

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5202

УДК 639.3.06

Статья

Повышение надёжности и ресурса пневматического распределителя для раздачи кормов в садки

Тихонов Евгений Андриянович

кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), tihonov@psu.karelia.ru

Базыкин Валентин Игоревич

кандидат технических наук, доцент, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства — филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Российская Федерация), valentine-bazykin@mail.ru

Муханов Николай Вячеславович

кандидат технических наук, доцент, Ивановская государственная сельскохозяйственная академия имени Д. К. Беляева (Российская Федерация), niket81@rambler.ru

Получена: 10 марта 2020 / Принята: 28 марта 2020 / Опубликовано: 11 мая 2020

Аннотация: В представленной работе рассматриваются технические аспекты совершенствования технических средств эффективной выдачи кормов в рыбоводные садки. Выполнен анализ конструкции ротационных кормораздатчиков, которые широко применяются в промышленном рыбоводстве. Проанализированы их недостатки. Определены возможные пути повышения надёжности: динамическая балансировка ротора, устранение подвижных частей в конструкции кормораздатчика. Предложена конструкция кормораздатчика без подвижных частей, которая обеспечивает требуемые параметры качества раздачи кормов в садки и при этом имеет высокую надёжность и практически неограниченный ресурс работы. Для обоснования конструктивных параметров кормораздатчика разработаны конструктивные факторы, влияющие на процесс раздачи кормов (высота среза патрубка, высота положения конуса, радиус кривизны образующей), и интегральный критерий для оценки качества раздачи кормов. Интегральный критерий включает оценку эффективной площади раздачи кормов в садок и её равномерность. Выполнено численное многофакторное исследование и определены оптимальные значения конструктивных факторов при максимальном значении интегрального критерия, определяющего эффективность процесса раздачи кормов в садки. По результатам обработки полученных данных

определены высокое качество раздачи кормов в садки и перспективность предложенной конструкции кормораздатчика в целом.

Ключевые слова: кормление рыбы в садках, кормовые системы, пневматические системы.

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5202

Article

Improving the reliability and service life of the pneumatic distributor for distributing feed to cages

Evgeniy Tihonov

*PhD in engineering, Associate professor, Petrozavodsk state university (Russian Federation),
tihonov@psu.karelia.ru*

Valentin Bazykin

*PhD in engineering, Associate professor, Institute of agroengineering and environmental problems
of agricultural production (Russian Federation), valentine-bazykin@mail.ru*

Nikolai Mukhanov

*PhD in engineering, Associate professor, Ivanovo state agricultural academy named after Dmitry
Belyaev (Russian Federation), nikem81@rambler.ru*

Received: 10 March 2020 / Accepted: 28 March 2020 / Published: 11 May 2020

Abstract: In this paper we consider the engineering aspects of improving the technical means of effective delivery of feed to fish cages. The analysis of the design of rotary feeders, which are widely used in industrial fish farming, is performed. Their disadvantages are analyzed and possible ways to improve reliability are identified: rotor dynamic balancing and elimination of moving parts in the feed feeder design. The design of the feed feeder without moving parts is proposed, which provides the required parameters of the quality of feed distribution in cages and at the same time has high reliability and almost unlimited service life. To justify the design parameters of the feed feeder, we developed design factors that affect the feed distribution process (the height of the pipe cut, the height of the cone position, the radius of curvature of the generator), and an integral criterion for evaluating the quality of feed distribution. The integral criterion includes an assessment of the effective area of feed distribution in the tank and its uniformity. A numerical multi-factor study was performed and the optimal values of design factors were determined with the maximum value of the integral criterion that determines the efficiency of the feed distribution process in cages. Based on the results of processing the obtained data, the high quality of feed distribution in cages and the prospects of the proposed design of the feed feeder as a whole were determined.

Keywords: feeding fish in cages, feed systems, pneumatic systems.

1. Введение

В настоящее время промышленная аквакультура в России переживает значительный подъём. В основном данный сегмент агропромышленного комплекса представлен производителями радужной форели. При этом внутренний спрос на данную продукцию значительно превышает предложение. Ежегодно появляются новые предприятия и расширяются существующие. Практически каждое предприятие промышленной аквакультуры в процессе своего становления проходит несколько этапов технологического оснащения. На начальном этапе, пока объёмы производства сравнительно невелики, значительную долю в технологическом процессе занимает ручной труд. Это относится ко всем технологическим процессам рыбоводного предприятия: зарыбление садков, рассадка, сортировка, кормление, выгрузка из садков и отгрузка. Особенно это ярко выражено в процессе кормления. На малых предприятиях этот процесс выполняется вручную. Порой вручную выдают достаточно большие объёмы корма — до 500 кг в один садок в сутки. А садков, даже на малом предприятии, — десятки. Помимо низкой эффективности использования трудовых ресурсов (значимость данного показателя очень зависит от стоимости рабочей силы в регионе), большой вопрос вызывает качество раздачи корма и контроль выполнения предписаний главного рыбовода предприятия.

По достижении определённых объёмов производства практически любое предприятие переходит на следующий этап механизации процесса кормления. Данный этап характеризуется применением мобильных пневматических кормораздатчиков различных конструкций: от достаточно маленьких (ёмкость загрузки 200 л) до сравнительно больших (ёмкость загрузки 1200—1500 л) [1]. При применении кормораздатчиков с большими объёмами загрузки возникает проблема дозирования. Как правило, данные кормораздатчики не имеют систем дозирования, что приводит к снижению точности выдачи и, как следствие, снижению общей эффективности кормления. Тут возможны два варианта: недокорм и, как следствие, снижение суточного прироста биомассы, и перекорм — рыба не будет съедать весь корм, и он упадёт на дно водоёма под садком. При втором варианте произойдёт повышение кормового коэффициента. Наиболее продвинутые конструкции мобильных кормораздатчиков имеют системы дозирования. Например, кормораздатчик, разработанный в Инженерном парке Института лесных, горных и строительных наук Петрозаводского государственного университета [2]. Данный кормораздатчик снабжён дозатором на 25 кг. Это весьма удобно, так как наиболее распространённая фасовка кормов для рыб составляет 25 кг. Ввиду этого часто главные рыбоводы предприятий округляют норму кормления задка до нормы, кратной 25 кг.

По мере роста объёмов производства применение мобильных систем кормораздачи становится неэффективным. Большие объёмы кормления требуют большого количества рейсов от пункта загрузки до пункта кормления. Это заставляет предприятия переходить на следующий этап механизации процесса кормления — автоматизация. Данный этап подразумевает применение стационарных (базирующихся на воде) систем кормления, которые обеспечивают полную автоматизацию [3]. Данные системы автоматически определяют норму

кормления и кормовой коэффициент в зависимости от температуры воды, концентрации кислорода, средней навески рыбы в садке. Также они учитывают суточный прирост биомассы и отход. Как правило, одна такая система обслуживает до 16 садков и обладает максимальной производительностью до 500 кг/ч. Единственное ограничение — длина пневматических кормопроводов. Она не должна превышать 300 м.

Наиболее уязвимым местом автоматических кормовых систем является точка непосредственной выдачи корма в садок. Иногда предприятие может ограничиться закреплением кормопровода на леер садка. В этом случае пятно падения корма в садок будет веретенообразным с малой площадью. Эффективность скармливания будет снижена. Для обеспечения наиболее эффективного пятна падения корма в садок применяют ротационные раздатчики, так называемые «спредеры» [4] (рисунок 1).



Рисунок 1. Пневматический ротационный раздатчик кормов

Данные пневматические раздатчики кормов обеспечивают пятно падения корма в виде кольца с наружным диаметром, чуть меньше внутреннего диаметра садка, и минимально возможным внутренним диаметром (рисунок 2).

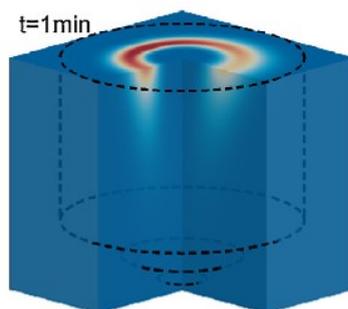


Рисунок 2. Распределение кормов внутри садка при раздаче ротационным раздатчиком

Данные кормораздатчики обеспечивают максимальную эффективность кормления, но не лишены недостатков. Первый — отсутствие отечественных аналогов и высокая цена (до 200 тыс. руб.). Второй — недостаточная равномерность раздачи кормов от центра до края садка [5]. В мире выполнен достаточный объём исследований на эту тематику [6], [7], который показывает, что конструкция ротационных раздатчиков близка к оптимальной и улучшить их характеристики без применения новых подходов не представляется возможным. Как видно из рисунка 3, эффективная выдача кормов производится на площади диаметром до 18 м, тогда как размеры садков для товарной рыбы достигают 30 м в диаметре.

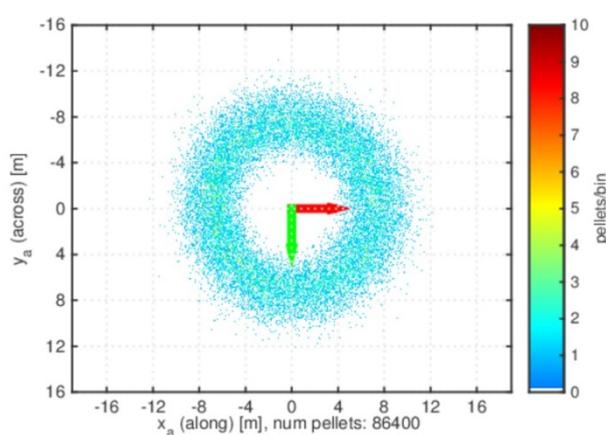


Рисунок 3. Распределение выдачи кормов в садок [5]

Исходя из этого получается, что площадь эффективной раздачи кормов составляет около 250 м^2 , тогда как общая площадь садка — около 700 м^2 . Свыше 400 м^2 не используется.

Второй недостаток связан с конструкцией и принципом работы устройства. Кормораздатчик имеет изогнутый подвод кормопровода, заканчивающийся шарнирно соединённым, изогнутым патрубком. Данный патрубок вращается благодаря реактивной струе воздуха, подаваемой под давлением из кормопровода. Тем самым обеспечивается круговая выдача корма в садок. Слабым узлом конструкции является шарнир [рисунок 4].



Рисунок 4. Шарнирный узел вращающегося патрубка

Так как конструкция шарнира подвержена воздействию влаги, он выполнен в виде подшипника из полимерных материалов. Вращающаяся часть патрубка не сбалансирована, поэтому на внутреннее кольцо подшипника действует циклический изгибающий момент, который значительно сокращает срок службы данного узла кормораздатчика. Как показывает практика, ресурс данного подшипника составляет примерно 1,5 года. При отказе узла происходит заклинивание вращающейся части патрубка, и площадь выдачи корма уменьшается до небольшого пятна в одной части садка.

Опасность данной ситуации заключается в том, что отказ может быть обнаружен не сразу, что приведёт к значительному снижению эффективности кормления садка. Также на предприятии должен быть запас подшипников, т. к. оперативную поставку организовать будет невозможно ввиду отсутствия отечественных аналогов. Но наиболее неблагоприятный тип отказа — это отрыв вращающейся части патрубка и падение его на дно садка. В такой ситуации корм будет подаваться вертикально вверх, что при наличии ветра приведёт к смещению пятна падения корма из садка и недокорму рыбы. Также поднять оторвавшуюся часть патрубка будет возможно только при помощи водолазов либо при подъёме деля, что происходит нечасто.

В связи с этим необходимо решить проблему надёжности ротационных кормораздатчиков и в рамках реализации программы импортозамещения предложить отечественной промышленности техническое решение кормораздатчика с «неограниченным ресурсом» и высокой надёжностью.

2. Материалы и методы

В процессе решения поставленной задачи были применены следующие методы: патентный поиск, теория решения изобретательских задач, численное моделирование многофазных газодинамических систем, многокритериальная оптимизация.

Выполнение патентного поиска выполнялось в поисковой системе Федерального института промышленной собственности по следующим запросам: кормораздатчик, распределитель кормов, система раздачи кормов. Было проанализировано свыше 50 патентных документов. Анализ показал отсутствие каких-либо полезных моделей, изобретений или способов, обеспечивающих «неограниченный ресурс» и высокую надёжность раздачи кормов в садок с требуемыми параметрами.

Для повышения ресурса подшипника были проанализированы возможные пути изменения конструкции вращающейся части патрубка. Наиболее действенным условием увеличения срока службы является устранение циклического изгибающего момента, действующего на внутреннее кольцо подшипника. Этого можно добиться, применив статическую балансировку вращающейся части патрубка при помощи противовеса. Смещение и массу противовеса необходимо подобрать таким образом, чтобы центр масс был на оси вращения патрубка (рисунок 5).

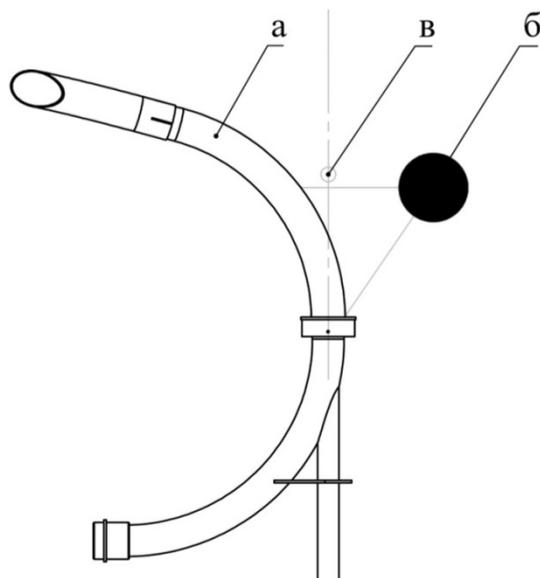


Рисунок 5. Вращающийся патрубок роторного раздатчика кормов с противовесом:
а — вращающийся патрубок; б — противовес; в — центр масс

При этом ресурс можно значительно увеличить, но спрогнозировать отказ не представляется возможным. Однако из курса общей теории надёжности известно, что надёжность системы обратно пропорциональна количеству кинематических пар в системе. В связи с этим необходимо применить техническое решение, исключая кинематические пары в устройстве.

Анализ отечественных исследований по данной тематике показал полное отсутствие публикаций каких-либо наработок и результатов по данной тематике. Зарубежные исследователи уделяют внимание ротационным кормораздатчикам. Но их исследования, как правило, касаются динамики рабочего процесса, равномерности распределения корма и вопросам вынужденных колебаний, возникающих в процессе работы [8], [9]. К конструкции ротационного кормораздатчика, его надёжности и ресурсу исследования, проводимые за рубежом, не относятся. Складывается впечатление, что применяемое на сегодняшний момент техническое решение для раздачи кормов считается оптимальным.

В качестве схемы, исключая подвижные части в конструкции кормораздатчика, в Петрозаводском государственном университете была разработана принципиальная схема, приведённая на рисунке 6.

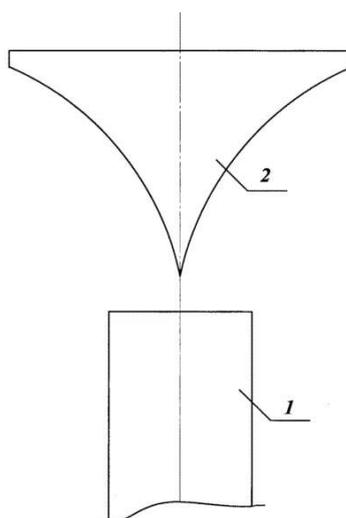


Рисунок 6. Принципиальная схема раздатчика кормов без подвижных частей:

1 — кормопровод; 2 — обратный конус

Данная схема работает следующим образом: корм, вылетая из вертикального патрубка пневматического кормопровода 1, отклоняется на определённый угол, ударяясь об обратный конус 2. При этом отклонение корма будет осесимметричным. Данная идея защищена патентом RU184230 [3].

Основной вопрос, возникший при проработке данной конструкции, — форма образующей обратного конуса. Форма обратного конуса должна обеспечивать максимально возможную равномерность распределения корма от центра садка к его краю. Для предварительной оценки распределения нами было выполнено моделирование процесса раздачи корма в среде численного моделирования Flow simulation, программного пакета SolidWorks. Визуализация результата моделирования представлена на рисунке 7.

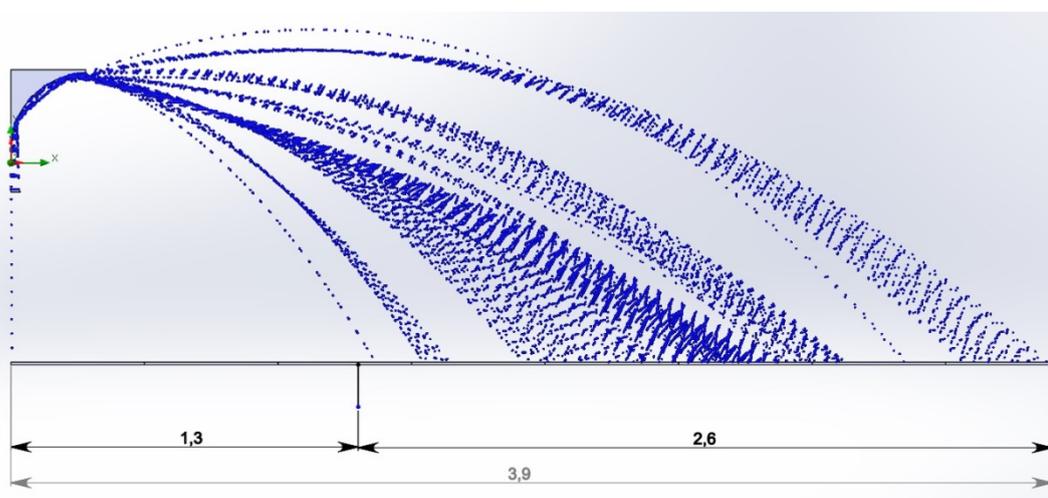


Рисунок 7. Визуализация результатов предварительного моделирования

Как видно из рисунка 7, корм начинает падать в воду на расстоянии 1,3 м от кормораздатчика. Далее удельная масса корма, падающая на единицу площади, растёт, достигая определённого максимума, а затем масса уменьшается и снижается до 0 на расстоянии 3,9 м от раздатчика. Распределение количества корма в зависимости от расстояния от кормораздатчика показано на рисунке 8.

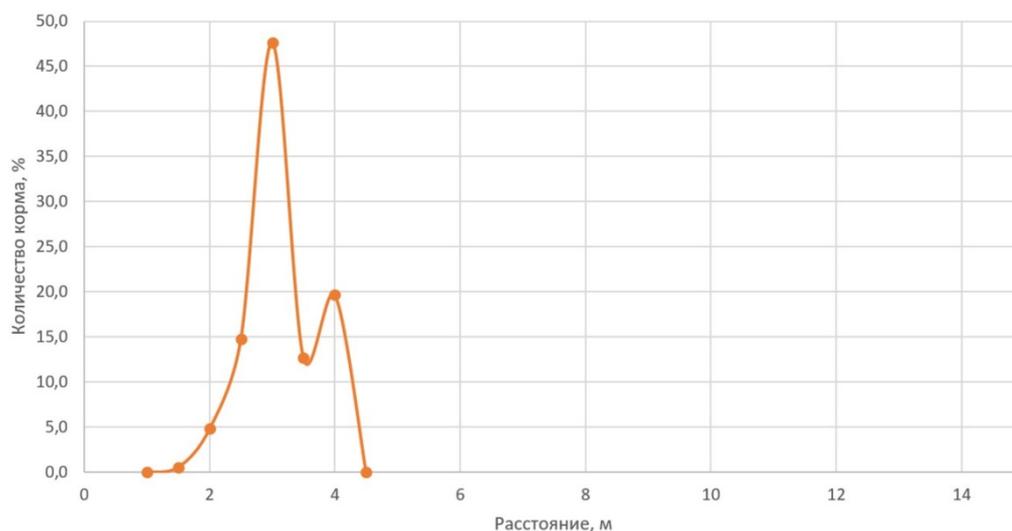


Рисунок 8. Распределение корма по радиусу садка

Предварительное моделирование показало работоспособность предложенного технического решения и необходимость увеличения дальности выброса корма и достижения максимальной равномерности выдачи по радиусу садка.

Так как наибольший диаметр садков, применяемых в России, как правило, не превышает 30 м, то, в идеальном случае, необходимо обеспечить площадь падения корма в садок в виде кольца наружным диаметром 25 м и внутренним — 0...5 м. Данные параметры будут критериями оптимизации для дальнейшего многофакторного исследования.

Для достижения данной цели были выполнены ряд исследований влияния конструктивных параметров раздатчика на дальность и равномерность выдачи кормов. Результат моделирования представлен на рисунке 9.

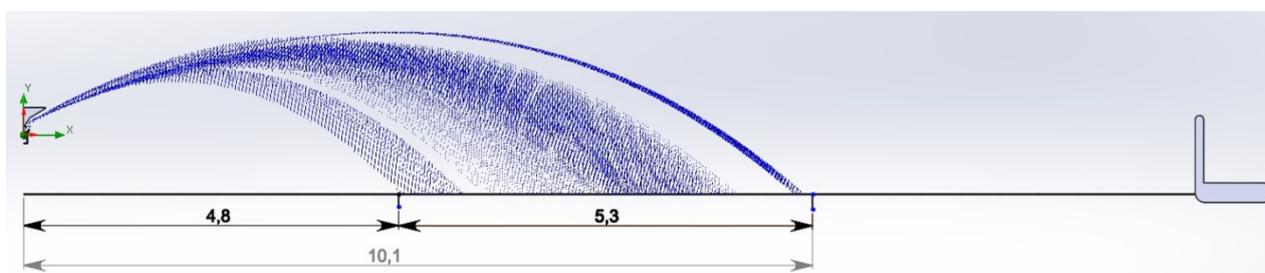


Рисунок 9. Визуализация результатов моделирования

Распределение корма представлено на рисунке 10.

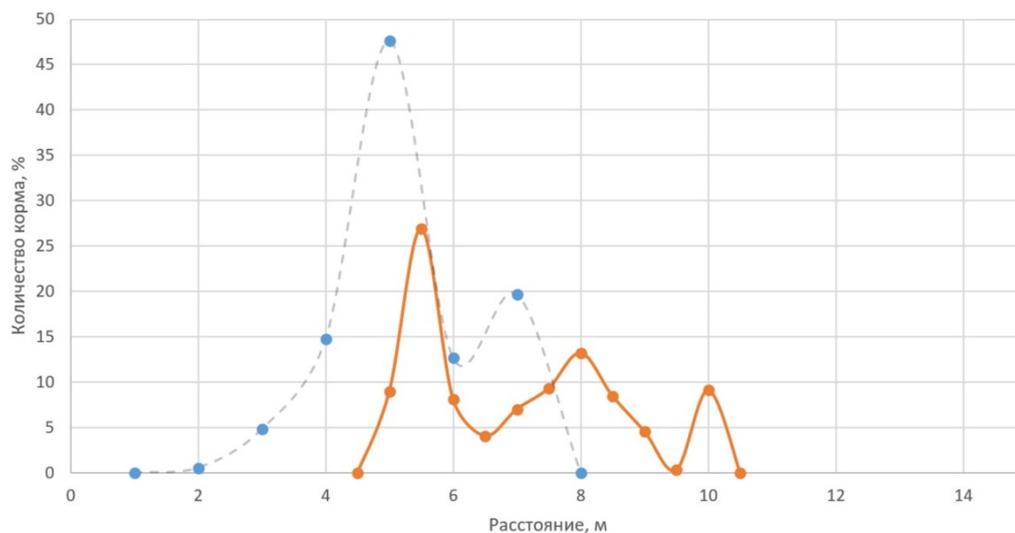


Рисунок 10. Распределение корма по радиусу садка: пунктир — распределение корма, представленное на рисунке 5

Определим геометрические параметры распределителя как факторы, влияющие на критерии оптимизации (рисунок 11).

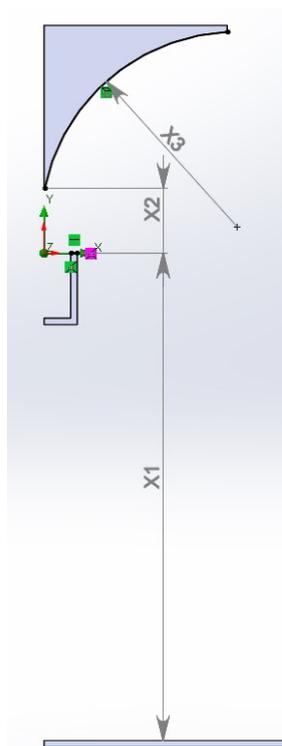


Рисунок 11. Конструктивные факторы

Факторы и уровни их варьирования представим в таблице 1.

Таблица 1. Факторы и уровни варьирования

| № | Фактор | Уровни варьирования | | |
|----------------|--------------------------------|---------------------|------|------|
| | | -1 | 0 | +1 |
| X ₁ | Высота среза патрубка, мм | 1000 | 1500 | 2000 |
| X ₂ | Высота положения конуса, мм | 0 | 50 | 100 |
| X ₃ | Радиус кривизны образующей, мм | 150 | 250 | 350 |

При определении уровня варьирования высоты среза патрубка и высоты положения конуса были приняты во внимание результаты предварительного моделирования. С радиусом кривизны образующей ситуация несколько более сложная.

По результатам моделирования видно, что часть гранул корма, выходящая из патрубка ближе к его оси, сталкивается с поверхностью конуса под малым углом. Затем, отразившись под таким же углом, сталкивается с верхней частью конуса (рисунок 12).

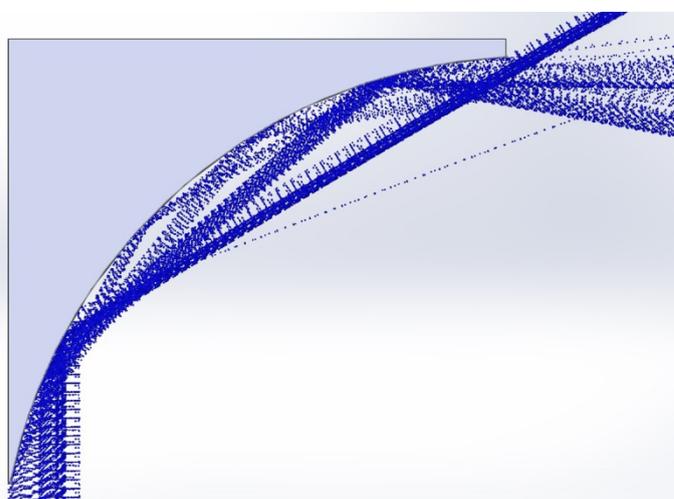


Рисунок 12. Отражения гранул корма от поверхности образующей конуса

Гранулы, вылетающие из патрубка ближе к его стенкам, ударяются о среднюю часть поверхности конуса и отклоняются на достаточный угол, чтобы избежать второго столкновения. От этих столкновений часть гранул может быть разрушена. С одной стороны, чем меньше угол столкновения, тем меньше ударное воздействие на гранулу. С другой стороны, при малых углах гранула два раза столкнётся с образующей конуса.

Наиболее важным аспектом столкновений является кинетическая энергия гранулы, которая будет уменьшаться, переходя в деформацию и нагрев, тем самым уменьшая дальность полёта гранулы до момента падения в воду. Вследствие этого фактор X₃ будет влиять на параметры распределения корма в садке.

Высота положения конуса X_2 также будет влиять на параметры распределения корма, т. к. при вылете из патрубка гранулы будут иметь начальный разлёт. И чем выше положение конуса, тем больше будет разлёт.

В качестве критериев оптимизации определим наружный радиус кольца площадки падения корма Y_1 и ширину кольца Y_2 . Также необходимо учесть фактор равномерности распределения количества выдаваемого корма по ширине кольца S_1 . Данный критерий определяется следующим образом. Значение Y_2 разбивается на 10 участков: от Y_{2-1} до Y_{2-10} . Далее оценивается отношение участка с максимальным количеством падающего корма к участку с минимальным количеством:

$$S_1 = \frac{Y_{2-max}}{Y_{2-min}}. \quad (1)$$

3. Результаты

Согласно выработанному плану исследования, был выполнен ряд численных экспериментов. Сначала анализировались результаты на предмет удовлетворения критерию Y_1 . Эксперименты, показывающие значение $Y_1 < 9$ м, были исключены из дальнейшего анализа, который базировался на следующих утверждениях: показатель Y_2 должен стремиться к максимуму, а критерий S_1 — к минимуму. Отсюда выводим интегральный критерий оптимизации:

$$YS = \frac{Y_2}{S_1} \Rightarrow MAX \quad (2)$$

Визуализация результатов моделирования представлена на рисунке 13.

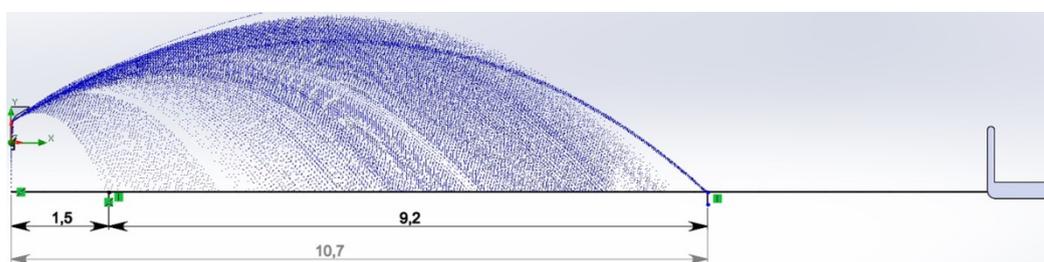


Рисунок 13. Моделирование раздачи корма с максимальным значением интегрального фактора YS

Распределение корма представлено на рисунке 14.

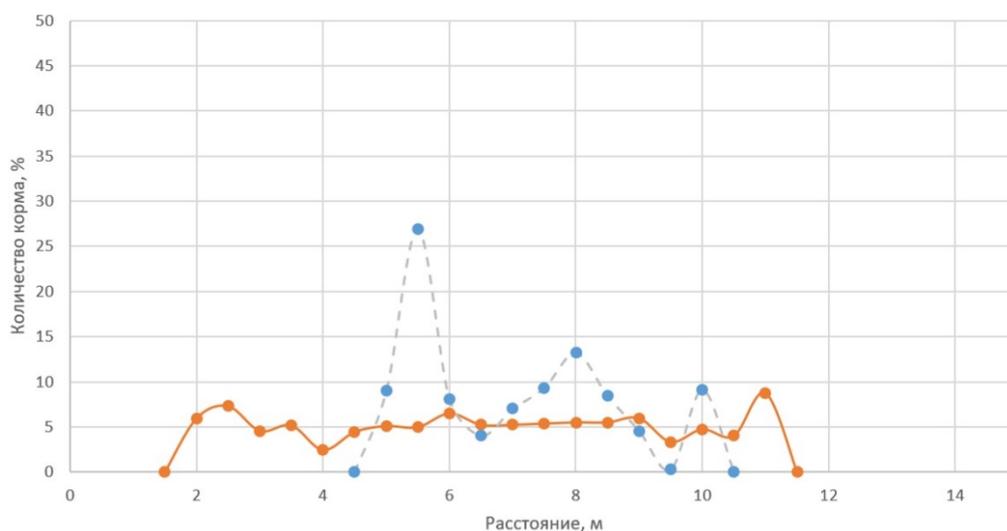


Рисунок 14. Распределение корма по радиусу садка: пунктир — распределение корма, представленное на рисунке 10

Значения достигнутых критериев следующие:

$$Y_1 = 10,7 \text{ м};$$

$$Y_2 = 9,2 \text{ м};$$

$$S_1 = 3,57;$$

$$YS = 2,58.$$

Значение факторов, обеспечивающих максимальный интегральный критерий оптимизации, представлено в таблице 2.

Таблица 2. Значения факторов, обеспечивающих $YS = \max$

| № | Фактор | Значение |
|-------|--------------------------------|----------|
| X_1 | Высота среза патрубка, мм | 1610 |
| X_2 | Высота положения конуса, мм | 75 |
| X_3 | Радиус кривизны образующей, мм | 345 |

Следует отметить, что в расчёте не учитывается взаимодействие между гранулами корма в полёте. В реальности равномерность выдачи корма будет выше из-за столкновений между гранулами.

4. Заключение

Выполненное исследование показало принципиальную возможность и техническую выполнимость технического решения кормораздатчика, обеспечивающего «неограниченный ресурс», высокую надёжность и равномерность выдачи корма при максимальном использовании внутренней площади садка. «Неограниченный ресурс» — понятие относительное. В предложенном техническом решении отсутствуют движущиеся части,

и единственной деталью, подверженной износу, является конус. Круговая образующая конуса будет постепенно истираться от столкновений с гранулами корма. Но ресурс данной детали будет на несколько порядков выше, чем у подшипника, который применяется в существующих ротационных раздатчиках. При этом отказом в предложенной конструкции будет являться изменение параметров площадки падения корма в садок. Данные изменения будут происходить постепенно и могут быть диагностированы инженерным персоналом предприятия при проведении плановых работ по обслуживанию садков. Изношенный конус может быть достаточно легко заменён на новый. При этом конструкция раздатчика является полностью импортозамещающей.

Список литературы

1. Автоматические кормовые системы / Петрозаводский государственный университет. Инженерный парк. 2020. URL: <https://petrsu.ru/structure/6906/pages/8265/avtomaticheskie-kormovye-sistemy>.
2. Кормораздатчики / Петрозаводский государственный университет. Инженерный парк. 2020. URL: <https://petrsu.ru/structure/6906/pages/8284/kormorazdatchiki>.
3. Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС). 2020. URL: <https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=d5d05c947e57579d916318169d8d7abe>.
4. Akva group. Rotor spreaders. 2019 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.akvagroup.com/pen-based-aquaculture/feed-systems/rotor-spreaders> (дата обращения 06.03.2020).
5. IAS Products Ltd. All rights reserved (2017). URL: <https://iasproducts.com/products/aerospreader-s500-feed-broadcaster/> 06.03.2020.
6. Skøien K. R., Alfredsen J. A. Feeding of large-scale fish farms: Motion characterization of a pneumatic rotor feed spreader // Oceans — St. John's. 2014. P. 1—7. DOI: 10.1109/OCEANS.2014.7003103.
7. Maïke Oehme, Turid Synnøve Aas, Mette Pe, Ingolf Lygren, Torbjørn Åsgård. Feed pellet distribution in a sea cage using pneumatic feeding system with rotor spreader // Aquacultural Engineering. 2012. Vol. 51. P. 44—52. ISSN 0144-8609. DOI:org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.001.
8. Kristoffer Rist Skøien, Morten Omholt Alver, Jo Arve Alfredsen. Modelling and simulation of rotary feed spreaders with application to sea cage aquaculture — A study of common and alternative designs // Aquacultural Engineering. 2018. Vol. 82. P. 1—11. ISSN 0144-8609. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.11.002>.
9. Morten O. Alver, Kristoffer Rist Skøien, Martin Føre, Turid Synnøve Aas, Maïke Oehme, Jo Arve Alfredsen. Modelling of surface and 3D pellet distribution in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) cages. // Aquacultural Engineering. 2016. Vol. 72—73. P. 20—29. ISSN 0144-8609. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.03.003>.
10. Kristoffer Rist Skøien, Morten Omholt Alver, Artur Piotr Zolich, Jo Arve Alfredsen. Feed spreaders in sea cage aquaculture — Motion characterization and measurement of spatial pellet

distribution using an unmanned aerial vehicle // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 129. P. 27—36. ISSN 0168-1699. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.020>.

References

1. Automatic feed systems / Petrozavodsk state University. Engineering Park. 2020. URL: <https://petrstu.ru/structure/6906/pages/8265/avtomaticheskie-kormovye-sistemy>.
2. Feeders // Petrozavodsk state University. Engineering Park. 2020. URL: <https://petrstu.ru/structure/6906/pages/8284/kormorazdattchiki>.
3. Federalnyj institut promyshlennoj sobstvennosti (FIPS). 2020. URL: <https://www.fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=d5d05c947e57579d916318169d8d7abe>.
4. Akva group. Rotor spreaders. 2019 [Elektronik resourse]. URL: <https://www.akvagroup.com/pen-based-aquaculture/feed-systems/rotor-spreaders> (date of request 06.03.2020).
5. IAS Products Ltd. All rights reserved (2017). URL: <https://iasproducts.com/products/aerospreader-s500-feed-broadcaster/> 06.03.2020.
6. Skøien K. R., Alfredsen J. A. Feeding of large-scale fish farms: Motion characterization of a pneumatic rotor feed spreader // Oceans — St. John's. 2014. P. 1—7. DOI: 10.1109/OCEANS.2014.7003103.
7. Maike Oehme, Turid Synnøve Aas, Mette Pe, Ingolf Lygren, Torbjørn Åsgård. Feed pellet distribution in a sea cage using pneumatic feeding system with rotor spreader // Aquacultural Engineering. 2012. Vol. 51. P. 44—52. ISSN 0144-8609. DOI:org/10.1016/j.aquaeng.2012.07.001.
8. Kristoffer Rist Skøien, Morten Omholt Alver, Jo Arve Alfredsen. Modelling and simulation of rotary feed spreaders with application to sea cage aquaculture — A study of common and alternative designs // Aquacultural Engineering. 2018. Vol. 82. P. 1—11. ISSN 0144-8609. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2017.11.00>.
9. Morten O. Alver, Kristoffer Rist Skøien, Martin Føre, Turid Synnøve Aas, Maike Oehme, Jo Arve Alfredsen. Modelling of surface and 3D pellet distribution in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) cages. // Aquacultural Engineering. 2016. Vol. 72—73. P. 20—29. ISSN 0144-8609. URL:<https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2016.03.003>.
10. Kristoffer Rist Skøien, Morten Omholt Alver, Artur Piotr Zolich, Jo Arve Alfredsen. Feed spreaders in sea cage aquaculture — Motion characterization and measurement of spatial pellet distribution using an unmanned aerial vehicle // Computers and Electronics in Agriculture. 2016. Vol. 129. P. 27—36. ISSN 0168-1699. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.08.020>.