорных коэффициентов трения
Tabela 1. Wartości referencyjnych współczynników tarcia

Номер кривой на рис.2	f_{01}	$f_{\min 1}$	f_{02}	$f_{\min 2}$	Δf_0	Δf_{\min}
1	0,25	0,18	0,43	0,23	0,18	0,05
2	0,35	0,28	0,53	0,33	0,18	0,05
3	0,45	0,38	0,63	0,43	0,18	0,05
4	0,55	0,48	0,73	0,53	0,18	0,05

Источник: Собственное исследование

Źródło: Opracowanie własne

Как видно из данных табл.1 в виртуальном эксперименте изменялись значения опорных коэффициентов трения, но разница между ними сохранялась постоянной.

При значениях фрикционных характеристик, соответствующих кривой 4 на рис.2 видно, что функция движения рыбы по виброплощадке является прерывистой и осуществляется по циклу «остановка-движение головой вперед-остановка». Очевидно, что возникающей инерционной силы, переданной колебаниями виброплощадки, недостаточно для того, чтобы преодолеть силу трения при движении рыбы хвостом вперед. Суммарное время рыбы превышает время скольжения головой вперед.

Характер зависимости 3 на рис.2 качественно не отличается от описанного для кривой 4. Однако интенсивность процесса вибротранспортирования несколько возрастает.

Относительное скольжение рыбы по виброплощадке, соответствующее зависимости 2 на рис.2 осуществляется

по полному циклу: «остановка-движение головой вперед-остановка-движение хвостом вперед». Причем интенсивность движения рыбы головой вперед существенно выше, чем при обратном движении.

Характер зависимости 1 на рис.2 также показывает, что относительное скольжение рыбы, ориентированной головой вперед, осуществляется по полному циклу. Этапы скольжения рыбы головой и хвостом вперед по времени почти одинаковы, при этом остановки между этапами очень кратковременны.

Эффективность процесса вибротранспортирования рыбы можно определить по средней скорости поступательного перемещения рыбы W_{cp} , а следовательно, и по производительности виброплощадки. На рис.3 представлены зависимости, характеризующие изменение координат рыбы по времени и соответствующие зависимостям на рис.2.

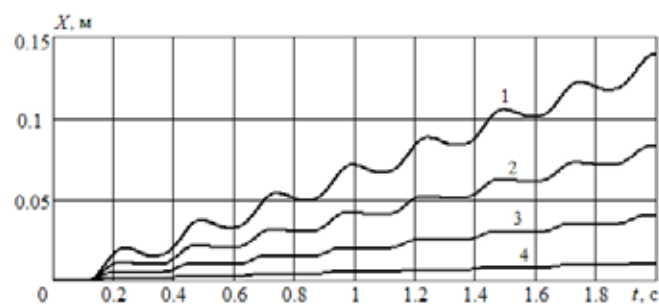


Рис. 3. Изменение координат рыбы при исходных данных, соответствующих данным на рис. 2.

Rys. 3. Zmiana współrzędnych ryby na dane początkowe odpowiadające danym na rys. 2.

Источник: Собственное исследование

Źródło: Opracowanie własne

По данным рис.3 скорость W_{cp} определяется как отношение перемещения рыбы x за время t . Для кривой 4 она составляет $0,005\text{ м/с}$; для кривой 3 - $0,025\text{ м/с}$; для кривой 2 - $0,04\text{ м/с}$; для кривой 1 - $0,07\text{ м/с}$. При этом, рассчитанная для рыб среднего размера теоретическая производительность виброплощадки, соответствующая условиям, отраженным зависимостью 4, составит для одного желоба ориентатора $33,6\text{ рыб/мин}$ [6]. Таким образом, виброплощадка с четырьмя желобами полностью обеспечит механизированную загрузку и работу большинства современных рыбообработывающих машин.

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 2, 3, можно сделать два важных вывода:

- наиболее эффективным является полный цикл скольжения рыбы по виброплощадке с двумя кратковременными (почти мгновенными) остановками;
- уменьшение коэффициентов трения рыбы приводит к увеличению ее относительной скорости перемещения по виброплощадке.

В таблице 2 представлены значения опорных коэффициентов трения, когда для виртуального эксперимента варьировались не только их величины, но и разница между ними.

Таблица 2. Значения опорных коэффициентов трения
Tabela 2. Wartości referencyjnych współczynników tarcia

Номер кривой на рис.4	f_{01}	f_{min1}	f_{02}	f_{min2}	Δf_0	Δf_{min}
1	0,25	0,18	0,43	0,23	0,18	0,05
2	0,35	0,28	0,63	0,43	0,28	0,15
3	0,45	0,38	0,83	0,63	0,38	0,25
4	0,55	0,48	1,03*	0,83	0,48	0,35

Источник: Собственного исследования

Źródło: Opracowanie własne

*Экспериментально установлено, что коэффициент трения покоя у рыб, ориентированных хвостом вперед, может превышать 1,0.

На рис.4, 5 показаны аналогичные рис.2, 3 зависимости, полученные для исходных данных табл.2

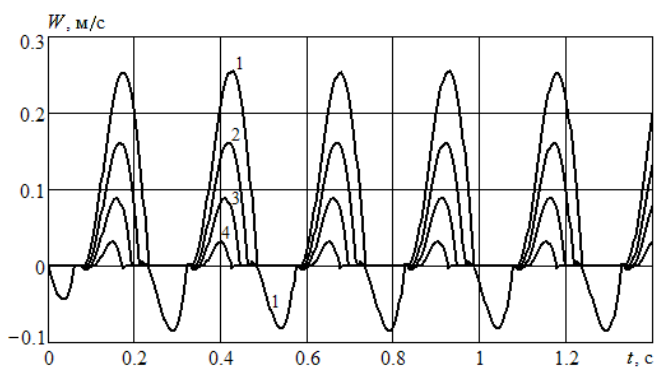


Рис. 4. Изменение относительной скорости рыбы при $A=10\text{мм}$, $w = 25,0\text{с}^{-1}$ и переменных коэффициентов трения.

Rys. 4. Zmiana względnej prędkości ryb $A=10\text{mm}$, $w = 25,0\text{s}^{-1}$ i zmiennych współczynników tarcia.

Источник: Собственного исследования

Źródło: Opracowanie własne

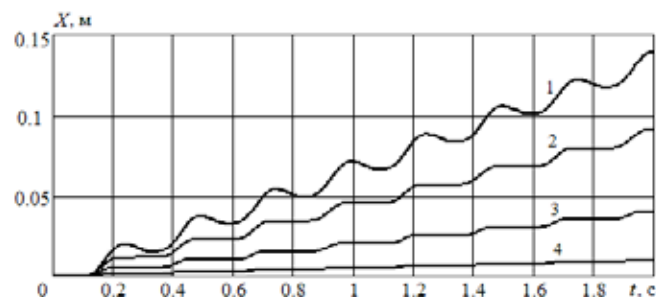


Рис. 5. Изменение координат рыбы при исходных данных, соответствующих данным на рис. 4.

Rys. 5. Zmiana współrzędnych ryby na dane początkowe odpowiadające danym na rys. 4.

Источник: Собственного исследования

Źródło: Opracowanie własne

По зависимостям, приведенным на рис.4, 5, можно видеть качественную аналогию с характером зависимостей, изображенных на рис.2, 3. Отличием является следующее. Разница между соответствующими коэффициентами трения влияет на динамику ее относительного перемещения по виброплоскости: с уменьшением разницы средняя скорость перемещения возрастает. Увеличение разницы между коэффициентами трения приводит к большим остановкам между этапами цикла. Полный цикл относительного перемещения рыбы характерен только для зависимости 4, причем параметры вибротранспортирования оказываются наиболее рациональными.

Учитывая тенденцию к улучшению условий виброориентирования в области малых значений коэффициентов трения и разницы между ними, проведем виртуальный эксперимент по исходным опорным значениям коэффициентов трения, приведенным в табл.3.

Таблица 3. Значения опорных коэффициентов трения
Tabela 3. Wartości referencyjnych współczynników tarcia

Номер кривой на рис.6	f_{01}	f_{min1}	f_{02}	f_{min2}	Δf_0	Δf_{min}
1	0,04	0,02	0,08	0,04	0,04	0,02
2	0,10	0,05	0,20	0,10	0,10	0,05
3	0,20	0,10	0,40	0,20	0,20	0,10

Источник: Собственного исследования

Źródło: Opracowanie własne

На рис.6 показаны аналогичные рис.2, 4 зависимости, а на рис.7 – аналогичные рис.3, 5, полученные для исходных данных табл.3.

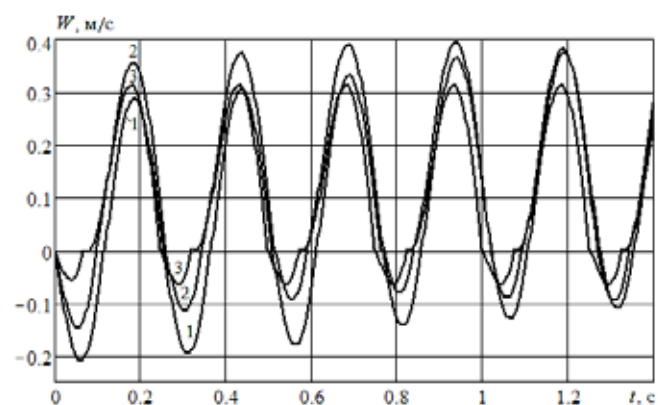


Рис. 6. Изменение относительной скорости рыбы при $A=10\text{мм}$, $w = 25,0\text{с}^{-1}$ и малых значениях коэффициентов трения.

Rys. 6. Zmiana względnej prędkości ryb przy $A=10\text{mm}$, $w = 25,0\text{s}^{-1}$ i małych współczynnikach tarcia.

Источник: Собственного исследования

Źródło: Opracowanie własne

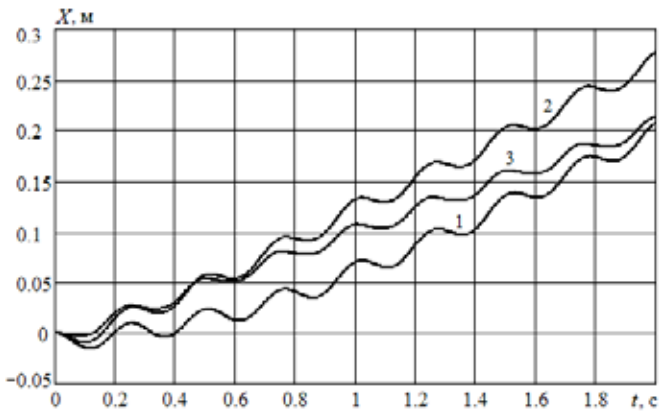


Рис. 7. Изменение координат рыбы при исходных данных, соответствующих данным на рис.4.

Rys. 7. Zmiana parametrów ryby przy danych wyjściowych zgodnych z rys. 4.

Источник: Собственное исследование

Źródło: Opracowanie własne

Из рассмотрения рис.6 видно, что для всех зависимостей характерно наличие полного цикла вибротранспортирования со всеми этапами. Однако наиболее рациональные (оптимальные) условия процесса отражает зависимость 2 на рис. 6 и 7. Вероятно, что чрезмерное уменьшение коэффициентов трения и разницы между ними приведет к «стоянию рыбы на месте», а их увеличения – к уменьшению скорости относительного перемещения рыбы на виброплоскости.

По данным рис. 6, 7 можно сделать вывод о том, что ранее изложенные в научной литературе рекомендации (например, [3, 7]) об увеличении шероховатости поверхности виброплоскости за счет искусственного нанесения мелкодисперсного материала, представляется неверным. Наоборот, с практической точки зрения нужно подбирать трущуюся пару «рыба-материал поверхности» как можно с меньшей шероховатостью. Это возможно или за счет подбора материала виброплоскости с маленькой шероховатостью (нержавеющая сталь; оргстекло; пластмассы, допускаемые для пищевого машиностроения), или за счет шлифования поверхности виброплоскости.

ВЫВОДЫ

1. Решение дифференциального уравнения движения рыбы на горизонтальной виброплоскости позволило установить влияние её фрикционных характеристик на динамику относительного движения головы вперед.
2. Установлено, что наиболее рациональным режимом виброперемещения является полный цикл, включающий этапы движения рыбы головой и хвостом вперед с двумя мгновенными остановками.
3. С уменьшением коэффициентов трения увеличивается скорость относительного перемещения рыбы. В области малых коэффициентов трения установлены их рациональные значения.
4. С практической точки зрения выбор рациональных параметров виброперемещения осуществляется также за счет оптимального сочетания фрикционной пары «рыба-материал технологической поверхности».

WNIOSKI

1. Rozwiązanie równania różniczkowego ruchu ryb na poziomej płaszczyźnie wibracyjnej pozwoliło ustalić wpływ właściwości ciernych na dynamikę ich względnego ruchu w kierunku głową do przodu.
2. Ustalono, że najbardziej racjonalnym rodzajem ruchu wibracyjnego jest pełny cykl, który obejmuje etapy poruszania głową i ogonem ryby do przodu za pomocą dwóch natychmiastowych zatrzymań.
3. Wraz ze spadkiem współczynników tarcia rośnie względna prędkość ryby. Korzystny obszar współczynników tarcia to ten o małych wartościach.
4. Z praktycznego punktu widzenia wybór racjonalnych parametrów przemieszczenia drgań odbywa się również dzięki optymalnemu połączeniu pary ciernej: „materiał rybny- powierzchnia technologiczna”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] АГЕЕВ О.В., Ю.А. ФАТЫХОВ. 2015. Совершенствование технологического оборудования для первичной обработки рыбы: опыт, проблематика, системный подход. Калининград: КГТУ.
- [2] AZARMDDEL H., E. INSUNZA-GONZALEZ, S.S. MONTASEBI, A. JAFARI, A.R. MUÑOZ. 2018. „Developing an orientation and cutting point determination algorithm for a trout fish processing system using machine vision”. Computers and Electronics in Agriculture vol.162: 613–629.
- [3] БРИЛЬ С.И. 1980. Загрузочные устройства рыбообработывающих машин. М.: Пищевая промышленность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] AGEEV O.V., JU.A. FATYKHOV. 2015. Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo oborudovanija dlja pervichnojj obrabotki ryby: opyt, problematika, sistemnyjj podkhod. Kaliningrad: KGTU
- [2] AZARMDDEL H., E. INSUNZA-GONZALEZ, S.S. MONTASEBI, A. JAFARI, A.R. MUNOZ. 2018. „Developing an orientation and cutting point determination algorithm for a trout fish processing system using machine vision”. Computers and Electronics in Agriculture vol.162: 613–629.
- [3] BRIL S.I. 1980. Zagruzochnye ustrojstva ryboobrabatyvajushhikh mashin. M.: Pishhevaja promyshlennost.

- [4] **COSTA C., F. ANTONUCCI, C. BOGLIONE, P. MENESATTI, B. CHATAIN. 2013.** „Automated shape analysis”. *Aquacultural Engineering* vol. 52: 58–64.
- [5] **ДУТКЕВИЧ Д., Ю.А. ФАТЫХОВ, А. ДОВГАЛЛО. 2014.** „О взаимосвязи физических свойств пищевого сырья и способов реализации процессов пищевого сырья и способов реализации процессов на основе системного подхода”. *Вестник ВГУИТ. Воронеж. No 4: 26–31.*
- [6] **ФАТЫХОВ Ю.А., В.А. НАУМОВ, О.В. АГЕЕВ, В.Н. ЭРЛИХМАН, В.С. ШАШКОВ. 2020.** „Математическое моделирование процесса виброориентирования рыбы”. *Известия КГТУ. Калининград, pg 57.*
- [7] **ПОСПЕЛОВ Ю.В. 1987.** *Механизированные разделочные линии рыбообработывающих производств. М.: Агропромиздат.*
- [8] **VILGIS T.A. 2020.** „The physics of the mouthfeel of caviar and other fish roe”. *International Journal of Gastronomy and Food Science* vol.19: 92–100.
- [9] **YU.C., X. FAN, Z. HU, X. XIA, Y. JHAO, R. LI, Y. BAI. 2020.** „Segmentation and measurement scheme for fish morphological features based on Mask R–CNN”. *Information Processing in Agriculture* vol.1: 1–12.

- [4] **COSTA C., F. ANTONUCCI, C. BOGLIONE, P. MENESATTI, B. CHATAIN. 2013.** „Automated shape analysis”. *Aquacultural Engineering* vol. 52: 58–64.
- [5] **DUTKEVICH D., JU.A. FATYKHOV, A. DO-VGALLO. 2014.** „O vzaimosvjazi fizicheskikh svojstv pishhevego syrja i sposobov realizacii processov pishhevego syrja i sposobov realizacii processov na osnove sistemnogo podkhoda”. *Vestnik VGUIT. Vo-ronezh. No 4: 26–31.*
- [6] **FATYKHOV JU.A., V.A. NAUMOV, O.V. AGEEV, V.N. EHRLIKHMAN, V.S. SHASHKOV. 2020.** „Matematicheskoe modelirovanie processa vibroorientirovanija ryby”. *Izvestija KGTU. Kaliningrad, pg 57.*
- [7] **POSPELOV JU.V. 1987.** *Mekhanizirovannye razdelochnye linii ryboobrabatyvajushhikh proizvodstv. M.: Agropromizdat.*
- [8] **VILGIS T.A. 2020.** „The physics of the mouthfeel of caviar and other fish roe”. *Inter–national Journal of Gastronomy and Food Science* vol.19: 92–100.
- [9] **YU.C., X. FAN, Z. HU, X. XIA, Y. JHAO, R. LI, Y. BAI. 2020.** „Segmentation and meas–urement scheme for fish morphological features based on Mask R–CNN”. *Information Pro–cessing in Agriculture* vol.1: 1–12.