

# МЕТОДИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ И ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНОГО МЕТОДА ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ЗЕРНА

## METHODOLOGY FOR MULTICRITERIA ASSESSMENT AND SELECTION OF AN EFFECTIVE METHOD OF GRAIN DISINFECTATION

**А.И. ПАХОМОВ**, д.т.н.

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия, AlivPx@mail.ru

**A.I. PANOMOV**, DSc in Engineering

Federal State Scientific Establishment «Agrarian Scientific Center “Donskoy”», Zernograd, Russia, AlivPx@mail.ru

Качественная продукция растениеводства не должна содержать чужеродных и опасных веществ как естественного, так и искусственного происхождения. К естественным контаминантам относятся паразитные микрогрибки и бактерии, к искусственным – химические соединения в виде пестицидов и удобрений. Пестициды, в той или иной мере решая задачу обеззараживания, сами являются опасными ядохимикатами. Кроме того, их постоянное применение ведет к мутациям паразитных микроорганизмов в сторону чрезвычайно устойчивых видов, т.е. проблеме резистентности. Во избежание этих недостатков существуют альтернативные методы обеззараживания, основанные на различных видах электромагнитной энергии. Разнообразие подобных методов выдвигает задачу их объективной оценки, в том числе, в сравнении с химическим протравливанием. Это определило цель исследования, состоящую в разработке научно-обоснованной методики многокритериальной оценки и выбора эффективного метода обеззараживания зерна. Объектом исследования послужили химические и электрофизические методы обеззараживания, предметом исследования – закономерности выбора лучшего из них. Новизну составили этапы методики: структурирование пространства признаков, составление иерархической схемы групп признаков, определение весовых коэффициентов и оценок исходя из специфики сельскохозяйственного производства. В математическом инструментарии применен метод максимума суммы взвешенных оценок, по которому рассчитывается интегральный критерий  $F$ . Методика пригодна для любых методов обеззараживания с любым числом признаков и альтернатив. Дан пример ее применения для четырех альтернатив: химическое протравливание, СВЧ-обеззараживание, УФ-обеззараживание, обеззараживание низкочастотным магнитным полем (НМП). При этом установлено преимущество метода НМП, получившего максимальную интегральную оценку  $F = F_{\max} = 0,864$ . В заключение сделаны выводы о достоверности методики, возможности ее применения в расширенном пространстве признаков, что даст уточненную оценку.

*Ключевые слова:* обеззараживание, пестициды, резистентность, электрофизические методы, многокритериальный анализ, методика, структурирование признаков, иерархическая схема, интегральный критерий, низкочастотное магнитное поле (НМП).

High-quality crop products should not contain extraneous and dangerous substances of both natural and artificial origin. Natural contaminants include parasitic micro-fungi and bacteria; artificial ones include chemical compounds in the form of pesticides and fertilizers. Pesticides, in one way or another solving the problem of disinfection, are themselves very dangerous. In addition, their constant use leads to mutations of parasitic microorganisms in the direction of extremely stable species, i.e. the problem of resistance. To avoid these shortcomings, there are alternative disinfection methods based on various types of electromagnetic energy. A variety of such methods raises the purpose of their objective assessment, including in comparison with chemical etching. This determined the purpose of the study, which consists in developing a scientifically based methodology for multicriteria assessment and choosing an effective method of grain disinfection. The object of the study was the chemical and electrophysical methods of disinfection, the subject of the study – the patterns of choosing the best of them. The novelty was made up of the stages of the methodology: structuring the attribute space, compiling a hierarchical diagram of groups of attributes, determining weighting factors and estimates based on the specifics of agricultural production. In mathematical tools, the maximum sum of weighted estimates method is used, according to which the integral criterion  $F$  is calculated. The technique is suitable for any disinfection methods with any number of signs and alternatives. An example of its application for four alternatives is given: chemical etching, microwave disinfection, SHV disinfection, disinfection with a low-frequency magnetic field (LMF). At the same time, the advantage of the LMF method was established, which received the maximum integral estimate  $F = F_{\max} = 0,864$ . The conclusions are drawn about the reliability of the methodology, the possibility of its application in an expanded space of signs, which gives an updated assessment.

*Keywords:* disinfection, pesticides, resistance, electrophysical methods, multicriteria analysis, methodology, structuring of characteristics, hierarchical scheme, integral criterion, low-frequency magnetic field (LMF).

Наше естественное преимущество (я думаю, что все с этим согласятся) – это огромные природные возможности, их нужно использовать для наращивания производства именно экологически чистой продукции. Поручаю Правительству создать защищённый бренд отечественной чистой, «зелёной» продукции, он должен подтверждать, что в её производстве используются только безопасные для здоровья человека технологии, заслужить гарантии высокого качества и на внутреннем, и на внешнем рынке.

Послание Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации. 20 февраля 2019 г.

## Введение

В настоящее время продукция растениеводства выращивается на фоне огромного количества химикатов. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов разрешает к применению на территории РФ порядка 650 видов химических средств защиты растений и свыше 1100 агрохимикатов. Это наибольшее количество пестицидов, разрешенных к использованию в России за последнее десятилетие. При этом 21 из разрешенных препаратов относится к 1-му классу опасности (чрезвычайно опасные), 101 препарат – ко 2-му классу опасности для человека и теплокровных (высокоопасные) [2].

Масштабы химизации растениеводства характеризуются тем, что ежегодно 12–14 тыс. тонн пестицидов ввозятся из-за рубежа, еще 16–18 тыс. тонн производятся на 40 химических заводах на основе импортных компонентов [2]. Сложившаяся ситуация никак не способствует получению «зеленой» продукции и безопасности агротехнологий – задачам, по-

ставленным в послании Президента РФ Федеральному Собранию РФ 20 февраля 2019 г. [1].

Массовое и регулярное применение ядохимикатов является одной из причин угрожающего роста устойчивых штаммов фитопатогенов, что подтверждается данными международного исследования и подробнее будет рассмотрено ниже. Из-за нарастающей проблемы резистентности, кардинального решения которой пока не найдено, химическое протравливание едва ли имеет отдаленные перспективы.

Альтернативу ядохимикатам составляют электрофизические методы, на базе которых возможно построение «зеленых» технологий. В настоящее время накоплено достаточно научных данных, подтверждающих обеззараживающий эффект таких методов, как сверхвысокочастотное (СВЧ) облучение, лазерное воздействие, ультрафиолетовое (УФ) облучение, магнитное поле и других, включая их комбинации (рис. 1). Практическая задача состоит в том, чтобы, всесторонне оценив эти методы, выбрать лучшие из них для эффективного внедрения в АПК.

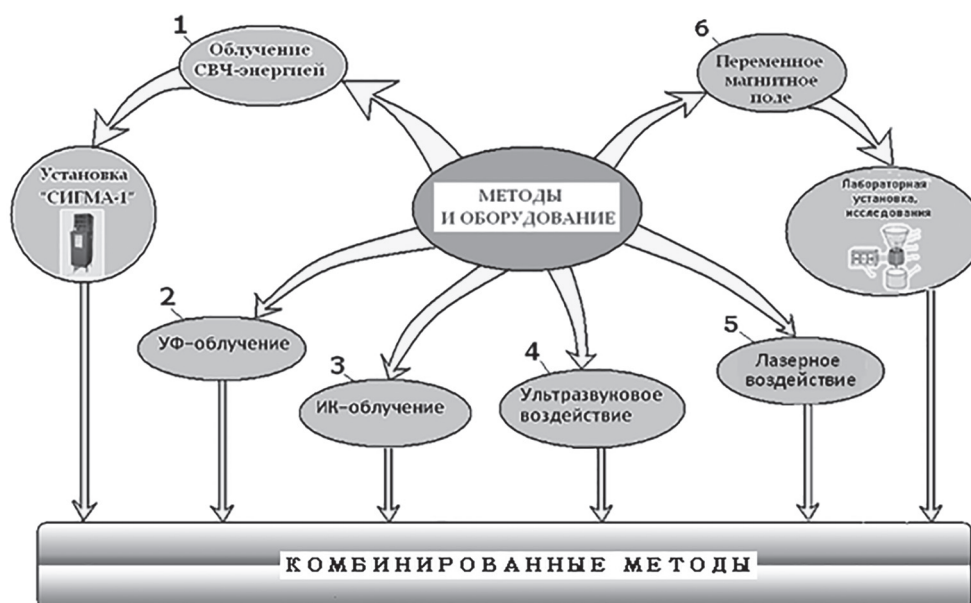


Рис. 1. Электрофизические методы обеззараживания зерна:

1, 2, 6 – методы, прошедшие исследования в подразделении СКНИИМЭСХ «АНЦ «Донской»

Каждый из упомянутых методов характеризуются своими особенностями как по сути протекающих процессов, так и в части технической реализации. Так, методы 1–6 (рис. 1) отличаются по энергозатратам, имеют разный обеззараживающий эффект, требуют оборудования разной сложности, генерируют внешние излучения разной степени опасности. Естественно, это необходимо учитывать при разработке новых агротехнологий, которые, безусловно, должны базироваться на лучших методах – эффективных и безопасных.

В литературе можно встретить упрощенное сравнение объектов, методов, технологий, когда речь идет об одном-двух показателях (признаках), на основании чего делается вывод о преимуществах того или иного варианта. Такой подход вполне допустим, например, для оценки СВЧ-оборудования [3], поскольку сравнение производится «внутри» одного и того же метода с близкими характеристиками активного воздействия. Но в более сложных случаях нужен иной, системный, подход, учитывающий всю совокупность признаков конкретного технологического процесса, реализуемого в условиях АПК при характерных особенностях активного воздействия, а также «важность», значимость этих признаков по конечному результату, являющемуся в данном случае комплексным, включающим, в том числе, влияние на окружающую среду.

Необходимость системного подхода и интегральной оценки объясняется следующим. Теоретически можно представить себе некую технологию, превосходящую все остальные по всем показателям, что однозначно указывает на лучший вариант. На практике, однако, этого не наблюдается, и вследствие уже упомянутых различий одна технология оказывается лучше по одним признакам, другая – по другим. Тем самым возникает задача многокритериальной оценки и выбора эффективного (наилучшего) варианта.

### Цель исследования

Разработка научно-обоснованной методики многокритериальной оценки и выбор эффективного метода обеззараживания зерна.

### Материалы и методы

Исходя из цели, объектом исследования послужили методы обеззараживания, предметом – закономерности выбора лучшего из них.

Достижению поставленной цели служит разработанная методика, состоящая из нескольких последовательных этапов.

На первом этапе выполняется структурирование пространства признаков. Для многопризнаковых объектов, к которым относятся методы обеззараживания, это пространство чаще всего разнородно и содержит разноплановые показатели. В данном случае существуют показатели с разным смыслом и единицами измерений, как, например, экономический эффект в рублях и обеззараживающий эффект в процентах. Таким образом, необходимо структурирование, и его предполагается выполнить в виде следующих групп:

- 1) эксплуатационные показатели: надежность, энергопотребление, количество обслуживающего персонала, ТО и ТР и другие;
- 2) экономические показатели: капитальные вложения, эксплуатационные затраты, срок окупаемости капитальных затрат, чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- 3) качественно-синергетические показатели: степень снижения всех видов инфекций в зерне, безопасность для окружающей среды и человека, эффект стимуляции семян и повышения урожайности.

Очевидно, что теперь во всех указанных группах находятся однородные показатели, пригодные для математического анализа в качестве критериев сравнения. Анализ такого рода может быть выполнен, например, методом МАУТ, заключающимся во введении обобщенного критерия, используемого для сравнения вариантов и определения лучшего из них, что обычно задается сверткой многих частных критериев в виде взвешенной суммы [4].

В самом общем виде задача многокритериального выбора формулируется следующим образом [4]. Имеется совокупность вариантов (альтернатив)  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , оцениваемых по критериям  $F_i$ , где  $i = 1, n$ . Каждый критерий  $F_i$ , называемый частным, имеет весовой коэффициент (вес)  $w_i$ , отражающий его значимость для рассматриваемого объекта или процесса и задаваемый в соответствии с числовой или вербальной шкалой. В результате решения задачи должен быть найден один или несколько предпочтительных вариантов.

Весовые коэффициенты образуют множество  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ . Чтобы определить его составляющие  $w_i$ , необходимо проанализировать информацию о влиянии  $F_i$  на исследуе-

мый процесс в совокупности  $X$ . Такой информацией в данном случае выступают некоторые экологические требования, результаты НИР, данные фитосанитарного анализа, характеристики оборудования, практические результаты в АПК. Большую роль при этом играет выбор приоритетов, о чем речь пойдет ниже. Сумма всех весовых коэффициентов в числовой оценке должна равняться некоторой константе, чаще всего единице [5]:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (1)$$

Уже упомянутым методом решения многокритериальной задачи является сведение ее к однокритериальной путем введения интегрального критерия  $F$ , называемого также суперкритерием. Последний зависит от частных критериев  $F = f(F_1, F_2, \dots, F_n)$  и рассчитывается по разным математическим методикам, среди которых можно выделить следующие [4, 5].

Метод максимума суммы взвешенных оценок:

$$F = \sum_{i=1}^n w_i F_i(x_j) \rightarrow \max(x_j \in X). \quad (2)$$

Согласно (2), наилучшей будет альтернатива с максимальной суммой взвешенных оценок по всем частным критериям.

Метод минимума суммы отклонений от «идеальной точки»:

$$F = \sum_{i=1}^n w_i (\tilde{F}_i - F_i(x_j)) \rightarrow \min(x_j \in X). \quad (3)$$

Под «идеальной точкой» подразумеваются максимальные значения всех частных критериев. Согласно (3), наилучшей будет альтернатива с минимальным отклонением взвешенных оценок от этой точки. Очевидно, что решение задачи методами (2) и (3) должно совпадать.

Метод минимума суммы квадратов отклонений от «идеальной точки»:

$$F = \sum_{i=1}^n w_i (\tilde{F}_i - F_i(x_j))^2 \rightarrow \min(x_j \in X). \quad (4)$$

Метод (4) имеет некоторое преимущество в том, что позволяет «отсеять» альтернативы со значительными отклонениями частных критериев от максимальных значений. Подобные отклонения, возведенные в квадрат, резко ухудшают значение интегрального критерия, чем и обусловлен «отсев».

Существуют и другие математические методы, рассмотрение которых выходит за рамки настоящей статьи, но анализ показывает, что наибольшей наглядностью и физическим смыслом обладает метод максимума суммы взвешенных оценок. По суперкритерию  $F$ , рассчитываемому согласно (2), он позволяет выбрать лучший вариант, оценить разницу между ним и ближайшими альтернативами и выделить худший вариант, нецелесообразный для дальнейшего использования.

Корректность решения многокритериальной задачи во многом зависит от информации по объектам сравнения. К сожалению, для методов обеззараживания полная информация по эксплуатационным, экономическим и качественно-синергетическим показателям отсутствует. Это проявляется, например, в том, что в характеристиках оборудования не приводятся данные о его надежности, обеззараживающем эффекте и т.п. [3]. В группе экономических показателей точно не известен ЧДД, зависящий от ценовой политики государства, вида выращиваемой культуры, состояния сельхозугодий, погодных-климатических условий и других нестабильных во времени факторов.

В условиях нехватки информации часть признаков остается неопределенной, нет надежных оснований для присвоения им обоснованных весов. В этом случае речь может идти о некоторой приближенной оценке при сужении исходного признакового пространства [4]. Такой подход требует учета приоритета признаков с тем, чтобы наиболее важные из них не были утеряны в ограниченном признаковом пространстве, повлияв тем самым отрицательно на решение задачи. С этой целью составляется иерархическая схема.

Таким образом, второй этап методики заключается в составлении иерархической схемы для предложенных групп признаков. Здесь следует учесть специфику решаемой задачи, широкий спектр проблем, затрагиваемых при промышленном применении обеззараживающих агротехнологий, в частности, их влияние на экологию и человека. С этой точки зрения верхний уровень иерархии, безусловно, должен принадлежать качественно-синергетическим показателям, поскольку именно они имеют наибольшее народнохозяйственное значение, связанное со здоровьем нации, сохранением экологии страны-производителя, перспективами развития растениеводства как экспортной



отрасли. Приоритет безопасных агротехнологий и экологически чистой продукции АПК подчеркивается в Послании Президента РФ Федеральному Собранию РФ [1].

С учетом сказанного разработана схема иерархии, представленная на рис. 2. Все пространство признаков разделено на три уровня. На первом уровне расположены качественно-синергетические признаки, на втором – экономические, на третьем – эксплуатационные. Следует заметить, что, хотя эксплуатационные признаки условно помещены на третий уровень, их фактически можно считать одноуровневыми со вторым, так как надежность и другие показатели этой группы, имея самостоятельное значение, влияют на ЧДД через эксплуатационные затраты и величину технологического ущерба в случае выхода оборудования из строя.

Основное назначение схемы на рис. 2 – регламентировать верхний уровень иерархии, признаки которого не подлежат сокращению. В дальнейшем этим признакам – частным критериям – необходимо дать вес, что и является содержанием следующего этапа.

Третий этап методики заключается в определении весовых коэффициентов критериев первого уровня, принадлежавших качественно-синергетической группе. Основой для этого

служит научно-практическая информация, упомянутая выше. Принимая ее во внимание, предлагается следующее распределение весовых коэффициентов.

Наибольший вес – 0,35 – придан критерию безопасности для окружающей среды и человека. Технология, несущая токсикологическую опасность или иную угрозу почвенно-природному комплексу, потребителям и производителям сельскохозяйственной продукции, не может быть признана приоритетной. И, напротив, безопасная технология, относящаяся к «зеленым», должна получать высокую интегральную оценку.

С безопасностью связана сфера применения технологий. Так, химическое протравливание допустимо только в предпосевных операциях, электрофизические методы могут использоваться как в предпосевных, так и послеуборочных технологиях. Чтобы не увеличивать общее число критериев, показатель сферы применения учтен в критерии безопасности как повышающий его вес.

Также высокий вес 0,3 задан критерию снижения зараженности зерна. Настоящий критерий отражает суммарную степень уменьшения грибковых и бактериальных инфекций в материале. Его важность объясняется следующим. Если начальный уровень инфекций в семенах



Рис. 2. Иерархическая схема признаков

не будет резко понижен предпосевной обработкой, всходы, развивающиеся растения, а затем и конечный продукт – зерно – получают неизбежную контаминацию опасными фитопатогенами. Самыми опасными среди них считаются грибки (плесени) семейств *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Claviceps* и др., продуцирующие в процессе своей жизнедеятельности высокотоксичные органические вещества – микотоксины. Попадая даже в микроколичествах в организм человека в хлебопродуктах и сельскохозяйственных животных через фураж, микотоксины поражают печень, почки, оказывают мутагенное и некротическое действия.

Микотоксины весьма устойчивы к термическим и другим видам обработки. Наиболее опасными среди них являются афлатоксины, выделяемые грибами *Aspergillus*, которые по классификации ВОЗ относятся к канцерогенам и подлежат строгому контролю во многих странах мира. Согласно действующим в РФ нормам «Технического регламента Таможенного Союза ТРТС 015-2011», содержание афлатоксина в зерне, поставляемом на пищевые цели, не должно превышать 0,005 мг/кг, в фуражном зерне – не более 0,02 мг/кг.

Чтобы добиться столь низкой контаминации, важно обеспечить не только эффективное подавление грибков-продуцентов, но и равномерное обеззараживание по всему объему материала. В противном случае в некоторых зонах материала возможно выживание отдельных паразитов, которые затем быстро размножатся с указанными выше негативными последствиями. Исходя из этого введен критерий равномерности обработки и выбран его вес 0,25.

Что касается стимуляции семян и повышения урожайности, этот эффект следует рассматривать как дополнительный, синергетический,

сопутствующий основному эффекту обеззараживания. Дело в том, что собранный урожай может оказаться совершенно непригодным для продовольственных и фуражных целей из-за содержания в нем микотоксинов. Поэтому показатель урожайности не имеет той значимости, что предыдущие, и вес данному критерию задан как 0,1.

В сумме все весовые коэффициенты равны единице, что соответствует выражению (1). Нетрудно заметить, что суммарный вес критериев снижения зараженности и равномерности обработки превышает сумму всех остальных. Тем самым учитывается основное назначение методов обеззараживания и качество самого процесса.

На четвертом этапе следует определиться с числом альтернатив – сравниваемых методов обеззараживания. Учитывая, что для каждой альтернативы потребуется обоснованная оценка – вербальная или числовая, имеет смысл ограничить их число теми, где имеется достоверная информация, подтвержденная научными исследованиями и практическим опытом.

### Результаты и обсуждение

В качестве примера рассмотрим четыре альтернативы, выбранные по вышеуказанным соображениям:

- 1) химическое протравливание;
- 2) СВЧ-обеззараживание;
- 3) УФ-обеззараживание;
- 4) обеззараживание низкочастотным магнитным полем (НМП).

Методы 2–4 прошли исследования в лаборатории биоэнерготехнологий подразделения СКНИИМЭСХ «АНЦ «Донской» [6–11] с разработкой инновационных установок, показанных на рис. 3, б–г. Для способа 1 выпускается

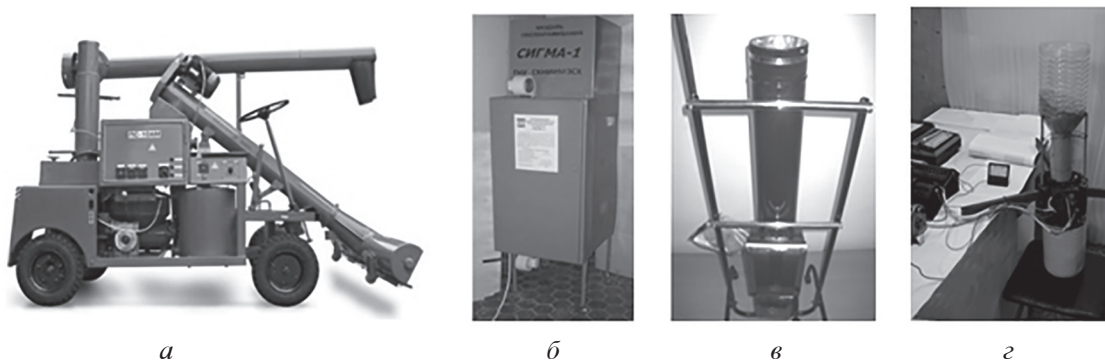


Рис. 3. Оборудование для обеззараживания зерна:

а – протравливатель семян ПС-10; б – СВЧ-установка «СИГМА-1»; в – электрооптический преобразователь ЭОП-10; г – установка для магнитного обеззараживания зерна НМП

промышленный протравливатель семян ПС-10 (рис. 3, а) и накоплен большой практический опыт в АПК.

Оценка выбранных альтернатив подразумевает шкалу уровней. Для приближенной оценки достаточно трех уровней: низкий, средний, высокий, или в долях единицы 0,33; 0,66; 1. Эти оценки должны быть выставлены по каждому критерию для каждого из 4 сравниваемых методов, что требует соответствующих обоснований. Ниже приводятся такие обоснования для критериев 1-го уровня иерархической схемы по рис. 2.

#### *Критерий безопасности*

Широко применяемые в растениеводстве системные фунгициды относятся ко второму классу опасности, т.е. представляют собой сильнотоксичные вещества для человека и теплокровных. Уничтожая грибковые инфекции на семенах, эти химикаты несут токсикологическую опасность обслуживающему персоналу, а также любым живым организмам, включая полезную микрофлору почвы. Учитывая общность клеточного метаболизма и трансмембранных процессов, вряд ли возможно даже в перспективе создание препаратов, избирательно действующих только на фитопатогены и совершенно не затрагивающих другие живые организмы. Исходя из этого безопасность химических методов следует оценить как низкую с числовой оценкой 0,33.

Методы СВЧ, УФ и НМП имеют принципиально иной механизм обеззараживания, не создающий токсикологических последствий. Речь может идти только об их отрицательном влиянии на обслуживающий персонал из-за утечек электромагнитной энергии. Для предотвращения подобных утечек в установке «СИГМА-1» применено двойное экранирование СВЧ-излучателей [6], а в установке ЭОП-10 имеется защитный кожух-труба для УФ-ламп [8]. Тем самым минимизируется опасность выхода рабочих излучений за пределы установок, но абсолютно безопасными эти воздействия считать нельзя, ведь не исключено случайное повреждение кожуха-экрана в процессе эксплуатации. В отличие от этого метод НМП полностью безопасен по своим физическим характеристикам и не требует никаких дополнительных мер экранировки [9–11]. Соответственно, оценки безопасности этих методов равны: СВЧ и УФ – 0,66; НМП – 1.

#### *Критерий снижения суммарной зараженности*

Наиболее сложно оценить по данному критерию химическое протравливание. Это связано с тем, что обеззараживающие свойства протравителей не есть величина постоянная, они зависят от резистентности микроорганизмов-вредителей, прогрессирующей по мере применения того или иного химиката. Известны *стрептомициновый* и *пенициллиновый* тип формирования устойчивости, что определяется характером мутаций микроорганизмов, но в любом случае ведет к появлению резистентных штаммов. На практике это означает, что самые эффективные противогрибковые препараты – системные фунгициды бензимидазольной группы (беномил, фундазол, тиофанат-метил и др.), теряют свою эффективность за несколько лет. Причем резистентность вырабатывается по отношению ко всему классу протравителей, который может содержать десятки наименований.

Проблему резистентности нельзя решить чередованием протравителей и их смесей – это лишь задерживает, но не устраняет накопление резистентных штаммов. Процесс чреват выработкой «супергрибков»-мутантов, о чем сообщается в журнале *Science* [12]. Авторы международного исследования [12] отмечают, что если в 1969 г. был зарегистрирован всего один случай устойчивости грибка к веществам класса бензимидазолов, то сегодня их перестали «бояться» уже 90 патогенов. Аналогичная ситуация наблюдается и с другими препаратами, к которым грибок развивает устойчивость в течение 2–10 лет. Быстрое развитие и распространение резистентности по миру ученые объясняют излишним применением ядохимикатов и активным перемещением продуктов аграрного сектора между регионами, что биологически дает возможность микрогрибкам «обмениваться» генами друг с другом [12].

На сегодняшний день, однако, нельзя полностью отрицать химических методов борьбы с фитопатогенами, принимая во внимание усилия разработчиков пестицидов по преодолению указанной проблемы. В подобной ситуации целесообразно принять среднюю оценку 0,66 эффективности химического протравливания с возможностью дальнейшей корректировки по мере развития указанных тенденций.

Оценить эффективность электрофизических методов помогают исследования. Так,

согласно [3, 6], СВЧ-обеззараживание на установке «СИГМА-1» дает суммарный уровень понижения грибковых и бактериальных инфекций в зерне 25–30 %. Приблизительно таким же эффектом обладает магнитная обработка НМП [9–11]. УФ-метод в силу некоторых особенностей, о которых речь пойдет ниже, имеет меньшую эффективность. Соответственно, оценки эффективности этих методов равны: СВЧ – 0,66; НМП – 0,66; УФ – 0,33.

#### *Критерий равномерности обеззараживания*

При обеззараживающей обработке не все частицы зернового материала одинаково доступны для активного воздействия. Чтобы получить равномерность стерилизации, в разных способах применяют разные технические решения. Так, в протравливателе ПС-10 использован вращающийся распылитель, обеспечивающий равномерное покрытие семян мелкодисперсной суспензией ядохимиката в специальной камере. Равномерность подобной обработки может считаться высокой с присвоением оценки 1.

В электрофизических методах следует учитывать глубину проникания электромагнитных волн в материал. Известно, что УФ-излучение практически не обладает проникающей способностью, воздействуя только на поверхность объекта, а значит, обеззараживанию будут подвергаться крайне локальные зоны зернового материала. С целью уменьшения этого недостатка в электрооптическом преобразователе ЭОП-10 (рис. 3, в), применено вращающееся УФ-поле, создаваемое УФ-лампами, равномерно расположенными по окружности рабочей камеры-трубопровода [8]. Это улучшает равномерность обработки периферийных слоев материала, ближних к лампам, но центральная часть потока все равно затенена и малодоступна для УФ-лучей.

СВЧ-энергия имеет определенную проникающую способность, зависящую от диапазона, однако при этом неравномерно распределяется на выходе из согласующего волновода. Чтобы улучшить равномерность СВЧ-обработки, в установке «СИГМА-1» (рис. 3, б) применено инновационное решение волноводной системы, отличающееся особым расположением магнетронов с согласующими волноводами по высоте и сторонам рабочей камеры [7]. Бла-

годаря этому достигается четырехстороннее облучение потока материала, когда каждый магнетрон дополняет действие других по сечению потока.

Однако наилучшими характеристиками обладает магнитное поле, которое практически не ослабляется биоматериалами и равномерно обеззараживает все зерновые частицы во всей массе материала. Равномерность самого магнитного поля обеспечивается выполнением требований [9]. Согласно этому, есть основания для следующих оценок: УФ – 0,33; СВЧ – 0,66; НМП – 1.

#### *Критерий стимуляции семян и повышения урожайности*

На рост и развитие растений влияет множество природно-климатических факторов, видовые и сортовые особенности выращиваемых культур. В этом сложном процессе определенную роль играет стимуляция семян перед посевом, что, как показывают исследования, вполне достижимо электрофизическими воздействиями. По данным экспертной оценки [13] и результатам НИР лаборатории биоэнерготехнологий подразделения СКНИИМЭСХ «АНЦ «Донской», наибольшим стимулирующим эффектом обладает СВЧ-энергия.

Ядохимикаты по определению не могут стимулировать растительный организм. После их разложения в почве возможно улучшение роста растений за счет избавления от фитопатогенов, но этот эффект свойственен и электрофизическим методам. Последние, более того, обеспечивают комплексный, синергетический результат: стимуляцию семян и улучшение роста и развития растений без патогенов. Таким образом, обоснованными оценками по данному критерию будут следующие: химическое протравливание – 0,33; СВЧ – 1; УФ – 0,66; НМП – 0,66.

Пятый этап методики заключается в расчете интегрального критерия для всех выбранных альтернатив. Согласно принятому методу максимума суммы взвешенных оценок, расчет производим по формуле (2). Результаты расчета для 4 альтернатив представлены в табл.

Как следует из табличных данных, наилучшим вариантом является метод НМП, для которого  $F = F_{\max} = 0,864$ . Далее в порядке убывания  $F$  следуют методы СВЧ, химического протравливания и УФ.



Расчет интегрального критерия  $F$ 

Альтернативы – методы обеззараживания	Критерии и весовые коэффициенты $w_i$				Интегральный критерий $F$
	Безопасность, 0,35	Снижение сумм. зараженности, 0,3	Равномерность обеззараживания, 0,25	Стимуляция семян и повышение урожайности, 0,1	
Хим. протравливание	0,33	0,66	1	0,33	0,597
СВЧ	0,66	0,66	0,66	1	0,694
УФ	0,66	0,33	0,33	0,66	0,479
НМП	1	0,66	1	0,66	0,864

Настоящая методика остается в силе при любом количестве признаков и альтернатив. По мере накопления информации, создания новых технологий и оборудования возможно расширение пространства признаков, а значит, более точная интегральная оценка. При этом есть основания полагать, что мощное магнитообеззараживающее оборудование, выполненное по требованиям [9], обеспечит еще больший «отрыв» метода НМП по критерию  $F$  от ближайших альтернатив. Это обусловлено, в частности, гораздо большим КПД генераторов НМП (электромагнитов) по сравнению с СВЧ-генераторами (магнетронами), что для мощного НМП оборудования даст существенную экономию электроэнергии, а следовательно, рост взвешенных оценок по экономическим показателям.

### Выводы

1. Сравнение методов и технологий обеззараживания следует проводить многокритериальной оценкой по математическому методу суммы взвешенных оценок.

2. Разработанная методика обладает новизной в структурировании пространства признаков, иерархической схеме групп признаков, обосновании весовых коэффициентов и оценок исходя из специфики АПК. Благодаря этому она достоверна в условиях неполной информации в ограниченном пространстве признаков, а по мере расширения последнего дает возможность уточненной оценки.

3. Оценка альтернатив по предложенной методике показала преимущество метода НМП, для которого  $F = F_{\max} = 0,864$ . Таким образом, значительно превосходя методы СВЧ, химического протравливания и УФ, обеззараживание НМП наиболее перспективно для эффективного внедрения в АПК.

### Литература

1. Послание Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации. 20.02.2019. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_318543/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_318543/).
2. Современная ситуация по пестицидам в России // Микробы и человек. URL: <http://mikrobiki.ru/mikroorganizmy/mikroorganizmy-v-pochve/sovremennaya-situatsiya-po-pestitsidam-v-rossii.html> (дата обращения 15.04.2019).
3. Пахомов А.И. Сравнительный анализ СВЧ-установок для обеззараживания зерна // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 1. С. 21–26.
4. Петровский А.Б., Ройзензон Г.В. Многокритериальный выбор с уменьшением размерности пространства признаков: многоэтапная технология ПАКС // Искусственный интеллект и принятие решений. 2012. № 4. С. 88–103.
5. Силич В.А., Силич М.П. Системный анализ и исследование операций: Учебное пособие. Томск: изд. ТПУ, 2000. 97 с.
6. Пахомов А.И., Максименко В.А. Инновационная СВЧ-установка «Сигма-1» // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 5. С. 11–12.
7. Пахомов А.И. Эффективная волноводная система для сельскохозяйственной СВЧ-установки // Техника и оборудование для села. 2013. № 8. С. 18–20.
8. Газалов В.С., Буханцов К.Н., Пономарева Н.Е. Оценка посевных свойств семян ярового ячменя сорта «Ратник» после обработки оптическим излучением // Ресурсосберегающие технологии и техническое обеспечение для инновационного развития агропромышленного комплекса: сб. науч. тр. 5-й Междунар. науч.-практ. конференции (г. Зерноград, ГНУ СКНИИМЭСХ Россельхозакадемии, 27–28 мая 2010 г.). Зерноград, 2010. С. 180–183.
9. Пахомов А.И. Исходные требования к оборудованию магнитного обеззараживания зерна // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 4. С. 48–54.

10. Пахомов А.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н., Ватутина Н.П. Результаты исследований по использованию вращающегося магнитного поля для обеззараживания зерна // Хлебопродукты. 2018. № 6. С. 40–43.
11. Пахомов А.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н., Ватутина Н.П. Экспериментальное определение параметров магнитного обеззараживания зерна // Аграрный научный журнал. 2019. № 3. С. 84–89. DOI: 10.28983/asj.y2019i3.
12. Matthew C. Fisher, Nichola J. Hawkins, Dominique Sanglard, Sarah J. Gurr Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security // Science. 2018: Vol. 360. P. 739–742. DOI: 10.1126/science.aap7999.
13. Ирха А.П. Повышение эффективности использования электрофизических способов предпосевной обработки семян сельскохозяйственных культур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. Краснодар: Кубанский ГАУ, 1998. 25 с.
6. Pahomov A.I., Maksimenko V.A. Innovative SHF device «Sigma-1». Traktory i sel'hozmashiny. 2015. No 5, pp. 11–12 (in Russ.).
7. Pahomov A.I. Efficient waveguide system for agricultural SHF installation. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2013. No 8, pp. 18–20 (in Russ.).
8. Gazalov V.S., Buhancov K.N., Ponomaryova N.E. Evaluation of the sowing properties of the «Ratnik» spring barley seeds after treatment with optical radiation. Resursosberegayushchie tekhnologii i tekhnicheskoe obespechenie dlya innovacionnogo razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: Sb. nauch. tr. 5-j Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii (g. Zernograd, GNU SKNIIMESKH Rossel'hozakademii, 27–28 maya 2010 g.) [Resource-saving technologies and technical support for the innovative development of the agricultural sector: Collection of works of 5th scientific and practical conference (Zernograd, North Caucasus Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture of Russian Academy of Agricultural Sciences, May 27th – 28th, 2010)]. Zernograd, 2010, pp. 180–183 (in Russ.).
9. Pahomov A.I. Initial requirements for equipment for magnetic disinfection of grain. Traktory i sel'hozmashiny. 2018. No 4, pp. 48–54 (in Russ.).
10. Pahomov A.I., Maksimenko V.A., Buhancov K.N., Vatutina N.P. Research results on the use of a rotating magnetic field for grain disinfection. Hleboprodukty. 2018. No 6, pp. 40–43 (in Russ.).
11. Pahomov A.I., Maksimenko V.A., Buhancov K.N., Vatutina N.P. Experimental determination of the parameters of magnetic disinfection of grain. Agrarnyj nauchnyj zhurnal. 2019. No 3, pp. 84–89 (in Russ.). DOI: 10.28983/asj.y2019i3
12. Matthew C. Fisher, Nichola J. Hawkins, Dominique Sanglard, Sarah J. Gurr Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security. Science. 2018: Vol. 360, pp. 739–742. DOI: 10.1126/science.aap7999
13. Irha A.P. Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya elektrofizicheskikh sposobov predposevnoj obrabotki semyan sel'skohozyajstvennykh kul'tur: Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of using electrophysical methods of presowing treatment of seeds of agricultural crops: Dissertation for Degree of Ph.D. (Engineering)]: 05.20.02. Krasnodar: Kubanskij GAU Publ., 1998. 25 p.

## References

1. Poslanie Prezidenta Rossijskoj Federacii Federal'nomu Sobraniyu Rossijskoj Federacii [Message of the President of the Russian Federation to the Federal Assembly of the Russian Federation]. 20.02.2019. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_318543/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_318543/).
2. The current situation of pesticides in Russia. Mikroby i chelovek. [Elektronnyj re-surs]. URL: <http://mikrobiki.ru/mikroorganizmy/mikroorganizmy-v-pochve/sovremennaya-situatsciya-popestitsidam-v-rossii.html> (data obrashcheniya 15.04.2019).
3. Pahomov A.I. Comparative analysis of SHF installations for grain disinfection. Traktory i sel'hozmashiny. 2018. No 1, pp. 21–26 (in Russ.).
4. Petrovskij A.B., Rojzenzon G.V. Multi-criteria selection with reduced dimension of feature space: multi-stage PAKS technology. Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij. 2012. No 4, pp. 88–103 (in Russ.).
5. Silich V.A., Silich M.P. Sistemnyj analiz i issledovanie operacij [System analysis and operations research]: Uchebnoe posobie. Tomsk: izd. TPU Publ., 2000. 97 p.