

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.331:639.3

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-2-86-93

ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТИ ВИТАНИЯ ИКРИНОК В ИНКУБАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ, УСТАНОВЛИВАЕМОЙ НА ОТРАБОТАННЫХ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, А.А. АНДРИАНОВА, ст. препод.

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lp62007@yandex.ru

© Яблонев А.Л., Андрианова А.А., 2026

Рекультивация отработанных торфяных месторождений методом обводнения и последующего зарыбления является наиболее эффективным методом хозяйствования. Выращивание ценных пород рыбы путем инкубирования мальков предполагает использование специальной инкубационной системы. Гидравлический расчет ее главного элемента – гнезда-инкубатора – невозможен без умения определять скорость витания икринки в гнезде, поскольку при большей скорости обтекания икринка будет вымываться потоком, а при значительно меньшей скорости – испытывать недостаток кислорода. В статье предложена математическая модель, позволяющая определять скорость витания икринки, и описаны проведенные экспериментальные исследования, показавшие адекватность разработанной модели.

Ключевые слова: отработанное торфяное месторождение, затопление, зарыбление, инкубационная система, гнездо-инкубатор, скорость витания, критическое число Рейнольдса.

ВВЕДЕНИЕ

Вовлечение в дальнейшее хозяйственное использование отработанных торфяных месторождений, занимающих весьма большие площади [1, 2], представляет важную задачу. Как уже было обосновано, обводнение и последующее зарыбление ценными породами рыбы – наиболее эффективный и экологичный способ такого вовлечения [3–5]. Среди ценных пород рыб, которые возможно воспроизводить и выращивать в торфяных прудах, нами была выделена пелядь, а среди методов воспроизводства – инкубирование мальков из икринок в специальной инкубационной системе – гнезде-инкубаторе. Это устройство позволяет инкубировать искусственно оплодотворенную икру в естественных условиях, получая саморасселяющиеся по примыкающим к проточному каналу прудам жизнестойкие личинки.

Для гидравлического расчета инкубационной системы необходимо знать скорость витания икринок в гнезде, поскольку при больших скоростях обтекания икринки ее будет вымывать из гнезда, а при малой – будет сказываться недостаток кислорода.

В связи с этим целью данной статьи является определение скорости витания икринки в гнезде-инкубаторе, устанавливаемом на отработанных торфяных месторождениях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема наиболее эффективной инкубационной системы (83...96 % по числу выклева и развития жизнестойких личинок) с выносным водозаборным устройством представлена на рис. 1.

Проточность гнезда-инкубатора осуществляется из размещенного на некотором расстоянии против течения водозаборного устройства. Внутри корпуса находится искусственный инкубационный субстрат в виде пластины с лунками. Пластина делит корпус на две части. Нижняя часть выполняет функцию отстойника взвешенных и влекомых потоком частиц ила и детрита [6].

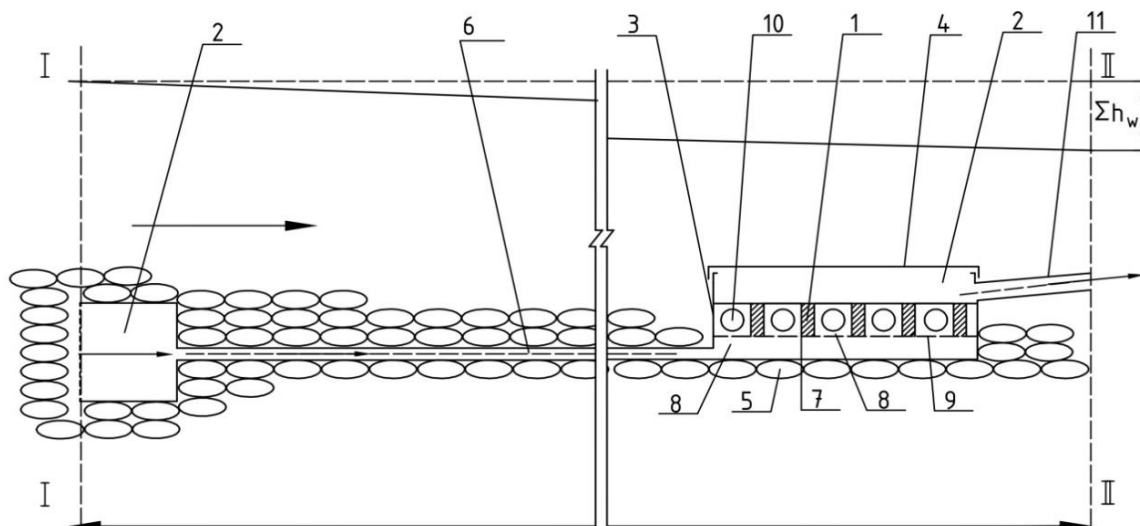


Рис. 1. Схема инкубационной системы (гнезда-инкубатора) с выносным водозаборным устройством: 1 – гнездо-инкубатор; 2 – водозаборное устройство; 3 – корпус; 4 – крышка; 5 – водонепроницаемое дно; 6 – гибкая подводная гофрированная трубка; 7 – искусственный нерестовый субстрат в виде пластины; 8 – лунки; 9 – сетка; 10 – икринки; 11 – выпускной патрубок

Корпус гнезда-инкубатора и водозаборного устройства заглубляется в грунт проточного канала отработанного торфяного месторождения. Вода поступает самотеком в водозаборное устройство из подруслового потока. В каждую лунку инкубационного субстрата помещают по одной икринке. Поскольку после вылупления личинке необходимо большее пространство, диаметр лунки на 3–5 мм больше, чем диаметр икринки. Выход личинок из гнезда-инкубатора в проточный канал происходит через выпускной патрубок. Вода из подруслового потока поступает в водозаборное устройство, далее – по гибкой гофрированной трубке в корпус инкубатора под пластину-субстрат. Проходя через лунки, вода обогащает кислородом пространство вокруг эмбрионов, выносит продукты их жизнедеятельности и через выпускной патрубок вытекает в проточный канал [6, 7].

Статистическая оценка показывает, что средний диаметр икры пеляди колеблется от 1,6 до 2,5 мм [8].

Рассмотрим шарообразную частицу (икринку), находящуюся во взвешенном состоянии в восходящем потоке воды (рис. 2).

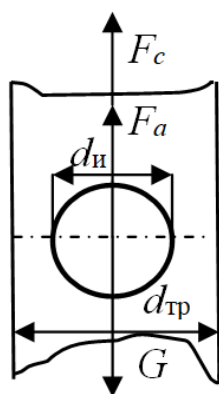


Рис. 2. Равновесие частицы (икринки) в восходящем потоке воды

На икринку диаметром d_u , помещенную в поток диаметром $d_{гр}$, действует сила тяжести G , сила Архимеда F_a и сила сопротивления F_c , обусловленная воздействием потока воды [9, 10].

Уравнение равновесия может быть записано в виде

$$F_a - G + F_c = 0 . \quad (1)$$

Сила Архимеда определяется объемом икринки (шарообразной частицы) V_u и плотностью воды $\rho_в$:

$$F_a = \rho_в g V_u = \rho_в g \frac{\pi d_u^3}{6}, \quad (2)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; d_u – диаметр икринки.

Сила тяжести определяется плотностью икринки ρ_u и ее диаметром d_u :

$$G = m_u g = \rho_u g \frac{\pi d_u^3}{6}, \quad (3)$$

где m_u – масса икринки.

Сила сопротивления зависит от режима движения жидкости и в общем случае для ламинарного режима определяется законом Стокса [9]:

$$F_c = 3\pi\mu d_u v, \quad (4)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости жидкости; v – скорость обтекания икринки восходящим потоком жидкости, равная скорости витания.

Подставив (2), (3), (4) в (1), получим:

$$\rho_в g \frac{\pi d_u^3}{6} - \rho_u g \frac{\pi d_u^3}{6} + 3\pi\mu d_u v = 0, \quad (5)$$

откуда скорость витания

$$v = \frac{\pi d_u^3 g (\rho_u - \rho_в)}{6 \cdot 3\pi\mu d_u} = \frac{d_u^2 g (\rho_u - \rho_в)}{18\mu}. \quad (6)$$

Для оценки полученного параметра проведем расчет по формуле (6), считая, что температура воды $t_b = 8$ °С. Тогда $\mu = 1,39 \cdot 10^{-3}$ Па · с, $\rho_b = 1\,000$ кг/м³, $\rho_u \approx 1\,070$ кг/м³ [12]. Диаметр икринки примем равным 2,3 мм.

$$v = \frac{d_u^2 g (\rho_u - \rho_b)}{18\mu} = \frac{0,0023^2 \cdot 9,81(1\,070 - 1\,000)}{18 \cdot 1,39 \cdot 10^{-3}} = 0,145 \text{ м/с.}$$

Число Рейнольдса для данных условий и обтекания икринки в трубе диаметром $d_{тр} = 6$ мм:

$$Re = \frac{\rho_b v d_{тр}}{\mu}, \quad (7)$$

$$Re = \frac{1\,000 \cdot 0,145 \cdot 0,006}{1,39 \cdot 10^{-3}} = 625,899.$$

Опыт эксплуатации гидроклассификаторов, схожих по действию с гнездом-инкубатором, показывает, что критическое число Рейнольдса для них составляет $Re_{кр} = 2$ [10]. Поскольку рассчитанное число Рейнольдса значительно больше критического, то можно сделать вывод о том, что обтекающий икринку поток воды турбулентен.

Для турбулентного потока сила сопротивления может быть найдена по формуле [9, 10]:

$$F_c = C_d S_u \rho_b \frac{v^2}{2}, \quad (8)$$

где $C_d = 0,44$ [10] – коэффициент обтекания для шарообразной частицы; S_u – площадь Миделя для икринки:

$$S_u = \frac{\pi d_u^2}{4}, \quad (9)$$

тогда

$$F_c = C_d \frac{\pi d_u^2}{4} \rho_b \frac{v^2}{2}. \quad (10)$$

Подставив (2), (3), (10) в (1), получим:

$$\rho_b g \frac{\pi d_u^3}{6} - \rho_u g \frac{\pi d_u^3}{6} + C_d \frac{\pi d_u^2}{4} \rho_b \frac{v^2}{2} = 0, \quad (11)$$

откуда

$$C_d \frac{\pi d_u^2}{4} \rho_b \frac{v^2}{2} = \rho_u g \frac{\pi d_u^3}{6} - \rho_b g \frac{\pi d_u^3}{6} = (\rho_u - \rho_b) \frac{\pi d_u^3}{6} g, \quad (12)$$

$$C_d \frac{\pi d_u^2}{4} \rho_b v^2 = (\rho_u - \rho_b) \frac{2\pi d_u^3}{6} g = (\rho_u - \rho_b) \frac{\pi d_u^3}{3} g. \quad (13)$$

Окончательно имеем

$$v = \sqrt{\frac{4d_u g (\rho_u - \rho_b)}{3C_d \rho_b}}. \quad (14)$$

Подставив полученные ранее данные в формулу (14), имеем:

$$v = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0023 \cdot 9,81(1070 - 1000)}{3 \cdot 0,44 \cdot 1000}} = 0,0692 \text{ м/с.}$$

Проверим число Рейнольдса по (7):

$$Re = \frac{1000 \cdot 0,0692 \cdot 0,006}{1,39 \cdot 10^{-3}} = 298,705.$$

Рассчитанное число Рейнольдса больше критического, следовательно, режим движения, как и предполагалось, турбулентный.

Для нахождения поправочного коэффициента, учитывающего отличия реальных условий от теоретических, был проведен эксперимент по оценке скорости витания икринок пеляди в прозрачной ПВХ-трубке диаметром $d_{тр} = 6$ мм. Диаметр икринок охватывал весь диапазон средних диаметров ($d_u = 1,6...2,5$ мм). Схема установки представлена на рис. 3.

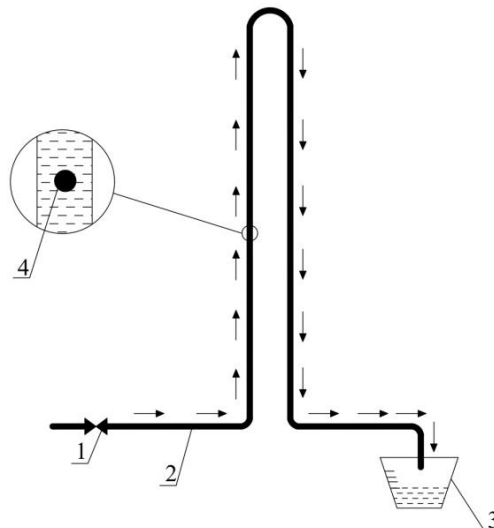


Рис. 3. Установка для определения скорости витания икринок:
1 – напорный кран; 2 – гибкая прозрачная трубка;
3 – емкость для определения объема жидкости; 4 – икринка

Объем воды в емкости 3 оценивался весовым методом с применением весов лабораторных Асом JW-1 с точностью до 0,01 г. Время наполнения емкости выбиралось одинаковое – 5 мин и отмечалось по электронному цифровому секундомеру с точностью до 0,01 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментального определения скорости витания икринок $v_{эксп}$ представлены в таблице.

Коэффициент k , учитывающий стесненность и другие отличия реальных условий от теоретических, названный нами коэффициентом стесненности, получен численным методом и составил 0,18...0,20. Теоретическая скорость витания $v_{теор}$, рассчитанная по формуле

$$v_{теор} = k \sqrt{\frac{4d_u g (\rho_u - \rho_в)}{3C_d \rho_в}}, \quad (15)$$

также содержится в таблице.

Кроме того, в таблице представлено относительное отклонение (относительная ошибка) теоретической скорости витания от экспериментальной, которое было определено по формуле

$$\varepsilon = \frac{|v_{эксн} - v_{теор}|}{v_{эксн}} \cdot 100 \%, \quad (16)$$

и среднее отклонение $\bar{\varepsilon}$.

Сравнительная оценка экспериментальной и теоретической скоростей витания икринки

| d_u , мм | $v_{эксн}$, м/с | $v_{теор}$, м/с | ε , % |
|------------|------------------|------------------|--------------------------------|
| 1,6 | 0,0113 | 0,01096 | 3,009 |
| 1,7 | 0,0114 | 0,01130 | 0,877 |
| 1,8 | 0,0114 | 0,01163 | 2,018 |
| 1,9 | 0,0117 | 0,01195 | 2,137 |
| 2,0 | 0,0126 | 0,01226 | 2,698 |
| 2,1 | 0,0127 | 0,01256 | 1,102 |
| 2,2 | 0,0130 | 0,01286 | 4,741 |
| 2,3 | 0,0131 | 0,01314 | 0,305 |
| 2,4 | 0,0135 | 0,01343 | 0,519 |
| 2,5 | 0,0140 | 0,01370 | 2,143 |
| | | | $\bar{\varepsilon} = 1,955 \%$ |

На рис. 4 представлена зависимость теоретической и экспериментальной скоростей витания от диаметра икринки.

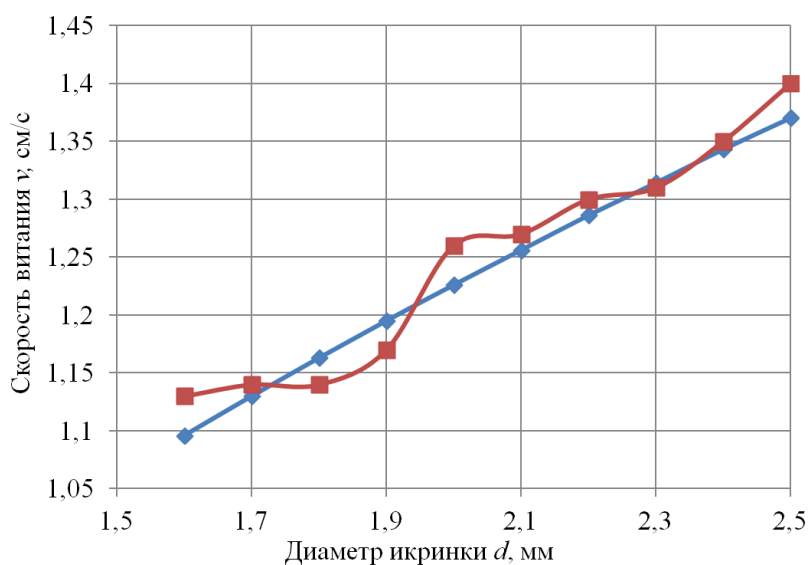


Рис. 4. Зависимость скорости витания от диаметра икринки:

—♦— расчет, —■— эксперимент

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подведем итоги вышеизложенного:

1. Для гнезда-инкубатора с помещенными внутрь икринками характерен турбулентный режим движения жидкости.
2. Икринка в гнезде-инкубаторе, как и любая частица в гидроклассификаторах, находится в поле действия трех сил – тяжести, Архимеда и сопротивления.
3. Скорость витания икринки в гнезде-инкубаторе ограничивает возможность вымывания ее из гнезда и зависит от сочетания указанных выше сил.
4. Скорость витания икринки в гнезде-инкубаторе в зависимости от диаметра икринки может быть описана линейным законом.
5. Предложенная математическая модель позволяет рассчитывать скорость витания икринки в гнезде-инкубаторе.
6. Относительное отклонение предложенной модели от экспериментальных данных в исследованном диапазоне диаметров икринок (от 1,6 до 2,5 мм) укладывается в границы от 0,305 до 4,741 % со средним значением 1,955 %, что меньше 5 %. На этом основании можно говорить о высокой точности предлагаемой модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Misnikov O. Basic technologies and equipment used for peat deposits development in foreign countries. *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2018. V. 41. P. 01046.
2. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
3. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Комплексное использование карьеров отработанных торфяных месторождений. *Современные технологии и инновации: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции* / под общ. ред. Т.Б. Новиченковой. Тверь: ТвГТУ, 2025. С. 61–65.
4. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Обзор методов комплексного использования выработанных месторождений торфа в сравнении с другими горными породами, добываемыми открытым способом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 26–40.
5. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Гидравлическое обоснование параметров инкубационной системы, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 1 (29). С. 65–74.
6. Скоробогатов М.А., Андрианова А.А., Павлов Д.С., Веселов А.Е., Ефремов Д.А., Ручьев М.А. Гидравлические расчеты гнезд-инкубаторов для икры лососевых рыб с выносным водозаборным устройством // *Природообустройство*. 2020. № 1. С. 104–110.
7. Скоробогатов М.А., Павлов Д.С., Веселов А.Е., Ефремов Д.А., Ручьев М.А., Фомина А.А. Гидравлические исследования гнезд-инкубаторов икры лососевых рыб, устанавливаемых в речных условиях // *Рыбное хозяйство*. 2016. № 4. С. 67–70.
8. Львов Ю.Б. Совершенствование технологии воспроизводства пеляди: дис. ... канд. с/х наук. М.: МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. 113 с.
9. Слепков А.И. Механика. URL: <https://teach-in.ru/file/synopsis/pdf/mechanics-M.pdf?ysclid=mj8poaii5f773542039> (дата обращения: 16.12.2025).

10. Гидроклассификаторы и расчет восходящего потока: теория и практика. URL: <https://inner.su/articles/gidroklassifikatory-i-raschet-vozhodyashchego-potoka-teoriya-i-praktika/> (дата обращения: 16.12.2025).

11. Динамический коэффициент вязкости воды. URL: https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fwww.chem21.info%2Fpic1%2F200073091086158063207080176161167117188109133093.png&lr=14&pos=0&rpt=simage&source=serp&text=динамический%20коэффициент%20вязкости%20воды (дата обращения: 19.12.2025).

12. Поликарпова В.Э., Алексанян И.Ю., Арабова З.М., Нугманов А.Х., Эльмурзаев А.А. Определение теплотехнических показателей икры сазана как объекта замораживания и источника лецитина // *Индустрия питания*. 2022. Т. 7. № 4. С. 25–35.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Андрианова А.А. Обоснование скорости витания икринок в инкубационной системе, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 86–93.

JUSTIFICATION OF THE RATE OF EGG HITTING IN AN INCUBATION SYSTEM INSTALLED IN DEPLETED PEAT DEPOSITS

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., A.A. ANDRIANOVA, Senior Lecturer

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: lp62007@yandex.ru

Reclamation of exhausted peat deposits by flooding and subsequent stocking is the most effective method of farming. Growing valuable fish species by incubating fry requires the use of a special incubation system. The hydraulic calculation of its main element, the incubation nest, is impossible without the ability to determine the speed of the egg's flight in the nest, as a faster speed of flow will cause the egg to be washed away, while a slower speed will result in a lack of oxygen. The article proposes a mathematical model that allows for determining the speed of an egg's flight, and describes the experimental studies that demonstrated the adequacy of the developed model.

Keywords: depleted peat deposit, flooding, stocking, incubation system, incubator nest, hovering speed, critical Reynolds number.

Поступила в редакцию/received: 05.02.2026; после рецензирования/reviced: 26.02.2026;
принята/accepted: 02.03.2026