

Зданович Владимир Владимирович,
кандидат биологических наук, доцент,
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

ОЦЕНКА СПЕЦИФИЧЕСКОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ПИЩИ У МОЛОДИ КОИ (*CYPRINUS CARPIO* VAR. *KOI*) ПРИ 20 И 25 °С: МЕТАБОЛИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЛЯ АКВАКУЛЬТУРЫ

Аннотация. Представлены результаты экспериментальной оценки специфического динамического действия пищи (СДДП) у молоди кои (*Cyprinus carpio* var. *koi*) средней массой 20,7 г при температурах воды 20 и 25 °С. Потребление кислорода (MO_2) регистрировали методом проточной респирометрии в течение 24 ч после кормления мотылём. При 25 °С пик СДДП наступал быстрее (2,0–2,5 ч против 3,5–4,0 ч), а его абсолютная величина была в 1,3 раза выше (173,6 против 130,2 Дж/100 г). Относительное превышение пикового метаболизма над стандартным уровнем при 25 °С оказалось ниже (141 % против 166 %), что указывает на менее контрастный, но более энергоёмкий ответ. В этих условиях целесообразно дробное кормление небольшими порциями с усилением аэрации и фильтрации для предотвращения гипоксии и токсического действия аммония.

Ключевые слова: Специфическое динамическое действие пищи (СДДП), кои, *Cyprinus carpio* var. *koi*, температура воды, потребление кислорода, энергетический обмен, аквакультура.

Введение. В современной аквариумистике и товарном рыбоводстве декоративные формы карпа кои (*Cyprinus carpio* var. *koi*) занимают особое место благодаря высокой эстетической ценности и относительной неприхотливости. Однако интенсификация кормления в замкнутых системах водообеспечения нередко сопровождается скрытыми метаболическими нагрузками, одной из которых является специфическое динамическое действие пищи (СДДП).

Под СДДП понимают постпрандиальное повышение уровня метаболизма, отражающее энергетическую стоимость переваривания, абсорбции, транспорта аминокислот и липидов, а также синтеза белков в тканях [1]. У пойкилотермных животных этот эффект носит ярко выраженный температурный характер: с повышением температуры скорость ферментативных процессов возрастает, что обычно ускоряет развитие пика СДДП, однако не всегда однозначно влияет на его абсолютную величину [2]. Для кои оптимальным диапазоном для роста и физиологической активности считается интервал 20–25 °С. Тем не менее количественные параметры СДДП в этом диапазоне до настоящего времени остаются малоизученными, особенно при кормлении живыми кормами. Цель настоящей работы – оценить временные и энергетические характеристики СДДП у молоди кои при температурах 20 и 25 °С для оптимизации режимов кормления в аквакультурных хозяйствах.

Материалы и методы. В экспериментах использовали молодь кои (средняя масса тела $20,7 \pm 1,2$ г; $n = 12$). Рыбы были получены из частного питомника и предварительно адаптированы к лабораторным условиям. Акклимация к экспериментальным температурам ($20,0 \pm 0,5$ °С и $25,0 \pm 0,5$ °С) проводилась в течение 7 дней при фотопериоде 12L:12D. Контроль температуры осуществлялся с точностью $\pm 0,1$ °С. За 24 ч до эксперимента рыбу не кормили для достижения фонового уровня рутинного метаболизма (RMR). В качестве корма использовали живого мотыля (личинки хирономид) с содержанием белка 5,5–7,5 % и жира 0,8–1,8 % от сырой массы. Разовая кормовая нагрузка составляла 3 % от массы тела рыбы, что



соответствует уровню, обеспечивающему максимальное проявление СДДП. Скорость потребления кислорода (MO_2 , $\text{мг O}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$) регистрировали методом проточной респирометрии с автоматическим датчиком растворённого кислорода. Регистрацию вели ежечасно в течение 24 ч после кормления.

На основе полученных экспериментальных данных рассчитывали следующие показатели: абсолютную величину СДДП (мг O_2 на 100 г рыбы) как разность между пиком MO_2 и RMR за период восстановления до фонового уровня. Для перевода метаболической энергии использовали оксикалорийный коэффициент: $1 \text{ мг O}_2 = 14 \text{ Дж}$ [3].

Статистический анализ выполнен с использованием непараметрического U-критерия Манна–Уитни. Различия считали значимыми при $p < 0,05$. Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартная ошибка.

Результаты. В ходе экспериментов получены следующие данные (таблица).

Таблица 1

Параметры СДДП у кои при 20 и 25 °C ($M \pm m$)		
Параметр	20 °C	25 °C
RMR, $\text{мг O}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$	$0,139 \pm 0,011$	$0,299 \pm 0,018^*$
Пик MO_2 , $\text{мг O}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$	$0,232 \pm 0,015$	$0,423 \pm 0,022^*$
Время достижения пика, ч	3,5 – 4,0	2,0 – 4,5*
Продолжительность СДДП, ч	6,0 – 6,5	4,0 – 4,5*
Абсолютная величина СДДП, $\text{мг O}_2/100 \text{ г}$	$9,3 \pm 0,6$	$12,4 \pm 0,7^*$
Превышение пика над RMR, %	166 ± 8	$141 \pm 6^*$

Примечание: * различия статистически значимы при $p < 0,05$

Установлено, что при 25 °C пик метаболизма наступает почти вдвое быстрее, однако его относительное превышение над базовым уровнем ниже, чем при 20 °C. При этом абсолютная величина СДДП (в расчёте на 100 г рыбы) при 25 °C оказалась в 1,3 раза выше, чем при 20 °C ($p < 0,05$). Энергетический эквивалент СДДП составил: при 20 °C – $9,3 \text{ мг O}_2/100 \text{ г} \times 14 \text{ Дж/мг} = 130,2 \text{ Дж/100 г}$; при 25 °C – $12,4 \text{ мг O}_2/100 \text{ г} \times 14 \text{ Дж/мг} = 173,6 \text{ Дж/100 г}$. Таким образом, при повышении температуры на 5 °C дополнительные энергозатраты на переваривание возрастают на 43,4 Дж на каждые 100 г массы рыбы, что составляет около 33 % от общих затрат на СДДП при 20 °C.

Обсуждение. Полученные результаты чётко демонстрируют температурную акселерацию постпрандиального метаболического ответа у кои. Ускорение наступления пика СДДП при 25 °C (с 3,5–4 до 2,0–2,5 ч) согласуется с известными данными о возрастании активности ключевых пищеварительных ферментов – трипсиноподобных протеаз и липаз – в этом температурном диапазоне [4, 5]. Однако более высокая абсолютная величина СДДП при 25 °C (на 33 % выше, чем при 20 °C) свидетельствует о том, что ускорение обработки корма достигается ценой повышенных энергозатрат.

Сравнение наших данных с исследованиями на обыкновенном карпе (*Cyprinus carpio*) выявляет как общие закономерности, так и видовые особенности. Показано, что при повышении температуры с 15 до 25 °C метаболический потенциал пищеварения у карпа возрастает на 49 % [7]. Этот результат хорошо согласуется с нашим наблюдением увеличения абсолютной величины СДДП при 25 °C. Более того, у карпа, в отличие от золотой рыбки, температурный фактор не меняет метаболический режим при совмещении пищеварения и локомоции: сердечно-дыхательная способность и метаболический потенциал пищеварительных и локомоторных органов возрастают параллельно [7]. Это указывает на высокую физиологическую пластичность карповых и позволяет экстраполировать данную



закономерность на кои, объясняя его способность к эффективной переработке корма в широком температурном диапазоне.

В фундаментальной работе на обыкновенном карпе (массой 63,6–84,0 г) при 28 °С установлена прямая зависимость между содержанием белка в корме и величиной СДДП, а также коэффициентом СДДП, который варьировал от 8,99 % (при 20 % белка) до 15,94 % (при 50 % белка) от энергии корма [8]. Эти данные крайне важны для интерпретации наших результатов. В нашем эксперименте мы использовали живой мотыль с умеренным содержанием белка (5,5–7,5 % сырой массы), что, вероятно, обусловило относительно невысокий абсолютный прирост энерготрат. Можно предположить, что при кормлении кои высокобелковыми гранулированными кормами абсолютная и относительная величина СДДП была бы значительно выше, что необходимо учитывать при разработке рационов. Кроме того, показано, что продолжительность СДДП увеличивается с ростом кормовой нагрузки, но не зависит от содержания белка [8], что подтверждает обоснованность нашего подхода к выбору фиксированной кормовой нагрузки (3 % от массы) для обеспечения максимального СДДП.

Исследования на личинках и молоди карпа продемонстрировали, что постпрандиальный подъём экскреции аммонийного азота и потребления кислорода наступает сразу после кормления, причём амплитуда и длительность этого эффекта зависят от массы тела и количества потреблённого азота [9]. Хотя наша работа фокусировалась исключительно на кислородном компоненте СДДП, эти сведения подчёркивают тесную сопряжённость энергетического и азотистого обмена в постпрандиальный период. Это указывает на то, что помимо повышенного потребления O_2 при 25 °С у кои следует ожидать и более интенсивного выделения продуктов азотистого обмена (аммиака, мочевины), что в условиях замкнутых систем аквакультуры создаёт дополнительную нагрузку на системы биофильтрации. Дополнительные данные подтверждают, что у молоди карпа экскреция аммония возрастает в 3–4 раза в первые 6 ч после кормления, причём этот эффект усиливается при повышении температуры [10].

Важным аспектом является влияние размера кормовой порции на СДДП. Хотя прямых данных для кои нет, работы на родственных видах, например на чёрном амуре (*Mylopharyngodon piceus*), показывают, что с увеличением размера рациона (от 0,5 % до 2 % массы тела) достоверно возрастают как пиковое потребление кислорода, так и общая продолжительность СДДП [11]. Также показано, что у рыб в процессе пищеварения пиковая скорость потребления кислорода после нагрузки значительно выше, а длительность и величина избыточного потребления кислорода ниже, чем у голодных особей [11], что свидетельствует о перераспределении энергетических ресурсов в пользу переваривания.

Таким образом, сопоставление наших результатов с данными литературы позволяет заключить, что СДДП у кои подчиняется общим для карповых закономерностям, однако имеет количественные особенности, определяемые видовой спецификой, составом корма и условиями содержания.

Кои относятся к видам, чувствительным к гипоксии, особенно в условиях высокой плотности посадки. В период СДДП потребление кислорода возрастает в 1,4–1,7 раза, что при 25 °С в сочетании с повышенной температурой и сниженной растворимостью O_2 в воде может создавать критическую ситуацию. Например, если в аквариуме объёмом 100 л при 25 °С концентрация кислорода составляет 7,0 мг/л, то за счёт дыхания рыб и СДДП она может упасть до 4,0–4,5 мг/л в течение 2–3 ч после кормления, что близко к порогу стресса для карповых [6]. С учётом данных [9] о резком росте экскреции аммония в замкнутых системах возникает двойная нагрузка: гипоксия усугубляется токсическим действием аммиака, что особенно опасно при высокой температуре.



Заключение. На основании проведённых исследований с учётом сопоставления с литературными данными можно сделать следующие выводы:

1. Повышение температуры с 20 до 25 °С у молоди кои приводит к значительному (почти вдвое) ускорению достижения пика СДДП и сокращению общей продолжительности постпрандиального метаболического ответа с 6 до 4 ч, что соответствует общей для карповых закономерности температурной акселерации пищеварения.

2. Абсолютная энергетическая стоимость СДДП возрастает при 25 °С на 43,4 Дж/100 г (с 130,2 до 173,6 Дж/100 г), что свидетельствует о повышенной «плате» за скорость переваривания при более высокой температуре, а также коррелирует с литературными данными о возрастании метаболического потенциала пищеварения у карпа на 49 % при аналогичном температурном сдвиге [7].

3. Относительное превышение пикового метаболизма над стандартным уровнем при 25 °С ниже (141 % против 166 % при 20 °С), что указывает на менее контрастный, но более энергоёмкий метаболический всплеск. Это требует пересмотра режимов кормления в аквариальной культуре: при 25 °С целесообразно дробное кормление небольшими порциями с одновременным усилением аэрации и биологической фильтрации для предотвращения гипоксии и токсичности аммония.

Список литературы:

1. Jobling, M. 1981. The influences of feeding on the metabolic rate of fishes: a short review // *Journal of Fish Biology*. V. 18. № 4. P. 385–400.
2. Kaushik S.J., Médale F., Fauconneau B., Blanc D. 1998. Protein and amino acid nutrition in fish // *Aquaculture*. V. 161. № 1–4. P. 1–17.
3. Elliott J.M. 1976. The energetics of feeding, metabolism and growth of brown trout (*Salmo trutta* L.) in relation to body weight, water temperature and ration size // *Journal of Animal Ecology*. V. 45. № 3. P. 923–948.
4. Hidalgo M.C., Urea E., Sanz A. 1999. Comparative study of digestive enzymes in fish with different nutritional habits // *Aquaculture*. V. 170. № 3–4. P. 267–283.
5. Kuz'mina V.V. 2008. Influence of temperature on the activity of proteinases and glycosidases in fish // *Journal of Ichthyology*. V. 48. № 4. P. 308–316.
6. Raffray G., Dupont-Prinet A., Le Roux A. et al. 2021. Hypoxia tolerance and metabolic response in ornamental cyprinids // *Aquaculture Reports*. V. 20. P. 100678.
7. Pang X., Cao Z.D., Fu S.J. 2011. The effects of temperature on metabolic interaction between digestion and locomotion in juveniles of three cyprinid fish (*Carassius auratus*, *Cyprinus carpio* and *Spinibarbus sinensis*) // *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*. V. 159. № 3. P. 253–260.
8. Chakraborty S.C., Ross L.G., Ross B. 1992. Specific dynamic action and feeding metabolism in common carp, *Cyprinus carpio* L. // *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*. V. 103. № 4. P. 809–815.
9. Kaushik S.J. 1983. Postprandial metabolic changes in larval and juvenile carp (*Cyprinus carpio*) // *Reproduction Nutrition Développement*. V. 23. № 4. P. 807–820.
10. Kaushik S.J., Dabrowski K., Cuinat P., Luquet P. 1982. Patterns of nitrogen excretion and oxygen consumption during ontogenesis of common carp (*Cyprinus carpio* L.) // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. V. 39. № 8. P. 1095–1105.
11. Li X.M., Fu S.J., Li X.J., Zheng H., Peng J.L., Wei W., Pang X., Zhang Y.G. 2018. The effects of meal size on postprandial metabolic response and post-exercise metabolic recovery process in juvenile black carp (*Mylopharyngodon piceus*) // *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology*. V. 51. № 2. P. 79–94.

