

# МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ПО КРИТЕРИЮ ОПТИМИЗАЦИИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПИТАНИЯ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РАЦИОНОВ ПИТАНИЯ. МОДЕЛЬ СТИГЛЕРА И ЕЕ РАЗВИТИЕ, ОБЗОР

**Смирнов Сергей Павлович**

Аспирант, Российский технологический университет МИРЭА (г. Москва)  
spvert@mail.ru

**MATHEMATICAL METHODS FOR EVALUATING THE OPTIMAL VARIANT BY THE CRITERION OF OPTIMIZATION OF CONTROLLED NUTRITION INTAKE PARAMETERS IN SOLVING THE PROBLEM OF DIET PLANNING. STIGLER MODEL AND ITS DEVELOPMENT, REVIEW.**

**S. Smirnov**

*Summary.* The paper considers methods for automating the development of food rations for various applications, based on the need for solving practical problems. The article considers the relevance of the task of diets planning to solve the problems of developing diets to treat obesity, to provide a minimum satisfactory diet to handle hunger issue, to evaluate a diet for astronauts and other special consumers. The article considers the creation of the Stigler method for calculating rations (the Stigler model) and its development in the last fifty years. The main approaches to solve the problem of diet planning, the key parameters of the tasks solved by the methods presented, and the identified limitations of the approaches described in the literature are considered. As a result of the analysis, a model describing the biological system of human-environment-nutrition is proposed, which allows sorting out the identified limitations of the method. The key interactions within the system model are considered. The main factors that influence the behavior of system components are considered: meta-genetic, geographical, social, environmental, nutritional value factors, variability, feedback factors, environmental effects, and others. The concept of "health" of the system is introduced, the meaning of "healthy" for each of the components of the biological system is defined. The simulation parameters for calculating the ration within the framework of the proposed model are formulated.

*Keywords:* diet, diet calculation, diet planning, mathematical model, diet model, Stigler model.

*Аннотация.* В работе рассмотрены методы автоматизации разработки рационов питания для различных применений, исходя из потребности в решении практических задач. Рассмотрена актуальность задачи планирования рационов питания для решения задач разработки диет для борьбы с ожирением, обеспечения минимально удовлетворительного рациона для борьбы с голодом, обеспечения специализированного рациона для космонавтов и других особых потребителей. Рассмотрено создание метода Стиглера расчета рационов (модели Стиглера) и ее развитие в последние пятьдесят лет. Рассмотрены основные подходы к решению задачи планирования рациона, ключевые параметры решаемых представленными методами задач и выявленные ограничения описанных в литературе подходов. В результате проведенного анализа, предложена модель, описывающая биологическую систему человек-среда-питание, позволяющая преодолеть выявленные ограничения метода. Рассмотрены ключевые взаимодействия внутри рассматриваемой модели системы. Рассмотрены основные факторы, оказывающие влияние на поведение компонентов системы: мета-генетические, географические, социальные, экологические, факторы пищевой ценности, вариативности, факторы обратной связи, влияния на окружающую среду и другие. Введено понятие «здоровья» системы, определено значение «здоров» для каждого из компонентов биологической системы. Сформулированы параметры моделирования для расчета рациона в рамках предложенной модели.

*Ключевые слова:* рацион питания, расчет рациона питания, диета, математическая модель, модель питания, модель Стиглера.

**З**адача планирования рациона питания существует, по факту, несколько тысячелетий. Ключевыми факторами, явившимися двигателями формирования и развития современного системного подхода к анализу проблемы планирования рациона стали нарастающая потребность в оптимизации затрат на снабжение уве-

личивающейся армии, острая необходимость создания рекомендаций по питанию в критические (кризисные) периоды. Также, начиная с середины двадцатого столетия, в рамках решения задачи по оптимизации стоимости производства продуктов питания и, соответственно, затрат в области животноводства, получило мощное

развитие планирование рациона кормов. Вторая половина двадцатого века привнесла частные, но не менее важные задачи планирования специализированных рационов питания, в том числе для применения в космосе.

В работе [1] рассматривается актуальность задач разработки рационов питания в контексте двух противоположных по смыслу проблем, каждая из которых трагирует, примерно, по миллиарду человек, и решение каждой из которых предполагает использование инструментов планирования рационов питания: неинфекционная пандемия ожирения и проблема массового голода. Экономические и гуманитарные последствия, приведенные в [2][3], однозначно указывают на то, что даже небольшой вклад в вопрос борьбы с ожирением или с голодом, может иметь существенную отдачу. Например, в докладе международной Организацией по Экономическому Сотрудничеству и Развитию (ОЭСР, OECD), опубликованном в октябре 2019 года [2], экономическая эффективность мер по борьбе с ожирением ожидается вплоть до шестикратного объема возврата инвестиций. Это делает задачу создания эффективных инструментов для оказания помощи больным с ожирением не только теоретически и гуманитарно важной, но и экономически обоснованной, что позволяет рассчитывать на практическое внедрение результатов проводимых исследований. В то же время проблема массового голода [3] ставит задачу обеспечения выживания в условиях недостаточной доступности еды и ресурсов для ее получения. Неудивительно, что задача снижения затрат, построения удовлетворительного рациона с минимальной стоимостью отмечена как изначальная практически во всех работах, рассматриваемых далее в настоящем обзоре.

Специфика рационов для исследователей космического пространства, например, представленная в обзорах [4][5], включает в себя необходимость употребления особых рационов до, во время и после полета; учета факторов и ограничений, связанных с употреблением пищи, адаптацией организма к условиям невесомости, изменением метаболизма и потребностей, деминерализацией костей, изменением объема крови, а также ограничений, связанных с техническими возможностями доставки, размещения и хранения питания на борту космического корабля.

Первым исследователем задачи автоматизации планирования меню можно назвать Джорджа Стиглера, в чьей работе в 1945 году [6] была впервые осуществлена попытка решения задачи планирования рациона с использованием расчетных методов. Задача решалась с целью поиска возможностей для минимизации расходов на питание при сохранении питательности рациона, что вполне актуально как для 30х/40х годов прошлого века, так и для наступающих времен мировой эконо-

мики. Стиглер предложил решать задачу методом проб и ошибок с целью, на основе высокоуровневого анализа требуемого количества питательных веществ, содержания питательных веществ в различных блюдах и продуктах, оценки минимума функции стоимости рациона питания, состоящего из  $j$  компонентов с какой-то определенной ценой, содержащий определенный список питательных веществ (нутриентов):

$$\text{Стоимость} = \sum c_j x_j$$

при выполнении условия качества питания, определенного как общая сумма каждого из питательных веществ, входящих в рацион, превышает потребность в соответствующем нутриенте:

$$\sum a_{ij} x_j \geq R_i$$

Где  $a_j$  — количество компонента  $j$ ;  $c_j$  — стоимость за единицу компонента  $j$ ;  $n_{ij}$  — содержание питательного вещества  $i$  в единице компонента  $j$ ;  $R_i$  — общая потребность в питательном веществе  $i$ .

Несмотря на то, что в работе упомянуто более 30 пищевых компонентов, которые необходимо учитывать в рационе, расчеты проведены только по калорийности, содержанию белка, кальция, железа и 5 витаминам в 77 продуктах или полуфабрикатах.

В результате расчетов по 510 рассмотренным комбинациям в работе представлен рацион с минимальной стоимостью в \$39.93 на человека в год (в ценах 1939 года). Состав предложенного рациона, включавший примерно 165 кг пшеничной муки, 50 кг капусты, 10 кг шпината, 150 кг бобовых и 57 банок сухого молока, был, по факту, непригоден для реального употребления человеком. Сравнение полученных результатов с принятыми в те годы минимальными рационами и, даже, рационами для выживания показывает, что последние стоят в несколько раз дороже (Карпентер и Стибелинг, 1936 — \$100 на человека в ценах 1939 года; Стибелинг и Кларк, 1939 — \$94 на человека; Роуз, 1939 — \$115 на человека), что объясняется автором тем, что принятые рационы рассчитаны вручную и, до некоторой степени, учитывают как предпочтения в питании, так и разнообразие блюд при длительном употреблении, что не могло быть учтено разработанной Стиглером моделью.

Однозначным недостатком модели является отсутствие обратной связи, позволяющей оценить приемлемость рациона для употребления, особенно на продолжительном промежутке времени. Неудивительно, что дальнейшее развитие модель Стиглера получила в сле-

дующих работах, посвященных рационам в животноводстве, где упомянутая проблема нивелирована:

- ◆ В работе голландцев Панне и Поппа [7] 1963 года, рассматривается оптимальный состав кормов для крупного рогатого скота, который может быть сформулирован как задача линейного программирования в случае определенности входных ограничений. В соответствующей постановке линейного программирования коэффициенты ограничений не являются постоянными, но могут рассматриваться как стохастические, что позволяет решать задачу методами нелинейного программирования. В качестве примера в работе эта задача решается с помощью одного из методов допустимых направлений Зойтендейка.
- ◆ В работе Чаппела [8] 1974 года рассматривается применение методов линейного программирования для оптимизации затрат в низкомаржинальном бизнесе производства кормов для животных.
- ◆ В работе американского исследователя Глен [9] 1980 года рассматривается эффективная работа откормочной площадки для мясного скота, определяемая весами при покупке и продаже и соответствующими ценами на животных, а также используемой системой кормления. В рамках исследования разработан метод определения оптимальных систем кормления, отвечающих стандартам питательных веществ, рекомендованным Национальным исследовательским советом США. Этот подход включает в себя сначала использование линейного программирования для определения наименее затратных рационов для получения заданного прироста живой массы у животных с известным живым весом. Далее используется динамическое программирование для определения оптимальной последовательности рационов для кормления с целью достижения заданной живой массы из животных известной начальной массы с минимальными затратами, используя наименьшие затраты рационов, определенные из модели линейного программирования. Результаты этой новой модели динамического программирования затем могут быть использованы для определения оптимального сочетания покупного веса, продажного веса и системы кормления.
- ◆ В другой работе Глен [10] 1986 года рассматривается более комплексная задача оптимизации работы интегрированного растениеводческого и животноводческого предприятия, в котором корма, используемые для кормления крупного рогатого скота, выращиваются самим предприятием. В работе разработана модель линейного программирования данного типа предприятий,

при этом коэффициенты кормовой деятельности животных выводятся из модели динамического программирования. Предложенная модель используется для определения наименее затратного способа кормления животных для получения заданного прироста живой массы с использованием рационов, составленных методом линейного программирования из заданного набора кормов.

- ◆ В работе британского исследователя Манфорда [11] 1989 года уже описывается микрокомпьютерная система формирования рационов питания животных методом линейного программирования. Эта система была разработана для использования специалистами по животноводству, часто с небольшим или вообще без опыта владения методами линейного программирования. Система была внедрена на предприятиях комбикормовой промышленности Великобритании.
- ◆ В работе испанских исследователей Пабло Лара и Карлоса Ромеро [12] 1992 года впервые была рассмотрена жесткость параметров питательности рациона и сформулирована гипотеза о представлении их в виде параметров, которые могут достигаться или не достигаться. В результате сформулирована применимая модель многоцелевого (multigoal) программирования, результаты применения которой использовались практически в формировании рациона крупного рогатого скота в Андалусии в Испании.
- ◆ В работе Раша и сотрудников [13] 1994 года представлено практическое применение расширенной модели Стиглера с использованием работок Поппа и Панне [7] для расчета рационов для животных с использованием стохастически заданных параметров кормов. Проведенный экономический анализ результатов внедрения разработанного метода показывает подтвержденную экономию компании Агвэй в объеме \$250,000 ежегодно. Данная работа базируется на ранее проведенных исследованиях той же группы [14–17] в основу которых положено предположение о неточности состава используемых кормов. Для оценки фактического состояния введено понятие неснижаемого порога (margin of safety), определяемого относительно среднего значения и рассчитываемый от половины стандартного отклонения содержания компонента в корме. Например, в [13] определено, что для содержания кукурузы  $8.7 \pm 0.8\%$  неснижаемый порог составляет 8.3%. В дальнейшем, Раш и сотрудники опубликовали в 2007 году работу [18], представляющую практический инструмент сравнения эффективности стохастического и линейного методов программирования для реше-

ния задачи разработки кормов. В рамках работы была разработана рабочая тетрадь Excel, иллюстрирующая линейный и стохастический программные подходы. Электронная таблица была настроена таким образом, чтобы вычисленное значение запаса прочности, согласно запрашиваемой вероятности, было одинаковым как для линейных, так и для стохастических программ. Полученные результаты, по мнению авторов, убедительно доказывают большую гибкость и точность стохастической программы по сравнению с линейной программой.

- ◆ В другой работе Манфорда [19] 1996 года рассмотрены две нелинейные задачи оптимизации, возникающие при составлении кормов для животных, и показано как их можно сформулировать в виде итерационной последовательности задач линейного программирования, и решить, в дальнейшем с помощью специализированного программного обеспечения Ultramix. Первая задача связана с целью удовлетворения потребностей молочной коровы в питательных веществах в том случае, когда потребности в питательных веществах принимаются за функцию рациона кормления. Вторая задача связана с составлением партий кормов для животных, когда содержание питательных веществ в сырье изменчиво и необходимо с заданной вероятностью удовлетворять потребности в питательных веществах. Итерация осуществляется с привязкой спецификаций питательных веществ к значениям, полученным от модуля моделирования, после подходящих правил остановки.
- ◆ В работе Галленти [20] 1997 делается попытка решения задачи моделирования рациона свиней с использованием метода много-критериального анализа.
- ◆ В 1997 году также опубликована работа [21] Митани и Накаяма, в которой предложено использовать для построения рациона подход STOM — многоцелевой метод оптимизации, который позволяет получить высокоточное единичное решение Парето, независимо от формы множества Парето. Вводя уровень аспирации, STOM преобразует задачу многоцелевой оптимизации в эквивалентную единственную объективную задачу. Когда заданное решение Парето не удовлетворяет, процесс поиска повторяется с другим уровнем аспирации, который выбирается, например, с помощью метода автоматического компромисса.
- ◆ В работе Полимено и соавторов [22] 1999 года поставлен вопрос об изменении с течением времени — нелинейно или периодически — параметров потребности потребителя питания. В работе рас-

смотрен метод решения проблемы с интеграцией линейного и динамического программирования, с использованием динамического программирования для выбора оптимальной последовательности изменений живой массы коровы в течение лактации и определения рационов, связанных с этим оптимальным путем; и использованием линейного программирования для оценки каждого потенциального изменения живой массы, происходящего в течение каждого из одиннадцати четырехнедельных периодов в течение лактации.

- ◆ В работе Тозера и Стокса [23] 2001 года рассматривается еще одна сторона планирования рационов на примере рациона крупного рогатого скота: влияние состава рациона и оптимизация затрат, связанных с потерей питательных веществ из-за несбалансированности поступления совокупности нутриентов. В статье рассмотрена возможность использования многоцелевого программирования для снижения экскреции питательных веществ путем включения функций экскреции питательных веществ в структуру рациона питания. В типичной модели формирования рациона (Стиглер) рацион составляется таким образом, чтобы минимизировать затраты и обеспечить достаточное количество питательных веществ для удовлетворения потребностей кормящегося животного типа. Но при этом невозможно обеспечить поступление всех нутриентов в объеме 100% и ни больше ни меньше — какие-то из питательных веществ могут поступать в избытке или недостаточном количестве. Для уменьшения нагрузки питательных веществ, рационы могут быть сформулированы так, чтобы минимизировать затраты, а также выведение неиспользованных нутриентов с помощью многократного объективного программирования. В работе показано, что многоцелевое программирование действительно имеет потенциал для снижения экскреции питательных веществ.
- ◆ В том же 2001 году была опубликована работа [24] Байоля и соавторов, в которой аналогичная проблема решалась в отношении корма свиней с помощью методов многоцелевого программирования.
- ◆ В работе [25] Чжана и Раша (ведущий автор ранее опубликованных работ [13–17]), опубликованной в 2002 году, описано применение модели многоцелевого программирования (МП) к процессу приготовления кормов с целью минимизации дисперсии питательных веществ и минимизации затрат на рацион бройлеров. Модель сформулирована с помощью инструментов Microsoft Excel. В качестве мягких ограничений рассматривались следующие цели: (1) удовлетворение потребностей в питательных веществах; (2) соблюдение

ограничений по ингредиентам; и (3) соответствие соотношениям питательных веществ, включая кальций к фосфору и соотношение аминокислот к Лизину (идеальное соотношение аминокислот). Жесткими ограничениями считались (1) наименее затратный рацион и (2) минимальные различия в питательных веществах для белка, метионина и лизина. Было обнаружено, что (1) Модель МП была более гибкой в обеспечении компромиссного решения, чем традиционная рецептура корма с линейной программой, (2) модель МП была способна одновременно решать несколько конфликтующих задач по сравнению с традиционным подходом линейного программирования, который мог решать только одну задачу, и (3) модель МП давала лучшее компромиссное решение, которое удовлетворяло бы множество лиц, принимающих решения.

- ◆ В 2004 году опубликована новая интересная работа [26] в которой Cadenas и соавторы ставят проблему нестабильности потребления корма каждым конкретным животным даже для самой прекрасно проработанной диеты. Поэтому авторами утверждается, что нет смысла разрабатывать диеты, точно определяющие потребности в питании. Более ценно учитывать нарушения ограничений, т.е. нечеткие ограничения, которые, в свою очередь, могут привести к удешевлению рациона питания. В соответствии с этим сценарием в работе задача моделируется как нечеткое линейное программирование (Fuzzy Linear Programming, FLP), а затем решается с помощью систем поддержки принятия решений (Decision Support System, DSS) для построения рационов крупного рогатого скота), которые авторы специально разработали для этой задачи.
- ◆ В работе [27], опубликованной в 2005 году, Castrodeza и соавторы ставят вопрос о решении задачи обеспечения правильного соотношения между поступающими в рацион. Для решения использована многоцелевая модель дробного программирования, которая лучше адаптирована к текущим потребностям в проектировании кормов, чем традиционно используемая линейная модель Стиглера. Также в работе показано, как задача может быть решена с помощью интерактивного метода многоцелевого программирования с использованием существующего программного обеспечения линейной оптимизации. Что очень интересно, это то, что в 2014 году была опубликована работа [28] совершенно других авторов, с абсолютно таким же названием и abstract как и работа [27].
- ◆ В 2007 году Помар и соавторы предложили свою модификацию метода Стиглера [29], в которой

вводился еще один параметр: штрафная стоимость  $\beta$ , назначаемая в случае недостатка или избытка нутриента (в статье речь шла о фосфоре P) в зависимости от количества избыточного или недостаточного компонента. Практические расчеты и применение результатов на реальных предприятиях обеспечили снижения уровня загрязнения из-за избытка фосфора на 10% при увеличении стоимости рациона свиней не более чем на 1%.

- ◆ В работе 2015 года [30] представлена модель оптимизации рациона кормления симментальских Быков. Модель основана на расчете требований к компонентам рациона с учетом ожидаемого ежедневного прироста массы с использованием методов математического программирования. Результаты работы показали успешную применимость метода, а также необходимость, в дальнейшем, осуществлять ранжирование животных по весовым категориям с целью более тонкой настройки рациона для поддержания максимальных значений прироста веса.
- ◆ В 2016 году в работе [31] рассмотрена модификация модели Стиглера с применением нечеткой логики. По мнению авторов, из-за неопределенности и отсутствия точности в оптимальном рационе питания, выполненном с помощью существующих методов, основанных на линейном программировании, существует необходимость использовать нечеткое линейное программирование для оценки рациона в период ранней лактации. Применение метода нечеткой оптимизации и плавающей цены позволило сформулировать и изменить полностью смешанные диеты с адекватными запасами прочности. Однако, в рамках работы не было разработано полезное программное обеспечение. Работа получила развитие в 2018 году [32] с введением интервального представления цены компонентов рациона, а также факторов неопределенности потребностей. В статье рассмотрена проблема диеты животных с нечеткими требованиями. Во-первых, задача нечеткого линейного программирования преобразована в задачу интервального линейного программирования с помощью  $\alpha$ -разрезов, а затем для решения предложенной задачи используется метод Тан Шаочэн. Как результат, представлен и решен практический пример задачи нечеткого линейного программирования применительно к оптимизированному рациону животных. Результат показал, что неопределенность пищевых потребностей незначительно повлияла на бюджет рациона животных.
- ◆ Дальнейшее развитие модели Стиглера предложено в работе [33] путем перехода к рассмотре-

нию т.н. серых систем — систем, относительно устройства и поведения которых мы имеем лишь ограниченные знания. В предыдущих работах [31–32] с целью получения наименее затратной диеты, в традиционной модели для оптимизации проблемы диеты, цена продуктов питания, потребности в питательных веществах и необходимость потребности в продуктах питания были рассмотрены как серые интервальные числа. Для решения проблемы серой диеты в работе [33] использован подход серого линейного программирования, которое, с учетом гибкости подбора коэффициентов модели, может быть более эффективным для решения задач диеты. В конкретном исследовании был использован только позиционный метод, реализованный в программном обеспечении GAMS. Методологические основы, описанные в данной работе, далее были развиты в теоретической работе [34], посвященной методам серого программирования и принятия решений.

- ◆ Помимо перечисленных выше работ необходимо также упомянуть другие работы, посвященные развитию модели Стиглера в практических приложениях разведения аквакультур [35] и овцеводства [36].

### Обсуждение

**В настоящий момент, модель Стиглера, с учетом ее развития, может быть описана следующим образом:**

#### Множества

F = множество продуктов питания  
N = множество нутриентов

#### Параметры

$a_{ij}$  — количество питательного вещества  $j$  в продукте  $i, \forall i \in F, \forall j \in N$   
 $c_i$  = стоимость одной порции продукта  $i, \forall i \in F$   
 $F_{minj}$  = минимальное требуемое количество порций продукта  $i, \forall i \in F$   
 $F_{maxi}$  = максимально допустимое количество порций продукта  $i, \forall i \in F$   
 $N_{minj}$  = минимальное необходимое количество нутриента  $j, \forall j \in N$   
 $N_{maxj}$  = максимально допустимое количество нутриента  $j, \forall j \in N$

#### Переменные

$x_i$  = количество порций продукта  $i$  для закупки/сервировки,  $\forall i \in F$

**Целевая функция:** минимизировать общую стоимость еды

$$\text{минимизировать } \sum_{i \in F} c_i x_i$$

**Ограничение 1:** Для каждого питательного вещества  $j \in N$ , существует минимальный уровень потребности:

$$\sum_{i \in F} a_{ij} x_i \geq N_{minj}, \forall j \in N$$

**Ограничение 2:** Для каждого питательного вещества  $j \in N$ , существует максимально допустимый уровень потребления:

$$\sum_{i \in F} a_{ij} x_i \leq N_{maxj}, \forall j \in N$$

**Ограничение 3:** Для каждого продукта/блюда  $i \in F$  существует минимально допустимое количество порций:

$$x_i \geq F_{minj}, \forall i \in F$$

**Ограничение 4:** Для каждого продукта/блюда  $i \in F$  существует максимально допустимое количество порций в рационе:

$$x_i \leq F_{maxi}, \forall i \in F$$

Недостатками модели, которые необходимо преодолеть в будущих разрабатываемых алгоритмах расчета рациона, являются:

- ◆ Отсутствие обратной связи потребителя;
- ◆ Отсутствие поддержки факторов вариативности;
- ◆ Существенная вычислительная сложность для решения NP-полной задачи в условии большого количества оптимизируемых переменных.

Для преодоления указанных недостатков предложено рассмотреть проблему питания в контексте биологической системы среда-человек-питание с высокоуровневыми взаимодействиями человек — среда, человек — питание, среда — питание.

Взаимодействие человек-среда включает в себя:

- ◆ Мета-генетические факторы. Генетически определенные, возникшие в результате тысячелетий эволюционного развития, факторы, определяющие степень адаптации организма человека к усвоению той или иной пищи.
- ◆ Географические факторы. Факторы определяют биодоступность той или иной пищи. Идеальной является ситуация, когда мета-генетические и географические факторы совпадают — человек проживает в эндемичном регионе и не испытывает дополнительных сложностей с «чужеродной» едой.

- ◆ Социальные факторы. В первую очередь — образ жизни, объем физической активности и род занятий, которые определяют такие ключевые параметры потребностей человека как энергетическая ценность и пищевая ценность рациона. Также сюда относятся параметры допустимой стоимости рациона, что принципиально для расчета питания для бедных регионов, в том числе, для минимизации последствий голода, являющегося следствием COVID-19.
- ◆ Экологические факторы. В отличие от географических факторов, определяют не биодоступность пищи, а уточняют специфические потребности человека в тех или иных компонентах пищевой ценности. Например, оказывают влияние на потребность или отсутствие таковой в дополнительных дозах витаминов или минералов. Также определяются ограничения человека — например, аллергия на те или иные продукты или сочетания продуктов.
- ◆ Влияние на окружающую среду. Включает в себя как социальные факторы, оказывающие прямое воздействие на качество производимой среды пищи (производство овощей путем активного применения азотсодержащих удобрений в сверхвысоких дозах, например, дает очень высокие урожаи при невысоком качестве продукции и «сжигании» земли, на которой эти овощи росли), так и факторы прямого изменения среды (уничтожение лесов, эрозия почв и т.п.)

Взаимодействие человек-пища включает в себя:

- ◆ Факторы пищевой ценности. Каждый продукт или блюдо имеет свою пищевую и энергетическую ценности, которые, в совокупности, должны удовлетворять потребности человека. Базовые значения параметров пищевой ценности для каждого продукта могут уточняться в результате взаимодействия пища-среда, в том числе, в результате опосредованного влияния взаимодействия человек-среда.
- ◆ Факторы совместимости пищи. Определенные продукты нельзя совмещать в пределах одного блюда, либо в пределах одного приема пищи. Базовые значения параметров могут уточняться в результате воздействия географический факторов взаимодействия пища — среда.
- ◆ Факторы усваиваемости. Определяют совместимость элементов пищевой ценности между собой и с биомеханизмами пищеварения. Морковь, в целом совместима со всеми другими продуктами. Но ее употребление как источника витамина А целесообразно только в составе рациона с достаточным количеством жиров, чтобы обеспечить растворение и доставку витамина А из же-

лудочно-кишечного тракта человека в кровь. Обратные примеры: большое количество клетчатки препятствует всасыванию большинства питательных веществ в организм; витамин С препятствует усвоению витаминов группы В и их лучше разделять по времени приема.

- ◆ Факторы пищевых предпочтений. Какую-то еду человек любит больше, какую-то меньше. Удовлетворение фактора предпочтений снижает вероятность отклонения человека от предложенного рациона (срыва диеты).

Взаимодействие пища — среда включает в себя:

- ◆ Мета-генетические факторы. Определяют, в первую очередь, возможности производства пищи только в естественной, в естественной и искусственной или только искусственной средах. Например, белый трюфель не растет в искусственных условиях. И, наоборот, домашняя курица не выживает в естественной среде.
- ◆ Географические факторы. Определяют биодоступность и биобезопасность пищи в зависимости от региона. Например, белый гриб, являющийся деликатесным в средней полосе РФ, является ядовитым в широтах Краснодарского края и вообще не растет в широтах вечной мерзлоты.
- ◆ Факторы вариативности. Отчасти пересекаются с географическими факторами, определяют вариативность пищевой ценности одного и того же продукта, изготовленного в разных условиях окружающей среды. Здесь необходимо отметить немаловажный параметр сезонности, который влияет на биодоступность пищи, с одной стороны, и уточняет пищевую ценность продукта — с другой (осенняя капуста местного производства отличается по пищевой ценности от капусты местного производства, пролежавшей всю зиму на хранении, и, тем более, отличается от капусты привезенной из Чили). Также к факторам вариативности относятся методы приготовления, транспортировки и подготовки пищи к использованию, оказывающие прямое влияние на пищевую ценность.
- ◆ Влияние на окружающую среду. Влияние на среду производства (или чрезмерного распространения, например, либо недостатка) той или иной пищи. Например, в ряде работ последователей Стиглера изучалась возможность минимизации ущерба окружающей среде в результате животноводческого производства путем оптимизации рациона животных для снижения выброса азот-содержащих соединений.

Таким образом, система состоит из компонентов: среда обитания, человек, его питание, которые взаимодей-

ствуют между собой и оказывают влияние друг на друга. При этом значения переменных, соответствующих вышеперечисленным факторам, изменяются во времени. То есть мы имеем дело с динамической системой, для которой фазовое пространство изменений определяется как совокупность критериев, в общем нечетком случае определяемых как «здоровость» компонентов и системы в целом. Так, здоровая среда — это способность осуществлять воспроизводство и разнообразие. Здоровый человек определяется через физическое здоровье и удовлетворенность. Здоровая пища определяется сбалансированностью и разнообразием пищевой цепочки.

В результате анализа решения практических задач (приведенных в обзоре выше), в контексте сбора требований пользователей, сформулированы следующие параметры для моделирования рациона:

- ◆ Потребность в энергии и пищевых компонентах;
- ◆ Калорийность и пищевая ценность, усваиваемость;
- ◆ Объемы жидкости и порции;
- ◆ Совместимость блюд и продуктов между собой, эндемичность;
- ◆ Пищевые предпочтения и ограничения, вариативность;

- ◆ Обратная связь для подстройки или перерасчета рациона;
- ◆ Особенности упаковки, хранения и употребления.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, подтверждена актуальность проблемы планирования рационов питания, для решения которой необходимо применение математических методов поиска оптимального решения. Выявлены ключевые параметры решаемых описанными в литературе методами задач и выявленные ограничения. Предложена модель, описывающая биологическую систему человек-среда-питание, позволяющая преодолеть выявленные ограничения метода Стиглера. Рассмотрены ключевые взаимодействия внутри рассматриваемой модели системы и основные факторы, оказывающие влияние на поведение компонентов системы. Введено понятие «здоровья» системы, определено значение «здоров» для каждого из ее компонентов. Сформулированы параметры моделирования для расчета рациона в рамках предложенной модели, ключевым из которых является обратная связь для подстройки или перерасчета рациона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов С.П. (2020). Иерархическое представление меню питания для целей построения оптимального варианта по критерию оптимизации контролируемых параметров питания в многокритериальном случае. / Современные проблемы экологии: доклады XXIV междунар. науч.-практич. конференции под общ. ред. В. М. Панарина. — Тула: Инновационные технологии, 2020, стр. 70–76.
2. OECD (2019), *The Heavy Burden of Obesity: The Economics of Prevention*, OECD Health Policy Studies, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/67450d67-en>.
3. WFP Chief warns of hunger pandemic as COVID-19 spreads (Statement to UN Security Council) [Электронный ресурс]. Режим доступа <https://www.wfp.org/news/wfp-chief-warns-hunger-pandemic-covid-19-spreads-statement-un-security-council>. Дата визита — 20.05.2020.
4. Smith SM, Davis-Street J, Rice BL, Lane HW. Nutrition in space. *Nutr Today*. 1997;32(1):6–12. doi:10.1097/00017285-199701000-00002
5. Lane HW, Feedback DL. Water and energy dietary requirements and endocrinology of human space flight. *Nutrition*. 2002;18(10):820-828. doi:10.1016/s0899-9007(02)00936-x
6. Stigler G.J. (1945). The cost of subsistence. / *J. Farm Econom.*, 27: 303–314. DOI: 10.2307/1231810
7. Panne C., Popp W. (1963). Minimum-cost cattle feed under probabilistic protein constraints. *Manage. Sci.*, 9: 405–430. DOI: 10.1287/mnsc.9.3.405
8. Chappel A.E. (1974). Linear programming cuts costs in production of animal feeds. *Operat. Res. Q.*, 25: 19–26. DOI: 10.1057/jors.1974.3
9. Glen J. J. (1980). A mathematical programming approach to beef feedlot optimization. / *Management Science*, 26(5), 524–535. ISSN: 1526–5501 DOI: 10.1287/mnsc.26.5.524
10. Glen J.J. (1986). A linear programming model for an integrated crop and intensive beef production enterprise. *J. Operat. Res. Society*, 37: 487–494. DOI: 10.1057/jors.1986.83
11. Munford A.G. (1989). A microcomputer system for formulating animal diets which may involve liquid raw materials. *Eur. J. Operat. Res.*, 41: 270–276. DOI: 10.1016/0377-2217(89)90248-8
12. Lara, P. and C. Romero (1992). An interactive multigoal programming model for determining livestock rations: An application to dairy cows in Andalusia, Spain. *J. Operat. Res. Society*, 43: 945–953. DOI: 10.1057/jors.1992.145
13. Roush W.B., Stock R. H., Cravener T. L., D'Alfonso T.H. (1994). Using chance-constrained programming for animal feed formulation at Agway / *Interfaces*, 24: 53–58. DOI: 10.1287/inte.24.2.53
14. D'Alfonso T.H., Roush W. B. (1990). A comparison of stochastic programming, linear programming and linear programming with a margin of safety for least-cost poultry rations. / *Poultry science Vol 69 (Supplement 1)*, p.39
15. D'Alfonso T.H., Roush W. B., Cravener T. L. (1991). A feeding trial comparing of stochastic programming and linear programming with a margin of safety for least-cost poultry rations. / *Poultry science Vol 70 (Supplement 1)*, p.32



16. D'Alfonso T.H., Roush W. B., Ventura J. A. (1992). Least-cost poultry rations with nutrient variability: a comparison of linear programming with a margin of safety and stochastic programming models. / Poultry science Vol 71 № 2, p.255–262
17. Roush W.B., Cravener T. L., D'Alfonso T.H. (1992). Effects of least-cost rations formulated with stochastic programming or linear programming with a margin of safety on laying hen production / Poultry science Vol 71 (Supplement 1), p. 174.
18. Roush W., Purswell J., Branton S. (2007). An Adjustable Nutrient Margin of Safety Comparison Using Linear and Stochastic Programming in an Excel Spreadsheet. Journal of Applied Poultry Research — J APPL POULTRY RES. 16. 514–520. DOI: 10.3382/japr.2007–00033.
19. Munford, A.G. (1996). The use of iterative linear programming in practical applications of animal diet formulation. / Math. Comput. Simulat., 42: 255–261. DOI: 10.1016/0378–4754(95)00115–8
20. Gallenti G. (1997). The use of computer for the analysis of input demand in farm management: A multicriteria approach to the diet problem. / Proceedings of the 1st European Conference for Information Technology in Agriculture, (ITA' 97).
21. Mitani, K. and H. Nakayama, (1997). A multiobjective diet planning support system using the satisficing trade-off method. J. Multi-Criteria Decis. Anal., 6: 131–139. DOI: 10.1002/(SICI)1099–1360(199705)6:3<131::AID-MCDA129>3.0.CO;2-S
22. Polimeno F., Rehman T., Neal H., Yates M (1999). Integrating the use of Linear and Dynamic Programming Methods for Dairy Cow Diet Formulation. / J. Operat. Res. Society, 50: 931–942. DOI: 10.2307/3010190
23. Tozer, P.R. and J. R. Stokes, (2001). A multi-objective programming approach to feed ration balancing and nutrient management. / Agric. Syst., 67: 201–215. DOI: 10.1016/S0308–521X(00)00056–1
24. Jean dit Bailleul P., Rivest J., Dubeau F., Pomar C. (2001). Reducing nitrogen excretion in pigs by modifying the traditional least-cost formulation algorithm. Livestock Product. Sci., 72: 199–211. DOI: 10.1016/S0301–6226(01)00224-X
25. Zhang, F. and W. B. Roush, (2002). Multiple-objective (goal) programming model for feed formulation: An example for reducing nutrient variation. Poultry Sci., 81: 182–192. DOI: 10.1093/ps/81.2.182
26. Cadenas, J.M., D. A. Pelta, H. R. Pelta and J. L. Verdegay, (2004). Application of Fuzzy optimization to diet problems in Argentinean farms. Eur. J. Operat. Res., 158: 218–228. DOI: 10.1016/S0377–2217(03)00356–4
27. Castrodeza, C., P. Lara and T. Pena, 2005. Multicriteria fractional model for feed formulation: Economic, nutritional and environmental criteria. / Agric. Syst., 86: 76–96. DOI: 10.1016/j.agsy.2004.08.004
28. Radu Burlacu, Cosmin Nitu (2014). Multicriteria fractional model for feed formulation: Economic, nutritional and environmental criteria. / Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies, 2014, 47 (2)
29. Pomar, C., F. Dubeau, M. P. Letourneau-Montminy, C. Boucher and P. O. Julien, (2007). Reducing phosphorus concentration in pig diets by adding an environmental objective to the traditional feed formulation algorithm. Livestock Sci., 111: 16–27. DOI: 10.1016/j.livsci.2006.11.011
30. Brus M, Pazek K, Rozman C, Janzekovic M (2015). The Feeding Ration Optimisation Model for Simental Bulls / Chapter 29 in DAAAM International Scientific Book 2015, pp.337–344, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN978–3–902734–05–1, ISSN1726–9687, Vienna, Austria DOI: 10.2507/daaam.scibook.2015.29
31. Nasser H., Darvishi D. (2016). Animal Diet Formulation with Floating Price. / Iranian Journal of Optimization. 8. 1034–1049.
32. Nasser H., Darvishi D. (2018). Planning livestock diet with fuzzy requirements. / Journal of Information and Optimization Sciences. 1–19. DOI: 10.1080/02522667.2017.1369654.
33. Darvishi D., Liu S., Nasser H. (2018). A new approach in animal diet by grey system theory. Grey Systems: Theory and Application. 00–00. DOI: 10.1108/GS-11–2017–0040.
34. Darvishi D. & Forrest J. & Liu S. (2019). A comparative analysis of grey ranking approaches. Grey Systems: Theory and Application. ahead-of-print. DOI: 10.1108/GS-05–2019–0014.
35. Shaftel, T.L. and B. M. Wilson, (1990). A mixed-integer linear programming decision model for aquaculture. Managerial Decis. Econom., 11: 31–38. DOI: 10.1002/mde.4090110105
36. Zioganas C. (1981). Least-cost feed rations for sheep by linear programming. Ph. D. Thesis, Wye College–University of London.

© Смирнов Сергей Павлович (spvert@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»