

УДК 519.248, 631.12

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агро-промышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ВЫБОРА ИНФРАКРАСНЫХ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Попов Виталий Матвеевич
д.т.н., профессор

Захакхатов Виктор Глебович
к.т.н., доцент

Афонькина Валентина Александровна
к.т.н., доцент

Левинский Василий Николаевич
к.т.н.

Южно-уральский государственный аграрный университет, Челябинская область, г. Троицк, Россия

Процесс сушки в отрасли пищевой и перерабатывающей промышленности стоит особняком, как самый распространенный, но в то же время и самый сложный и энергозатратный вид технологической операции. Аппараты обезвоживания характеризуются многими технико-экономическими параметрами, что делает выбор их для конкретных условий многофакторных технологий, зачастую связанных с живыми средами, в условиях многочисленных предложений со стороны производителей, затруднительным. Обобщенная функция желательности Харрингтона, позволяющая установить связь между физическими показателями аппарата и психологическими оценками этих показателей, может стать основой доступного метода ранжированного анализа сразу нескольких аппаратов. В настоящей статье по расчетному значению обобщенной желательности сравниваются две радиационные сушилки транспортерно-каскадного типа по шести основным показателям. Объективность получаемой оценки обусловлена строгостью методики, однако экспертные оценки анализируемых признаков имеют некий субъективизм, связанный с желательностью признаков конкретным конечным потребителем, а набор сравниваемых признаков и их иерархическая выстройка будет зависеть от цели. Таким образом, функции желательности Харрингтона - это один из возможных методов наглядного сравнения техники и технологий, учитывающий совокупность и полноту набора необходимых качеств

Ключевые слова: СУШИЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ИНФРАКРАСНЫЙ, ФУНКЦИЯ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ХАРРИНГТОНА, ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА, ПСИХОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-186-006>

UDC 519.248, 631.12

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

SOLVING THE PROBLEM OF MULTICRITERIA SELECTION OF INFRARED DRYING PLANTS

Popov Vitaly Matveyevich
Doctor of Technical Sciences, professor

Zakhakhatnov Viktor Glebovich
Candidate of Technical Sciences, associate professor

Afonkina Valentina Aleksandrovna
Candidate of Technical Sciences, associate professor

Levinsky Vasily Nikolaevich
Candidate of Technical Sciences
South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk Region, Troitsk, Russia

The drying process in the food and processing industry stands apart as the most common, but at the same time the most complex and energy-consuming type of technological operation. Humidity removal devices are characterized by a large number of parameters of technical and economic content, which makes it difficult to choose them for specific conditions of multifunctional technologies, often associated with living environments, in the face of numerous offers from manufacturers. The generalized Harrington desirability function, which makes it possible to establish a connection between the physical indicators of the device and the psychological assessments of these indicators, can become the basis of an accessible method of ranked analysis of several devices at once. In this article, according to the calculated value of generalized desirability, two radiation dryers of the conveyor-cascade type are compared according to six main indicators. The adequacy of the assessment obtained is explained by the strictly set methodology, however, expert assessments of the analyzed signs have a certain subjectivity associated with the desirability of signs by a specific end user, and the set of compared signs and their hierarchical alignment will depend on the goal. Thus, Harrington's desirability functions are one of the possible methods of visual comparison of technology and technologies, taking into account the totality and completeness of the set of necessary qualities

Keywords: DRYING UNIT, INFRARED, HARRINGTON DESIRABILITY FUNCTION, EXPERT EVALUATION, PSYCHOLOGICAL EVALUATION

Введение. Два века понадобилось, для того чтобы трансформация электрической энергии в теплоту стала технологически оправданным способом нагрева в технике. Динамический процесс совершенствования и оптимизации инструментария электротермических агрегатов имеет важную особенность, он должен отвечать запросам постоянно изменяющегося спроса на качественные продукты. Появление современных методов и средств электронагрева в сочетании с классическими приемами переработки пищевого сырья, стимулирует расширение области применения и широкого использования в промышленности новой элементной базы [1-5].

Особый интерес на сегодняшний день вызывают установки с электронагревом для сушки пищевого сырья. Это связано с развитием культуры полезного правильного питания, что подразумевает собой употребления в пищу в первую очередь продуктов, приготовленных из высококачественного пищевого сырья, прошедшего все процедуры переработки в условиях низких температур. Щадящие режимы работы перерабатывающих машин позволяют сохранить максимальное количество биологически активных компонентов в конечном продукте.

Существует огромное количество различных электротермических агрегатов, отличающихся по ряду признаков, главным из которых является способ подвода тепла к влажному материалу (конвективный, контактный, радиационный и др.).

Наибольшее распространение получили конвективные электротермические агрегаты, однако на сегодняшний день большой интерес вызывают радиационные, в частности инфракрасные сушильные установки. С точки зрения энергетических затрат их отмечают, как более экологичные и экономичные [1,2].

В рамках данной статьи рассматриваются инфракрасные сушильный установки транспортерно-каскадного типа двух производителей: УСК-7 (ООО «ПКБ Малышева, г. Чайковский») [3] и СТКИ-7 (ООО НТЦ «Агро-ЭСБ», г. Челябинск) (рис.1, табл.1) [4]. Данные установки предназначены

для сушки такого пищевого сырья как: макаронные полуфабрикаты, зеленые культуры, масленичные культуры, корнеклубнеплодовые культуры.



УСК (ООО «ПКБ Малышева, г. Чайковский)



СТКИ (ООО НТЦ «АгроЭСБ», г. Челябинск)

Рис. 1. Внешний вид транспортерно-каскадных сушильных установок

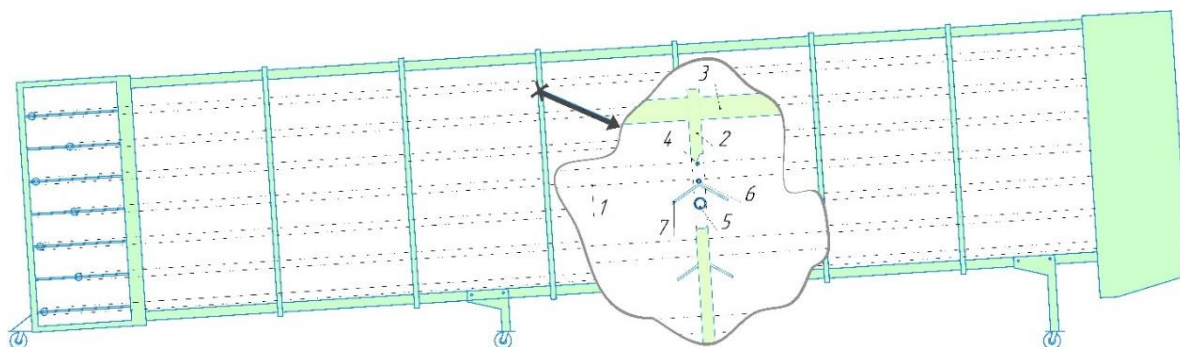
Таблица 1 – Технические характеристики сушилок УСК-7 и СТКИ-7

№ п/п	Наименование параметра	УСК-7 (установка сушильная конвейерная)	СТКИ-7 (сушилка транспортерно-каскадная инфракрасная)
1	Количество ярусов (транспортеров), шт	7	
2	Ширина транспортера (ленты), мм	1200	
3	Высота сушильной установки	2100	
4	Ширина сушильной установки	10100	
5	Напряжение питания, В / частота, Гц	380/50	
	Температура процесса сушки, °С	не более 70	не более 55
6	Тип нагревательного элемента. Технические характеристики: <i>Рабочий диапазон излучения, мкм;</i> <i>Температура поверхности излучателя, °С</i>	Кварцевый трубчатый электронагреватель 5,2-6,2 190-280	Пленочный электронагреватель 8,5-9,5 30-70
7	Количество нагревательных элементов, шт	77	52
8	Мощность 1 нагревательного элемента, кВт	0,6	0,55
9	Установленная мощность установки, кВт	47	29

Оба варианта сушильной установки представляют собой конструкцию жестко связанных между собой транспортеров, расположенных друг над другом. Сырье (продукт) в непрерывном режиме распределяется ровным слоем по поверхности ленты первого транспортера в процессе его движения. В тот момент, когда продукт дойдет до края первого транспортера, он пересыплется на второй транспортер, который движется в противоположную сторону, далее произойдет пересыпание на третий транспортер и так до последнего, после которого произойдет либо дальнейшая транспортировка по технологической линии, либо окончательная выгрузка продукта в контейнер. Над каждым транспортером располагаются электрические нагревательные элементы. Количество расположенных транспортеров друг над другом, их длина, скорость движения и режим работы электронагревателей в конечном итоге будет влиять на производительность такого типа сушилок. Для сравнения в таблице 1 приведены технические характеристики сушилок УСК-7 и СТКИ-7, состоящие из семи транспортеров (ярусов).

Из сравнения двух установок следует, что конструктивно они похожи, различие заключается в применении типа нагревательных элементов, как следствие разница в режимах их работы и применении системы автоматического управления.

На рисунке 2 показано, как установлены кварцевые трубчатые электронагреватели в сушилке УСК-7.

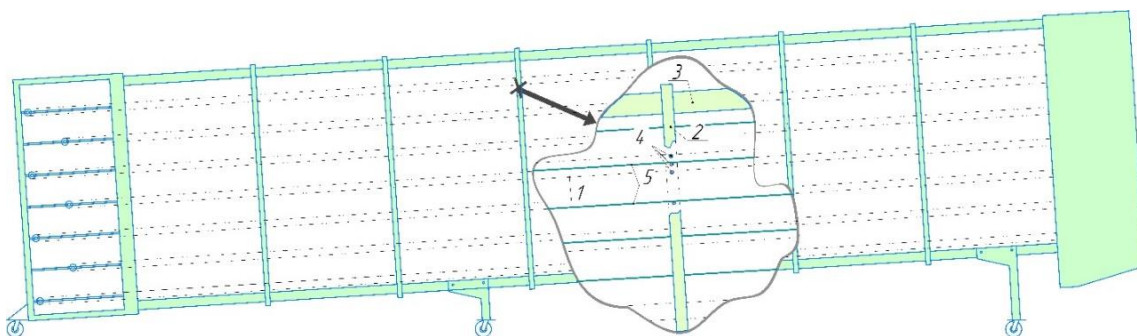


1 – Транспортерная лента; 2 – рама промежуточная; 3 – соединитель промежуточных рам; 4 – прут цельнометаллический; 5 – кварцевый трубчатый электронагреватель; 6 – труба металлическая; 7 – отражатель.

Рис. 2. Расположение кварцевых трубчатых электронагревателей в УСК-7

Кварцевый трубчатый электронагреватель в сушилке работает в непрерывном режиме и за счет отражателя перекрывает определенную зону, подвергаемую нагреву. Продукт в процессе движения на ленте поочередно попадает в зоны нагрева и зоны охлаждения, за счет чего осуществляется осциллирующий режим воздействия на продукт и при его верном выборе можно избежать критического превышения температуры регламентированной технологией производства. Время чередования и охлаждения высушиваемого продукта изменяется за счет увеличения или уменьшения скорости движения ленты. Для этого системой автоматического управления (САУ) предусмотрен частотный преобразователь, благодаря которому в ручном режиме можно изменить частоту цепи, тем самым изменить скорость движения ленты. Также в ручном режиме предусмотрено поярусное отключение электронагревателей, что целесообразно в двух случаях. В первом случае при начальной загрузке высушиваемого материала, когда он находится на верхних транспортёрах, а нижние еще пусты. И во втором случае по окончании процесса сушки, когда на нижних транспортерах высушиваемый материал еще присутствует, при этом загрузка на верхние уже не осуществляется.

Нагревательные элементы сушильной установки СТКИ-7 располагаются фактически над и под всей площадью транспортной ленты (рис. 3). Поэтому воздействие на продукт осуществляется с двух сторон, так как применяемая транспортная лента прозрачна для ИК-луча, что подтверждено в ранее опубликованных материалах [1,2,4,5].



1 – Транспортная лента; 2 – рама промежуточная; 3 – соединитель промежуточных рам; 4 – прут цельнометаллический; 5 – пленочный электронагреватель.

Рис. 3. Расположение пленочных электронагревателей в СТКИ-7

САУ сушилки СТКИ более сложная в сравнении с УСК, помимо контроля скорости движения транспортерами, блок управления предусматривает наличие температурного контроллера. Он позволяет в режиме реального времени контролировать температуру нагрева пленочных электронагревателей и температуру продукта на каждом ярусе. Более сложная САУ позволяет расширить функциональность сушильной установки: во-первых, при достижении заданной температуры, к примеру на первом ярусе, возможно отключения только этого яруса, не отключая при этом остальные; во-вторых, возможно поярусное снижение температуры, что в свою очередь позволяет осуществлять «мягкий» режим сушки, что актуально для термолабильного сырья; в-третьих, контролировать все параметры возможно в удаленном режиме. Все приведенные расширения функциональных возможностей сушильной установки позволяет осуществлять

осциллирующий режим воздействия на продукт, где критическое превышение температуры исключено, при сниженном энергопотреблении.

Для сушки пищевого сырья с высоким содержанием биологически-активных веществ целесообразно использование и СТКИ-7, и УСК-7, что доказано как экспериментальными данными, так и в процессе эксплуатации данных сушилок [3,4] При использовании любого варианта сушилок можно добиться необходимого качества высушиваемого продукта, подобрав необходимый режим, отрабатываемый жестким алгоритмом. И в этом случае между рассматриваемыми сушильными установками возникает сложность выбора для конечного потребителя.

Нахождение оптимума рынка «цена-качество», сравнивая несколько технических устройств по одному из показателей, даст крайне субъективную оценку. Сушилки в этом не являются исключением. Таким образом, объективная многофакторная оценка сушилок, с возможностью назначения определенных параметров значимостью, исходя из запросов технологии, представляет интерес для тех кто производит сушильные установки, кто занимается их продажей, а также для тех кто их эксплуатирует (конечный потребитель).

Ретроспективный анализ на сегодняшний день представлен немалым количеством методик, в том числе, конкретно для сушильных установок. Например, по энергоемкости процесса сушки, количественной оценкой которой служит КПД, или методики, где процесс сушки рассматривается как многоуровневая технологическая система, качество которой может быть количественно оценено по коэффициентам стабильности ее составляющих. Как правило, инструментарий подобных методик достаточно трудоемок, и не может быть универсальным рецептом при выборе той или иной установки [6,7].

Для оценки технических объектов, распространение получил метод обобщенной функции желательности Харрингтона. Основными плюсами

метода считаются зависимости, обладающие монотонностью непрерывностью и непрерывностью, что позволяет его использовать в решении задач по оценке процессов разных отраслях народного хозяйства [6,7].

Нами было принято решение рассмотреть именно метод обобщенной функции желательности Харрингтона, как инструмент сравнительного анализа по интегральному критерию для транспортерно-каскадных сушильных установок УСК-7 и СТКИ-7.

Материалы и методы исследования. Не все рассматриваемые характеристики и показатели в равной степени влияют на потребительские качества сушильных установок, и это важно учитывать. Однако пути решения с выводом обобщенного критерия оценки объекта с показателями, стремящимися в бесконечное множество, не приводит к хорошим результатам [7], что диктует ввод весовых коэффициентов. Важно чтобы сумма частных показателей коэффициентов должна быть равна единице. Соответственно это может быть шкала, вводимая методом экспертных оценок, но трудность ее ввода заключается в большом наборе абсолютно не равнозначных характеристик для одной конкретной группы объектов. Этим будет затруднена оценка вклада частных характеристик в суммарный показатель. В этом случае рациональным становится выбор основных характеристик, который определяет свойства объекта необходимые конечному потребителю. Для оценки транспортерно-каскадных сушильных установок такими характеристиками могут быть: категория автоматизации технологического процесса, стоимость установки, производительность, температурный режим процесса сушки, удельный расход энергии на килограмм испаренной влаги, суммарная электрическая мощность всех агрегатов сушильной установки и др.

Характеристики необходимо объединить шкалой желательности, которая устанавливает связь между физическими характеристиками системы и психологическими оценками желательности конечного результата. До-

полнительным плюсом является то, что шкала желательности позволяет свести исходную многокритериальную задачу принятия решения с разно размерными критериями к критериям, измеряемым в одной безразмерной шкале. Функция желательности задается выражением уравнения (1):

$$d = \exp[-\exp(-y')] \tag{1}$$

где d – значение желательности; y' - кодированное, то есть приведенное к одному диапазону значение частного признака (характеристики).

Рабочий диапазон кодированных значений признака лежит в диапазоне $-2 \dots 6$, так как полученная по выражению (1) функция при $y' = -2$ $d \approx 0$, а при $y' = 6$ $d \approx 1$. На рисунке 4 показана зависимость критериев желательности при наложении ограничения на признаки следующим образом $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$. Диапазон изменяющейся функции, необходимый для расчета желательности, также представлен на рисунке 4 [6,7].

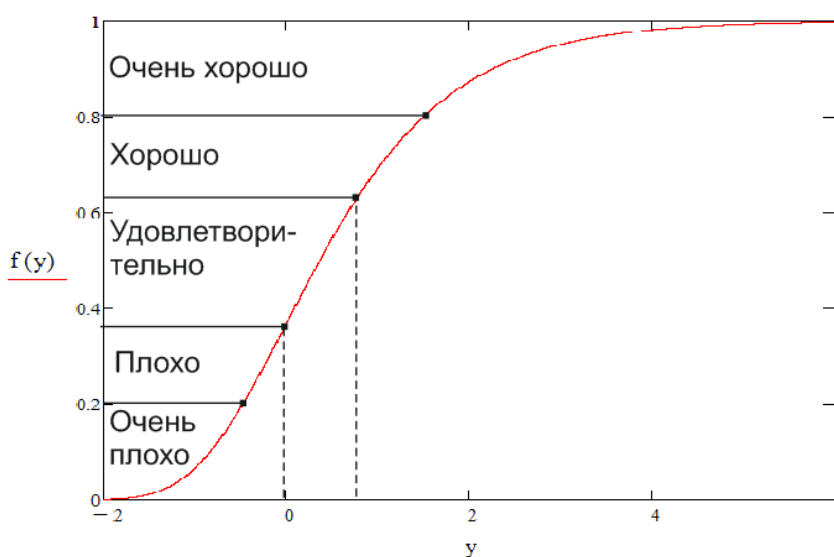


Рис.4. Распределение критериев желательности

Как правило диапазон изменения показателя кодируют в соответствии с прямолинейным участком функции (рис. 4), обеспечивая равную чувствительность экспертных оценок. Из этого следует, что для кодирова-

ния частных показателей можно воспользоваться уравнением первой степени (2):

$$y' = a * y + b \quad (2)$$

где a , b – коэффициенты линейной функции.

Обычно в качестве диапазона функции желательностей принимают: минимальном значении 0,37; максимальное значение равно 0,8. Эти значения совместно с крайними значениями рассматриваемого признака следует подставить в выражение (2), откуда последует система из двух уравнений (3), решив которую можно определить значения a и b .

$$\begin{aligned} y'_{max} &= ay_{max} + b \\ y'_{min} &= ay_{min} + b \end{aligned} \quad (3)$$

Определив значения a и b , по выражению (2) рассчитываются кодированные значения частных признаков. Затем по выражению (1) рассчитывается их желательность. В конечном итоге, приведя все признаки к равнозначности, по выражению (4) рассчитывается обобщенный коэффициент желательности.

$$D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_n} \quad (4)$$

где $d_1 d_2 \dots d_n$ – желательности частных показателей,
 n – число используемых показателей.

Расчёт обобщенного коэффициента желательности для каждой из рассматриваемых сушильных установок позволит объективно сделать выбор в пользу варианта с большим коэффициентом.

Результаты и обсуждение. Согласно приведенной методике произведено сравнение УСК-7 и СТКИ-7 по 6 показателям:

1. Цена установки, на момент написания статьи не стабильна, обладают сильной зависимостью от стоимости металла и транспортерных лент, в течении небольшого периода времени может изменяться как в сторону увеличения, так и 0.в сторону уменьшения, поэтому данный показатель

выбирался в соответствии с уровнем 2015 года, как наиболее экономически-стабильный период на территории Российской Федерации.

2. Категория автоматизации технологического процесса, данный показатель выбирался согласно ГОСТ 23004-78 «Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении. Основные термины, определения и обозначения», где приводятся данные категории в зависимости от диапазона изменений временного уровня автоматизации средств технологического оснащения (рис. 5).

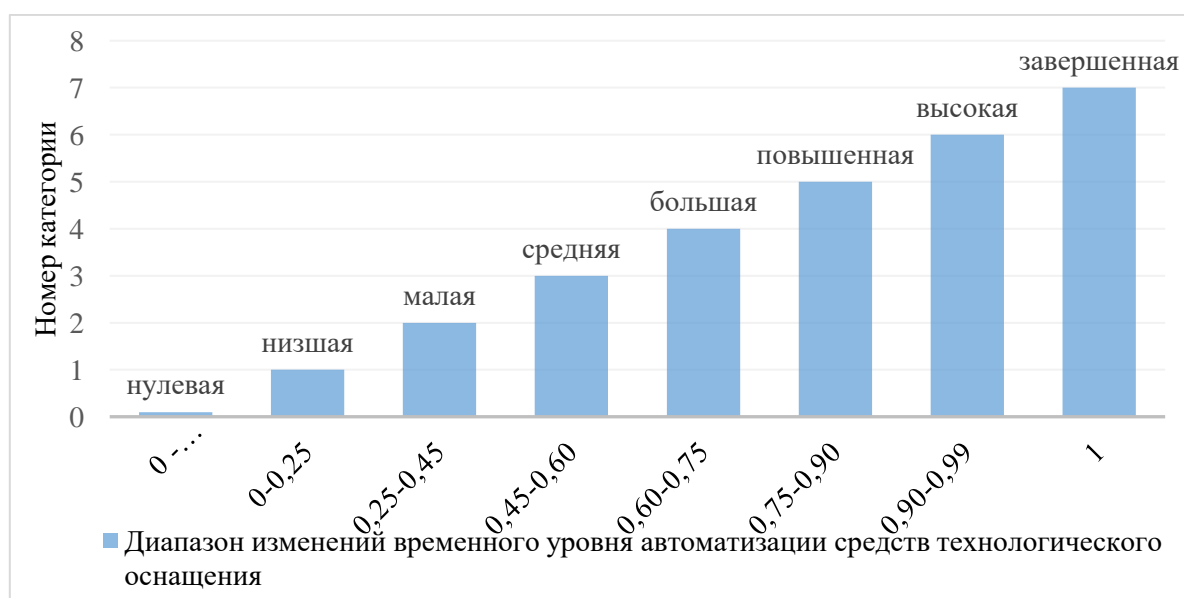


Рис. 5 Гистограмма уровня автоматизации технологического процесса по категориям в зависимости от диапазона изменений временного уровня автоматизации средств технологического оснащения

3. Установленная электрическая мощность, данный показатель выбирался согласно паспортным данным сушилок (табл.1). Значение показателя преимущественно есть совокупность мощностей всех установленных нагревательных элементов.

4. Расход энергии на испарение одного килограмма влаги, данный показатель может быть получен экспериментальным путем и зависит он от

многих факторов, важнейшим из которых являются установленная электрическая мощность и коэффициент одновременного включения. В свою очередь на коэффициент одновременного включения формируется в зависимости: от уровня автоматизации сушильной установки, что будет способствовать более качественному поддержанию заданных технологических параметров; от теплофизических свойств высушиваемого объекта.

5. Температурный режим процесса сушки. Установки УСК-7 и СТКИ-7 классифицируются как инфракрасные, соответственно процесс сушки подчинен законам теплового излучения, в которых основными параметрами являются: температура нагретого тела, чернота тела, длина волны излучения, плотность потока излучения, мощность потока излучения и др. При составлении технологической карты процесса сушки какого-либо продукта важно учитывать теплофизические свойства продукта (ограничения по температуре, связанные с сохранением биологически активных веществ) и с учетом этих свойств, согласовывать по его спектральной характеристике с рабочим диапазоном излучения нагревательного элемента (то есть с температурой его поверхности, согласно закону прямого смещения Вина) и времени воздействия нагревателя на продукт.

6. Квалификация обслуживающего персонала, данный показатель зависит от степени сложности управления сушильной установки для оператора, непосредственно работающего на этой сушильной установке, для наладчика (слесарь КИПиА, электро-механик), производящего техническое обслуживание и наладку установки, согласно технологической карте. Чем сложнее оборудование, тем выше квалификация персонала, соответственно тем выше оплата труда, откуда следует – чем ниже экспертная оценка, тем выше психологическая оценка потенциального владельца сушильной установки.

Психологическая оценка по шкале желательности для экспертных оценок выбранных технических и экономических показателей сушильных установок транспортерно-каскадного типа приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Сводные экспертные оценки

Экспертная оценка						Психологическая оценка
Цена млн.ру б	Категория автоматизации технологического процесса	Установленная электрическая мощность, кВт	Расход энергии на испарение одного килограмма влаги, кВт·ч/1 кг. исп.вл	Температурный режим процесса сушки, °С	Квалификация обслуживающего персонала	
y1	y2	y3	y4	y5	y6	
0,5	6	30	1,0	50	1	Очень хорошо
0,6	5	45	2,0	70	2	Хорошо
0,7	4	60	3,0	100	3	Удовлетворительно
0,9	3	75	4,0	200	4	Плохо
1,0	2	90	5,0	300	5	Очень плохо

В таблице 4 приводятся результаты расчета по выражению (2) приведенных (безразмерных) показателей для сравниваемых сушильных установок УСК-7 и СТКИ-7, соответствующие этим показателям желательности, рассчитанные по выражению (1) и рассчитанные по выражению (4) коэффициенты обобщенной желательности D.

Таблица 4 – Результаты расчета коэффициента обобщенной желательности D

Показатель	УСК-7	СТКИ-7
y ₁ млн. руб	0.576	0.710
y ₂	3	6
y ₃ кВт	47	29
y ₄ кВт·ч/1 кг. исп.вл	2,2	1,1
y ₅ °С	70	55
y ₆	2	4
y' ₁	0.709	0.548
y' ₂	0.350	0.800
y' ₃	0.630	0.810
y' ₄	0.620	0.785
y' ₅	0.752	0.788
y' ₆	0,650	0,350
D	0.602	0.652

Результаты расчета обобщенной желательности показывают, что сушильная установка УСК-7 не значительно, но уступает СТКИ-7, несмотря на превышение в стоимости ($\approx 25\%$) и достаточного простого управления и обслуживания. При относительно небольшой разницы температурного режима, хотя в некоторых случаях и это существенно, ключевыми показателями преимущества СТКИ-7 над УСК-7 являются энергетические показатели, а именно установленная электрическая мощность и расход энергии на испарение одного килограмма влаги.

Заключение. Предложенная в статье методика состоятельна, применима и достаточно объективна. Достаточно часто для нужд АПК техника выполняется по индивидуальному техническому заданию, в рамках субсидирования и грантовой поддержки, где встает вопрос, обоснования выбора сторонней организации соисполнителя работ по техническому заданию. Производители смогут давать оценку и разрабатывать коммерческие предложения, в основе которых будет не просто рекламные слоганы, а вполне обоснованный сравнительный анализ образцов ближайших конкурентов, учитывающий несколько разно размерных показателей, влияющих на эксплуатацию объекта и отвечающих требованиям конкретного технологического регламента и технического задания.

Литература

1. Designing the infrared drying machines of cylindrical type with an active reflector / V. Popov, V. Afonkina, V. Levinskii, E. Zudin and E. Krivosheeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. - 403(1)
2. Research of substrate materials for drying liquid materials / V.M. Popov, V.A. Afonkina, V.N. Levinskiy, A.V. Medvedev // AIP Conference Proceedings: Digital technologies in agriculture of the Russian Federation and the world community. – 2022. - С. 060008.
3. Макароны изделия - оборудование | линии для производства макарон. Режим доступа: <https://pkbm.ru/makaron/>
4. Зудин Е.С. Инфракрасная сушка макаронных изделий с применением транспортерно-каскадной сушилки СТКИ-7 / Е.С. Зудин, В.М. Попов, В.А. Афонькина // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития. матер. Междунар. научн.-практ. конф. Красноярск - 2018. - С. 95-98.
5. Theoretical justification of film electric heater parameters as a source of infrared radiation in the technology of drying green crops / V.M. Popov, E.N. Epishkov, V.A. Afonkina,

E.I. Krivosheeva, V.N. Levinsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2021. - 723(3). - 032038

6. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский– М.: Наука, 1976. – 279 с.

7. Захахатнов В.Г. Функция желательности харрингтона как критерий оптимального выбора зерносушилки / В.Г. Захахатнов, В.М. Попов, В.А. Афонькина // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. - 2022. - №2(94). - С. 110-114.

References

1. Designing the infrared drying machines of cylindrical type with an active reflector / V. Popov, V. Afonkina, V. Levinskii, E. Zudin and E. Krivosheeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. - 403(1)

2. Research of substrate materials for drying liquid materials / V.M. Popov, V.A. Afonkina, V.N. Levinskiy, A.V. Medvedev // AIP Conference Proceedings: Digital technologies in agriculture of the Russian Federation and the world community. – 2022. - С. 060008.

3. Makaronnye izdeliya - oborudovanie | linii dlya proizvodstva makaron. Rezhim dostupa: <https://pkbm.ru/makaron/>

4. Zudin E.S. Infrakrasnaya sushka makaronnyh izdelij s primeneniem transportno-kaskadnoj sushilki STKI-7 / E.S. Zudin, V.M. Popov, V.A. Afon'kina // Nauka i obrazovanie: opyt, problemy, perspektivy razvitiya. mater. Mezhdunar. nauchn.-prakt. konf. Krasnoyarsk - 2018. - S. 95-98.

5. Theoretical justification of film electric heater parameters as a source of infrared radiation in the technology of drying green crops / V.M. Popov, E.N. Epishkov, V.A. Afonkina, E.I. Krivosheeva, V.N. Levinsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2021. - 723(3). - 032038

6. Adler YU.P., Markova E.V., Granovskij YU.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij / YU.P. Adler, E.V. Markova, YU.V. Granovskij– М.: Nauka, 1976. – 279 с.

7. Zahahatnov V.G. Funkciya zhelatel'nosti harringtona kak kriterij optimal'nogo vybora zernosushilki / V.G. Zahahatnov, V.M. Popov, V.A. Afon'kina // Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. - 2022. - №2(94). - S. 110-114.