

УДК 631.363.285

## Экспериментальные исследования гранулирующих форм отверстий в экструдере комбикормов для рыб

И. А. Хозяев, Д. В. Рудой

(Донской государственный технический университет)

Рассматривается влияние формы отверстия формующей матрицы шнекового экструдера на качество гранул комбикормов для рыб. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований. В виде уравнения описана форма поверхности отверстия матрицы, позволяющая получать равномерное давление прессуемого материала по всей длине отверстия. Получено криволинейное уравнение для определения производительности при равномерном распределении давлений в отверстии матрицы. Экспериментально определены величины давлений по длине отверстия и построены зависимости производительности и длины отверстия от давлений. Основные требования к качеству гранул связаны со спецификой кормления рыб: прочность, водостойкость, крошимость и плотность гранул. И формы отверстий оцениваются именно с точки зрения конечного качества комбикорма. Полученные результаты доказывают преимущества разработанного экспериментального отверстия по сравнению со стандартными формами. Во-первых, использование такого отверстия в экструдере повышает энергоэффективность процесса продавливания. Во-вторых, улучшается качество гранул.

**Ключевые слова:** отверстие повышенной пропускной способности, гранулирование, комбикорм, фильера, шнековый пресс-гранулятор.

**Введение.** Проблема кормления рыб включает такие аспекты, как разработка рецептуры комбикормов, прогресс в технологии кормления рыб на всех этапах их товарного выращивания, совершенствование технологических приёмов изготовления комбикормов.

Гранулирование широко используется в производстве кормов, топливных пеллет, лекарственных препаратов, минеральных удобрений и т. п. Преимущество гранулирования состоит в том, что у конечного продукта существенно ниже склонность к слёживанию. Это упрощает хранение, транспортировку и дозирование. Снижаются потери кератина. Однако у гранулирования комбикормов есть существенный недостаток — это энергозатратный процесс.

Целью работы является совершенствование технологического процесса гранулирования — снижение энергоёмкости и повышение качества гранул.

**Основная часть.** Распространённый вид гранулирующих устройств — шнековые прессы. Их преимущество — перемешивание продукта в процессе прессования, существенный недостаток — высокая энергоёмкость.

В результате проведённого анализа [1] было выявлено, что энергоёмкость процесса в значительной степени зависит от количества и формы отверстий в фильере.

Установлено, что для повышения качества гранул в процессе продавливания продукта необходимо обеспечить постоянное давление прессования в фильере по всей длине отверстия. Анализ работ по гранулированию показал, что при использовании цилиндрического, конического и других форм отверстий этого достичь невозможно. Однако похожие задачи решались при истечении сыпучих материалов из бункеров [2, 3]. Было определено, что форма отверстия с наибольшей пропускной способностью без потери давления соответствует уравнению кривой:

$$y = \frac{R}{\sqrt[4]{1 + 2 \cdot \pi^2 \cdot g \cdot \frac{R^4}{q_{пр}^2} \cdot x}}. \quad (1)$$

где  $R$  — радиус входного сечения конического отверстия;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $q_{\text{пр}}$  — предельный расход.

Процесс гранулирования подобен гидравлическому истечению из отверстия, поэтому производительность истечения из отверстия можно определить по следующей формуле:

$$Q = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода;  $S_0$  — площадь поперечного сечения отверстия;  $\Delta P$  — расчётная разность давлений, под действием которых происходит истечение;  $\rho$  — плотность.

Энергоёмкость продавливания определяется работой прессования, равной произведению среднего усилия на путь прессования (3):

$$A = P \cdot S \quad (3)$$

где  $P$  — среднее давление;  $S$  — длина отверстия.

После проведённого анализа было создано экспериментальное гранулирующее отверстие (рис. 1, г).

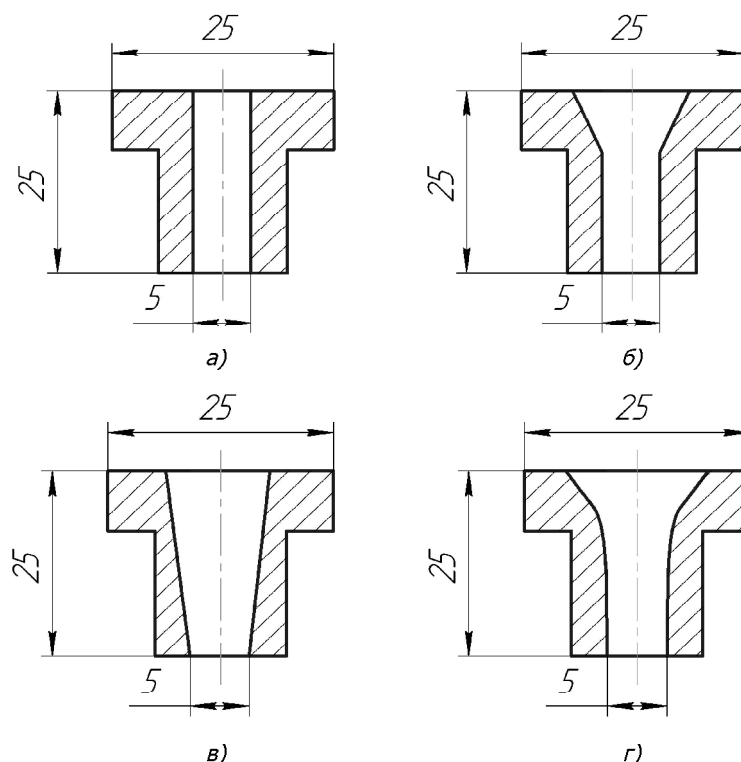


Рис. 1. Гранулирующие отверстия: цилиндрическое (а); цилиндрическое с коническим входом (б); коническое сужающееся (в); экспериментальное (г)

Для проведения экспериментальных исследований работы гранулирующих отверстий при нагрузках был создан стенд. Модель (рис. 2) отражает основные свойства шнекового пресса-гранулятора. Она представляет собой компрессионную камеру со сплошным цилиндром (1) и сплошным дном. Возможен выбор различных видов отверстий (2).

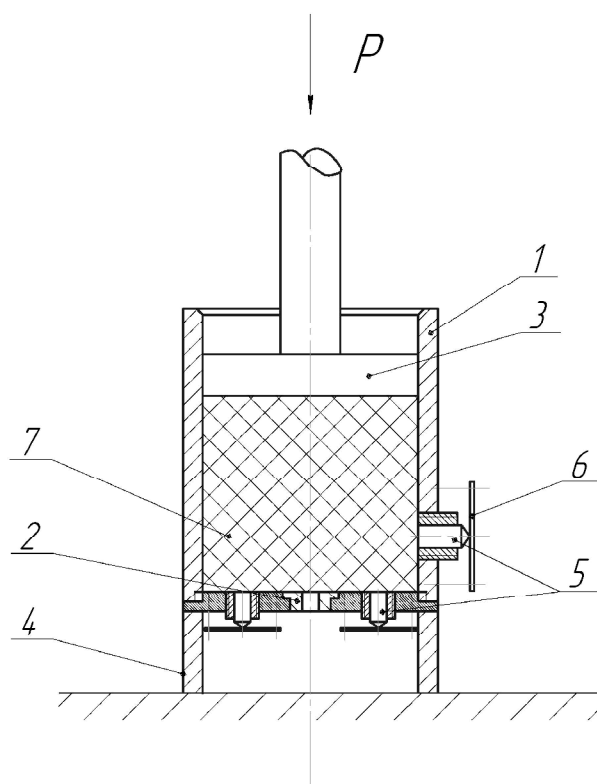


Рис. 2. Схема компрессионной камеры: 1 — цилиндр; 2 — сменная плашка с отверстием; 3 — поршень; 4 — опора; 5 — поршни тензоэлементов; 6 — тензобалки; 7 — прессуемый материал

Давление фиксировалось тензодатчиками, наклеенными на тензоэлементы в дне и на стенках цилиндра. Полученный с помощью усилителя сигнал обрабатывался специальной компьютерной программой *L-GraphII*.

В ходе экспериментов использовалась комбикормовая смесь, состоящая из муки рыбной (22 %), муки мясокостной (3 %), муки пшеничной (11,6 %), жмыха подсолнечного (28 %), масла подсолнечного (5 %), соевого шрота (30,4 %) [4]. Испытания проводились при влажности смеси ( $W$ ) 30 %, диаметре отверстий ( $d$ ) 5 мм, длине отверстий ( $l$ ) 25 мм.

Стандартные отклонения и доверительные интервалы параметров гранул были определены при помощи программы Microsoft Excel 2007. Полученные данные представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

### Результаты экспериментальных данных

| Отвер-<br>вер-<br>стие <sup>1</sup> | Давление   | Среднее зна-<br>чение $P$ , МПа | Дисперсия | Стандартное<br>отклонение | Доверительный<br>интервал | $Q_T$ , кг/ч | $Q_Z$ , кг/ч | $A$ , Дж |
|-------------------------------------|------------|---------------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|--------------|--------------|----------|
| 1                                   | Радиальное | 2,47                            | 0,072     | 0,046                     | $\pm 0,053$               | 3,68         | 3,7          | 61,75    |
|                                     | Осевое     | 5,18                            | 0,084     | 0,058                     | $\pm 0,066$               | 7,7          | 7,75         | 129,5    |
| 2                                   | Радиальное | 2,30                            | 0,071     | 0,045                     | $\pm 0,051$               | 3,6          | 3,65         | 57,5     |
|                                     | Осевое     | 5,05                            | 0,096     | 0,068                     | $\pm 0,077$               | 7,9          | 7,96         | 126,25   |
| 3                                   | Радиальное | 2,13                            | 0,070     | 0,045                     | $\pm 0,051$               | 3,5          | 3,53         | 53,25    |
|                                     | Осевое     | 4,94                            | 0,085     | 0,059                     | $\pm 0,067$               | 8,1          | 8,12         | 123,5    |
| 4                                   | Радиальное | 2,25                            | 0,064     | 0,037                     | $\pm 0,042$               | 3,61         | 3,59         | 56,25    |
|                                     | Осевое     | 5,02                            | 0,084     | 0,058                     | $\pm 0,066$               | 8,05         | 8,02         | 125,5    |

<sup>1</sup> 1 — цилиндрическое, 2 — цилиндрическое с коническим входом, 3 — коническое, 4 — экспериментальное.

Из представленных результатов (табл. 1), видно, что у экспериментального отверстия работа ( $A$ ) равна 125,5 Дж. Это больше, чем у конического ( $A = 123,5$  Дж). Однако следует отметить, что при использовании экспериментального отверстия качество гранул выше.

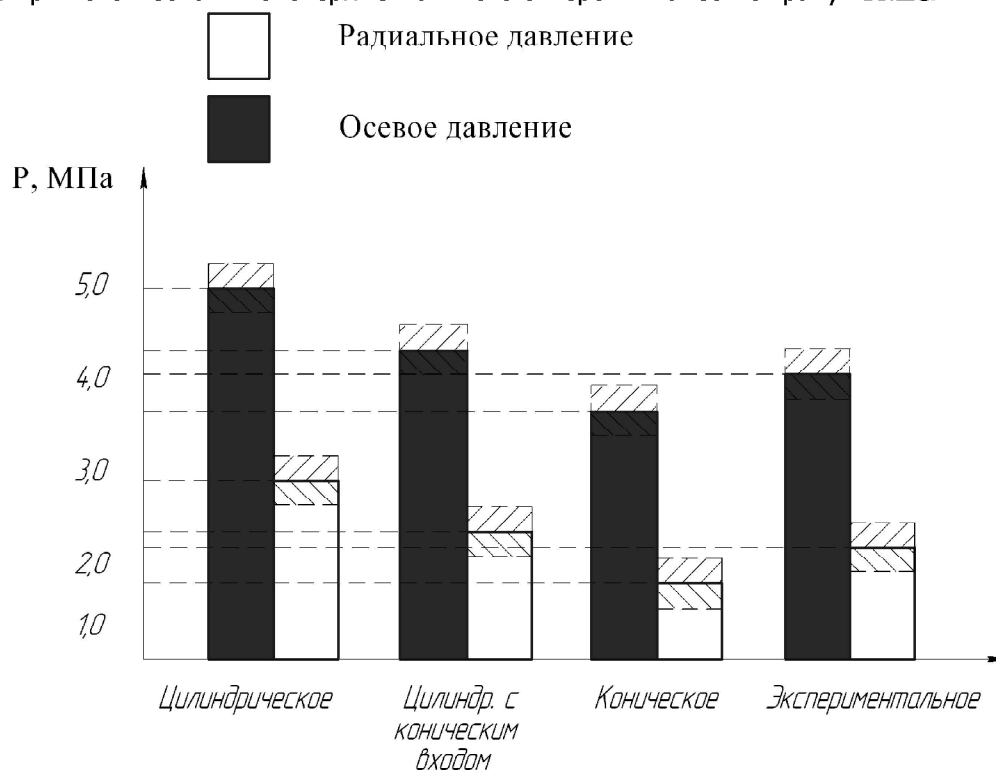


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований исследуемых отверстий

Из рис. 3, видно, что давление, создаваемое при гранулировании через экспериментальное отверстие, составляет 5,02 МПа. Это выше, чем у конического отверстия, на 2 %, но ниже, чем у цилиндрического, на 4 %.

На рис. 4 представлена зависимость распределения давления по длине отверстий различных форм.

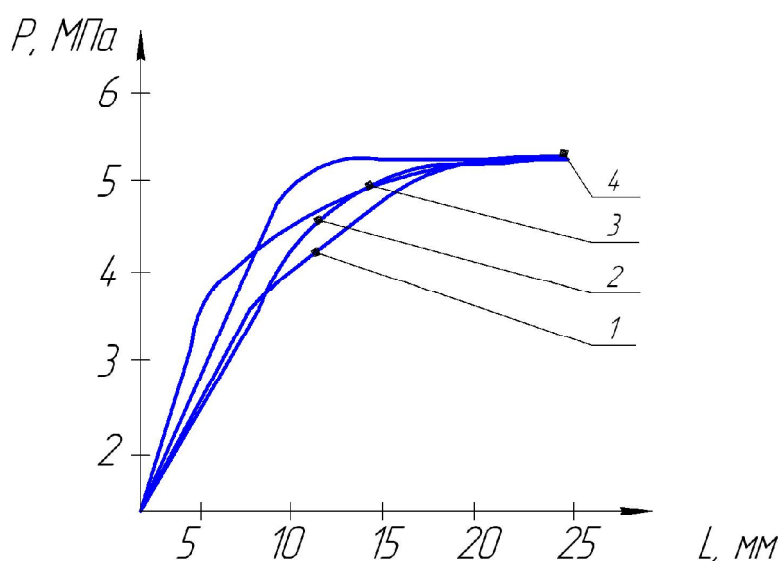


Рис. 4. График распределения давления по длине отверстий различных форм:  
1 — цилиндрическое; 2 — цилиндрическое с коническим входом; 3 — коническое; 4 — экспериментальное

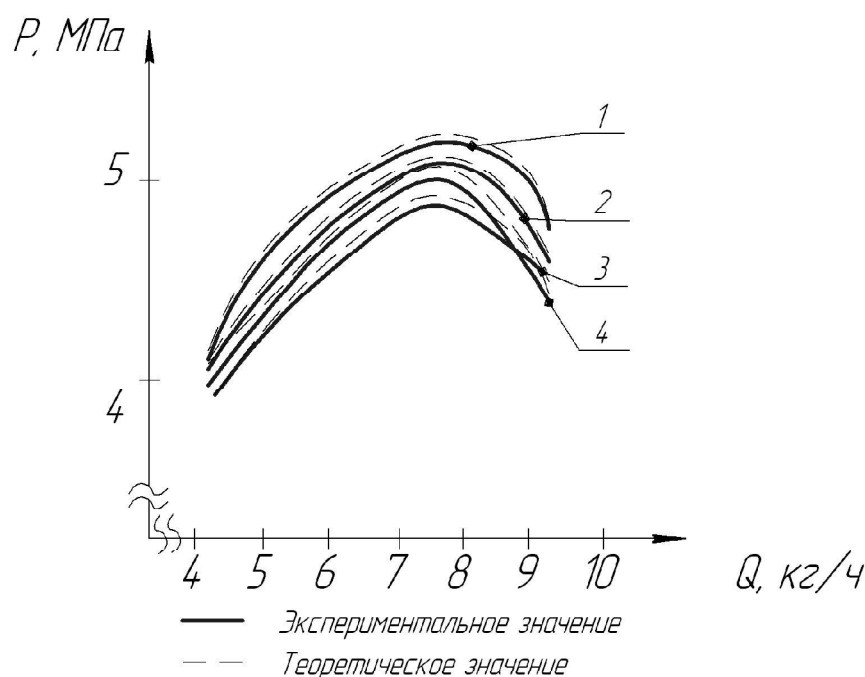


Рис. 5. Зависимость давления от производительности исследуемых форм отверстий:  
1 — цилиндрическое; 2 — экспериментальное; 3 — коническое; 4 — цилиндрическое с коническим входом

Из рис. 5 видно, что при увеличении производительности давление сначала растёт, а затем с некоторого значения  $Q$  уменьшается. Очевидно, что при  $Q = 0$  давление нарастает, а при  $Q = Q_{\max}$  — непрерывно падает.

При использовании конического отверстия достигается максимальная производительность  $Q = 8,12$  кг/ч при минимальном давлении  $P = 4,94$  МПа, но качество полученных гранул хуже по сравнению с экспериментальной формой отверстия  $Q = 8,02$  кг/ч и  $P = 5,02$  МПа.

К гранулированным комбикормам для рыб предъявляются особые требования, связанные со спецификой кормления. Важный этап в производстве гранул — контроль качества.

Полученные гранулы были представлены на анализ по следующим параметрам [5]: влажность, крошимость, степень набухания, плотность, водостойкость. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

#### Результаты качественных показателей полученных гранул

| Показатель                   | Тип отверстия  |                                    |            |                   |
|------------------------------|----------------|------------------------------------|------------|-------------------|
|                              | Цилиндрическое | Цилиндрическое с коническим входом | Коническое | Экспериментальное |
| Диаметр гранул, мм           | 5              | 5                                  | 5          | 5                 |
| Влажность, %                 | 9,2            | 9,3                                | 9,5        | 9,2               |
| Крошимость, %                | 2,1            | 2,4                                | 2,5        | 2,1               |
| Степень набухания, %         | 34             | 34                                 | 45,7       | 34,2              |
| Плотность, г/дм <sup>3</sup> | 1391           | 1235                               | 1188       | 1398              |

Влажность полученных гранул не превышает 13,5 %, что соответствует ГОСТ 13496.3-92 [6]. Крошимость полученных гранул не превышает 8 %, что соответствует ГОСТ 28497-90 [7]. Плотность регламентируется по ГОСТ Р 52337-2005 и характеризуется процентным отношением массы гранул к разнице значения объёмов [8].

Полученные экспериментальные гранулы соответствуют технологическим требованиям и могут находиться в воде не менее 10 минут.

### **Выводы**

1. Давление создаваемое при гранулировании через экспериментальное отверстие составляет 5,02 МПа, что выше, чем у конического на 2 %, но ниже чем у цилиндрического отверстия на 4 %.

2. При использовании конического отверстия, достигается максимальная производительность  $Q = 8,12$  кг/ч при минимальном давлении  $P = 4,94$  МПа, но качество полученных гранул хуже по сравнению с экспериментальной формой отверстия ( $Q = 8,02$  кг/ч и  $P = 5,02$  МПа).

3. При использовании в устройстве экспериментального отверстия затрачиваемая работа больше, чем при использовании конического ( $A = 125,5$  Дж и  $A = 123,5$  Дж соответственно), при этом качество гранул выше.

4. Влажность полученных гранул не превышает 13,5 %, что соответствует ГОСТ 13496.3-92. Крошимость полученных гранул не превышает 8 %, что соответствует ГОСТ 28497-90. Применение экспериментального отверстия (в сравнении с отверстием конической формы) обеспечивает более высокую плотность гранул. Разница составляет 15 %. Полученные экспериментальные гранулы соответствуют технологическим требованиям в условиях аквакультуры и могут находиться в воде не менее 10 минут.

### **Библиографический список**

1. Рудой, Д. В. Обзор и анализ конструкций рабочих органов шнековых пресс-грануляторов / И. А. Хозяев, Д. А. Яковлев // Инженерное обеспечение инновационного развития сельскохозяйственного производства : сб. науч. трудов 6-й Междунар. науч.-практ. конф. — Зерноград, 2011. — С. 50–55.

2. Гячев, Л. В. Основы теории бункеров / Л. В. Гячев. — Новосибирск : Изд-во Новосибир. ун-та, 1992. — 310 с.

3. Гячев, Л. В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах / Л. В. Гячев. — Москва : Машиностроение, 1968. — 184 с.

4. Хозяев, И. А. Разработка рецептуры рыбных комбикормов с заменой дорогостоящих белковых компонентов протеиновыми зелёными концентратами / И. А. Хозяев, Д. А. Яковлев // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2010. — С. 101–105.

5. Рудой, Д. В. Экспериментальные исследования процесса гранулирования кормосмеси на основе протеиновой зелёной пасты / Д. В. Рудой, Д. А. Яковлев, А. Г. Карапетян // Инженерное обеспечение инновационного развития сельскохозяйственного производства : сб. науч. трудов 6-й междунар. науч.-практ. конф. — Зерноград, 2010. — С. 21–28.

6. ГОСТ 13496.3-92. Комбикорма, комбикормовое сырьё. Методы определения влаги / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2011. — 4 с.

7. ГОСТ 28497-90. Комбикорма, сырьё гранулированные. Методы определения крошимости / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2006. — 4 с.

8. ГОСТ Р 52337-2005. Корма, комбикорма, комбикормовое сырьё. Методы определения общей токсичности / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2005. — 14 с.

Материал поступил в редакцию 19.11.2012.

### **References**

1. Rudoy, D.V., Khozyayev, I.A., Yakovlev, D.A. *Obzor i analiz konstruktсий rabochikh organov shnekovykh press-granulyatorov*. [Review and analysis of operative part structures of screw extruder-

granulators.] *Inzhenernoye obespecheniye innovatsionnogo razvitiya selskokhozyaystvennogo proizvodstva: sb. nauch. trudov 6-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Engineering assurance of farming development: Proc. VI Int. Sci.-Pract. Conf.] Zernograd, 2011, pp. 50–55 (in Russian).

2. Gyachev, L.V. *Osnovy teorii bunkerov*. [Bunker theory foundations.] Novosibirsk: Izd-vo Novosib. un-ta, 1992, 310 p. (in Russian).

3. Gyachev, L.V. *Dvizheniye sypuchikh materialov v trubakh i bunkerakh*. [Bulk materials flow in pipes and bunkers.] Moscow: Mashinostroyeniye, 1968, 184 p. (in Russian).

4. Khozyayev, I.A., Yakovlev, D.A. *Razrabotka retseptury rybnykh kombikormov s zamenoy dorogostoyashchikh belkovykh komponentov proteinovymi zelenymi kontsetratami*. [Fish mixed feed formulation with substitution of high-priced albinotic constituents for green protein concentrates.] *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya selskokhozyaystvennogo mashinostroyeniya: mat-ly mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Status and development prospects of agricultural engineering: Proc. Int. Sci.-Pract. Conf.] Rostov-on-Don, 2010, pp. 101–105 (in Russian).

5. Rudoy, D.V., Yakovlev, D.A., Karapetyan, A.G. *Eksperimentalnyye issledovaniya protsessa granulirovaniya kormosmesi na osnove proteinovoy zelenoy pasty*. [Field research of feed mix pelleting on green protein paste basis.] *Inzhenernoye obespecheniye innovatsionnogo razvitiya selskokhozyaystvennogo proizvodstva: sb. nauch. trudov 6-y Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Engineering assurance of farming development: Proc. VI Int. Sci.-Pract. Conf.] Zernograd, 2010, pp. 21–28 (in Russian).

6. *GOST 13496.3-92. Kombikorma, kombikormovoye syrye. Metody opredeleniya vlagi*. [State standard 13496.3-92. Compound feeds, raw material. Methods for determination of moisture.] Federal Agency on Technical Regulation and Metrology. — Moscow: Standartinform, 2011, 4 p. (in Russian).

7. *GOST 28497-90. Kombikorma, syrye granulirovannyye. Metody opredeleniya kroshimosti*. [Granular mixed feeds, granular raw material. Methods of crumbling properties determination.] Federal Agency on Technical Regulation and Metrology. — Moscow: Standartinform, 2006, 4 p. (in Russian).

8. *GOST R 52337-2005. Korma, kombikorma, kombikormovoye syrye. Metody opredeleniya obshchey toksichnosti*. [Feeds, compound feeds, material for compounds feeds. Methods for the determination of common toxicity.] Federal Agency on Technical Regulation and Metrology. — Moscow: Standartinform, 2005, 14 p. (in Russian).

## **EXPERIMENTAL STUDIES ON PELLETIZING DIE HOLE CONFIGURATION IN EXTRUDER FOR FISH FORMULA FEED**

**I. A. Khozyayev, D. V. Rudoy**  
(Don State Technical University)

*The effect of the die hole configuration in the screw extruder on the pellet quality of the fish formula feed is considered. The results of the corresponding theoretical and experimental research are presented. The surface form of the die hole that allow to produce uniform pressure of the pressable material throughout the hole length is equated. The curvilinear equation to determine the capacity under the even pressure distribution in the die hole is obtained. The pressure values along the hole length are determined experimentally, and the dependences of the hole capacity and the length on the pressures are developed. Basic requirements to the pellet quality are connected with the fish feeding specificity: durability, water resistance, crumbling, and density of pellets. The hole configuration is evaluated just according to the final quality of the mixed feed. The obtained results prove the advantages of the developed experimental die hole in comparison with the common forms. Firstly, the application of such hole in the extruder increases energy efficiency of the pressing-through process. Secondly, the pellet quality is improved.*

**Keywords:** high throughput hole, pelletization, mixed feed, die, screw cubing-and-pelleting press.