

**ПРОИЗВОДСТВО ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЯИЦ. Сообщение I. РОЛЬ  
 $\omega$ -3-ПОЛИНЕНАСЫЩЕННЫХ ЖИРНЫХ КИСЛОТ\***  
(обзор)**А.Ш. КАВТАРАШВИЛИ, И.Л. СТЕФАНОВА, В.С. СВИТКИН, Е.Н. НОВОТОРОВ**

Один из самых распространенных функциональных пищевых продуктов — яйцо птицы, обогащенное различными нутриентами или их комплексами (N. Shapira, 2010). Высокая скорость и гибкость метаболизма липидов у птиц позволяет довольно быстро модифицировать состав желтка, изменяя рацион кур-несушек. Особый интерес диетологов вызывают продукты, богатые  $\omega$ -3-полиненасыщенными жирными кислотами (ПНЖК), прежде всего  $\alpha$ -линоленовой (АЛК, С18:3), эйкозапентаеновой (ЭПК, С20:5) и докозагексаеновой (ДГК, С22:6), которые необходимы для развития мозга, зрительной функции, профилактики сердечно-сосудистых заболеваний и т.д. (A. Simopoulos, 2001), но дефицитны в рационах населения в большинстве стран, включая Россию. У птицы  $\omega$ -3-ПНЖК из рациона через 1-2 нед устойчиво переходят в яйцо (С.О. Leskanich с соавт., 1997), но при повышении доли скормливаемых  $\omega$ -3-ПНЖК возможны изменения метаболизма липидов с негативными последствиями: снижением содержания липидов в крови, повышением — в печени (вплоть до развития ее геморрагической ожиренности), их катаболизмом, уменьшением массы яиц и желтка (M.E. Van Elswyk, 1997). Кроме того, яйца, обогащенные  $\omega$ -3-ПНЖК, часто имеют неприятный рыбный запах (F. Babel с соавт., 2011). Один из источников  $\omega$ -3-ПНЖК в рационах — рыбий жир маслянистых видов рыб. Он обеспечивает высокое обогащение яйца длинноцепочечными ПНЖК (прежде всего, ДГК), но их состав нестабилен, высокая степень ненасыщенности приводит к усиленному окислению, часто (даже при низких дозах) у продукта появляется рыбный запах, кроме того, есть проблемы с ценой, доступностью и экологичностью (I. Fraeye с соавт., 2012). Второй тип источников  $\omega$ -3-ПНЖК — льняное семя, жмых или масло. При относительно невысоком содержании ДГК количество АЛК в них значительно (около 50 % от суммы жирных кислот), что повышает окислительную стабильность липидов желтка (в отличие от обогащения ЭПК или ДГК). Дозы 5-8 % для льняного семени или жмыха и 3 % — для масла практически не влияют на продуктивность несушек и качество яиц (E.M. Goldberg с соавт., 2013). В России из-за распространенности и низкой стоимости этих добавок их применение для обогащения яиц  $\omega$ -3-ПНЖК, возможно, наиболее выгодно. Третья группа добавок — морские водоросли, но они доступны далеко не везде и пока недостаточно изучены, хотя обсуждается их потенциальная перспективность (J.H. Park с соавт., 2015). При повышении содержания  $\omega$ -3-ПНЖК в кормах и продукции необходимо одновременно обогащение антиоксидантами, стабилизирующее липиды (Ch. Nimalaratne с соавт., 2015). В этом качестве наиболее изучен и, пожалуй, наиболее эффективен витамин Е. Имеющиеся данные относительно возможности получения и применения обогащенных  $\omega$ -3-ПНЖК яиц зачастую противоречивы вследствие ограниченности сравниваемых показателей и сложности метаболизма липидов у птиц, поэтому необходимы углубленные исследования, а также создание международной базы первичных данных для их более эффективного анализа методами сравнительной статистики.

Ключевые слова: функциональные яйца, полиненасыщенные жирные кислоты омега-3, метаболизм липидов, льняное семя и масло, рыбий жир.

В последние десятилетия появилось понятие «функциональный продукт питания», то есть продукт повседневного потребления, который содержит определенные биологически активные вещества (БАВ) в количествах, значительно превышающих таковые в нефункциональных аналогах, и способствует улучшению состояния здоровья и (или) предотвращает возникновение и развитие заболеваний (1). Обогащение БАВ должно происходить как можно более естественно, поскольку безопасность и натуральность таких продуктов имеют важное значение. В этой связи интерес представляют яйца и мясо птицы вследствие высокой (по сравнению с другими

\* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда для реализации проекта 16-16-04047 «Создание функциональных яйцепродуктов, оптимизированных по параметрам метаболической адекватности и аллергенности и комплексной технологии их получения, включающей кормление птицы и переработку получаемых яиц с обогащением эссенциальными нутриентами на всех этапах процесса».

видами сельскохозяйственных животных) эффективности переноса многих веществ из кормов в продукцию (2). Проблема заключается, с одной стороны, в необходимости обеспечить благополучие поголовья при кормлении обогащенными БАВ рационами, с другой — в стоимости и доступности функциональных продуктов для населения. В розничной торговле они стоят на 15-20 % дороже своих не-функциональных аналогов (1). Исследования рынка (например, в Сербии) подтвердили, что это ограничивает спрос (3), однако, как ожидается, потребление функциональной продукции, в том числе птицеводческой, возрастет, о чем свидетельствует развитие производства функционального яйца в таких европейских странах, как Сербия (4), Македония (5) или Греция (6).

Настоящий обзор посвящен биологическим и технологическим аспектам производства пищевого яйца, обогащенного различными биоактивными веществами и их комплексами.

**Функциональное яйцо: общие положения.** К концу XX века установлено, что количество потребляемого холестерина лишь незначительное влияет на его концентрацию в крови (7), масштабные исследования также не выявили существенной связи между потреблением яиц и риском сердечно-сосудистых заболеваний (8), однако «холестериновые споры» в печати продолжают (9). Накопленные данные легли в основу концепции функционального (обогащенного, усиленного, дизайнерского) яйца (functional, enriched, fortified, designer egg) яйцом. Первый термин подразумевает потенциальный терапевтический и (или) профилактический эффект, второй и третий — направленное обогащение биоактивными веществами (БАВ), четвертый — возможность создавать продукт для различных групп населения и пациентов в соответствии с потребностями. Выбор БАВ определяется его дефицитностью в рационе человека, эффективностью переноса из корма в яйцо, стабильностью содержания при переработке или кулинарной обработке, долей суточной потребности, обеспечиваемой одним функциональным яйцом. Так, обогащение витаминами В<sub>1</sub> и В<sub>2</sub> нецелесообразно из-за их высокого содержания в других продуктах питания, а витаминами А и С невозможно вследствие низкого переноса в яйца (10).

Липидный состав яйца в значительной мере определяется набором жиров в рационе (в отличие от аминокислотного, который от рациона почти не зависит) (11). Кроме того, из-за высокой скорости метаболизма липидов и липопротеинов у кур жирнокислотный профиль желтка быстро изменяется в зависимости от рациона (12, 13), что позволяет модифицировать липидную композицию желтка и обогащать его жирорастворимыми БАВ (например, витамином Е, натуральными антиоксидантами — каротиноидами, полифенолами), а также селеном и йодом. Для разных целевых компонентов желтка период трансформации и стабилизации профиля составляет 2-4 нед (13-15), но рост содержания отмечают уже через 1 нед. Это согласуется со сроками формирования яйца после рекрутирования фолликула: 8 сут, из которых около 7 сут приходится на рост фолликула до овуляции и около 1 сут — на отложение белка и скорлупы (16); от начала роста примордиального фолликула до снесения яйца проходит около 14 сут (17).

Рынок функциональных яйцепродуктов (желток, меланж и т.д.) тоже начинает развиваться, но по объему значительно уступает рынку цельных яиц (18). При производстве в яйцепродукты можно добавлять биоактивные вещества, которые не получаются или невыгодно вводить в яйцо. Так, перенос витамина С и некоторых микроэлементов (Cu, Zn) из кормов в яйца малоэффективен и не обеспечивает их достаточного обогащения (10).

ω-3-Полиненасыщенные жирные кислоты. В настоящее вре-

мя жирнокислотному составу рациона, особенно незаменимым (эссенциальным) жирным кислотам (ЖК), в первую очередь полиненасыщенным (ПНЖК), уделяется все больше внимания. Действительно незаменимые для человека и большинства животных ПНЖК линолевая (ЛК, С18:2 $\omega$ -6) и  $\alpha$ -линоленовая (АЛК, С18:3 $\omega$ -3) не синтезируются в организме из более насыщенных кислот из-за отсутствия необходимой для этого  $\Delta^{12}$ -десатуразы (19). ЛК и АЛК из рациона могут служить прекурсорами в биосинтезе ПНЖК с более длинными углеродными цепями (длинноцепочечных ПНЖК, ДЦПНЖК). Некоторые физиологически важные ПНЖК, например докозагексаеновая (ДГК, С22:6 $\omega$ -3) или  $\gamma$ -линоленовая (ГЛК, С18:3 $\omega$ -6), относятся к условно-незаменимым, так как не синтезируются на определенном этапе онтогенеза или при некоторых заболеваниях (20, 21).

Физиологически значимые ПНЖК образуют  $\omega$ -3 и  $\omega$ -6 ряды (по положению первой двойной связи, считая от конечной метильной группы). Важнейшие  $\omega$ -6-ПНЖК, кроме ЛК, — это ГЛК, длинноцепочечные дигомо- $\gamma$ -линоленовая (ДГЛК, С20:3 $\omega$ -6) и особенно арахидоновая (АК, С20:4 $\omega$ -6) кислоты. В группе  $\omega$ -3-ПНЖК, наряду с АЛК, выделяются длинноцепочечные ДГК и эйкозапентаеновая кислота (ЭПК, С20:5 $\omega$ -3). Физиолого-биохимические функции  $\omega$ -3- и  $\omega$ -6-ПНЖК индивидуальны, но между ними возможна конкуренция: например, за использование элонгаз (удлинение молекулы ЖК) и десатураз (катализируют появление двойных связей) при образовании ДЦПНЖК обоих рядов из соответствующих ПНЖК (ЛК или АЛК), а также при биосинтезе эйкозаноидов (простагландинов, тромбоксанов, простациклинов, лейкотриенов, ресолвинов и др.) — сигнальных молекул, участвующих в процессах, связанных с воспалением и другими формами иммунного ответа, регуляцией клеточного роста, контролем кровяного давления и т.д. Зачастую функции эйкозаноидов, синтезируемых из ЖК рядов  $\omega$ -3 и  $\omega$ -6, противоположны (22), поэтому важно не только абсолютное содержание, но и соотношение этих кислот в рационах. Например, при росте доли  $\omega$ -3-ПНЖК снижается биосинтез АК и ее производных — провоспалительных эйкозаноидов (23).

В качестве оптимальных называются разные соотношения  $\omega$ -6- и  $\omega$ -3-ПНЖК — 1:1, 3:1 и 6:1 (24). В странах, где потребление рыбы, богатой  $\omega$ -3-ПНЖК, традиционно высокое (например, в Японии), а частота сердечно-сосудистых заболеваний очень низкая, это соотношение близко к 4:1 (25). Пропорция 4:1 в рационе приводит к соотношению 1:1 в клеточных мембранах (26). В развитых странах показатель для рациона чрезмерно высок — от 10:1 до 25:1 (27). Современные рационы для птицы на основе кукурузы и других зерновых также избыточны по  $\omega$ -6-ПНЖК: содержание АЛК очень мало, а ДГК и ЭПК практически отсутствуют (28). Используемые растительные масла (кукурузное, соевое, подсолнечное, рапсовое) тоже содержат значительные количества  $\omega$ -6-ПНЖК (прежде всего, ЛК) и мало  $\omega$ -3-ПНЖК (29); исключение — некоторые разновидности рапса (30). Поэтому в столовом яйце соотношение  $\omega$ -6- и  $\omega$ -3-ПНЖК намного выше оптимального (31). Также отмечалось, что у белых несушек  $\omega$ -3-ПНЖК откладываются в яйце эффективнее, чем у коричневых (32).

Для успешного обогащения  $\omega$ -3-ПНЖК требуется, во-первых, использовать источник с их высокой биологической доступностью, не оказывающий существенного негативного влияния на здоровье, благополучие несушек, яичную продуктивность и качество яиц, включая вкус и запах, во-вторых, учитывать соотношение  $\omega$ -6- и  $\omega$ -3-ПНЖК и в рационе, и в конечном продукте. Проблему также составляет подверженность объектов

окислению при высокой доле ПНЖК (особенно с 4-6 двойными связями).

Кроме того, важно определить, какими  $\omega$ -3-ПНЖК целесообразно обогащать яйцо. У взрослого человека эффективность биоконверсии АЛК в  $\omega$ -3-ДЦПНЖК (в ДГК и ЭПК) в печени составляет менее 5 %; у кур она тоже невысока (33, 34), причем не только в печени. Изучая *in vitro* образование АК и ДГК из  $^{14}\text{C}$ -меченых ЛК и АЛК (С18) при инкубировании с фрагментами мембраны желточного мешка куриного эмбриона, где была обнаружена активность  $\Delta^9$ - и  $\Delta^6$ -десатураз (35), авторы предполагали выявить биосинтез ДЦПНЖК при транспорте липидов желтка через перивителлиновую мембрану для улучшения снабжения ими эмбриона. Однако биоконверсия обоих предшественников составила лишь 4-8 % при том, что основное количество метки через 4 ч находилось во фракции триглицеридов и фосфолипидов перивителлиновой мембраны (35).

Промежуточные продукты конверсии АЛК в ДГК — эйкозатриеновая ЭТК (С20:3 $\omega$ -3) и докозапентаеновая ДПК (С22:5 $\omega$ -3) кислоты — были обнаружены в яйцах, обогащенных как АЛК, так и ДЦПНЖК, причем среди ДЦПНЖК наиболее эффективно откладывалась ДГК (36). Высокое содержание ДЦПНЖК в рационе снижало эффективность биоконверсии АЛК в ДГК в печени (36). Средство  $\Delta^6$ -десатуразы к субстратным ЖК усиливалось при увеличении числа двойных связей (37), указывая на преимущество наиболее ненасыщенных ДЦПНЖК (ЭПК, ДПК) перед АЛК при конкуренции за десатуразу. Возможно, поэтому сообщений об одновременном вводе в рацион источников АЛК и ДЦПНЖК (например, смеси льняного масла и рыбьего жира) мало, а их результаты не представляют интереса (38). В ряде исследований промежуточные продукты удлинения и десатурации ЖК не определяли и не учитывали в суммарном показателе для  $\omega$ -3-ПНЖК, хотя, на наш взгляд, постадийная оценка изменения концентраций таких продуктов была бы информативной.

Снижение окислительной стабильности при увеличении доли и степени ненасыщенности ПНЖК (в том числе  $\omega$ -3) в кормах и тканях печени может приводить к образованию вредных для птицы продуктов окисления и их переносу в яйца, а в яйцах — к более быстрому ухудшению качества при хранении и (или) кулинарной обработке. J.M. Miranda с соавт. (39) утверждают, что окислительное повреждение желтка связано только с прямым отложением из рациона окисленных липидов (от есть при хранении яиц липиды не окисляются), и при этом ссылаются на работу (40), в которой показано уменьшение концентрации веществ, реагирующих с тиробарбитуровой кислотой (ВРТБК — суммарная концентрация продуктов окисления липидов, прежде всего малонового диальдегида МДА), в содержимом яйца после хранения при 4 °С в течение 60 сут. Сами авторы исследования (40) считали, что наблюдаемый эффект, скорее всего, обусловлен реакцией МДА с другими веществами яйца и, возможно, частичной полимеризацией МДА, что уменьшает ВРТБК. О снижении ВРТБК при хранении сообщалось и в других публикациях (41-43), хотя описано и устойчивое повышение этого показателя (44-46). Поэтому вывод J.M. Miranda с соавт. (39) о безусловной окислительной стабильности липидов желтка при хранении яиц представляется недостаточно обоснованным.

Гипотеза о транспорте окисленных жиров из печени в желток ранее уже выдвигалась (47). В ряде случаев отмечали повышение значений ВРТБК в печени несушек в ответ на скармливание рыбьего жира (47) или льняного семени (48). Также сообщалось о присутствии МДА в свежеснесенном яйце на фоне антиоксиданта — кормового витамина Е (49). Действительно, окисление липидов желтка возможно, так как газообмен через

скорлупу (50) и диффузия воды из белка в желток (51) не прекращаются даже при пониженной температуре хранения. В то же время жидкофазная экстракция липидов для теста с ТБК сама может вызывать оксидацию при отгонке растворителя независимо от присутствия антиоксидантов (52).

Проблему окислительной стабильности при обогащении ПНЖК обычно решают с помощью добавок к кормам (и, как следствие, переноса в яйца) стабилизаторов-антиоксидантов (селен, витамины Е и А, каротиноиды и пр.), которые сами служат ценными БАВ для человека и животных. Еще один рекомендуемый технологический прием — снижение срока хранения корма с источниками ПНЖК и скармливание птице как можно более свежего корма с минимально окисленными липидами (53).

В рационах чаще всего используют лен (семя или масло) и рыбий жир подходящего жирнокислотного состава как доступные источники  $\omega$ -3-ПНЖК (54), также предлагались морские микро- и макроводоросли. Однако при применении всех добавок возможны общие (и для каждой — специфические) негативные последствия для здоровья птицы и качества яиц.

Изменения в метаболизме липидов и снижение массы желтка при обогащении рационов  $\omega$ -3-ПНЖК. Об этом эффекте сообщали многие авторы. Так, в группах, получавших рыбий жир, снижение составило около 3 г, и его оценили как полезное, особенно для перелинявших несушек (55), поскольку уменьшалась доля крупных яиц со скорлупой низкого качества, которые во многих странах категоризируются как низкосортные (56). В других опытах снижения не обнаружили: на рационе с 3 % льняного масла анализируемый показатель достоверно ( $p < 0,05$ ) вырос (с 62,88 до 65,28 г), а яйценоскость была чуть ниже контроля (57).

Снижение массы желтка и содержания липидов в крови несушек при длительном скармливании источников  $\omega$ -3-ПНЖК, возможно, связано с изменениями жирового обмена: у млекопитающих рост доли  $\omega$ -3-ПНЖК в рационе ведет к подавлению биосинтеза липидов в печени, усилению их  $\beta$ -окисления в пероксисомах и последующему сокращению количества липидов разных фракций в крови (58). У птицы тоже отмечали гиполипидемию (уменьшение количества общего жира и триглицеридов в крови) при скармливании льняного семени (59) или рыбьего жира (55, 60). Позднее эта гипотеза получила нутригеномное подтверждение: рыбий жир как источник ДЦПНЖК вызывал повышение экспрессии факторов транскрипции, вовлеченных в биосинтез и катаболизм ЖК в печени, — рецептора  $\alpha$ -типа, активируемого пероксисомными пролифераторами (PPAR $\alpha$ ), и белков, связывающих стероидный регуляторный элемент (sterol regulatory element-binding proteins, SREBPs) (61), приводя к гиполипидемии и липидозу печени. Еще одна гипотеза (62) связывала регуляцию наблюдаемых изменений жирового обмена с эффектом эндогенного эстрадиола, хотя механизм такого влияния оставался для авторов неясным. С этим предположением отчасти связана гипотеза, основанная на действии фитоэстрогенов льна на несушек (63). У млекопитающих фитоэстрогены (диглюкозид секоизоларицирезинола и матаирезинол) метаболизируются микрофлорой толстого кишечника с образованием лигнанов млекопитающих — энтеродиола и энтеролактона, проявляющих эстрогенное и антиэстрогенное действие благодаря структурному сходству с эндогенными эстрогенами (64). У молодых, получавших в рационе льняное семя, также были обнаружены эти лигнановые метаболиты и отмечалось уменьшение (до -30 %) содержания эстрадиола в крови (65). Возможно, именно поэтому при скармливании льняного семени яйценоскость снижается только в начале яйцекладки, когда гормональный баланс и метаболизм липидов еще не до конца

адаптированы к требованиям продуктивного периода и особенно чувствительны к любым воздействиям. Кроме того, используя аминоглютетимид для подавления биосинтеза эстрадиола, давно показали, что его концентрация в крови оказывает влияние скорее на массу яиц и желтка, чем на яйценоскость (66), которая при долгосрочном скармливании льняного семени в целом обычно остается не ниже контрольной.

Метаболический синдром ожиренности печени. Геморрагическая ожиренность печени (*fatty liver hemorrhagic syndrome, FLHS*) наблюдается у несушек на фоне высокоэнергетических рационов и характеризуется высоким содержанием разных липидных фракций, особенно триглицеридов, усилением жировой инфильтрации гепатоцитов, геморрагиями с последствиями вплоть до летальных. Этиология синдрома не до конца ясна, хотя известно, что у птиц предрасположенность к нему связана с тем, что у них (в отличие от млекопитающих) биосинтез ЖК *de novo* происходит исключительно в печени, поэтому образующиеся в кишечнике хиломикроны всасываются непосредственно в кровь воротной вены и практически не попадают в другие ткани (67). Факторы, влияющие на проявление этого синдрома у кур-несушек, — условия содержания, генотип, состав рациона, гормональный и антиоксидантный статусы (68). Связь между FLHS и долей  $\omega$ -3-ПНЖК в рационе несушек (69-71) нельзя считать твердо установленной, поскольку в других работах ее не обнаружили как при визуальной оценке состояния печени и индекса геморрагий (48, 72), так и в гистологических исследованиях (59). Имеющиеся данные скорее указывают на зависимость между проявлением FLHS и количеством общих триглицеридов (независимо от их жирнокислотного профиля) (73, 74).

«Рыбный» запах яиц. Появление яиц, по запаху напоминающих несвежую рыбу, связано с включением в рацион не только рыбопродуктов, но и, например, масла или жмыха льна либо рапса. Неприятный запах существенно снижает спрос на обогащенные  $\omega$ -3-ПНЖК яйца и яйцопродукты (54). Однако органолептические свойства не проясняют ни химическую природу веществ, вызывающих запах, ни причину его появления. Дегустационная оценка — скорее маркетинговый, чем биологический или технологический показатель, отражающий изменения, которые могут быть связаны или же не связаны с ПНЖК. Триметиламин (ТМА), который наряду с биоaminaми (путресцином, кадаверином и т.д.) выделяется при естественной порче рыбопродуктов — единственное неплохо изученное вещество, вызывающее действительно рыбный запах яиц (75). ТМА — продукт жизнедеятельности некоторых представителей микрофлоры дистального отдела тонкого кишечника кур (в том числе слепых отростков) (76). Есть генотипы кур, предрасположенные к рыбному запаху яиц вследствие высокой частоты однонуклеотидного полиморфизма типа А-Т в 7-м экзоне гена флавиносодержащей монооксигеназы 3 (FMO3), причем эта рецессивная мутация встречается практически исключительно у коричневых несушек (77). У человека и крупного рогатого скота она вызывает триметиламинирию — рыбный запах дыхания и (или) тела человека или молока коров. Вследствие этой мутации в печени отмечается полная или частичная дефицитность по ТМА-оксидазе, необходимой для окисления ТМА до почти лишнего запаха и нелетучего ТМА-N-оксида (ТМАО). В результате у кур выделяемый кишечными бактериями ТМА не окисляется в печени до N-оксида и не выводится почками, что происходит в норме, а накапливается в фолликулах яичника. Экспрессия и наследуемость мутации усиливается при длительном скармливании несушкам рационов с высокой долей (12-24 %) рапсового жмыха, действующего как нутригени-

ческий триггер, причем доля основного предшественника бактериального синтеза — холина (в отличие от рапса) не влияет на отложение ТМА в яйце (78). Наблюдаемый нутригенетический эффект объясняют действием антипитательных факторов рапса — глюкозинолатов, которые ингибируют экспрессию печеночной ТМА-оксидазы и также присутствуют (правда, в существенно меньших количествах) в льняном семени. Однако ни в одном исследовании ТМА до сих пор не идентифицирован как основная причина рыбного запаха. Сообщалось, что у несущек с триметиламинурией дыхание зачастую имеет этот запах (76), но в исследованиях по обогащению яиц ПНЖК подобный факт не отмечен.

Таким образом, в большинстве случаев пока лишь предполагается связь рыбного запаха яиц с продуктами окисления обогащенных ПНЖК липидов, причем присутствие антиоксидантов не всегда устраняет проблему. Ранее сообщалось, что рыбий жир в рационе несущек влияет на содержание в яйце 23 из 42 исследованных летучих веществ, и обсуждалась возможность появления рыбного запаха как сенсорной результирующей количественных изменений нескольких этих веществ (79). Появление рыбного запаха у молочного жира при окислении специфически связано с образованием летучих соединений альдокетоновой природы с сопряженными диеновыми фрагментами в углеводородных цепях (80). Подобные соединения, например 2,4-гептадиеналь, обнаружены среди продуктов самопроизвольного окисления рыбьего жира при хранении, и их запах авторы тоже идентифицируют как «рыбный» (81). Теоретически окисление ПНЖК (и в большей степени ДЦПНЖК) может давать подобные соединений и быть связано с биохимическими механизмами возникновения рыбного запаха яиц, но это явление и разработка контрмер требуют специальных исследований.

Отметим, что лишь в очень небольшом числе работ представлен комплекс таких показателей, как жирнокислотный состав источников и рационов, содержание всех целевых ЖК в крови, печени и яйцах, соотношения  $\omega$ -6- и  $\omega$ -3-ПНЖК, органолептическая оценка и т.д., поэтому результаты, которые зачастую противоречивы, трудно сравнивать. Данные по продуктивности несущек тоже неоднозначны. Поэтому полезным было бы создание международной базы экспериментальных данных, которая позволяет проводить статистические исследования массивов информации.

Источники  $\omega$ -3-ПНЖК в рационах кур-несущек. *Рыбий жир*. Это первый и наиболее изученный целевой источник  $\omega$ -3-ПНЖК. Его основные недостатки — нестабильность состава, в том числе из-за высокой окисляемости, что сопровождается рыбным запахом яиц и мяса. Преодолеть проблему удастся лишь частично, что и вызвало интерес к изучению льна как альтернативного источника менее ненасыщенных липидов (82).

В качестве используемой добавки преобладает жир из американской сельди — менхэдена (*Brevoortia tyrannus*). Однако известно, что состав кормовых рыбопродуктов (жира и муки) заметно различается не только между видами рыб, но и между партиями от одного поставщика — из-за нестабильности видового состава улова, сезонных флуктуаций состояния рыбы, высокой предрасположенности к окислению вследствие значительной доли ДЦПНЖК с большим числом двойных связей (ЭПК, ДГК) (83). В Австралии ряд коммерческих препаратов рыбьего жира (даже капсулированных) оказались высокоокисленными (концентрации маркеров окисления превышали допустимые), только в 2 из 32 изученных образцов количество ЭПК и ДГК соответствовало спецификации, а в остальных было ниже заявленного производителями (84).

Следующий и основной недостаток рыбьего жира даже при низких

дозировках — появление рыбного запаха яиц (82). Дезодорирование добавки не улучшало органолептических показателей яиц: введение в рацион 2, 4 или 6 % рыбьего жира приводило к достоверно более высоким баллам по анализируемому показателю, причем достоверных различий между дезодорированной и не дезодорированной формами не обнаружили (85). При этом, как и во многих других работах, отмечали достоверное ( $p < 0,05$ ) линейное снижение массы яиц с повышением дозы рыбьего жира в рационе (на 3-4 % при дозе 6 %). Использование дезодорированного рыбьего жира по сравнению с интактным значительно повысило отложение суммы  $\omega$ -3-ПНЖК в яйца (343 против 246 мг/желток при дозах 6 % на фоне 53 мг/желток в контроле). Возможно, дезодорированный жир привлекает больше для несушек (потребление корма в таких группах — 105 против 101 г · гол.<sup>-1</sup> · сут.<sup>-1</sup>), что приводит к разнице по сумме  $\omega$ -3-ПНЖК в рационах (17,82 и 15,88 г/кг против 2,39 г/кг в контроле). Капсулирование рыбьего жира также не исключает появления рыбного запаха: у белых леггорнов при введении 2; 4 или 6 % микрокапсулированного рыбьего жира в рацион даже доза 2 % через 3 нед достоверно ухудшала запах в сравнении с контролем, хотя суммарное содержание  $\omega$ -3-ПНЖК достоверно и линейно увеличивалось с 141 (контроль) до 299 мг/желток (6 % рыбьего жира) (86). Не следует забывать, что дезодорирование или микрокапсулирование рыбьего жира заметно увеличивает стоимость кормовой добавки.

Наконец, рыбий жир производят в основном из промышленной рыбы, запасы и объемы лова которой во многих странах падают, а загрязненность тяжелыми металлами, полихлордифенилами и другими опасными поллютантами растет (87). Это приводит к снижению рыночной доступности и удорожанию качественного рыбьего жира для производства кормов.

В то же время данные об эффективности применения рыбьего жира неоднозначны. Так, при включении 1,5 % рыбьего жира в рацион несушек их продуктивность и основные показатели качества яиц сохранялись в пределах контроля (88). В других опытах при дозе рыбьего жира 3 % продуктивность кур не изменялась, но по сравнению с контролем в яйце достоверно ( $p < 0,05$ ) снижалось содержание суммы  $\omega$ -6-ПНЖК, повышалась доля ДГК (с 0,19 в контроле до 3,21 %) и ЭПК (с 0,00 до 0,18 %), а соотношение  $\omega$ -6-ПНЖК и  $\omega$ -3-ПНЖК уменьшалось с 33,52 до 2,55 (89). В настоящее время признается, что доля рыбьего жира в рационе для обогащения яиц  $\omega$ -3-ПНЖК не должна превышать 1,5 % (90). То же подтверждают опыты с маслом из тресковой печени: у уток включение 5-6 % этого масла в рационы приводило к существенному и достоверному повышению баллов оценки яиц по рыбному запаху, но при меньших дозах (2-4 %) подобного не отмечали. Продуктивность уток при этом оставалась в пределах контроля, кроме небольшого снижения массы яиц при дозе масла 6 % (91).

*Льняное масло и семя.* Более половины ЖК в липидах льняного семени приходится на АЛК, и в качестве ее источника льняное семя не имеет себе равных (92). Из-за недостаточной доступности на рынке и относительно высокой цены льняное масло в кормлении птицы используют реже, чем семя или жмыхи (93). Цельное семя содержит около 40 % жира, 20-25 % протеина и 3-10 % клейких веществ; последние, наряду с упомянутыми выше лигнанными фитоэстрогенами, линатином (антагонист пиридоксина) и линамарином (цианогенный глюкозид), относятся к основным антипитательным факторам льна (94). Производители обычно рекомендуют вводить семя льна в корма для взрослой птицы в дозе не более 10 % (93) и использовать переработанные семена (размол, автоклавирование, гранулирование, экструзия, микроволновая термообработка и т.п.),



что повышает доступность протеина и  $\omega$ -3-ПНЖК (95, 96). При скармливании мелкого гравия или ракушек птица весьма эффективно перемалывает цельные семена в мышечном желудке (97).

Водорастворимые клейкие вещества семян, состоящие в основном из нейтральной арабиноксилановой и кислой пектиноподобной фракций и содержащиеся прежде всего в оболочке, могут, как и фитострогены, ухудшать продуктивные показатели у несушек. Арабиноксиланы способны существенно повышать вязкость химуса, снижая эффективность использования питательных веществ рациона (98). Известно, что в льняном семени содержание некрахмальных полисахаридов выше, чем в рапсе (99), а рационы с рапсом рекомендуют обогащать ферментами, расщепляющими его некрахмальные полисахариды (100). К сожалению, подобных исследований по льну немного, и в литературе по обогащению яиц  $\omega$ -3-ПНЖК они не упоминаются. Однако сообщалось, что при скармливании несушкам 15 % льняного семени с 39- до 63-суточного возраста обогащение рациона мультиэнзимным комплексом Superzyme<sup>®</sup>-ОМ («Canadian Bio-Systems Inc.», Канада), расщепляющим некрахмальные полисахариды, достоверно улучшало яйценоскость (с 78,0 до 80,9 %;  $p < 0,01$ ) и конверсию корма (с 2,15 до 2,03 кг/кг;  $p < 0,001$ ), тогда как скармливание той же дозы льняного семени без добавки фермента снижало яйценоскость и массу скорлупы по сравнению с контролем без добавок льна и фермента. При применении фермента в яйце также достоверно ( $p < 0,01$ ) повысилась сумма  $\omega$ -3-ПНЖК (с 546 до 578 мг в пересчете на 1 яйцо массой 60 г) и ДГК (с 91,8 до 101,9 мг) (101). Не исключено, что мультиэнзимные препараты в сочетании с высокой долей льняного семени в рационе могут улучшить продуктивные показатели по яйцу, обогащенному  $\omega$ -3-ДЦПНЖК, но пока остается открытым вопрос об органолептических качествах такого продукта.

Подсчитано, что на каждый 1 % ввода в рацион несушек льняного семени сумма  $\omega$ -3-ПНЖК возрастает примерно на 40 мг/яйцо (102). Высокие дозы льняного семени могут повышать содержание АЛК до 200 мг/яйцо, ДГК — до 90 мг/яйцо (90). Следовательно, на практике целесообразно использование льняного семени в дозе не выше 5 %, масла — не выше 3 %: при меньших дозах содержание целевых ЖК в яйце будет недостаточным, при больших — продуктивность несушек и качества яиц могут снизиться при отсутствии заметного роста суммы  $\omega$ -3-ПНЖК, поскольку плато уже достигнуто (103). Установленная в 1990-х годах для льняного семени предельная доза 8 % (104) в настоящее время представляется слишком высокой (из-за влияния на продуктивность и проблемы рыбного запаха). По мнению большинства исследователей, в умеренных количествах льняное семя не сказывается на яйценоскости несушек; исключение в ряде случаев касается раннего продуктивного периода (69).

Сравнив эффект стандартного рациона, богатого  $\omega$ -6-ПНЖК (особенно ЛК), и того же рациона, обогащенного АЛК за счет добавки 5 % эструдированного льняного семени, установили (105), что в опыте сумма  $\omega$ -3-ПНЖК в яйце была больше, чем в контроле, в 3,8 раза (258,2 против 67,3 мг/яйцо), АЛК — в 6,4 раза (156,7 против 24,5 мг/яйцо), ДГК — в 2,4 раза (101,6 против 42,8 мг/яйцо). Отмечали снижение отношения  $\omega$ -6-ПНЖК: $\omega$ -3-ПНЖК — в 3,6 раза, ЛК:АЛК — в 5,7 раза, АК:ДГК в 3,0 раза. После 1-й нед на рационе, обогащенном АЛК, сумма  $\omega$ -3-ПНЖК повысилась в 3,4 раза, через 3 и 5 нед — в 3,7 и 4,0 раза относительно контроля. При сопоставлении последствий введения 0; 5; 10; 15 и 20 % необжаренного или обжаренного полножирного льняного семени в рационы (106) обнаружили, что во всех вариантах с необжаренным семенем яйценос-

кость кур была ниже контроля, при этом лучшие (хотя и недостоверно) показатели яйценоскости отмечали в группах, получавших 5 или 10 % обжаренного семени (93,82 и 93,35 % против 92,71% в контроле). Масса и цветность желтка оставались во всех группах в пределах контроля. Содержание ПНЖК вышло на плато при дозах обеих добавок 15 % (по ДГК прирост в 2,9 раза, ДПК — в 4,0 раза, ЭПК — в 5,5 раза, АЛК — в 9,8 раза), а не 10 %, как сообщалось в других работах. Авторы связывают это с необычно низкой долей АЛК (38,43 % от суммы ЖК) в использованном льняном семени и отмечают, что обжарка льняного семени не дала существенных улучшений по отложению ПНЖК в яйце. Изучая рационы с льняным маслом (1,5; 3,0 и 4,5 %) (107), показали, что его использование в дозе 3 % вместо кукурузы, соевого шрота и рыбной муки в 2,54 раза повышало отложение  $\omega$ -3- и  $\omega$ -6-ЖК в яйце (0,2 мг/мл объема) относительно контроля, не получавшего льняного масла. При этом по АЛК показатель возрос в 1,55 раза, по ЭПК — в 0,15 раза, по докозапентаеновой (C22:5) — в 1,6 раза, по ДГК — в 3,22 раза. Качество белка в единицах Хау в группе с 3,0 % льняного масла в рационе составило 81,3 % и было выше, чем в других группах: в контроле и в варианте с 4,5 % масла — 80,8 %, 1,5 % масла — 80,0 % (интерес к качеству белка не вполне понятен).

Из благоприятных эффектов льняного семени, вводимого в рационы несушек, следует отметить рост концентрации IgY в яйцах: при скормливании 10 % льняного жмыха она достоверно ( $p < 0,05$ ) выросла с 10,4 до 12,0 мг/г желтка (108). В этом опыте яйценоскость кур была на 4 % достоверно ( $p < 0,05$ ) выше, чем в контроле, а масса яиц, относительная масса скорлупы (%) и толщина скорлупы с той же достоверностью снизились. Также недавно сообщалось об увеличении доли полезных лактобацилл в кишечнике несушек, получавших 0,5 или 1,0 % льняного масла (109).

*Морские водоросли.* Альтернативные морские источники  $\omega$ -3-ПНЖК привлекают исследователей, поскольку некоторые ауто- и гетеротрофные микроводоросли вырабатывают довольно значительные количества этих ЖК, прежде всего ЭПК и ДГК. К наиболее изученным относится жирнокислотный профиль у ряда видов *Phaeodactylum* и *Nannochloropsis* (образуют больше ЭПК — до 40 % от суммы ЖК), *Thraustochytrium* и *Schizochytrium* (синтезируют значительные количества ДГК — до 30-40 % ЖК), а также некоторых видов *Chlorella* (продуцируют значительные количества АЛК) (110). В аквакультуре можно повышать отложение ЖК, в том числе целевых, контролируя состав питательной среды и условия выращивания (111). Водоросли — ценный источник белка для сельскохозяйственных животных (112). Кроме того, в качестве побочного продукта после выделения из водорослей концентрата ПНЖК остаются значительные объемы маслянистых веществ, используемые в производстве дизельного биотоплива (113). Еще одно важное преимущество водорослей как компонента кормов для животных, в том числе кур-несушек, — высокое содержание натуральных каротиноидов ( $\beta$ -каротин, кантаксантин, астаксантин и др.). У несушек они улучшают цвет желтка и антиоксидантный статус яиц (114). Водоросли содержат различные микроэлементы, но их эффективность как источника микроэлементов в рационах птицы и влияние на минерализацию скорлупы пока практически не изучены (115). При скормливании несушкам водоросли *Schizochytrium* (0,5 и 1,0 %) с 40-й нед жизни в течение 6 нед (115) яйценоскость примерно соответствовала контролю, а качество скорлупы и цветность желтка повышались. Содержание триглицеридов и общего холестерина в крови достоверно снижалось в обеих опытных группах, концентрация ДГК в яйце достоверно увеличилась (с 0,70 % в контроле

до 0,75 и 0,88 % по двум дозам добавки), а величина  $\omega$ -6-ПНГЖК: $\omega$ -3-ПНГЖК достоверно снизилась (с 11,36 в контроле до 8,20 и 6,08).

Оказалось, что использование водорослей как источника  $\omega$ -3-ПНЖК в рационах тоже связано с проблемой рыбного запаха. При сравнении льняного семени и порошка сушеных водорослей *Nannochloropsis oculata* при равных дозировках (8 %) обнаружили (116), что количество ДГК при скармливании водорослей (111,62 мг/яйцо) достоверно ( $p < 0,05$ ) выше, чем для льняного семени (98,66 мг/яйцо). Однако при органолептической оценке вареных яиц баллы по рыбному запаху, твердости и эластичности желтка яиц в контроле были достоверно лучше, чем в обеих опытных группах (соответственно  $P < 0,001$ ;  $P < 0,01$  и  $P < 0,001$ ), и более половины дегустаторов отдали предпочтение яйцам от контрольной птицы.

Обогащение яиц  $\omega$ -3-ПНЖК, по-видимому, в значительной мере зависит от вида водорослей. Сообщалось, что на фоне 5 или 10 % сушеной биомассы *Nannochloropsis gaditana* эффективность накопления  $\omega$ -3-ПНЖК (особенно ЭПК) в яйце было низким (117). Но в другой работе (118) при скармливании препарата обезвоженных цельноклеточных водорослей (All-G-Rich, «Alltech», США) в течение 70 нед продуктивного периода концентрация ДГК в яйце линейно и достоверно ( $p < 0,05$ ) повышалась с ростом дозы препарата в рационе (85; 187 и 240 мг/100 г яйца в группах, получавших 0; 1 и 2 % добавки). Не выявлено влияния водорослей на интенсивность яйценоскости (84 %), массу яйца (61,5 г), конверсию корма (1,59 кг корма на 12 яиц), относительную массу скорлупы яиц (9,9 % от массы яйца) и прочность скорлупы (2,76 кгс). В целом исследования по использованию водорослей в качестве источника  $\omega$ -3-ПНЖК при обогащении яиц дают довольно обнадеживающие результаты. Есть вероятность, что со временем водоросли приобретут большее значение как компонент кормов, в том числе в России, но пока доступность этих добавок ограничена.

Эффективность стабилизации  $\omega$ -3-ПНЖК антиоксидантами. Известно, что включение в рационы птицы  $\omega$ -3-ПНЖК совместно с антиоксидантами способствует окислительной стабилизации липидов в печени, мясе, желтке яиц. В ряде случаев этот прием позволил смягчить проблему рыбного запаха, хотя в других оказался недостаточно эффективным, особенно при использовании рыбьего жира (63). В яйца в качестве антиоксидантов пробовали вводить различные природные и синтетические соединения и их смеси — каротиноиды, флавиновые и бензохинолоновые антиоксиданты, витамины С, А и Е, селен, йод, галлаты, бутилированные гидроксизанол и гидрокситолуол и т.д. (119).

Наиболее результативным стабилизатором липидов желтка, обогащенных  $\omega$ -3-ПНЖК, оказался жирорастворимый витамин Е. Его антиоксидантные свойства связаны со способностью блокировать переокисление липидов, связывая радикалы гидроперекисей жирных кислот за счет образования эфира по своей фенольной группе и делокализации электронной плотности по ароматической структуре витаминного фрагмента молекулы эфира (120). При сравнении роли разных доз витамина Е в виде  $\alpha$ -токоферола (0, 50, 100 и 150 МЕ/кг корма) и бутилированного гидрокситолуола (БГТ; 0, 50, 100 и 150 мг/кг корма) в рационах с 10 % льняного семени (40) витамин Е во всех исследованных дозах, кроме самой низкой, эффективнее поддерживал концентрацию  $\omega$ -3-ПНЖК при хранении яиц в охлажденном виде (4 °С). В вариантах с дозами витамина Е 50 МЕ/кг и БГТ 50-100 мг/кг содержание  $\omega$ -3-ПНЖК в яйцах снизилось на 13-17 %. Следует отметить, что концентрация витамина Е в яйцах при хранении также уменьшалась. Сообщалось о зависимости между продуктивностью

несушек и дозой витамина Е в рационе: с увеличением последней с 27 до 50 МЕ яйценоскость достоверно ( $p < 0,05$ ) возростала с 94,3 до 96,1 % (53). Добавка витамина Е в дозе 100 МЕ/кг к рациону с 10 % льняного семени достоверно ( $p < 0,05$ ) повышала показатель ВРТБК в печени кур относительно такового у поедавших льняное семя без добавки витамина, обеспечивая ВРТБК в пределах значений для контрольной группы, которой не скармливали ни льняное семя, ни витамин Е (59).

Интересные результаты получены при изучении ускоренного окисления ПНЖК *in vitro* (121), когда оценивали стабильность АЛК и ДГК в присутствии разных доз  $\alpha$ -токоферола (0,0; 0,25; 2,5 и 5,0 мг/мг ЖК) при 70 °С. В отсутствие витамина Е концентрация ДГК снижалась через 24 ч инкубации до 78,2 %, через 72 ч — до 43,0 % от начальной, по АЛК показатели составили соответственно 89,2 и 52,6 %. Все исследованные дозы витамина Е повышали сохранность обеих ЖК в сравнении с контролем (без витамина), однако улучшение оказалось не столь однозначным, как можно было ожидать, исходя из условий опыта, где витамин Е не мог восстанавливать свою активность после нейтрализации окисленных форм ЖК, как это происходит в биообъектах. Так, после 24 ч инкубации наилучшую сохранность для ДГК отмечали при дозах витамина Е 2,5 и 5,0 мг/мг (87,4 и 87,9 %), для АЛК — при 0,25 и 2,5 мг/мг (99,1 и 98,1 %), тогда как доза витамина 5,0 мг/мг давала процент сохранности АЛК, близкий к контролю (лишь 90,4 %). После 72 ч инкубации самая высокая сохранность для ДГК была при дозах витамина Е 0,25 и 2,5 мг/мг (79,6 и 62,5 %), а его максимальная доза (5 мг/мг) обеспечила лишь 55,9 % сохранности. По АЛК более эффективными опять-таки оказались самые низкие дозы витамина Е (94,2 % при 0,25 мг/мг и 87,4 % при 2,5 мг/мг), а при самой высокой дозе сохранность АЛК не превысила 77,0 %. Эти данные отражают нелинейную зависимость между концентрацией витамина Е и его стабилизационной активностью в отношении ПНЖК (вплоть до снижения эффективности стабилизации липидов с высоким содержанием ПНЖК при избыточных дозах витамина Е), а также значительно бóльшую окислительную устойчивость АЛК в отличие от ДГК.

Таким образом, обогащение рациона несушек источниками  $\omega$ -3-полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) для повышения их содержания в функциональном яйце может приводить к гипополипемии, липидозу и уменьшению массы желтка, а появление у яиц рыбного запаха снижает их потребительские качества. Добавки на основе жира маслянистых видов рыбы не обеспечивают окислительной стабильности длинноцепочечных (ДЦ) ПНЖК в корме, организме птицы и получаемых яйцах, у продукции часто появляется рыбный запах, а доступность и экологическая безопасность таких добавок невысоки. При использовании в этом качестве продуктов льняного семени, жмыха и масла к недостаткам относится наличие антипитательных веществ и низкая (по сравнению с рыбьим жиром) эффективность отложения в яйце ДЦПНЖК, но эти добавки дешевле и доступнее, обеспечивают более высокую окислительную стабильность липидов, возникает меньше проблем с рыбным запахом яиц. Богатые ПНЖК микроводоросли как добавки, возможно, физиологически оптимальны, но не везде доступны и недостаточно изучены. По результатам многолетних исследований рекомендуемая доза рыбьего жира в кормах для несушек — не более 1,5-2,0 %, семян или жмыха льна — не более 5-8 %, масла — 3 %; при больших дозах возможно снижение продуктивности несушек. Обогащение яиц  $\omega$ -3-ПНЖК, снижающее окислительную стабильность липидов, требует дополнительного включения в рацион антиоксидантов, из которых наиболее популярен витамин Е.

## FUNCTIONAL EGG PRODUCTION. I. THE ROLE OF $\omega$ -3 POLYUNSATURATED FATTY ACIDS (review)

*A.Sh. Kavtarashvili, I.L. Stefanova, V.S. Svitkin, E.N. Novotorov*

*Federal Scientific Center All-Russian Research and Technological Poultry Institute RAS, Federal Agency of Scientific Organizations, 10, ul. Ptitsegradskaya, Sergiev Posad, Moscow Province, 141311 Russia, e-mail alexk@vniitp.ru (corresponding author), dp.vniipp@mail.ru, 89267796966@yandex.ru, en-5506040@mail.ru*

ORCID:

Kavtarashvili A.Sh. orcid.org/0000-0001-9108-1632

Svitkin V.S. orcid.org/0000-0002-4161-0986

Stefanova I.L. orcid.org/0000-0002-4394-5149

Novotorov E.N. orcid.org/0000-0003-4478-3206

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Supported by the grant from Russian Science Foundation under project 16-16-04047 for the development of functional egg products enriched with essential nutrients, optimal metabolic parameters and low allergenicity

Received November 30, 2016

doi: 10.15389/agrobiol.2017.2.349eng

### Abstract

The world's market of functional foodstuffs is a permanently growing sector. Functional foods should meet the nutritive requirements of the consumers and render therapeutic and/or preventive effects on human health. Functional eggs enriched with different bioactive substances are one of the most voluminous segments of this market (N. Shapira, 2010). High rate and flexibility of avian lipid metabolism allow fast modifications in egg yolk composition via corresponding alterations in the diets of laying hens. In the last decades nutritionists pay increasingly close attention to  $\omega$ -3 polyunsaturated fatty acids (PUFAs), primarily  $\alpha$ -linolenic (ALA, C18:3), eicosapentaenoic (EPA, C20:5), and docosahexaenoic (DHA, C22:6) acids due to the benefits for human health and necessity for brain development, retinal function, prevention of cardiovascular diseases, etc. (A. Simopoulos, 2001); human diets in most countries including Russia are severely deficient in these essential fatty acids. Flexibility of avian lipid metabolism allows transfer of dietary PUFAs into eggs after 1-2 weeks of feeding PUFA-enriched diets (C.O. Leskanich, R.C. Noble, 1997). However, any increase in PUFA contents in dietary lipids can lead to definite changes in lipid metabolism in layers affecting productivity and egg quality: a decrease in blood level of total fat and triacylglycerols, an increase in hepatic level and catabolism of triacylglycerols which can cause the fatty liver hemorrhagic syndrome (FLHS), as well as the decrease in yolk and egg weight (M.E. Van Elswyk, 1997). Another common problem related to egg enrichment with  $\omega$ -3 PUFAs is fishy taint phenomenon: panel tests often characterize enriched eggs as smelling fish-like, and this effect deteriorates market attractiveness of these eggs (F. Bubel et al., 2011). Diets for laying hens for the production of  $\omega$ -3 PUFA enriched eggs usually contain one of the three types of dietary PUFA sources. The first is fish oil from different species; its advantages include higher levels of long-chain PUFAs (LC-PUFAs), primarily EPA and DHA in resulting enriched eggs. Major disadvantages of fish oil, however, are instability of composition and high susceptibility to oxidation; frequent appearance of fishy taint even at the lowest levels of inclusion into the diets; relatively high price, market availability, and contamination with typical oceanic pollutants (I. Fraeye et al., 2012). The second type of additives is flax products, seeds, cake or oil containing substantially lesser amounts of LC-PUFAs compared to fish oil while being extremely rich in ALA (over 50 % of total fatty acids); ALA-enriched lipids in diets, layer body and eggs are more resistant to oxidation. The data of numerous studies suggests that reasonable level of inclusion of flaxseed products into the diets for layers are 5-8 % for seed and cake and 3 % for oil; these doses are reportedly beneficial for productivity and egg quality (E.M. Goldberg et al., 2013). In Russia flax products are available and inexpensive, and can therefore represent the most profitable dietary source of  $\omega$ -3 PUFA for layers. The third type additives are macro- and microalgal species which are less available and still understudied, though the recent research data show that these additives can be the most promising dietary sources of  $\omega$ -3 PUFA (J.H. Park et al., 2015). Enrichment of feeds and eggs with  $\omega$ -3 PUFA requires additional dietary antioxidants to prevent lipid oxidation (Ch. Nimalaratne, J. Wu, 2015); the most efficient and well-studied antioxidant is vitamin E which is, after that, a valuable bioactive substance per se for egg enrichment. The data of different experiments with different  $\omega$ -3 PUFA sources are often inconsistent and controversial due to the close relation to the multifaceted avian lipid metabolism, and comparative analysis of these studies is further complicated by the lack of estimated parameters; it could be helpful, therefore, to

launch an international database related to these experiments and containing raw datasets which could be statistically analyzed and compared in a more efficient way.

Keywords: functional eggs, polyunsaturated fatty acids n-3, lipid metabolism, flax seed and oil, fish oil.

## REFERENCES

1. Siry I., Kápolna E., Kápolna B., Lugasi A. Functional food. Product development, marketing and consumer acceptance — A review. *Appetite*, 2008, 51: 456-467 (doi: 10.1016/j.appet.2008.05.060).
2. Fisinin V.I. *Ptitsevodstvo Rossii — strategiya innovatsionnogo razvitiya* [Poultry farming in Russia — innovative strategy]. Moscow, 2009 (in Russ.).
3. Rodić V., Perić L., Pavlovski Z., Vlahović B. Consumers' perception and attitudes towards table eggs from different housing systems: the case study from Serbia. *Proc. XIII European Poultry Conf.*, Tour, France, August 23-27, 2010 (CD).
4. Rodić V., Rodić V., Milošević N. Production of poultry meat and eggs as functional food — Challenges and opportunities. *Biotechnol. Anim. Husbandry*, 2011, 11(3): 511-520 (doi: 10.2298/BAH1103511P).
5. Gjorgovska N., Filev K. Multi-enriched eggs with omega 3 fatty acids, vitamin E and selenium. *Arch. Zootech.*, 2011, 14(2): 28-35.
6. Yannakopoulos A., Tserveni-Gousi A., Christaki E. Enhanced egg production in practice: The case of bio-omega-3 eggs. *International Journal of Poultry Science*, 2005, 4(8): 531-535 (doi: 10.3923/ijps.2005.531.535).
7. Howell W.H., McNamara D.J., Tosca M.A., Smith B.T., Gaines J.A. Plasma lipid and lipoprotein responses to dietary fat and cholesterol — A meta-analysis. *Am. J. Clin. Nutr.*, 1997, 65(6): 1747-1764.
8. Hu F.B., Stamper M.J., Rimm E.B., Manson J.E., Ascherio A., Colditz G.A., Rosner B.A., Spiegelman D., Speizer F.E., Sacks F.M., Hennekens C.H., Willett W.C. A prospective study of egg consumption and risk of cardiovascular disease in men and women. *JAMA-J. Am. Med. Assoc.*, 1999, 281(15): 1387-1394.
9. Gray J., Griffin B.A. Eggs and dietary cholesterol — dispelling the myth. *Nutr. Bull.*, 2009, 34(1): 66-70 (doi: 10.1111/j.1467-3010.2008.01735.x).
10. Surai P. *Kombikorma*, 2010, 6: 95-96 (in Russ.).
11. Cruickshank E.M. Studies on the fat metabolism in the fowl. I. The composition of the egg fat and depot fat of the fowl has affected by the ingestion of large amounts of different fats. *Biochem. J.*, 1934, 28: 965-977.
12. Arkhipov A.V. *Lipidnoe pitanie, produktivnost' ptitsy i kachestvo produktov pitsevodstva* [Lipid nutrition, poultry productivity and quality of poultry products]. Moscow, 2007 (in Russ.).
13. Leskanich C.O., Noble R.C. Manipulation of the n-3 polyunsaturated fatty acid composition of avian eggs and meat. *World's Poultry Sci. J.*, 1997, 53(2): 155-183 (doi: 10.1079/WPS19970015).
14. Griminger P. Lipid metabolism. In: *Avian Physiology*. P.D. Sturkey (ed.). Springer, NY, 1986: 345-358.
15. Hargis P.S., Van Elswyk M.E., Hargis B.M. Dietary modification of yolk lipid with methaden oil. *Poultry Sci.*, 1991, 70(4): 874-883 (doi: 10.3382/ps.0700874).
16. Lovell T.M., Gladwell R.T., Groome N.P., Knight P.G. Ovarian follicle development in the laying hen is accompanied by divergent changes in inhibin A, inhibin B, activin A and follistatin production in granulosa and theca layers. *J. Endocrinol.*, 2003, 177(1): 45-55 (doi: 10.1677/joe.0.1770045).
17. Perry M.M., Waddington D., Gilbert A.B., Hardie M.A. Growth rates of the small yolky follicles in the ovary of the domestic fowl. *IRCS Med. Sci.-Biochem.*, 1983, 11: 979-980.
18. Kassis N., Drake S.R., Beamer S.K., Matak K.E., Jaczynski J. Development of nutraceutical egg products with omega-3-rich oils. *LWT — Food Science and Technology*, 2010, 43(5): 777-783 (doi: 10.1016/j.lwt.2009.12.014).
19. Ganesan B., Brotherson C., McMahon D.J. Fortification of foods with omega-3 polyunsaturated fatty acids. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2014, 54(1): 98-114 (doi: 10.1080/10408398.2011.578221).
20. Swanson D., Block R., Mousa Sh.A. Omega-3 fatty acids EPA and DHA: Health benefits throughout life. *Adv. Nutr.*, 2012, 3(1): 1-7 (doi: 10.3945/an.111.000893).
21. Kapoor R., Huang Y.S. Gamma linolenic acid: an antiinflammatory omega-6 fatty acid. *Curr. Pharm. Biotechnol.*, 2006, 7(6): 531-534 (doi: 10.2174/138920106779116874).
22. Simopoulos A. Evolutionary aspects of diet and essential fatty acids. *World Rev. Nutr. Diet.*, 2001, 88: 18-27 (doi: 10.1159/000059742).
23. Li D., Hu X. Fish and its multiple human health effects in times of threat to sustainability and affordability: are there alternatives? *Asia Pac. J. Clin. Nutr.*, 2009, 18(4): 553-563 (doi: 10.6133/apjcn.2009.18.4.15).
24. Stoll A. *The omega-3 connection*. Simon and Schuster, NY, 2001: 40.

25. Abedi E., Sahari M.A. Long-chain polyunsaturated fatty acid sources and evaluation of their nutritional and functional properties. *Food Sci. Nutr.*, 2014, 2(5): 443-463 (doi: 10.1002/fsn3.121).
26. Allport S. *The queen of fats: why omega-3 fats were removed from the western diet and what we can do to replace them*. University of California Press, Berkeley, 2007: 115.
27. Simopoulos A.P. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids. *Biomed. Pharmacother.*, 2002, 56(8): 365-379 (doi: 10.1016/S0753-3322(02)00253-6).
28. Sparks N.H.C. The hen's egg — is its role in human nutrition changing? *World's Poultry Sci. J.*, 2006, 62(2): 308-313 (doi: 10.1079/WPS200599).
29. Okolelova T.M. *Pitisevodstvo*, 2013, 5: 15-19 (in Russ.).
30. Antongiovanni M., Minieri S., Buccioni A., Galligani I., Rapaccini S. Transfer of dietary fatty acid from butyric acid fortified canola oil into the meat of broiler. *Ital. J. Anim. Sci.*, 2009, 8(Suppl. 2): 754-756 (doi: 10.4081/ijas.2009.s2.754).
31. Shapira N. Every egg may have a targeted purpose: Toward a differential approach to egg according to composition and functional effect. *World's Poultry Sci. J.*, 2010, 66(2): 271-284 (doi: 10.1017/S0043933910000322).
32. Atalas M.S., Citić O.B. Comparison of fatty acid composition of egg yolks obtained white and brown hens fed in the same way method. *Maced. J. Anim. Sci.*, 2013, 3(1): 41-44.
33. Komprada T. Eicosapentaenoic and docosahexaenoic acids as inflammation-modulating and lipid homeostasis influencing nutraceuticals: A review. *Journal of Functional Foods*, 2012, 4(1): 25-38 (doi: 10.1016/j.jff.2011.10.008).
34. Plourde M., Cunnane S.C. Extremely limited synthesis of long chain polyunsaturates in adults: implications for their dietary essentiality and use as supplements. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 2007, 32(4): 619-634 (doi: 10.1139/H07-034).
35. Speake B.K., Deans E.A. Biosynthesis of oleic, arachidonic and docosahexaenoic acids from their C18 precursors in the yolk sac membrane of the avian embryo. *Comp. Biochem. Physiol. B Biochem. Mol. Biol.*, 2004, 138(4): 407-414 (doi: 10.1016/j.cbpc.2004.05.006).
36. Calchadora P., García-Rebollar P., Alvarez C., Méndez J., De Blas J.C. Double enrichment of chicken eggs with conjugated linoleic acid and n-3 fatty acids through dietary fat supplementation. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 2008, 144(3-4): 315-326 (doi: 10.1016/j.anifeeds.2007.10.010).
37. Sardesai V.M. Nutritional role of polyunsaturated fatty acids. *J. Nutr. Biochem.*, 1992, 3(4): 154-166 (doi: 10.1016/0955-2863(92)90110-5).
38. García-Rebollar P., Cachaldora P., Alvarez C., De Blas C., Méndez J. Effect of the combined supplementation of diets with increasing levels of fish and linseed oils on yolk fat composition and sensorial quality of eggs in laying hens. *Anim. Feed Sci. Tech.*, 2008, 140(3-4): 337-348 (doi: 10.1016/j.anifeeds.2007.03.006).
39. Miranda J.M., Anton X., Redondo-Valbuena C., Roca-Saavedra P., Rodríguez J.A., Lamas A., Franco C.M., Cepeda A. Egg and egg-derived products: Effects on human health and use as functional foods. *Nutrients*, 2015, 7(1): 706-729 (doi: 10.3390/nu7010706).
40. Hayat Z., Cherian G., Pasha T.N., Khattak F.M., Jabbar M.A. Oxidative stability and lipid components of eggs from flax-fed hens: Effect of dietary antioxidants and storage. *Poultry Sci.*, 2010, 89(6): 1285-1292 (doi: 10.3382/ps.2009-00256).
41. Galobart J., Barroeta A.C., Baucells M.D., Cortinas L., Guardiola F. - Tocopherol transfer efficiency and lipid oxidation in fresh and spray-dried eggs enriched with n-3 polyunsaturated fatty acids. *Poultry Sci.*, 2001, 80(10): 1496-1505 (doi: 10.1093/ps/80.10.1496).
42. Gebert S., Messikommer R., Pirter H.P., Bee G., Wenk C. Dietary fats and vitamin E in diets for laying hens: Effects on laying performance, storage stability and fatty acid composition of eggs. *Arch. Geflügelkd.*, 1998, 62: 214-222.
43. Scheideler S.E., Froning G., Cuppett S. Studies of consumer acceptance of high omega-3 fatty acid-enriched eggs. *J. Appl. Poult. Res.*, 1997, 6(2): 137-146 (doi: 10.1093/japr/6.2.137).
44. Fernandes Pereira A.L., Fontoura Vidal T., Gonçalves Abreu V.K., Fuentes Zapata J.F., Rodrigues Freitas E. Type of dietary lipids and storing time on egg stability. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, 2011, 31(4): 984-991 (doi: 10.1590/S0101-20612011000400026).
45. Aghdam Shahryar H., Salamatdoust R., Chekain-Azar S., Ahadi F., Vahdatpoor T. Lipid oxidation in fresh and stored eggs enriched with dietary  $\omega$ 3 and  $\omega$ 6 polyunsaturated fatty acids and vitamin A and E dosages. *Afr. J. Biotechnol.*, 2010, 9(12): 1827-1832 (doi: 10.5897/AJB10.1482).
46. Chekaniazar S. Unhealthy fats can be declined in enriched eggs by graded levels of polyunsaturated oils and selenium sources. *J. Appl. Environ. Biol. Sci.*, 2011, 1(12): 711-715.
47. Marshall A.C., Sams A.R., Van Elswyk M.E. Oxidative stability and sensory quality of stored eggs from hens fed 1.5 % menhaden oil. *J. Food Sci.*, 1994, 59(3): 561-563 (doi: 10.1111/j.1365-2621.1994.tb05561.x).
48. Caston L., Squires E.J., Leeson S. Hen performance, egg quality, and the sensory evaluation of eggs from SCWL hens fed dietary flax. *Can. J. Anim. Sci.*, 1994, 74(2): 347-353 (doi: 10.4141/cjas94-047).
49. Florou-Paneri P., Nikolakakis I., Giannenas I., Koidis A., Botsog-

- lou E., Dotas V., Mitsopoulos I. Hen performance and egg quality as affected by dietary oregano essential oil and  $\alpha$ -tocopheryl acetate supplementation. *International Journal of Poultry Science*, 2005, 4(7): 449-454 (doi: 10.3923/ijps.2005.449.454).
50. Onagbesan O., Bruggeman V., De Smit L., Debonne M., Witters A., Tona K., Everaert N., Decuyper E. Gas exchange during storage and incubation of avian eggs: Effects on embryogenesis, hatchability, chick quality and post-hatch growth. *World's Poultry Sci. J.*, 2007, 63(4): 557-573 (doi: 10.1017/S0043933907001614).
  51. Akter Y., Kasim A., Omar H., Sazili A.Q. Effect of storage time and temperature on the quality characteristic of chicken eggs. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 2014, 12(3-4): 87-92.
  52. Raharjo S., Sofos J.N., Schmidt G.R. Solid phase acid extraction improves thiobarbituric acid methods to determine lipid oxidation. *J. Food Sci.*, 1993, 58(4): 921-924 (doi: 10.1111/j.1365-2621.1993.tb09391.x).
  53. Scheideler S.E., Froning G.W. The combined influence of dietary flaxseed variety, level, form and storage conditions on egg production and composition among vitamin E-supplemented hens. *Poultry Sci.*, 1996, 75(10): 1221-1226 (doi: 10.3382/ps.0751221).
  54. Bubel F., Dobrzański Z., Bykowski P., Patkowska-Sokoła B., Trziszka T. Enrichment of hen eggs with omega-3 polyunsaturated fatty acids — physiological and nutritional aspects. *Acta Sci. Pol. Medicina Veterinaria*, 2011, 10(3): 5-18.
  55. Van Elswyk M.E., Schake L.S., Hargis B.M., Hargis P.S. Effects of dietary menhaden oil on serum lipid parameters and hepatic lipidosis in laying hens. *Poultry Sci.*, 1991, 70(Suppl. 1): 122.
  56. Van Elswyk M.E., Prochaska J.F., Carey J.B., Hargis P.S. Physiological parameters in response to dietary menhaden oil in molted hens. *Poultry Sci.*, 1992, 71(Suppl. 1): 114.
  57. Herkel R., Gálik B., Bíro D., Rolinec M., Šimko M., Juráček M., Majlát M., Arpášová H. The effect of pumpkin and flaxseed oils on selected parameters of laying hens performance. *Acta Fytotechnica et Zootechnica*, 2014, 17(3): 96-99 (doi: 10.15414/afz.2014.17.03.96-99).
  58. Harris W.S. Fish oils and plasma lipid and lipoprotein metabolism in humans: A critical review. *J. Lipid Res.*, 1989, 30(6): 785-807.
  59. Cherian G., Hayat Z. Long-term effects of feeding flaxseed on hepatic lipid characteristics and histopathology of laying hens. *Poultry Sci.*, 2009, 88(12): 2555-2561 (doi: 10.3382/ps.2009-00425).
  60. Phetteplace H.W., Watkins B.A. Lipid measurements in chicken fed different combinations of chicken fat and menhaden oil. *J. Agric. Food Chem.*, 1990, 38(9): 1848-1853 (doi: 10.1021/jf00099a013).
  61. König B., Spielmann J., Haase K., Brandsch C., Kluge H., Stangl G.I., Eder K. Effects of fish oil and conjugated linoleic acids on expression of target genes of PPAR and sterol regulatory element-binding proteins in the liver of laying hens. *Br. J. Nutr.*, 2008, 100(2): 355-363 (doi: 10.1017/S0007114507883024).
  62. Whitehead C.C., Bowman A.S., Griffin H.D. Regulation of plasma oestrogen by dietary fats in the laying hen: relationships with egg weight. *Brit. Poultry Sci.*, 1993, 34(5): 999-1010 (doi: 10.1080/00071669308417659).
  63. Van Elswyk M.E. Nutritional and physiological effects of flaxseed in diets for laying fowl. *World's Poultry Sci. J.*, 1997, 53(3): 253-264 (doi: 10.1079/WPS19970020).
  64. Thompson L.U., Robb P., Serraino M., Cheung E. Mammalian lignan production from various foods. *Nutr. Cancer*, 1991, 16(1): 43-52 (doi: 10.1080/01635589109514139).
  65. Kennedy A.K., Dean C.E., Aymond W.M., Van Elswyk M.E. Dietary flax seed influences pullet reproductive parameters. *Poultry Sci.*, 1994, 73(Suppl. 1): 20.
  66. Johnson A.L., van Tielhoven A. Effects of aminoglutethimide on luteinizing hormone and steroid secretion, and ovulation in the hen, *Gallus domesticus*. *Endocrinology*, 1984, 114(6): 2276-2283 (doi: 10.1210/endo-114-6-2276).
  67. Crespo R., Shivaprasad H.L. Developmental, metabolic and other non infectious disorders. In: *Diseases of poultry*. Y.M. Saif, H.J. Barnes, J.R. Glisson, A.M. Fadly, L.R. McDougald, D.E. Swayne (eds.). Iowa State University Press, Ames, 2003: 1048-1102.
  68. Julian R.J. Production and growth related disorders and other metabolic diseases of poultry - A review. *The Veterinary Journal*, 2005, 169(3): 350-369 (doi: 10.1016/j.tvjl.2004.04.015).
  69. Bean I.D., Leeson S. Long-term effects of feeding flaxseed on performance and egg fatty acid composition of brown and white hens. *Poultry Sci.*, 2003, 82(3): 388-394 (doi: 10.1093/ps/82.3.388).
  70. Van Elswyk M.E., Hargis B.M., Williams J.D., Hargis P.S. Dietary menhaden oil contributes to hepatic lipidosis in laying hens. *Poultry Sci.*, 1994, 73(5): 653-662 (doi: 10.3382/ps.0730653).
  71. Cherian G., Goeger M.P. Hepatic lipid characteristics and histopathology of laying hens fed CLA or n-3 fatty acids. *Lipids*, 2004, 39(1): 31-36 (doi: 10.1007/s11745-004-1198-2).
  72. Schumann B.E., Squires E.J., Leeson S., Hunter B. Effect of hens fed dietary flaxseed with and without a fatty liver supplement on hepatic and plasma and production characteristics relevant to fatty liver haemorrhagic syndrome in laying hens. *Brit. Poultry Sci.*, 2003,



- 44(2): 234-244 (doi: 10.1080/0007166031000087065).
73. Squires E.J., Leeson S. Aetiology of fatty liver syndrome in laying hens. *Brit. Vet. J.*, 1988, 144(6): 602-609 (doi: 10.1016/0007-1935(88)90031-0).
  74. Summers J.D., Adams C.A., Leeson S. *Metabolic disorders in poultry*. Context Product Ltd., Packington (Leicester, UK), 2013: 109-130.
  75. Farag M.M.A. Estimation of formatting biogenetic amines concentration in fresh and processed sardine fish products during different storage conditions. *World J. Fish & Marine Sci.*, 2013, 5(6): 628-636 (doi: 10.5829/idosi.wjfds.2013.05.06.7541).
  76. March B.E., MacMillan C. Trimethylamine production in the caeca and small intestine as a cause of fishy taints in eggs. *Poultry Sci.*, 1979, 58(1): 93-98 (doi: 10.3382/ps.0580093).
  77. Honkatukia M., Reese K., Preisinger R., Tuiskula-Haavisto M., Weigend S., Roito J., Mäki-Tanila A., Vilkki J. Fishy taint in chicken eggs is associated with a substitution within a conserved motif of the FMO3 gene. *Genomics*, 2005, 86(2): 225-232 (doi: 10.1016/j.ygeno.2005.04.005).
  78. Ward A.K., Classen H.L., Buchanan F.C. Fishy-egg tainting is recessively inherited when brown-shelled layers are fed canola meal. *Poultry Sci.*, 2009, 88(4): 714-721 (doi: 10.3382/ps.2008-00430).
  79. Van Elswyk M.E., Dawson P.L., Sams A.R. Dietary menhaden oil influences sensory characteristics and headspace volatiles of shell eggs. *J. Food Sci.*, 1995, 60(1): 85-89 (doi: 10.1111/j.1365-2621.1995.tb05612.x).
  80. Swoboda P.A.T., Peers K.E. Volatile odorous compounds responsible for metallic, fishy taint formed in butterfat by selective oxidation. *J. Sci. Food Agric.*, 1977, 28(11): 1010-1018 (doi: 10.1002/jsfa.2740281110).
  81. Iglesias J., Lois S., Medina I. Development of a solid-phase microextraction method for determination of volatile oxidation compounds in fish oil emulsions. *J. Chromatogr. A*, 2007, 1163(1-2): 277-287 (doi: 10.1016/j.chroma.2007.06.036).
  82. Hargis P.S., Van Elswyk M.E. Manipulating the fatty acid composition of poultry meat and eggs for the health conscious consumer. *World's Poultry Sci. J.*, 1993, 49(3): 251-264 (doi: 10.1079/WPS19930023).
  83. Moffat C.F., McGill A.S. Variability of the composition of fish oils: significance for the diet. *Proceedings of the Nutrition Society*, 1993, 52(3): 441-456 (doi: 10.1079/PNS19930085).
  84. Albert B.B., Derraik J.G.B., Cameron-Smith D., Hofman P.L., Tumanov S., Villas-Boas S.G., Garg M.L., Cutfield W.S. Fish oil supplements in New Zealand are highly oxidised and do not meet label content of n-3 PUFA. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7928 (doi: 10.1038/srep07928).
  85. Gonzalez-Esquerria R., Leeson S. Effect of feeding hens regular or deodorized menhaden oil on production parameters, yolk fatty acid profile, and sensory quality of eggs. *Poultry Sci.*, 2000, 79(11): 1597-1602 (doi: 10.1093/ps/79.11.1597).
  86. Lawlor J.B., Gaudette N., Dickson T., House J.D. Fatty acid profile and sensory characteristics of table eggs from laying hens diets containing microencapsulated fish oil. *Animal Feed Science and Technology*, 2010, 156(3-4): 97-103 (doi: 10.1016/j.anifeeds.2010.01.003).
  87. Kura Y., Revenga C., Hoshino E., Mock G. *Fishing for answers: making sense from the global fish crisis*. World Resources Institute, Washington, DC, 2004: 4-6.
  88. Agboola A.F., Omidwura B.R.O., Oyeyemi A., Iyayi E.A., Adelani A.S. Effect of four dietary oils on cholesterol and fatty acid composition of egg yolk in layers. *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, 2016, 10(2): 60-67.
  89. Omid M., Rahimi Sh., Torshizi M.A.K. Modification of egg yolk fatty acids profile by using different oil sources. *Vet. Res. Forum*, 2015, 6(2): 137-141.
  90. Fraeye I., Bruneel C., Lemahieu C., Buyse J., Muylaert K., Foubert I. Dietary enrichment of eggs with omega-3 fatty acids: A review. *Food Res. Int.*, 2012, 48(2): 961-969 (doi: 10.1016/j.foodres.2012.03.014).
  91. Chen T.-F., Hsu J.-Ch. Incorporation of n-3 long-chain polyunsaturated fatty acids into duck egg yolks. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, 2003, 16(4): 565-569 (doi: 10.5713/ajas.2003.565).
  92. Caston L.J., Leeson S. Dietary flax and egg composition. *Poultry Sci.*, 1990, 69(9): 1617-1620 (doi: 10.3382/ps.0691617).
  93. Newkirk R. *Flax: Feed Industry Guide*. Flax Canada 2015, Winnipeg, MB, 2008.
  94. Morris D.H. *Flax: A health and nutrition primer*. Flax Council of Canada, Winnipeg, MB, 2007.
  95. Shen Y., Feng D., Oresanya T.F., Chavez E.R. Fatty acid and nitrogen utilization of processed flaxseed by adult chickens. *J. Sci. Food Agric.*, 2005, 85(7): 1137-1142 (doi: 10.1002/jsfa.2073).
  96. Feng D., Shen Y., Chavez E.R. Effectiveness of different processing methods in reducing hydrogen cyanide content of flaxseed. *J. Sci. Food Agric.*, 2003, 83(8): 836-841 (doi: 10.1002/jsfa.1412).
  97. Aymond W.M., Van Elswyk M.E. Yolk thiobarbituric acid reactive substances and n-3 fatty acids in response to whole and ground flaxseed. *Poultry Sci.*, 1995, 74(8): 1388-1394.
  98. Alzueta C., Rodriguez M.L., Cutuli M.T., Rebole A., Ortiz L.T., Centeno C., Trevino J. Effect of whole and demucilaged linseed in broiler chicken diets on di-

- gesta viscosity, nutrient utilization and intestinal microflora. *Brit. Poultry Sci.*, 2003, 44(1): 67-74 (doi: 10.1080/0007166031000085337).
99. Słominski B.A., Meng X., Campbell L.D., Guenter W., Jones O. The use of enzyme technology for improved energy utilization from full-fat oilseeds. Part II: Flaxseed. *Poultry Sci.*, 2006, 85(6): 1031-1037 (doi: 10.1093/ps/85.6.1025).
  100. Egorova T.A., Lenkova T.N. Rapeseed (*Brassica napus* L.) and its prospective usage in poultry diet (review). *Agricultural Biology*, 2015, 50(2): 172-182 (doi: 10.15389/agrobiology.2015.2.172eng) (in Eng.).
  101. Jia W., Słominski B.A., Guenter W., Humphries A., Jones O. The effect of enzyme supplementation on egg production parameters and omega-3 fatty acid deposition in laying hens fed flaxseed and canola seed. *Poultry Sci.*, 2008, 87(10): 2005-2014 (doi: 10.3382/ps.2007-00474).
  102. Leeson S., Summers J.D. Ingredient evaluation and diet formulation: Flaxseed. In: *Commercial poultry nutrition*. S. Leeson, J.D. Summers (eds.). University Books, Guelph, Ontario, Canada, 2005: 44-46.
  103. Goldberg E.M., Ryland D., Gibson R.A., Aliani M., House J.D. Designer laying hen diets to improve egg fatty acid profile and maintain sensory quality. *Food Sci. Nutr.*, 2013, 1(4): 324-335 (doi: 10.1002/fsn3.47).
  104. Leeson S., Summers J.D., Caston L.J. Response of layers to dietary flaxseed according to body weight classification at maturity. *J. Appl. Poult. Res.*, 2000, 9(3): 297-302 (doi: 10.1093/japr/9.3.297).
  105. Weill P., Schmitt B., Chesneau G., Daniel N., Safraou F., Legrand P. Effects of introducing linseed in livestock diet on blood fatty acid composition of consumers of animal products. *Ann. Nutr. Metab.*, 2002, 46(5): 182-191 (doi: 10.1159/000065405).
  106. Najib H., Al-Yousef Y.M. Essential fatty acid content of eggs and performance of layer hens fed with different levels of full-fat flaxseed. *J. Cell Anim. Biol.*, 2010, 4(3): 58-63.
  107. Brown Ch., Hamidu J., Adomako K. Paradigm shift in feeding layer birds for omega 3 eggs production. *Proc. XXV World's Poultry Congr., Sep 5-9, 2016. Abstracts*. Beijing, China, 2016: 42.
  108. Cherian G., Quezada N. Egg quality, fatty acid composition and immunoglobulin Y content in eggs from laying hens fed full fat camelina or flax seed. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 2016, 7: 15 (doi: 10.1186/s40104-016-0075-y).
  109. Lee Y.J., Kang S.K., Heo Y.J., Shin D.W., Park T.E., Han G.G., Jin G.D., Lee H.B., Jung E., Kim H.S., Na Y., Kim E.B., Choi Y.J. Influence of flaxseed oil on fecal microbiota, egg quality and fatty acid composition of egg yolks in laying hens. *Curr. Microbiol.*, 2016, 72(33): 259-266 (doi: 10.1007/s00284-0.15-0946-z).
  110. Adarme-Vega T.C., Lim D.K.Y., Timmins M., Vernen F., Li Y., Schenk P.M. Microalgal biofactories: A promising approach towards sustainable omega-3 fatty acid production. *Microbial Cell Factories*, 2012, 11(1): 96 (doi: 10.1186/1475-2859-11-96).
  111. Griffiths M.J., Harrison S.T.L. Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production. *J. Appl. Phycol.*, 2009, 21(5): 493-507 (doi: 10.1007/s10811-008-9392-7).
  112. Lum K.K., Kim J., Lei X.G. Dual potential of microalgae as a sustainable biofuel feedstock and animal feed. *J. Anim. Sci. Biotechnol.*, 2013, 4(1): 53 (doi: 10.1186/2049-1891-4-53).
  113. Schenk P.M., Thomas-Hall S.R., Stephens E., Marx U.C., Mussnug J.H., Posten C., Kruse O., Hankamer B. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy Res.*, 2008, 1(1): 20-43 (doi: 10.1007/s12155-008-9008-8).
  114. Fredriksson S., Elwinger K., Pickova J. Fatty acid and carotenoid composition of egg yolk as an effect of microalgae addition to feed formula for laying hens. *Food Chem.*, 2006, 99(3): 530-537 (doi: 10.1016/j.foodchem.2005.08.018).
  115. Park J.H., Upadhaya S.D., Kim I.H. Effect of dietary marine microalgae (*Schyzochytrium*) powder on egg production, blood lipid profiles, egg quality, and fatty acid composition of egg yolk in layers. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.*, 2015, 28(3): 391-397 (doi: 10.5713/ajas.14.0463).
  116. Wu Y., Chang Y., Huang X., Liu W., Liao R., Zhang Sh., Yan H. Comparison of n-3 polyunsaturated fatty acid-enriched eggs from hens fed diets supplemented with microalgae and flaxseed. *Proc. XXV World's Poultry Congr., Sep 5-9, 2016. Abstracts*. Beijing, China, 2016: 531.
  117. Bruneel Ch., Lemahieu Ch., Frayeye I., Ryckebosch E., Muylaert K., Buyse J., Foubert I. Impact of microalgal feed supplementation on omega-3 fatty acid enrichment of hen eggs. *Journal of Functional Foods*, 2013, 5(2): 897-904 (doi: 10.1016/j.jff.2013.01.039).
  118. Ao T., Macalintal L., Paul M., Glenney Ph., Pescatore A., Cantor A., Ford M., Dawson K. Long term effects of dietary microalgae on productive performance of laying hens and egg docosahexaenoic acid concentration. *Proc. XXV World's Poultry Congr., Sep 5-9, 2016. Abstracts*. Beijing, China, 2016: 114.
  119. Nimalaratne Ch., Wu J. Hen egg as an antioxidant food commodity: A review. *Nutrients*, 2015, 7(10): 8274-8293 (doi: 10.3390/nu7105394).
  120. Gülçin I. Antioxidant activity of food constituents: An overview. *Arch. Toxicol.*, 2012, 86(3): 345-391 (doi: 10.1007/s00204-011-0774-2).
  121. Holser R., Hinton A., Jr. Use of polyunsaturated fatty acids with  $\alpha$ -tocopherol in poultry feeds. *Lipid Insights*, 2010, 3(1): 1-4 (doi: 10.4137/LPI.S5788).