



Kent Academic Repository

Narushin, Valeriy G., Selina, M.V. and Romanov, Michael N. (2020) [Development of non-destructive technologies and mathematical methods for assessing the egg quality] Разработка неразрушающих технологий и математических методов для оценки качества яиц. In: Materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference / Материалы 2-й Международной научно-практической конференции. . pp. 151-164. Sel'skokhozyaistvennyye tekhnologii / Сельскохозяйственные технологии, Moscow, Russia / Москва, Россия

Downloaded from

<https://kar.kent.ac.uk/89180/> The University of Kent's Academic Repository KAR

The version of record is available from

<https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/k20-5>

This document version

Publisher pdf

DOI for this version

Licence for this version

UNSPECIFIED

Additional information

In Russian; English abstract

Versions of research works

Versions of Record

If this version is the version of record, it is the same as the published version available on the publisher's web site. Cite as the published version.

Author Accepted Manuscripts

If this document is identified as the Author Accepted Manuscript it is the version after peer review but before type setting, copy editing or publisher branding. Cite as Surname, Initial. (Year) 'Title of article'. To be published in **Title of Journal** , Volume and issue numbers [peer-reviewed accepted version]. Available at: DOI or URL (Accessed: date).

Enquiries

If you have questions about this document contact ResearchSupport@kent.ac.uk. Please include the URL of the record in KAR. If you believe that your, or a third party's rights have been compromised through this document please see our [Take Down policy](https://www.kent.ac.uk/guides/kar-the-kent-academic-repository#policies) (available from <https://www.kent.ac.uk/guides/kar-the-kent-academic-repository#policies>).

РАЗРАБОТКА НЕРАЗРУШАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЯИЦ

Нарушин В.Г.,¹ Селина М.В.,² Романов М.Н.^{2,3}

¹ ООО «Вита-Маркет», Запорожье, Украина;

² ФГБОУ ВО «Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологии – МВА имени К.И. Скрябина», Москва, Россия;

³ Университет Кента, Кентербери, Великобритания.

E-mail: val@vitamarket.com.ua

Аннотация

В племенной и селекционно-генетической работе с сельскохозяйственной птицей важным аспектом является оценка качества яиц. Помимо усиленного поиска молекулярно-генетических механизмов и маркеров качества яиц, существует необходимость в разработке неразрушающих технологий и математических методов для оценки качества яиц, которые позволяют достаточно точно определять внешние и внутренние параметры яйца без разбивания скорлупы и могут послужить основой для последующих исследований в области повышения качества яичной продукции.

Ключевые слова: математические методы, куры, объем яйца, площадь поверхности яйца, неразрушающее измерение, ошибка вычисления, имитационное моделирование

Введение

В ходе племенной и селекционно-генетической работы с сельскохозяйственной птицей существенным аспектом является оценка качества яиц. Это вызвано, в первую оче-

редь, тем, что бой и трещины скорлупы яйца обуславливают значительные экономические потери в птицеводческой отрасли. Тонкая скорлупа увеличивает риск появления трещин, что в свою очередь приводит к бактериальному загрязнению яиц. Полноценное развитие птичьего эмбриона напрямую зависит от крепкой скорлупы, которая обеспечивает механическую и антибактериальную защиту яйца, предотвращает от избыточной потери влаги и служит первоначальным источником кальция для развития скелета эмбриона птенца. На качество скорлупы могут влиять как генетические особенности птицы, так и ее возраст, особенности кормления (прежде всего кальциевый обмен), условия содержания птицы и микрофлора (прежде всего микоплазмы). Таким образом, качество скорлупы яйца является важным критерием в разведении домашней курицы.

Научный и практический интерес к яйцу домашней птицы не ослабевает и сохраняется на протяжении десятилетий, что связано с его важностью для воспроизводства птицы, а также широкого применения в фармацевтической, косметической и пищевой промышленности. Особенно увеличились сведения о белках яйца в связи с развитием современных высокопроизводительных молекулярно-генетических методов, используемых в сочетании с доступным геномным сиквенсом домашней курицы (International Chicken Genome Sequencing Consortium, 2004). С помощью протеомной и транскриптомной техники были определены более чем несколько сотен белковых компонентов яичного белка (Guerin-Dubiard et al., 2006; Mann, 2007; D'Ambrosio et al., 2008), яичного желтка (Mann, Mann, 2008; Farinazzo et al., 2009), желточной мембраны (Mann, 2008), а также более 500 белков матрицы яичной скорлупы домашней курицы (Mann et al., 2006; Jonchere et al., 2010). Эти исследования дают на сегодняшний день наиболее полный набор сведений о белках яиц и предлагают базовую информацию

для дальнейшего функционального исследования яйца птицы. Например, многие из многочисленных компонентов белка в яйце являются повсеместно встречающимися белками (такими как актин, убиквитин и гистоны; Mann et al., 2006; Mann, 2007; D'Ambrosio et al., 2008). В общем случае эти неспецифические яичные белки широко распространены у всех позвоночных, в том числе у костных рыб и млекопитающих, предполагая эволюционный консерватизм и общие функции у этих животных. Тем не менее было выделено много белков, которые обнаружены только в репродуктивных органах домашней курицы и которые играют важную роль во время развития эмбриона, такие как яичный альбумин (Woo et al., 1981), вителлогенины (Wallace, 1985), овокаликсин-32, овокаликсин-36 (Gautron et al., 2001, 2007) и овоклеидин-116 (Hincke et al., 1999).

Кроме того, проводится поиск молекулярно-генетических маркеров, связанных с качеством яиц (Romanov et al., 1999). Например, было выявлено два мажорных локуса количественных признаков (QTL), маркированных по сайтам однонуклеотидного полиморфизма (SNP): SNP 2_1 нуклеотидной последовательности CR523443 и SNP rs14491030 последовательности гена *NCAPG*, который кодирует не-SMC субъединицу CAP-G комплекса конденсина I (Баркова и др., 2011; Баркова, Смарагдов, 2013). QTL-локус, маркированный по сайту SNP2_1, обладает плейотропным эффектом на признаки качества яйца и продуктивности, в частности, имеет достоверную ассоциацию с толщиной скорлупы и массой яйца, а также с яйценоскостью кур-несушек породы красный род-айланд. Аллели сайта rs14991030 (в последовательности гена *NCAPG*) имеют достоверную связь с признаками массы яйца и упругой деформации. Следует принять во внимание, что конденсины являются субъединичными белковыми комплексами,

играющими фундаментальную роль в структурной и функциональной организации хромосом, участвуют в регуляции экспрессии генов, рекомбинации и репарации (Hirano, 2005). Ген *NCAPG* имеет также тенденцию оказывать влияние на признаки роста животных.

Помимо генетических исследований в области повышения качества яичной продукции, еще одним важным аспектом является разработка неразрушающих технологий и математических методов для оценки качества яиц, которые позволяют достаточно точно определять внешние и внутренние параметры яйца без разбивания скорлупы. Объем и площадь поверхности яйца являются ключевыми параметрами, характеризующими его количественные и качественные свойства, в связи с чем как точность, так и удобство их вычислений вызывают целую полемику в научных исследованиях, посвященных этому аспекту.

Первыми, кто поднял данный вопрос, были Romanoff & Romanoff (1949), которые для расчета объема яйца, V , привели в качестве исходной расчетную формулу для эллипсоидов, а площадь поверхности, S , предложили рассчитывать, исходя из величины объема:

$$V = \frac{\pi LB^2}{6} = 0,5236LB^2, \quad (1)$$

$$S = kV^{\frac{2}{3}}, \quad (2)$$

где k — некая константа.

Romanoff & Romanoff (1949), анализируя исследования, проведенные в этом направлении, привели несколько вариантов констант как для формулы (1), так и для формулы (2), дающих погрешность от 1 до 15%, очевидно, в зависимости от выборки и вида яиц, с которыми работали авторы этих работ. Подбор констант, гарантирующих точность расчета данных показателей, продолжился и после 1949

года, с величиной которых можно ознакомиться, к примеру, в обзоре Narushin (1997).

В результате наших теоретических исследований (Narushin, 2005; Narushin et al., 2020a) было продемонстрировано, что k является не постоянной величиной, а функцией от линейных параметров яйца: его длины, L , и максимальной ширины, B . В нашей следующей работе (Narushin et al., 2020b) мы показали, что контуры куриного яйца идеально описываются моделью Гюгельшеффера, а на величину коэффициента k дополнительное влияние оказывает параметр w , соответствующий расстоянию сдвига центра эллипса при преобразовании его в овоид. Хотя, казалось бы, приведенные в исследованиях теоретические формулы расчета V и S позволяют обеспечить высокую точность определения этих показателей, измерение параметра w создает сложности в их использовании.

В связи с этим целью данного исследования был вывод расчетных формул объема и площади поверхности куриных яиц, базирующихся на замерах их длины и ширины с использованием метода имитационного моделирования.

Методика исследований

Применение в настоящей работе метода имитационного моделирования было обусловлено необходимостью ухода от некоей ограниченной выборки яиц, результаты измерения которой переносятся авторами на все возможные комбинации, присутствующие в природе. Богатство таких комбинаций может обеспечить только искусственный перебор возможных параметров, что позволило учесть все варианты сочетаний значений трех параметров, L , B и w , применимых к куриным яйцам и задействованных в расчетных формулах определения V и S (Narushin et al., 2020b). При этом более удобно использовать соотношения некоторых

линейных параметров, к примеру, так называемый индекс формы, $SI=B/L$, вместо B , а также w/L вместо w .

Основываясь на данных Romanoff & Romanoff (1949), теоретических предпосылках Obradović et al. (2013) по изучению видоизменений геометрических контуров модели Гюгельшеффера, а также наших собственных результатах о возможных разбросах w/L (Narushin et al., 2020b), нами за основу были приняты следующие вариации этих параметров:

$$L=5,2 \text{ см} \dots 6,4 \text{ см}; SI=B/L=0,66 \dots 0,84; w/L=0 \dots 0,25.$$

Эти данные послужили основой для моделирования большого разнообразия яиц. Изменяя данные для L с шагом 0,2, SI с шагом 0,02 и w с шагом 0,05, мы симутировали 1820 комбинаций, характерных для всего возможного разнообразия куриных яиц, по которым были рассчитаны реальный объем V и площадь поверхности S яйца по формулам из работы Narushin et al. (2020b). Полученные значения V сравнивали с рассчитанными по формуле для эллипсоидов (1), при этом, чтобы избежать путаницы, объем в формуле (1) обозначали V_{el} . Значения V и S были также использованы для оценки коэффициента k в формуле (2).

Результаты исследований и обсуждение

1. Объем яйца

Результаты сравнения расчетных данных V и V_{el} показали погрешность вычисления по формуле для эллипсоидов от 0 до 5,1% со средней величиной 1,4%, что в большинстве случаев вполне допустимо при выполнении исследований, не требующих достижения высокой точности. Отношение V_{el}/LB^2 позволило получить среднюю величину константы в формуле (1), равную $0,5163 \pm 0,0065$. Использование новой константы в формуле, которая приняла следующий вид:

$$V = 0,5163LB^2, \quad (3)$$

позволило снизить вариацию погрешности до 0...3,7% со средней величиной 1,1%.

Нами были предприняты дальнейшие попытки увеличить точность расчета, для чего данные V и V_{el} были аппроксимированы соответствующей функцией (рис. 1).

$$V = f(V_{el})$$

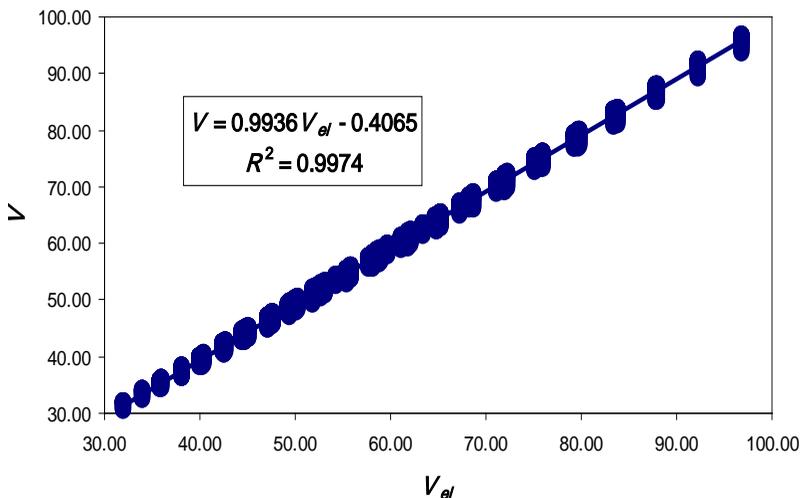


Рис. 1. Взаимосвязь величины объема куриного яйца с объемом эллипсоида, имеющего аналогичные геометрические размеры длины и максимальной ширины

В результате для расчета объема куриного яйца можно использовать следующую формулу:

$$V = 0,5202LB^2 - 0,4065. \quad (4)$$

Хотя результаты вычислений несколько приблизились к реальной величине объема, тем не менее ее погрешность, практически, не изменилась в сравнении с формулой (3) и составила 0...3,6% со средней величиной 1,1%.

Наши попытки выразить константу в формуле (1) через значения L и B также не дали возможность повысить точность расчета V ввиду достаточно низкого коэффициента множественной корреляции ($R=0,221$) между этими параметрами.

Таким образом, при расчете объема куриных яиц, в случае, если подобные исследования не предполагают высокой точности измерений, мы предлагаем использовать формулу (4), гарантирующего простоту измерений исходных параметров и достаточную точность получаемых результатов.

2. Площадь поверхности яйца

Величины значений площади поверхности, S_{el} , определенных по формуле для эллипсоидов, превышали результаты расчета S по формуле, выведенной для модели Гюгельшеффера (Narushin et al., 2020b), в среднем на 30% ($S=56,4\pm 10,9$ см², при $S_{el}=73,5\pm 12,3$ см²), в результате чего мы сделали вывод о недопустимости использования расчетной формулы для эллипсоидов при определении площади поверхности куриных яиц.

В связи с этим мы сравнили значения S и S_{el} и аппроксимировали их взаимосвязь функциональной зависимостью (рис. 2).

С учетом формулы определения площади поверхности эллипсоидов (например Tee, 2004) и линейной функции их взаимосвязи (рис. 2), окончательную расчетную формулу можно записать в следующем виде:

$$S = 1,2145B \left(L \cdot \frac{\arcsin \sqrt{1 - \frac{B^2}{L^2}}}{\sqrt{1 - \frac{B^2}{L^2}}} + B \right) - 0,4685. \quad (5)$$

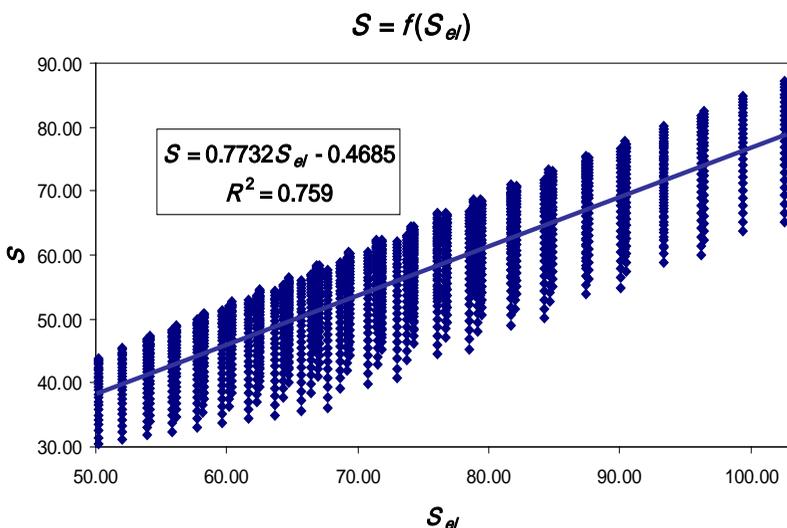


Рис. 2. Взаимосвязь величины площади поверхности куриного яйца с площадью поверхности эллипсоида, имеющего аналогичные геометрические размеры длины и максимальной ширины

Данный подход позволил несколько повысить точность расчета, тем не менее погрешность находилась в пределах 0...43,5% со средней величиной 8,4%, что требовало иных расчетных методов.

Из формулы (2) путем соответствующего деления значений S и $V^{2/3}$ были определены величины коэффициента k , среднее значение которого было равным $3,8 \pm 0,34$. Полученные величины оказались ниже тех, которые когда-либо публиковались и могут быть найдены, к примеру, в работах Romanoff & Romanoff (1949) и Hughes (1984). Завышенные коэффициенты, используемые в настоящее время для подобных расчетов, очевидно, связаны с отсутствием точных методов прямых измерений площади поверхности яиц. Тем не менее замена k в формуле (2) на его среднее значение 3,8 не позволила значительно повысить точность

расчета. Погрешность измерений, осуществляемых по видоизмененной формуле (2):

$$S = 3,8V^{\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

находилась в пределах 0...41,4% со средней величиной 7,8%.

Следующая попытка повысить точность заключалась в поиске адекватной функциональной зависимости k от совокупности значений L и B . Из аппроксимированных уравнений линейной, квадратичной и степенной зависимостей наибольшую точность показала последняя, которая после небольших усовершенствований позволила преобразовать формулу (2) в следующий вид:

$$S = 2,57L^{\frac{1}{2}}B^{\frac{1}{3}}V^{\frac{2}{3}},$$

либо в приведенном к стандартному математическому виду:

$$S = 2,57\sqrt{L} \cdot \sqrt[3]{\frac{V^2}{B}}. \quad (7)$$

Использование формулы (1) позволило несколько повысить точность расчета. Погрешность измерений, осуществляемых с ее использованием, находилась в пределах 0...33,6% со средней величиной 7,5%.

Таким образом, ценность и адекватность полученных формул для расчета объема яиц (4) и площади их поверхности (7) состоит в имитации всех возможных вариаций геометрических параметров, характерных для куриных яиц, что покрывает любую экспериментальную выборку, проводимую с замерахми реальных яиц. Если вычисление объема по упрощенным зависимостям можно смело брать за основу для практических целей, то расчет площади поверхности дает довольно высокую погрешность, в связи с чем при оценке этого параметра авторы рекомендуют по-

мимо замеров L и B использовать также параметр w , с перерасчетом по формуле из работы Narushin et al. (2020b). Предлагаемый нами подход может с успехом применяться в ходе дальнейшей разработки неразрушающих технологий и математических методов для оценки качества яиц.

Список литературы

Баркова О.Ю., Смарагдов М.Г. Анализ ассоциации однонуклеотидной замены в межгенном районе хромосомы 4 с признаками, определяющими качество яйца домашней курицы // Генетика. 2013. Т. 49. № 7. С. 856–861.

Баркова О.Ю., Сазанова А.Л., Благовещенский И.Ю., Фомищев К.А., Малевски Т., Сазанов А.А. Создание системы генотипирования *Gallus gallus* по аллелям rSNP (регуляторных мононуклеотидных полиморфных сайтов), оказывающим влияние на толщину скорлупы яйца // Генетика. 2011. Т. 47. № 2. С. 243–248.

D'Ambrosio C., Arena S., Scaloni A., Guerrier L., Boschetti E., Mendieta M.E., Citterio A., Righetti P.G. Exploring the chicken egg white proteome with combinatorial peptide ligand libraries // Journal of Proteome Research. 2008. Vol. 7. No. 8. P. 3461–3474.

Farinazzo A., Restuccia U., Bachi A., Guerrier L., Fortis F., Boschetti E., Fasoli E., Citterio A., Righetti P.G. Chicken egg yolk cytoplasmic proteome, mined via combinatorial peptide ligand libraries // Journal of Chromatography. A. 2009. Vol. 1216. No. 8. P. 1241–1252.

Gautron J., Hincke M.T., Mann K., Panheleux M., Bain M., McKee M.D., Solomon S.E., Nys Y. Ovocalyxin-32, a novel chicken eggshell matrix protein. isolation, amino acid sequencing, cloning, and immunocytochemical localization // The Journal of Biological Chemistry. 2001. Vol. 276. No. 42. P. 39243–39252.

Gautron J., Murayama E., Vignal A., Morisson M., McKee M.D., Réhault S., Labas V., Belghazi M., Vidal M.L., Nys Y., Hincke M.T. Cloning of ovocalyxin-36, a novel chicken eggshell protein related to lipopolysaccharide-binding proteins, bactericidal permeability-

increasing proteins, and plunc family proteins // *The Journal of Biological Chemistry*. 2007. Vol. 282. No. 8. P 5273–5286.

Guérin-Dubiard C., Pasco M., Mollé D., Désert C., Croguennec T., Nau F. Proteomic analysis of hen egg white // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006. Vol. 54. No. 11. P. 3901–3910.

Hincke M.T., Gautron J., Tsang C.P., McKee M.D., Nys Y. Molecular cloning and ultrastructural localization of the core protein of an eggshell matrix proteoglycan, ovocleidin-116 // *The Journal of Biological Chemistry*. 1999. Vol. 274. No. 46. P. 32915–32923.

Hirano T. Condensins: organizing and segregating the genome // *Current Biology*. 2005. Vol. 15. No. 7. P. R265–R275.

Hughes R.J. Estimation of shell surface area from measurements of length, breadth, and weight of hen eggs // *Poultry Science*. 1984. Vol. 63. P. 2471–2474.

International Chicken Genome Sequencing Consortium. Sequence and comparative analysis of the chicken genome provide unique perspectives on vertebrate evolution // *Nature*. 2004. Vol. 432. No. 7018. P. 695–716.

Jonchère V., Réhault-Godbert S., Hennequet-Antier C., Cabau C., Sibut V., Cogburn L.A., Nys Y., Gautron J. Gene expression profiling to identify eggshell proteins involved in physical defense of the chicken egg // *BMC Genomics*. 2010. Vol. 11. Article 57.

Mann K. The chicken egg white proteome // *Proteomics*. 2007. Vol. 7. No. 19. P. 3558–3568.

Mann K. Proteomic analysis of the chicken egg vitelline membrane // *Proteomics*. 2008. Vol. 8. No. 11. P. 2322–2332.

Mann K., Mann M. The chicken egg yolk plasma and granule proteomes // *Proteomics*. 2008. Vol. 8. No. 1. P. 178–191.

Mann K., Macek B., Olsen J.V. Proteomic analysis of the acid-soluble organic matrix of the chicken calcified eggshell layer // *Proteomics*. 2006. Vol. 6. No. 13. P. 3801–3810.

Narushin V.G. Non-destructive measurements of egg parameters and quality characteristics // *World's Poultry Science Journal*. 1997. Vol. 57. P. 141–153.

Narushin V.G. Egg geometry calculation using the measurements of length and breadth // *Poultry Science*. 2005. Vol. 84. P. 482–484.

Narushin V.G., Lu G., Cugley J., Romanov M.N., Griffin D.K. A 2-D imaging-assisted geometrical transformation method for non-destructive evaluation of the volume and surface area of avian eggs // *Food Control*. 2020a. Vol. 112. Article107112.

Narushin V.G., Romanov M.N., Lu G., Cugley J., Griffin D.K. Digital imaging assisted geometry of chicken eggs using Hügelschäffer's model // *Biosystems Engineering*. 2020b. Vol. 197. P. 45–55.

Obradović M., Malešević B., Petrović M., Đukanović G. Generating curves of higher order using the generalisation of Hügelschäffer's egg curve construction // *Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara: Seria Hidrotehnica*. 2013. Vol. 58. P. 110–114.

Romanoff A.L., Romanoff A.J. *The Avian Egg*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1949.

Romanov M.N., Miao Y., Wilson P.W., Morris A., Sharp P.J., Dunn I.C. Detection and assay of polymorphism in reproductive gene loci in a commercial broiler breeder population for use in association studies // Conference "From Jay Lush to Genomics: Visions for Animal Breeding and Genetics", J.C.M. Dekkers, S.J. Lamont, M.F. Rothschild (Eds.). Ames, IA, USA: Iowa State University, Department of Animal Science, 1999. P. 155.

Tee G.J. Surface area and capacity of ellipsoids in n dimensions // *New Zealand Journal of Mathematics*. 2004. Vol. 34. P. 165–198.

Wallace R.A. Vitellogenesis and oocyte growth in nonmammalian vertebrates // *Oogenesis. Developmental Biology (A Comprehensive Synthesis)* / L.W. Browder (ed.). Boston, MA, USA: Springer, 1985. Vol. 1. P. 127–177.

Woo S.L., Beattie W.G., Catterall J.F., Dugaiczuk A., Staden R., Brownlee G.G., O'Malley B.W. Complete nucleotide sequence of the chicken chromosomal ovalbumin gene and its biological significance // *Biochemistry*. 1981. Vol. 20. No. 22. P. 6437–6446.

Development of non-destructive technologies and mathematical methods for assessing the egg quality

Narushin V.G.,¹ Selina M.V.,² Romanov M.N.^{2,3}

¹ Vita-Market Ltd, Zaporozhye, Ukraine;

² K.I. Skryabin Moscow State Academy of Veterinary
Medicine and Biotechnology, Moscow, Russia;

³ University of Kent, Canterbury, UK

Abstract

In poultry breeding as well as selection and genetic work, an important aspect is the evaluation of egg quality. In addition to the intensive search for molecular genetic mechanisms and markers of egg quality, there is a need in developing non-destructive technologies and mathematical methods for assessing the egg quality, which make it possible to accurately determine the external and internal parameters of the egg without breaking the eggshell and can serve as a basis for further research in the field of quality improvement of egg products.

Key words: egg volume, egg surface area, non-destructive measurement, computation error, simulation modelling