Формирование яйца и качество скорлупы

Оксана ВЕЛИЧКО,
кандидат сельскохозяйственных наук
ЗАО «Птицефабрика «Боровская»
Сергей МЕЛЬНИЧУК,
доктор биологических наук,
профессор
Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Украинская лаборатория качества и безопасности продукции АПК
Татьяна ФОТИНА,
доктор ветеринарных наук,
профессор
Сумской национальный аграрный университет
Петр СУРАЙ,
доктор биологических наук,
профессор
Шотландский сельскохозяйственный колледж
Университет Глазго, Великобритания

За последнее десятилетие мировое яичное производство вышло на новые рубежи. Согласно данным ФАО, в 2007 г. получено около 59,3 млн т яйца, из них 34,6 млн т – в Азии, в том числе 21,8 млн т (36,8% всего мирового объема) – в Китае, около 9,83 млн т – в Европе, 5,79 млн т – в Северной Америке, 2,1 млн т (37,8 млрд штук) – в России, 807,2 тыс. т – на Украине. Интересно, что в том же году в США произвели 5,4 млн т яйца, а в Великобритании – почти в 10 раз меньше (579,3 тыс. т).

Основные проблемы отрасли

В яичном птицеводстве возникает много проблем, но основные из них, связанные с питанием птицы, можно суммировать следующим образом.

• Снижение качества скорлупы во второй половине периода продуктивности, что приводит к увеличению боя, насечки и тёка.

• Снижение качества яйца (уменьшение единиц Хау и разжижение белка) чаще всего во второй половине периода продуктивности, особенно в летние месяцы.

• Короткий пик яйценоскости. После выхода птицы на максимальный уровень продуктивности многие стресс-факторы способны вызвать ее падение, и даже после их устранения птица, как правило, уже не возвращается на пик яйцекладки.

Физиология образования яйца

Чтобы разработать эффективные методы предупреждения отклонений, нужно знать процесс формирования яйца, особенно скорлупы.

Яйцевод несушки составляет 63–69 см в длину и разделен на пять основных отделов.

• Воронка яйцевода длиной 7,5–10 см захватывает выделенную из яичника яйцеклетку. Она находится в этом отделе 15–18 минут, за которые происходит оплодотворение, а вокруг желтка накапливается небольшой слой внутреннего плотного белка.

• Белковый отдел длиной 33–35 см — наибольшая часть яйцевода. Яйцеклетка находится здесь примерно три часа, в это время к желтку добавляется белок.

• Перешеек длиной около 10 см, где развивающееся яйцо находится в среднем 75 минут. В этом отделе у него появляется наружный жидкий слой белка, охватывающая его внутренняя и внешняя скорлупа, формируются ее мембраны, состоящие из протеиновых волокон и плотно соприкасающиеся друг с другом.

• Скорлупный отдел (матка) длиной 10–13 см, где яйцо находится около 20 часов (80% времени формирования), за которые образуется скорлупа. Примерно половина необходимого для этого кальция поступает из резервов организма (костей), другая — из корма. Здесь же происходит включение пигмента в скорлупу (если она окрашена).

• Влагалище длиной 10–13 см не принимает участия в формировании яйца, однако в нем образуется кутикула скорлупы, играющая важную роль в поддержании его качества. За счет сокращения мышц влагалище выталкивает яйцо наружу. Оно находится в нем около 10 минут.

У кур-несушек овуляция обычно наступает утром и при нормальном дневном освещении почти никогда — после 15:00. Общее время формирования яйца, как правило, составляет 25–26 часов. Овуляция новой яйцеклетки (желтка)

происходит в течение часа после снесения яйца. Таким образом, курица с каждым днем сносит яйцо все позже и позже. Это похоже на отстающие часы. Когда доходит до того, что овуляция должна произойти после 15 часов, она задерживается до следующего дня и последовательность яйцекладки нарушается, а после — снова восстанавливается.

Нарушения в формировании яйца

Формирование яйца — сложный, точно регулируемый процесс, и многие стресс-факторы внешней среды могут приводить к следующим его нарушениям.

• Двухжелтковое яйцо. Его появление во многом связано с возрастом птицы, но и генетическая предрасположенность тоже вносит свою лепту. У молодых несушек из яичника часто выделяются сразу один за другим два фолликула и образуются два желтка. Такое яйцо не пригодно для инкубации. В промышленном птицеводстве уже разработан ряд брендов двухжелткового яйца с более высокой ценой реализации.

• Безжелтковое яйцо. Обычно оно появляется у молодых несушек, когда маленький кусочек ткани отрывается от яичника или яйцевода и стимулирует секреторные железы в различных его частях.

• Образование «яйца в яйце» происходит, когда почти сформированное яйцо начинает двигаться по яйцеводу в обратном направлении и стимулирует выделение белка, после чего образуется еще одна скорлупная оболочка.

• Кровяные включения вокруг желтка. Как правило, они появляются вследствие разрыва мельчайших сосудов вокруг желтка в процессе овуляции из-за повышенной активности несушек (стресс) в этот период.

• Мясные включения в яйце образуются, когда маленькие кусочки стенки яйцевода отрываются в процессе прохождения по нему яйца.

• Бесскорлупное яйцо. Обычно скорлупная мембрана окружает белок, однако яйцо может каким-либо образом избежать формирования полноценной скорлупы. При увеличении процента таких яиц необходимо провести дополнительные исследования на наличие вирусов инфекционного бронхита и синдрома снижения яйценоскости.

• Яйцо с избыточной кальцификацией, которая проявляется в виде крапинок карбоната кальция на скорлупе или в ее неправильной форме. Это связано с нарушениями процессов кальцификации в скорлупном отделе яйцевода.

• Яйцо с кольцевым утолщением появляется, когда треснувшая в процессе формирования скорлупа срастается и на ней остаются рубцы. Поверхность такого яйца значительно менее прочная, чем нормального.

Структура яичной скорлупы

Яичная скорлупа состоит из шести слоев.

• Внешняя подскорлупная мембрана, прилегающая к белку.

• Внутренняя подскорлупная мембрана, плотно примыкающая к внешней и соприкасающаяся с сосочковым слоем.

• Внутренняя зона кальцифицированной скорлупы (сосочковый слой), состоящая из нерегулярных конусов и тесно связанная с внешней частью подскорлупной мембраны.

• Основной губчатый (палисадный) слой, который пронизан канальцами-порами и соединен с одной стороны с сосочковым слоем, а с другой распространяется дальше конусов и переходит в следующий слой.

• Тонкий слой кристаллов, расположенных перпендикулярно к поверхности скорлупы. Во многих старых источниках литературы этот слой отдельно не выделялся и считался частью губчатого.

• Внешний слой, называемый кутикулой, — это тонкая пленка на поверхности яичной скорлупы, состоящая из кристаллов гидроксиапатита и содержащая окрашивающие ее пигменты.

У большинства видов птицы яичная скорлупа составляет примерно 10–11% массы яйца. Основная часть кальцифицированной зоны (примерно 95% массы) состоит из кальцита — наиболее стабильной полиморфной формы карбоната кальция.

Скорлупа обычно содержит примерно 5,5 г карбоната кальция (из которых 2,2 г — чистый кальций), 0,3% фосфора, 0,3% магния, следовые количества натрия, калия, цинка, марганца, железа и меди. При этом концентрация кальция в скорлупе определена генетически, поэтому у яйца большого размера она, как правило, истончена и легче бьется.

Примерно 3,5% остальных веществ приходится на долю органического матрикса, состоящего главным образом из фибриллярных протеинов с дисульфидными поперечными связями, коллагеном типа I, V и X в мембране яичной скорлупы и протеогликанов и гликопротеинов в ее кальцифицированных слоях. Эти белки, хотя их количество незначительно, — важные компоненты, определяющие структуру скорлупы. Они должны быть точно включены в определенные места для того, чтобы обеспечить ее оптимальные характеристики.

Таким образом, протеины обеспечивают структурную целостность и устойчивость скорлупы к внешним воздействиям. В условиях стресса секреторная активность многих клеток яйцевода нарушается, изменяется кислотность среды в некоторых его отделах, что в конечном счете приводит к отклонениям в формировании скорлупы. Потери мировой яичной индустрии из-за ее дефектов составляют около 6 млн долл. в год. ЖР

(Окончание в следующем номере)

Формирование яйца и качество скорлупы

(Окончание. Начало в № 5)

Оксана ВЕЛИЧКО,
кандидат сельскохозяйственных наук
ЗАО «Птицефабрика «Боровская»
Сергей МЕЛЬНИЧУК,
доктор биологических наук,
профессор
Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины
Украинская лаборатория качества и безопасности продукции АПК
Татьяна ФОТИНА,
доктор ветеринарных наук,
профессор
Сумской национальный аграрный университет
Петр СУРАЙ,
доктор биологических наук,
профессор
Шотландский сельскохозяйственный колледж
Университет Глазго (Великобритания)

Физиология формирования скорлупы

Кальцификация скорлупы — результат преципитации (выпадения в осадок) кальция на подскорлупную мембрану в процессе прохождения яйца по яйцеводу. Это пример одного из наиболее быстрых процессов минерализации в природе с очень строгим контролем последовательности его стадий.

При продвижении желтка по яйцеводу он сначала «одевается» в белок в белковом отделе, потом в перешейке образуются скорлупные мембраны. Органические агрегаты, известные как сосочковые утолщения, накапливаются на поверхности внешней скорлупной мембраны, где происходит процесс нуклеации (зарождение кристаллов) карбоната кальция.

На следующем этапе формирования скорлупы (примерно через 4,5–5 часов после овуляции) яйцо оказывается в скорлупном отделе и приобретает свою овальную форму за счет набухания белка. В него поступает жидкость, и яйцо вырастает до окончательного размера. При этом происходит кристаллизация кальцита во внеклеточной маточной жидкости, содержащей пересыщенный раствор ионизированного кальция и бикарбонат в концентрациях, которые превышают растворимость кальцита одновременно с другими молекулами в составе органического матрикса. Концентрация этих компонентов существенно варьируется во время формирования скорлупы.

Яйцо вращается в процессе линейного накопления карбоната кальция (у кур — примерно 0,33 г/ч), когда последовательно образуются сосочковый и губчатый слои. Примерно за 1,5 часа до снесения яйца минерализация прекращается и на поверхности скорлупы начинает формироваться органическая кутикула. Интересно, что минерализация заканчивается в пересыщенном растворе кальцита, вероятно, за счет какого-то (до сих пор не выявленного) компонента или вещества в жидкости, находящейся в скорлупной железе.

Главная функция яичной скорлупы — защита развивающегося эмбриона от внешних неблагоприятных факторов. При этом она должна легко разрушаться изнутри во время вывода птенцов, обеспечивать эффективный обмен газов и воды между эмбрионом и внешней средой и служить дня него источником кальция.

Скорлупа соответствует всем этим требованиям. Во внешней ее зоне находится жесткая часть, созданная из больших кристаллов. Удар извне поглощается тонкими внутрикристаллическими органическими слоями, что препятствует их повреждениям.

Внутренний слой скорлупы состоит из микрокристаллов кальцита, образующих сферическую структуру, которая способствует распространению трещин в процессе проклева перед выводом цыпленка. Кроме того, благодаря такому строению происходит мобилизация кальция для развития эмбриона путем растворения высокореактивных микрокристаллов кальцита.

Несмотря на то что скорлупа состоит из шести слоев, с точки зрения формирования она представляет собой единую структуру. Считается, что высокая степень контроля размера, формы и ориентации кристаллов кальцита в яичной скорлупе и ее исключительные механические свойства (она выдерживает до 30 Н нагрузки при толщине 0,33 мм) — результат конкуренции кристаллов, принадлежащих к одному и тому же или прилегающему центру нуклеации. Другой важный момент — контроль ✏

морфологии кристаллов за счет компонентов органического матрикса, взаимодействующих с карбонатом кальция.

Под световым микроскопом отчетливо видна внутренняя органическая мембрана скорлупы, полоса центров нуклеации с радиальной структурой и плотный кристаллиновый слой. Центры нуклеации имеют форму полушарий и состоят из микрокристаллов кальцита с радиальным расположением. На начальной стадии формирования скорлупы они начинают конкурировать за пространство для роста, что приводит к образованию колоннообразных структур. Выживают только те кристаллы, которые ориентированы перпендикулярно к субстрату (к внешней подскорлупной мембране). Таким образом, с использованием двухмерной структуры можно доказать, что количество выживших кристаллов — функция толщины скорлупы. Простое геометрическое правило борьбы за пространство объясняет удивительный структурный градиент яичной скорлупы за исключением кутикулы.

Особенности структуры скорлупы цесарок

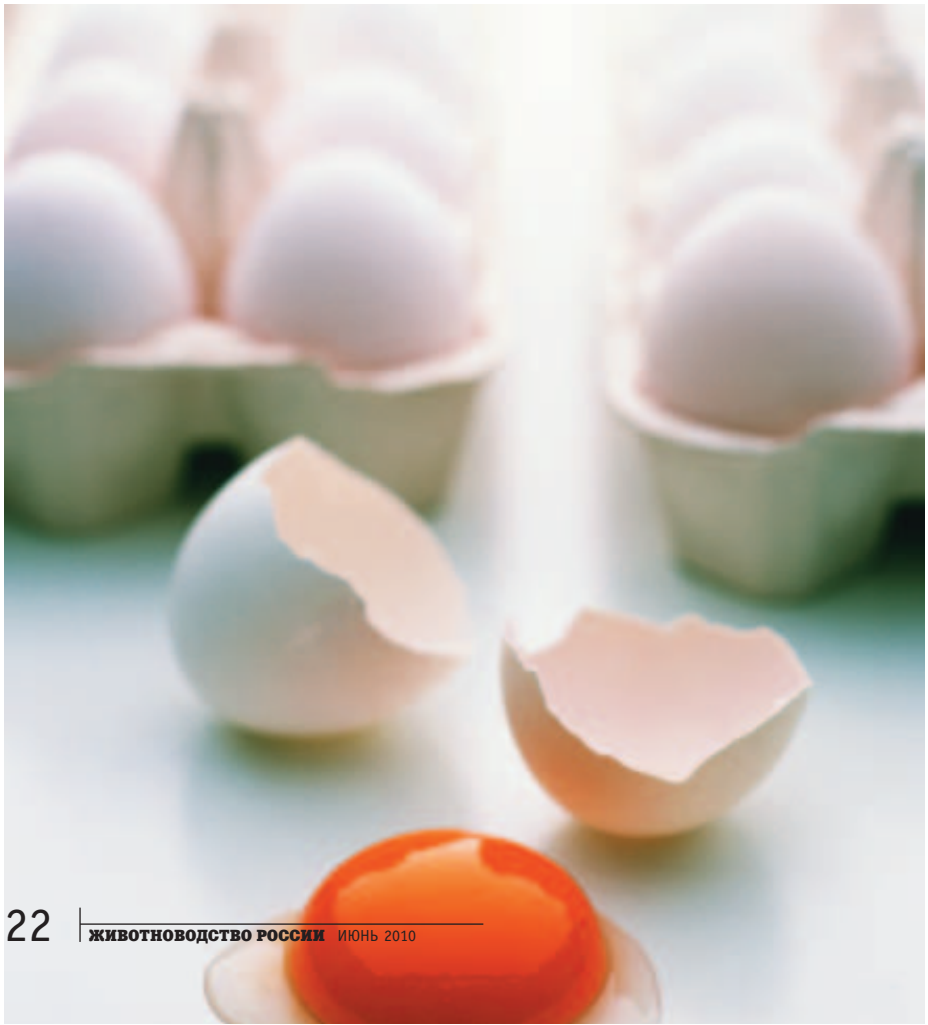
При изучении структуры скорлупы яиц разных видов птицы ученые обнаружили существенные различия в сосочковом слое, включая размер и ориентацию кристаллов. Особого внимания заслуживает скорлупа цесарок из-за ее необычайной крепости, которая обеспечивается большим соотношением массы скорлупы и ее размера из-за укороченной фазы нуклеации кристаллов и более длинной фазы самой кристаллизации скорлупы.

Интересно, что толщина скорлупы лишь частично определяет ее прочность. В скорлупе яйца цесарок кристаллы кальцита в верхней губчатой зоне характеризуются сложным переплетением в отличие от скорлупы яйца кур, где колонки кристаллов отделены друг от друга. Кристаллическая структура развивается в середине губчатого слоя. Однако до сих пор не удалось связать ее с изменениями в секреции компонентов матрикса скорлупы в процессе быстрой кристаллизации.

Химический состав подскорлупных мембран

Химическому составу подскорлупных мембран посвящено значительное число публикаций. Сначала основой фиброзного материала в мембране считали овокератин. Однако исследования ее аминокислотного состава с использованием специфических антител опровергли эту гипотезу. Позже в мембране идентифицировали десмозин и изодесмозин, что дало основание предполагать наличие в ней эластина, но исследование содержания глицина заставило исключить и такую возможность. В конце концов коллаген идентифицировали по наличию гидроксилизина и результатам переваривания подскорлупной оболочки коллагеназой. Это было подтверждено опытами с использованием антител против коллагенов трех типов: I, V и X. Однако различия в аминокислотном составе подскорлупной оболочки и коллагеновых тканей говорят о том, что коллаген, вероятно, не является главным компонентом мембраны. Считается, что она содержит уникальный белок с внутренними лизиновыми связями.

Очень важно отметить, что интактная подскорлупная мембрана необходима для кальцификации яичной скорлупы у кур-несушек. Доказано отрицательное влияние нарушения структуры мембраны при дефиците меди на строение скорлупы. Мембрана также представляет собой барьер, предотвращающий дальнейшую минерализацию. Предполагается, что коллаген типа X может участвовать в торможении кальцификации. Его удаление химическим путем индуцирует образование кристаллов кальция *in vitro* на волокнах подскорлупной мембраны. Однако локализация коллагена в центре мембранных волокон не подтверждает эту гипотезу.



Органический матрикс и прочность скорлупы

При рассмотрении механизмов повреждения скорлупы в результате физического воздействия особого внимания заслуживает вопрос упругой деформации. Дело в том, что скорлупа — это, в сущности, биокерамика. Обычная керамика достаточно прочная, но не обладает гибкостью и легко бьется. Сочетание неорганических кристаллов, размещенных под определенными углами, и органических молекул белков и гликанов делает скорлупу не только крепкой, но и пластичной. То есть при ударе она может прогибаться не трескаясь. Это свойство и называется упругой деформацией, и обеспечивает его главным образом органический матрикс скорлупы. С одной стороны, он представляет собой подложку на скорлупной мембране, определяющую положение

и размеры кристаллов. С другой стороны, это своеобразный органический клей, скрепляющий кристаллы и обладающий некоторой пластичностью.

Сегодня задача ученых — изучить механизмы синтеза элементов органического матрикса, выяснить причины нарушений этого процесса, приводящие к дефектам скорлупы и снижению ее качества. Исследования последних лет доказали, что прочность и толщина скорлупы главным образом зависят от баланса кальция, фосфора и витамина D, а упругая деформация обеспечивается органическим матриксом. Учитывая, что цинк, медь, марганец и селен — кофакторы многих ферментных систем, участвующих в регуляции синтеза его компонентов, особое внимание следует обратить на баланс этих элементов в рационе кур-несушек, особенно во второй фазе яйценоскости. В начале периода продуктивности их запасов в организме достаточно и система утилизации работает эффективно, обеспечивая синтез компонентов органического матрикса и высокую упругую деформацию скорлупы. На более поздних стадиях яйцекладки птица часто ощущает дефицит указанных элементов, что приводит к нарушению образования органического матрикса и снижению качества скорлупы.

Стрессы и качество скорлупы

Особую роль в ухудшении качества скорлупы играют различные стрессы, которые нарушают регуляцию процесса ее формирования. Исследования, проведенные в начале 1990-х годов венгерским профессором Мезешом, показали, что перекисное окисление липидов в скорлупной железе яйцевода кур — серьезный фактор риска снижения качества скорлупы.

К сожалению, эти исследования не получили дальнейшего развития. Если учесть, что 80% времени яйцо находится в скорлупном отделе и до тех пор, пока предыдущее яйцо не отложено, следующий фолликул не выходит из яичника, становится понятной роль скорлупной железы в снижении яйценоскости. Если по какой-то причине (воспаление или другие нарушения в скорлупной железе) скорость формирования скорлупы упадет на 10%, то яйценоскость автоматически снизится на 8%. Такое часто происходит при стрессе на пике продуктивности.

Разжижение белка

Как известно, свежесть яйца — один из наиболее важных показателей его качества. Ее можно легко определить по размеру воздушной камеры и по высоте белка, во многом зависящей от связей между протеинами, в частности овомуцином и лизоцимом, которые наиболее стабильны при pH 7,5. В процессе хранения яйца через поры выделяется вода и углекислый газ, что приводит к изменению pH, нарушению связей между протеинами и разжижению белка.

Кроме того, оно может происходить из-за таких факторов, как генетика и состояние здоровья кур-несушек, микроклимат в птичнике, состав корма и качество воды. В летние месяцы яйцо с разжиженным белком — серьезная проблема для птицеводов.

По последним заключениям ученых, она может быть связана и с окислением белков. До недавнего времени считалось, что лишь жиры способны окисляться, а сегодня известно, что белки тоже окисляются.

Как предотвратить этот процесс или снизить чувствительность белков к окислению? Один из элементов, используемых для защиты белков от окисления, — селен, входящий в состав фермента метионинсульфоксидредуктазы. Исследования в этом направлении продолжаются, и есть надежда на прорыв в ближайшем будущем.

Как улучшить качество скорлупы

Исходя из современных представлений о формировании скорлупы и ее регуляции различными факторами питания следует особо подчеркнуть, что сбалансированный витаминно-минеральный премикс — основной «инструмент» в решении этой проблемы.

На рынке существует много различных добавок, предназначенных для улучшения скорлупы, однако только сбалансированное поступление витаминов и минералов обеспечивает физиологические процессы формирования скорлупы всем необходимым. Дисбаланс витаминов (особенно D, E и ряда водорастворимых) и минералов (кальций, фосфор, селен, медь, марганец и цинк) неизбежно приводит к снижению ее качества, увеличению боя и насечки.

Таким образом, создание высокоэффективного премикса для кур-несушек базируется на многих ноу-хау и длительной практике. В Великобритании, например, активное сотрудничество между ведущими производителями премиксов (компания Premier Nutrition Products — основной производитель высокоэффективных премиксов для птицеводства и свиноводства в стране), комбикормовыми заводами (которые чаще всего входят в состав холдингов) и птицефабриками позволяет поддерживать высокое качество скорлупы на протяжении всего периода продуктивности кур. При этом сама концепция кормления птицы ориентирована не столько на цену премиксов, сколько на их качество. Обеспечение несушек витаминами и минералами и достижение высокой яйценоскости и отличного качества продукции в конечном счете приносит максимальную прибыль.

В течение многих лет специалисты в основном уделяли внимание кальцию, фосфору и витамину D в рационе. Нет сомнения в том, что они необходимы для формирования скорлупы. Витамин D регулирует синтез белка, связывающего кальций и ответственного за его транспортировку к месту биологического действия. Сбалансировать рацион по кальцию и фосфору сегодня уже нетрудно, да и дефицит витамина D в рационе несушек при использовании современных премиксов — явление весьма редкое. Тем не менее даже при оптимальном балансе этих компонентов в рационе во второй половине периода продуктивности часто наблюдается снижение качества скорлупы. То есть традиционный подход к минеральному кормлению кур-несушек нуждается в серьезном пересмотре.

Особое внимание следует уделять включению в комбикорм витаминов D и E, цинка, марганца, меди и селена. Лишь высококачественные премиксы, при создании которых учитывались взаимодействия этих элементов, способны решить указанные проблемы.

Новые исследования в области регуляции синтеза органического матрикса скорлупы позволят разработать эффективные приемы улучшения ее качества. Налаживание долгосрочных связей между производителями премиксов и птицефабриками и их эффективное сотрудничество, когда техническая поддержка производства яйца и мяса птицы осуществляется специалистами, как выезжающими в хозяйства, так и работающими с ними в режиме on line, — залог будущего успеха яичной индустрии России. ЖР