

# Цифровая модель развития популяции рыб вида *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом) для создания цифрового двойника промышленного рыбоводческого комплекса на базе технологии ИИ с возможностью предиктивной аналитики

К.Ю. Мокшин, М.Г. Жабицкий, Ю.А. Андриенко

**Аннотация** — Объектом исследования является процесс управления аквабиологическим производством в части моделирования развития товарных популяций рыб вида *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом). Цель работы – разработка цифровой модели, обеспечивающую прогнозирование и визуализацию показателей развития рыбной популяции при воздействии факторов производства. Разработано математическое ядро для моделирования процессов жизнедеятельности рыбной популяции клариевого сома в рамках аквабиологического производства. Обсуждены пути доработки модели для её дальнейшего использования в интегрированной системе цифрового двойника аквабиотехнологического производства на базе промышленного интернета вещей. Сценарий внедрения модели - модуль прогнозирования и визуализации показателей развития рыбной популяции при воздействии на неё различных факторов производства. Внедрение цифровой системы позволит оптимизировать управление аквабиотехнологическим производством, избежать проведения экспериментов по поиску эффективных параметров жизнедеятельности популяции на живых особях, увеличить производительность фермы за счёт оптимизации жизненного цикла рыбных популяций.

**Ключевые слова**— цифровой двойник, аквабиологическое производство, управление производством, цифровая трансформация, моделирование процессов, математическое ядро, промышленный интернет вещей

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В сфере промышленного производства продовольствия важное место занимает рыбная продукция. Потребность в рыбном белке,

подтверждённая платежеспособным спросом, непрерывным вырастает и в мире, и в Российской Федерации. Примерно с восьмидесятых годов XX века рост вылова рыбы из естественных водоёмов практически остановился. Нарращивание производства идёт за счёт аквакультуры - целенаправленного, инженерное обеспеченного выращивания рыбы [1-4]. Поначалу это производство было организовано преимущественно в открытках водоёмах, естественных и искусственных с их дополнительным оборудованием. Однако, по аналогии с интенсивным животноводством или вертикальными фермами в растениеводстве, в аквакультуре наиболее высокой производительности, контроля качества конечной продукции и низкой себестоимости удаётся достичь при использовании ещё более интенсивных технологий. Речь идёт о технологиях замкнутого водообращения с высокой и сверхвысокой плотностью посадки выращиваемых организмов в рыбоводной ёмкости. Для разных пород рыб предельная плотность посадки составляет 200–500 килограммов на кубический метр ёмкости (коэффициент заполнения объёма - 20–50%). В этой ситуации интенсивного промышленного производства эффективным и востребованным становится его автоматизация на современном уровне. В настоящее время, с переходом к четвёртой Промышленной революции, это означает глубокую цифровизацию производства. Аналогичные тенденции реализуются и в сферах агробизнеса. Известно, что агропроизводство является одним из лидеров по окупаемости затрат на цифровую трансформацию].

Аналогичная концепция явно прослеживается для современных технологии аквакультуры. Интенсивное производство рыбы по технологии УЗВ - фактически поточное промышленное производство. При этом, наиболее эффективным представляется именно комплексная цифровая трансформация. Под этим мы понимаем, что цифровые технологии внедряются и в инженерную составляющую (автоматизируемая система управления технологическими процессами), и в цифровой контроль биологических компонент производства на базе технологии промышленного интернета вещей, и в сквозную цифровую организацию бизнес-процессов производственное планирование,

Статья получена 11 июня 2022.

Мокшин К.Ю. – магистр ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: mygorod11@gmail.com);

Жабицкий М.Г. – заместитель директора ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: jabitsky@mail.ru);

Андриенко Ю.А. – к.ф.-м.н., старший преподаватель ВИШ НИЯУ МИФИ (e-mail: yand@outlook.com).

оптимизации сбыта, мониторинга рынков через сеть Интернет с применением методов искусственного интеллекта. Фактически, как и на промышленных высокотехнологичных предприятиях, цифровая трансформация аквабиотехнологического производства представляет собой достаточно сложный комплекс мероприятий, интегрирующий разнородные цифровые технологии [5-9]:

- Создание единой среды обращения данных на всей территории предприятия, бесшовно объединяющей беспроводные и проводные сегменты. Сеть в целом должно удовлетворять стандартам для отказоустойчивой умной сети. Для этого проводные сегменты сети желательно строить с резервированием траекторией передачи сигналов, а беспроводные - с перекрытием, достаточным для сохранения доступности всех устройств при выходе из строя любого узла сети. Все обеспечивающие передачу данных устройства должны обладать свойствам самодиагностики, поддерживаемой развёрнутым на предприятии программным обеспечением.

- Проектирование и создания на всём в производственном комплексе цифровой системы контроля параметров, включающей интеллектуальные датчики и контроллеры. Обеспечение всех важных контрольных точек датчиками с функциями цифровой передачи данных и с цифровым управлением. Для оптимизации возможно развёртывание на локальных сегментах контроллеров, обеспечивающих подключение многочисленных разнородных датчиков. Цифровые датчики должны обеспечивать как контроль параметров, важных для протекания технологического процесса, так и контроль работы всех электроприводных исполнительных механизмов. Для рассматриваемого типа производства необходим контроль физических параметров жидкой среды (температуры, скорости течения, давления), а также существенного набора физико-химических характеристик (общая удельная электропроводность, кислотность, мутность, окрашенность, ионный состав по ключевым примесям, таким как йон аммония, нитрит и нитрат ионы и ряд других, а также концентрация растворённого молекулярного кислорода). Для контроля режимов работы электроприводных механизмов необходимо оборудовать каждый из них. Для обеспечения обратной связи в режимах работы электроприводного оборудования, все активные элементы производства должны быть оснащены цифровыми датчиками контроля электрических параметров силового питания и энкодерами. Управление электроприводами насосов, вентиляторов, воздуходувок, автоматов кормления и другими активными элементами (нагревателями, электроприводной арматурой и др.) осуществляется подключенными к единой цифровой среде контроллерами. Весь массив данных по состоянию производственной системы имеется в цифровом виде и обрабатывается программной платформой, имеющей и модули автоматизированного принятия решений, и интерфейсы взаимодействия с оператором, и модуль интеллектуального ассистента оператора. В нормальных режимах работы всё управление производственными операциями идёт через программную платформу.

- Проектирование и создания интерфейса

взаимодействие цифровой производственной платформы с персоналом. При этом взаимодействие по цифровым каналам обеспечивается для всех категорий персонала. Дежурные операторы имеют доступ к информации о состоянии производственной системы и цифровому управлению со стационарных рабочих мест (АРМ сменного оператора), вынесенных из производственной зоны. Оперативный персонал подключён к цифровой платформе с применением носимых планшетов. На этих планшетах установлено программное обеспечение удалённого сегмента цифровой платформы управления инженерными системами предприятия. Специализированные программные модули развёрнуты на каждом планшете. На них осуществляется вывод производственных заданий, необходимые инструкции, справки о технологических характеристиках и иная информация. Обрато, персонал вводит информацию о фактическом состоянии производственного оборудования в точки проведения операций с применением функции интерфейса цифровой платформы, в виде фото и видео материалов, а также в формате текстовых и голосовых сообщений в свободной форме. Ответственные лица (руководство предприятия, квалифицированные узкие специалисты, в том числе на аутсорсинге) имеют доступ к цифровой платформе через глобальную сеть Интернет из любой точки мира. Естественно, в зависимости от квалификации, должностных обязанностей и других характеристик конкретного специалиста, доступ к информации осуществляется в рамках прав, определённых администратором цифровые платформы и контролируемых системой доступа.

- Интеграция с цифровой платформой аквабиотехнологического предприятия программных модулей и средств внешних производителей, включённых в организацию, контроль и управление обеспечивающими бизнес-процессами, такими как как экономический анализ (на базе объективного контроля издержек по цифровым данным), управление материально-техническими запасами для производства, управление складом готовой продукции, сбытом и отгрузками, управление логистикой, управление персоналом, бухгалтерия и финансы и ряд других. Для цифровизации всего комплекса стандартных бизнес-процессов различными производителями предлагается весьма широкий программный инструментарий, из которого, как правило, задолго до сквозной цифровизации, уже осуществлён выбор конкретных инструментов для данного предприятия. Соответственно, на этапе сквозной цифровизации в большинстве случаев смена цифрового инструментария не происходит вовсе, либо происходит частично. Однако, при правильные настройки всего программного комплекса работа цифровых бизнес-систем изменяется кардинально. Главное преобразование, к которому нужно стремиться - переход от укрупнённой ввода данных в цифровые бизнес-продукты человеком вручную к обработке каждой элементарной транзакции на основании данных, автоматически генерируемых "умным" оборудованием. Широко известным примером-аналогом является внедрение в розничной торговле онлайн-касс, что привело к управлению выручкой, запасами и логистикой в онлайн-режиме, по данным о

покупке и выдаче клиенту каждой единицы товара. Известно, что это привело к многократному повышению всех видов эффективности (росту производительности труда и фондоотдачи, снижению складских остатков, потерь от порчи и превышение сроков годности, да и практически всех других тоже). Аналогичный комплекс мероприятий на биотехнологическом производстве также сводится к детальному по операционному учету в реальном режиме времени - расхода кормов, всех видов энергии, учёта износа оборудования, расходных материалов и других ресурсов. Однако главный ожидаемый целевой эффект состоит для биотехнологических предприятий в возможности непрерывного контроля хода корневого биотехнологического процесса - жизнедеятельности культивируемых организмов в зоне биотехнологического, инженерно-технологического экономического оптимума. Смысл этого мероприятия именно в интеграции разнородного ПО на базе единой платформы. Для программного обеспечения цифровой бизнес-обязки производство это требует разработки специальных программных модулей. Биотехнологические производства имеют ещё одну особенность, которую важно учитывать. Производственный цикл роста, развития и продуктивной отдачи живых организмов весьма длительный. Как правило, он составляет несколько месяцев или даже лет. Следовательно, стартуя производственный процесс, мы сталкиваемся с необходимостью планировать спрос потребителей на момент получения продуктивного выхода. Это не является слишком большим препятствием - цепочки добавленной стоимости в промышленности также имеют временные показатели, во многих случаях сравнимые по длительности. Гораздо важнее наличие у хозяйственно-продуктивных живых организмов и биологических популяций собственной программы развития. Легко остановить сборку автомобилей, выплавку стали или движение поездов - и возобновить эти производственные процессы при восстановлении спроса. Однако, к принципиально невозможно задержать развитие биологических объектов - рост зерновых, созревание фруктов, рождение молодняка скота, развитие животных, будь то крупный рогатый скот или рыбная популяция. Кроме того, на разных стадиях развития оптимальные условия обитания живых организмов существенно отличаются. Температура, полив, инсоляция для растений требуются различные в момент пророста семян, наращивания зелёной массы или на этапе созревания плодов и зерна. Сходная ситуация и в аквабиотехнологических производствах. Тип корма, режимы кормления, устойчивость к отклонению среды обитания от оптимальных значений различны на разных стадиях развития рыбных популяций. Для высокоинтенсивного рыбоводства по технологии УЗВ формируются не встречающиеся в живой природе типы популяций. Популяция, как правило моновидовая. В одной рыбоводной ёмкости содержится только форель или только сом, или только осётр. Все особи рыб в этом случае имеют одинаковый возраст и практически одинаковый размер. Сколь угодно значимое отклонение от стандартного размера очень быстро приводят к гибели слабых особей, в том

числе вследствие внутривидового каннибализма. В целом, это тенденция в интенсивном промышленном рыбоводстве вполне аналогична положению в других отраслях сельского хозяйства, где выращиваются преимущественно также совокупности организмов одного вида. Поля пшеницы, птицефабрики, свинофермы - база современного индустриального сельского хозяйства.

Теперь мы подошли непосредственно к задаче, предметное обсуждение которой является фокусом данной работы. Для эффективного применения методов контроля и управления технологическим процессом выращивания живых организмов необходимы знания и понимание модели самого этого процесса. Это означает точки зрения цифровизация - понимание набора факторов и параметров, влияющих на развитие продуктивной популяции, умение измерять объективное значение этих параметров и предсказывать реакцию целевого объекта - продуктивной популяции на результаты производственного процесса.

## II. ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО РЫБОВОДСТВА

Собственно, обладание моделью развития продуктивной популяции как реакции на динамику влияющих факторов необходима для организации целенаправленных управляющих воздействий для получения заданного результата на любом производстве. В биотехнологии дело осложняется объективными закономерностями развития живых организмов. То есть объект производства имеет собственную встроённую, неустранимую программу развития. И производственное воздействие, по сути, сводится к воздействию не просто на пассивный объект, а на динамически развивающиеся системы.

Моделирование развития популяции означает прогнозирование изменения её параметров по времени в зависимости от условий существования. Параметры условия существования конкретной популяции могут изменяться в разной логике. В живой природе, даже в режиме сельскохозяйственного производства, например при свободном выпасе скота или выращивании рыбы в природном водоёме существенное значение имеют природные колебания параметров среды обитания. Это сезонные или погодные изменения. Какие параметры являются прогнозным фоном, то есть их можно измерять, можно рассчитывать на определённые закономерности их динамики - но практически невозможно на них влиять. В промышленной агрокультуре или аквакультуре ситуация иная. Среда обитания, режимы кормления достаточно полно контролируются производителем. Это соответствует выращиванию растений в теплицах, содержанию продуктивного стада в замкнутых изолированных комплексах или рыбы в рыбоводных ёмкостях в помещении. Условия обитания в этих случаях до определённой степени формируются и контролируются производителем. На современном уровне способ такого контроля - соответствующие инженерные системы. Заметим, что даже в этих случаях могут воздействовать неучтенные факторы - например, эпидемии в популяции. Отметим третий существенный сценарий формирования параметры среды обитания, характерный

для высокоинтенсивных агротехнологических или акватехнологических производств. При высоких и сверхвысоких плотностях особей в продуктивных популяциях, существенным становится воздействие жизнедеятельности популяции на её условия обитания. Очень давно с этим столкнулись в растениеводстве, когда совершенно обычное поле сельскохозяйственных культур изменяет за один сезон вегетации свойства почвы существенным образом. Именно для компенсации этого воздействия появились понятия и технологии севооборота, искусственного внесения удобрений и другие. В интенсивном рыбководстве, при высокой и сверхвысокой плотности посадки, изменения водной среды обитания аквакультуры за счёт жизнедеятельности организмов происходит гораздо быстрее. Время существенных изменений, вплоть до несовместимых с выживанием особей, может составлять часы или даже минуты. Кроме того, длительное или регулярное пребывание в среде обитания с неблагоприятными условиями может существенно изменить товарную продуктивность рыбной популяции - снизить привесы или качество товарная продукция экономически значимым образом. При этом, как мы упоминали выше, производственный цикл достаточно велик, и важно уметь предвидеть последствия конкретного состояния условия обитания для конечной производительности популяции. Кроме того, для высоконагруженных экологических систем, компенсация биологической нагрузки и нормализация среды обитания происходит за счёт воздействия инженерных и инженерно-биологических систем, таких как механические и биологические фильтры, насосы, нагреватели, воздуходувки, дозаторы химических и биологических активных добавок, источники обеззараживающее ультрафиолетового излучения и иных производственных инженерных систем. Кормление при промышленном производстве также полностью искусственное. Все эти технологические процессы имеют вполне конкретные экономические измерения. Поскольку производство должно быть экономически оправданным, а поддержания оптимума для роста и развития популяции несёт значимые издержки, важно понимать закономерности обратной реакции популяции на условия обитания и режимы кормления. Длительное время технологические режимы при культивировании живых организмов подбирались на основании накопленного опыта. Однако рост потребностей и конкуренция требует на сегодняшнем этапе оптимизации управление активными воздействиями на выращиваемые популяции. Предсказание конечного результата в зависимости от фактически реализованных режим их выращивания, и оперативно принимаемых инженерно-управленческих решений требуют наличие предиктивной модели развития продуктивной популяции в зависимости от существенных параметров её существования на полном жизненном цикле.

### III. ФАКТОРЫ И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ РЫБНОЙ ПОПУЛЯЦИИ

Обсудим более конкретно биотехнологический производственный процесс, то есть выделим факторы, влияющие на рост рыбы. Укрупнено, это три группы

факторов. Во-первых, это параметры самой рыбной популяции. В ситуации интенсивного промышленного производства рыбной монокультуры по технологии УЗВ, в качестве производственной единицы мы можем рассматривать одну популяцию. В таком, извращённом для живой природы случае, все особи популяции на каждый момент времени имеют одинаковый возраст одинаковый размер. Размещены они рыболовные ёмкости, которые имеют постоянный объём. В ёмкости поддерживается интенсивный водообмен. На практике скорость водообмена составляет от нескольких часов до десяти минут, в зависимости от биологической нагрузки. Модель развития, естественно зависит от биологического вида товарной рыбы. В настоящей работе референтным видом был *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом), достаточно широко культивируемый по технологии замкнутого водообращения в России. Референтным предприятием была рыбная ферма в селе Панинское Курской области. Единицей моделирования для нас служит выделенная рыбная популяция, размещённая в рыбководной ёмкости постоянного объёма  $V$ . Во времени изменяется средняя масса особи  $m$ , при этом дисперсия массы не учитывается. Также моделируется количество особей в популяции  $N$ , которая может снижаться за счёт гибели части членов популяции от воздействия неблагоприятных условий. Целевым параметром, важным для оценки производства является общий выход товарной рыбы в живом весе на каждый момент времени  $M = m * N$ .

Второй группой факторов модели является режим кормления. Рост размеров особей в нормальных условиях определяется именно кормлением, и именно этот вид издержек имеет наиболее существенное влияние на себестоимость конечной продукции (60-80% затрат). С точки зрения построения математической модели, режимы кормления сводятся к графику подачи определённых масс корма с определённым кормовым коэффициентом (отношение массового расхода корма к привесу рыбной популяции). Кормовой коэффициент декларируется производителями кормов, однако экспериментально контролируется на каждой рыбной ферме. Управленческие решения о кормовых режимах оптимизируются при правильном выборе решения по экономическим критериям - биологически более оптимальные корма могут иметь неприемлемо высокую стоимость. Также существенно, что перерасход корма ведёт к дополнительному загрязнению водной среды обитания аквакультуры.

Наконец, третьей группы факторов являются характеристики водной среды обитания. Это прежде всего, температура  $T$ , сильно различающиеся для выращивания различных видов рыб. Для рассматриваемого нами *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом) температурный оптимум лежит в области 30–32 градусов Цельсия. Вторым фактором является состав водной среды. Естественно, это синтетический фактор, при оценке которого должны быть учтены многие примеси. Однако в реальности, для интенсивного промышленного производства можно свести его к концентрации обобщённых загрязнений. Для высоких и сверхвысоких плотностей посадки самым существенным загрязнением являются ионы

аммония. В среде обитания они генерируются в ходе жизнедеятельности организмов, выделяясь через жабры рыб в составе отходов жизнедеятельности. Данная примесь одновременно и оказывает наиболее интенсивное угнетающее воздействие на развитие особей при высоких концентрациях, и легко измеряется приборами контроля. В том числе ее биологически опасные концентрации могут ощущаться персоналом как характерный запах аммиака. В рамках модели интегрального понятия "загрязнение" описывается удельной концентрацией ионов аммония в пересчёте на хлорид аммония. Для других видов рыб важным является концентрация растворённого молекулярного кислорода в воде [O<sub>2</sub>] однако, для клариевого сома в условиях установок замкнутого водообращения влияние этого параметра относительно незначительно. Для других, выращиваемых в УЗВ пород рыб, условия биологического оптимума могут сильно отличаться. Например, для форели оптимальная температура 14 градусов Цельсия, а концентрация растворенного молекулярного кислорода является критическим параметром, причём наиболее быстро изменяющимся. На параметры водной среды обитания воздействуют процесс жизнедеятельности популяции и функционирование внешних обеспечивающих инженерных систем водоочистки и регулирования температуры.

Таким образом, интегральная модель развития популяции должна описывать изменения средней массы особей  $m$  и снижение их количества  $N$  во времени. Определяющими факторами рассматриваются:

- темп суточного поступления массы корма рыболовную ёмкость  $d$  и его кормовой коэффициент  $k$ ;
- внешне задаваемая температура водной среды обитания  $T$ ;
- уровень загрязнения водной среды обитание  $P$ .

Динамика факторов развития популяции частично зависит от биологической нагрузки (прежде всего в части уровня загрязнений), а частично определяется внешним воздействием (условиями в помещении, работы инженерных систем подачи корма, терморегуляции и биологической очистки водной среды обитания аквакультуры). Внешние воздействия являются управляемыми, и в перспективе могут быть описаны в терминах работы конкретного производственного оборудования. Целевой надстройкой над биотехнологической моделью развития популяции, в конечном счёте, должно быть экономико-биотехнологическим модель прогноза себестоимости и объёма товарной продукции в зависимости от режимов эксплуатации производственного комплекса.

#### IV. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ПОПУЛЯЦИИ

Математическая модель развития популяции основана на системе обыкновенных дифференциальных уравнений зависимостей параметров от времени. Для произвольного вида рыб должны рассматриваться пять уравнений, описывающих изменение средней массы особи, их количество в популяции с учётом гибели, температуры водной среды обитания, интегрального уровня загрязнений водной среды обитания (концентрация ионов аммония) и концентрации

растворенного молекулярного кислорода. Для референтной товарные культуры *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом) можно не учитывать изменения концентрация кислорода в воде, и ограничиться моделированием на основе четырех уравнений. Функции влияния внешних параметров на рост особей и их гибель частично описаны в литературе, а частично получены и аппроксимированы авторами по результатам анализа производственных журналов референтного предприятия. В перспективе, при глубокой цифровизации производства, эти функции влияния будут уточняться по данным детального мониторинга параметров в ходе развития многих популяций.

Базовая закономерность роста особи, аппроксимированная экспоненциальным асимптотическим законом, используемая нами представлена на рисунке 1. Эта закономерность с хорошей точностью аппроксимируют контрольные замеры на рассматриваемом референтном производстве. Данные в первом приближении очищенный от влияния температуры на скорость роста и соответствуют условно-оптимальной температуре воды 30-32 градуса Цельсия. Реальный цикл производства товарной продукции *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом) - порядка 9 месяцев.



Рисунок 1 – График, выражающий скорость изменения массы особи до массы взрослой рыбы

Влияние температуры на скорость роста живых холоднокровных организмов, в частности рыб, чрезвычайно высоко. В первом приближении это зависимость объясняется правилом Вант-Гоффа, эмпирической закономерностью изменение скорости химических (в нашем случае - биохимических) реакций в небольшом температурном интервале. Это закономерность предсказывает экспоненциальный рост скорости реакции при повышении температуры. А поскольку рост биологических организмов и есть производная от сложного набора химических реакций, в интервале комфортного развития (для рассматриваемого вида рыбы в интервале 22–32 градуса Цельсия) скорость роста изменяется по экспоненциальному закону зависимости от температуры со значением характерного температурного перепада в экспоненте приблизительно в 4-5 градусов Цельсия. Это значение оценено по производственным журналам. Поскольку существенные колебания температуры не нормальны для целей производства, оценка характерной температуры выполнялась для относительно редких производственных эксцессов, и значение характерного перепада температур в экспоненциальном законе должно быть уточнено после внедрения системы регулярного контроля производственных параметров

(для данных целей - температура в системе и детальных привесов).

Влияние загрязнений на развитие особей выражается в двух эффектах. Во-первых, загрязнения повышают общую смертность в популяции, а во-вторых, угнетают развитие организмов, то есть снижают привесы. В первом приближении эти факторы в системе уравнений представляется в качестве поправочных коэффициентов в различных уравнениях. Очевидным образом, в уравнении для изменения числа особей в популяции учитывается коэффициент повышение смертности, а в уравнении для средней массы особи - коэффициент замедления роста. В рамках данной работы мы ограничимся детальным обсуждением первого эффекта. Для его моделирования были использованы данные работы [10], изучавшей динамику рыбной популяции при заметных уровнях загрязнения аналогом продуктов жизнедеятельности - хлоридом аммония. Кроме того, анализ производственных журналов референтного предприятия позволяет постулировать на этапе нормального развития особей от подросткового до взрослого состояния примерно постоянную относительную долю смертности особей в рамках равных временных интервалов, то есть экспоненциальный закон уменьшения особей популяции. Для нормальных условий эксплуатации характерное время этого изменения относительно велико, однако быстро снижается при превышении загрязнения предельно допустимых концентрацией. По результатам математической обработки экспериментальных данных [10] были рассчитаны в зависимости характерного времени экспоненциального снижения количества особей от уровня загрязнений. Оказалось, что в логарифмическом масштабе эту зависимость можно с хорошей точностью аппроксимировать линейным законом. Соответствующие графики представлены на рисунках 2 и 3. Сплошная линия - обработка данных экспериментов, пунктирная - линейная аппроксимация.

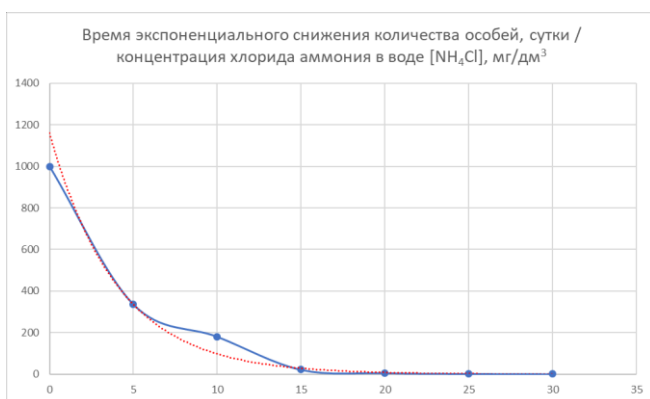


Рисунок 2 – График зависимости расчетного и экспериментального значений времени

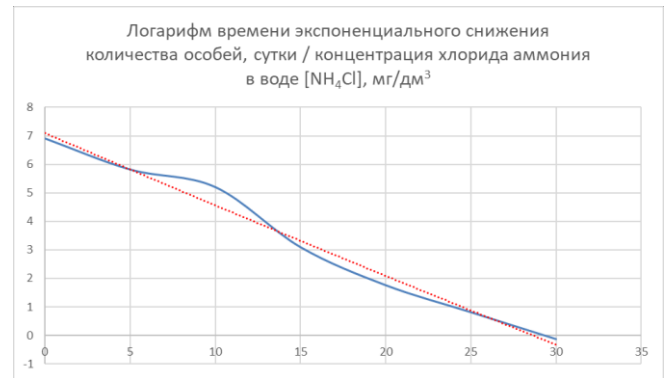


Рисунок 3 – График логарифма времени экспоненциального снижения количества особей от концентрации хлорида аммония в воде (сплошная линия – экспериментальные данные, пунктир – принятая нами расчетная модель)

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С использованием разработанной модели нами были проведены расчёты нескольких характерных простых производственных ситуаций. Коротко обсудим некоторые из них.

На рисунке 4 представлены изменения скорости роста на начальной стадии развития молоди рыб вида *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом). Видно, что, при оптимальной температуре 32 градуса Цельсия удвоение массы происходит примерно за 10 дней, при падении температуры до 27° Цельсия эти привесы достигаются более чем за 4 недели, а при температуре 22° Цельсия с производственной точки зрения значимого роста не наблюдается. Эти расчётные данные хорошо согласуются с анализом производственных режимов рыбной фермы "Панинское". Парадоксальным образом, более неожиданным для производителей оказалось влияние суточных колебаний температуры воды на привесы. Ночное снижение температуры воды вследствие колебания температуры окружающей среды, а также ложно понимаемой частью персонала "экономии" - снижением интенсивности обогрева в ночное время даёт чётко выраженный эффект, представленный на рисунке 5.

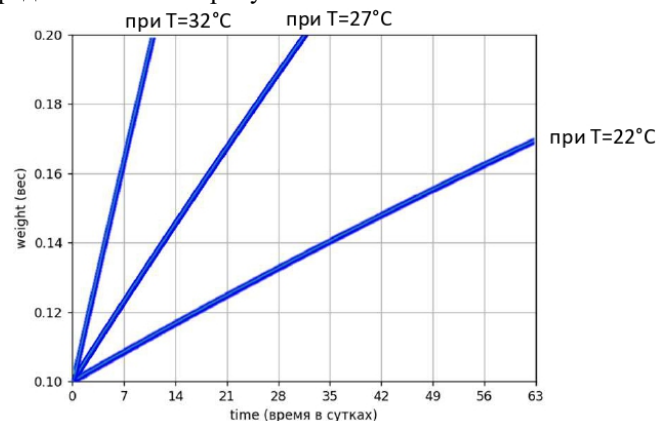


Рисунок 4. Вес особей на начальной стадии развития молоди рыб вида *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом) при различных температурах

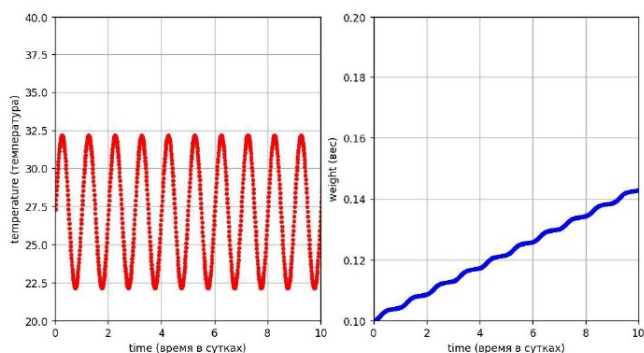


Рисунок 5. Вес особей на начальной стадии развития молоди рыб вида *Clarias gariepinus* (Африканский клариевый сом) при учете суточных колебаний температуры воды

Также проведено расчётное моделирование падежа в популяции в зависимости от уровня загрязнения. На рисунках 6 и 7 приведено изменения численности популяции по времени для условий нормальной работы систем водоочистки и при их отказе условиях высокой плотности посадки. Очевидно, на что первый сценарий соответствует нормальному функционированию рыбной фермы, а второй - экологически-производственной катастрофе.

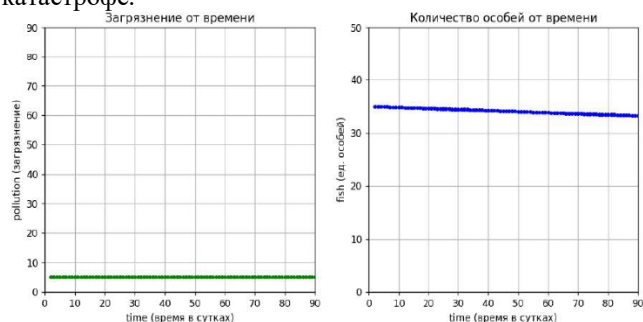


Рис. 6 Падеж при постоянной умеренной концентрации загрязняющих веществ и стабильной работе фильтров

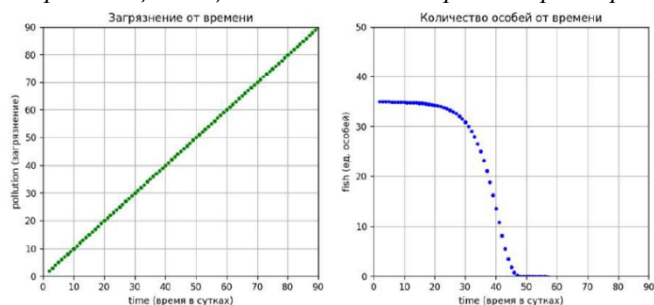


Рис. 7 Падеж при воздействии нарастающей концентрации загрязняющих веществ. Гибель популяции при отсутствии очистных сооружений.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведём итоги выполненного анализа, построения и апробации математической модели развитие рыбной популяции, а также перспектив интеграции цифровой модели с программной платформой цифровой трансформации аквабиотехнологического предприятия.

При условии корректной работы расчётной модели появляется возможность предсказывать последствия фактически произошедших на производстве событий (графиков контроля технологических режимов) и прогнозируемых сценариев. При этом возможен точный

экономический расчёт, предсказывающий объём производства товарной продукции и её себестоимость. Тонкая настройка расчётного инструмента возможна при его интеграции с датчиками контроля состояния рыбной популяции и параметров технологических режимов. Такая настройка существенно повысит точность предиктивной аналитики биотехнологических процессов. Для полной интеграции с управлением производством желательна надстройка биологической модели до инженерно-биологической, определяющие обратные связи режима функционирования конкретной единицы оборудования с развитием продуктивной рыбной популяции. Следующий уровень адаптации расчётной модели предполагает введение модуля экономических расчётов в соответствии с конкретными мгновенными значение стоимости использованных ресурсов и объемом их использования в ходе функционирования основных и обеспечивающих производственных систем. Такая модель, интегрированная в цифровую программную платформу (цифровой двойник) аквабиотехнологического бизнеса, позволит обеспечить оптимизацию его эффективности на базе предиктивной аналитики адекватные расчётные модели. В случае реализации данной программы развития производственное предприятие получит значительные конкурентные преимущества на рынке производства ценной высокобелковой продукции.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Fish to 2030. Prospects for Fisheries and Aquaculture [Электронный ресурс]. – URL: [fao.org/3/a-i3640e.pdf](http://fao.org/3/a-i3640e.pdf) (дата обращения: 02.04.2022).
- [2] FAO. 2018. The State of World Fisheries and Aquaculture [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.fao.org/3/i9540EN/i9540en.pdf> (дата обращения: 29.03.2022).
- [3] Федеральное агентство по рыболовству. 09.07.2021 [Электронный ресурс]. – URL: <https://fish.gov.ru/news/2021/07/09/mirovoe-potreblenie-rybyuvvelichilos-do-212-kg-na-cheloveka-k-2030-godu-fao/> (дата обращения: 02.04.2022).
- [4] Федеральное агентство по рыболовству. 11.04.2022 [Электронный ресурс]. – URL: <https://fish.gov.ru/news/2022/04/11/proizvodstvo-rybnojprodukcii-v-strane-vyroslo-na-2-i-dostiglo-628-tys-tonn-v-tom-chisle-za-schyotyvyпуска-rybnogo-file/> (дата обращения: 11.04.2022).
- [5] Fore, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J.A., Dempster, T., Eguiraun, H., Watson, W., Stahl, A., Sunde, L.M., Schellewald, C., Skoien, K.R., Alver, M.O., Berckmans, D. (2018) Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture Biosystems Engineering, 173, pp. 176- 193
- [6] Lagasco, F., Collu, M., Mariotti, A., Safier, E., Arena, F., Atack, T., Brizzi, G., Tett, P., Santoro, A., Bourdier, S., Salcedo Fernandez, F., Muggiasca, S., Larrea, I. (2019) New engineering approach for the development and demonstration of a multipurpose platform for the blue growth economy. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE, 6
- [7] Digital transformation model based on the digital twin concept for intensive aquaculture production using

closed water circulation technology M G Zhabitskii, Y A Andryenko, V N Malyshev, S V Chuykova and A A Zhosanov IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 723, Mechanization, engineering, technology, innovation and digital technologies in agriculture

- [8] A Digital Twin of Intensive Aquabiotechnological Production Based on a Closed Ecosystem Modeling & Simulation Zhabitskii M., Andrienko Y., Malyshev V., Chuykova S., Zhosanov A. Proceedings of the 33rd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2021), pp. 247-252. DOI: <https://doi.org/10.46354/i3m.2021.emss.034>
- [9] Концептуальный проект частичной автоматизации установки замкнутого водоснабжения для рыбной фермы / Д.М. Григорьев, Д.Л. Болгова // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 9, no. 8, 2021. – С. 5.
- [10] Экологический мониторинг и оценка токсикологической безопасности водных объектов Республики Татарстан [Текст] / А.Р. Макаева // Казань, ФГНБУ «ФТИЦРБ-ВНИВИ» 2017. – С.3-102.



# A digital model of the fish population *Clarias gariepinus* species development for creation industrial fish farm digital twin based on IIoT technology with the possibility of predictive analytics

K.U. Mokshin, M.G. Zhabitskii, U.A. Andrienko

**Annotation** — The study object is the management process of aquatic biological production in terms of modeling for commercial fish populations of the species *Clarias gariepinus* (African *clarium* catfish) development. The purpose of the work is to develop a digital model that provides forecasting and visualization of the fish population development indicators under the production factors influence. A mathematical core has been developed for vital processes modeling of the clary catfish population within the framework of aquabiological production. Ways to refine the model for its further use in the integrated system of the aquabiotechnological production digital twin based on the industrial Internet of Things are discussed. The scenario for the implementation of the model is a module for forecasting and visualizing indicators of the fish population development under the influence of various factors of production. The digital system introduction will optimize the aquabiotechnological production management, avoid conducting experiments to find effective parameters of the population's vital activity on live individuals, increase farm productivity by optimizing the fish populations life cycle.

**Key words** — digital twin, aquatic biological production, production management, digital transformation, process modeling, mathematical core, industrial internet of things of the life cycle of fish populations.

## REFERENCES

- [1] Fish to 2030. Prospects for Fisheries and Aquaculture – URL: [fao.org/3/a-i3640e.pdf](http://fao.org/3/a-i3640e.pdf) (Accessed: 02.04.2022).
- [2] FAO. 2018. The State of World Fisheries and Aquaculture – URL: <http://www.fao.org/3/i9540EN/i9540en.pdf> (Accessed: 29.03.2022).
- [3] Federal Agency of Fisheries 09.07.2021– URL: <https://fish.gov.ru/news/2021/07/09/mirovoe-potreblenie-rybyuvelichilos-do-212-kg-na-cheloveka-k-2030-godu-fao/> (Accessed: 02.04.2022).
- [4] Federal Agency of Fisheries 11.04.2022– URL: <https://fish.gov.ru/news/2022/04/11/proizvodstvo-rybnojprodukczii-v-strane-vyroslo-na-2-i-dostiglo-628-tys-tonn-v-tom-chisle-za-schyotvypuska-rybnogo-file/> (Accessed: 11.04.2022).
- [5] Fore, M., Frank, K., Norton, T., Svendsen, E., Alfredsen, J.A., Dempster, T., Eguiraun, H., Watson, W., Stahl, A., Sunde, L.M., Schellewald, C., Skoien, K.R., Alver, M.O., Berckmans, D. (2018) Precision fish farming: A new framework to improve production in aquaculture *Biosystems Engineering*, 173, pp. 176- 193
- [6] Lagasco, F., Collu, M., Mariotti, A., Safier, E., Arena, F., Atack, T., Brizzi, G., Tett, P., Santoro, A., Bourdier, S., Salcedo Fernandez, F., Muggiasca, S., Larrea, I. (2019) New engineering approach for the development and demonstration of a multipurpose platform for the blue growth economy. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 6
- [7] Digital transformation model based on the digital twin concept for intensive aquaculture production using closed water circulation technology M G Zhabitskii, Y A Andrienko, V N Malyshev, S V Chuykova and A A Zhosanov *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Volume 723, Mechanization, engineering, technology, innovation and digital technologies in agriculture
- [8] A Digital Twin of Intensive Aquabiotechnological Production Based on a Closed Ecosystem Modeling & Simulation Zhabitskii M., Andrienko Y., Malyshev V., Chuykova S., Zhosanov A. *Proceedings of the 33rd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2021)*, pp. 247-252. DOI: <https://doi.org/10.46354/i3m.2021.emss.034>
- [9] Conceptual project of partial automation of recirculation aquaculture farm / Dmitry Grigorev, Daria Bolgova // *International Journal of Open Information Technologies* ISSN: 2307-8162 vol. 9, no. 8, 2021. – p. 52-57.
- [10] Environmental monitoring and assessment of toxicological safety of water bodies of the Republic of Tatarstan / A.R. Makaeva // *Kazan, FSNBU "FTTSRB-VNIVI" 2017.* – p.3-102.