

УДК 631.365

**В.П. Чеботарев, Н.Д. Лепешкин,
И.В. Барановский, В.В.Чумаков**

*(РУП «НПЦ НАН Беларуси по
механизации сельского хозяйства»,
г. Минск, Республика Беларусь)*

В.Б. Ловкис, А.В. Новиков,

Т.А. Непарко

*(УО «БГАТУ»,
г. Минск, Республика Беларусь)*

**КЛАССИФИКАЦИЯ И
ПОКАЗАТЕЛИ
ТЕХНИЧЕСКОГО
УРОВНЯ
СОВРЕМЕННЫХ
ЗЕРНОСУШИЛОК**

Введение

Сушка зерна необходима для удаления части содержащейся в нем влаги, чтобы при хранении максимально подавить рост количества микроорганизмов, ферментативные реакции и окислительные процессы. Процесс сушки при этом должен быть организован так, чтобы гарантированно обеспечивалась успешная консервация зерна, с одной стороны, а с другой – он не должен оказывать негативного воздействия на питательные вещества, определяющие ценность зерна, а также на его технологические качества. В зерне влага содержится в свободной или связанной форме. Вследствие большой силы связи между влагой и твердым веществом, содержащуюся в зерне влагу нельзя полностью удалить с помощью механического способа разделения, например с помощью центрифугирования или прессования. Свободную или физически связанную влагу можно удалить из зерна только путем сушки. В процессе сушки влага под воздействием подаваемой тепловой энергии или под воздействием уменьшающегося парциального давления паров воздуха, необходимого для сушки, сначала испаряется или выпаривается, а затем отводится от поверхности зерна с помощью сушильного агента.

Основная часть

Разработано и используется на практике множество способов сушки зерна и сушильных установок различных типов [1–3], общий для всех принцип действия которых заключается в том, что через неподвижный или постоянно перемещающийся слой зерна проходит поток агента сушки. Тепловая энергия, необходимая для испарения или выпаривания влаги, непрерывно переносится преимущественно конвективным путем от сушильного агента на материал, подлежащий сушке. Другие способы передачи тепла, например теплопроводность или излучение, при сушке зерна используются крайне редко. Способы сушки зерна и разработанные для этого сушильные установки можно классифицировать по следующим основным технологическим [4] признакам: принципу действия, конструктивному исполнению, параметрам сушильного агента, способам подачи сушильного агента и зерна.

На рисунке 1 представлена классификация зерносушильных установок, содержащая принцип действия установок, температуру воздуха, необходимо для сушки, форму емкостей (элеваторов) сушильных установок, а также способ подачи воздуха-зерна и другие классификационные признаки.

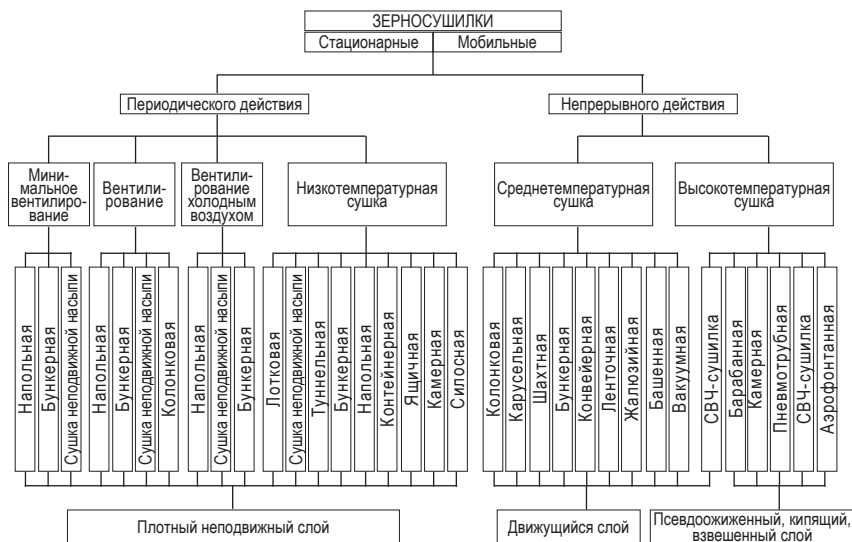


Рисунок 1. – Классификация зерносушильных установок

Основным в классификации зерносушилок является способ подачи зерна в сушильную установку: периодической загрузкой или непрерывным потоком. В сушильных установках, работающих дискретно или периодически, в так называемых сушильных установках периодического действия, емкость сушильной установки заполняется влажным зерном. После сушки партии зерна до состояния пригодности для хранения и его охлаждения до температуры окружающей среды зерно выгружается из емкости сушильной установки, а затем она снова заполняется влажным зерном. Значительно более сложным по сравнению с установкой периодического действия является технологический процесс сушки зерна в сушильной установке непрерывного действия.

Для компенсации технологических недостатков сушильных установок периодического действия и установок непрерывного действия были разработаны комбинированные способы сушки, при которых за непрерывным процессом сразу же следует периодический процесс сушки. После предварительной сушки теплым воздухом в сушильной установке теплое зерно помещается в зернохранилище с возможностью его вентиляции. Сушка зерна до состояния его пригодности для хранения реализуется путем вентиляции насыпанного вороха зерна незначительно подогретым окружающим воздухом.

Следующий важный отличительный признак – движение зерна, подлежащего сушке. В сушильных установках с неподвижным зерном в ходе процесса сушки и охлаждения оно лежит неподвижно, в то время как в сушильных установках непрерывного действия зерно непрерывно перемещается по емкости установки. Движение зерна в вертикальных емкостях сушильной установки происходит под действием силы тяжести. В горизонтальных или расположенных под наклоном емкостях сушильной установки непрерывное поступательное движение зерна вызывается механическими транспортирующими механизмами, например ленточными транспортерами, механизмами для перелопачивания.

Если зерно сушится в неподвижном состоянии, то это неизбежно приводит к его пересушиванию в месте поступления агента сушки и одновременно к относительно высоким термическим нагрузкам на зерно в этой зоне. За счет установки устройств для ворошения или перемешивания зерна его слой может быть разворошен или пересыпан, в результате чего процесс сушки становится более равномерным; одновременно удается исключить воздействие относительно высоких термических нагрузок на часть зерна.

Температура агента сушки представляет собой следующий отличительный признак для классификации зерносушильных установок, так как с увеличением температуры сушки увеличивается ее скорость и растет способность воздуха поглощать пары воды. По величине температуры агента сушки следует различать низко-, средне- и высокотемпературную сушку. Что касается низкотемпературного агента, то под ним следует понимать окружающий воздух или незначительно подогретый окружающий воздух, причем температура предварительного нагрева составляет 3–5 °С. Это так называемая низкотемпературная сушка. Среднетемпературный агент сушки нагревают в воздушно-нагревателе до температуры 40–200 °С. Сушильные установки непрерывного действия главным образом работают на таком агенте сушки, при этом его температура должна подбираться в зависимости от вида и назначения зерна, типа сушильной установки. Агент сушки, нагретый до более высоких температур, называется высокотемпературным, его используют исключительно в барабан-ных сушилках для сушки фуражного зерна при температурах 200–350 °С.

Отличительным признаком для консервации зерна является расход (потребление) агента сушки. В зависимости от цели следует различать следующие способы: минимальное вентилирование, охлаждение наружным воздухом, охлаждение с помощью холодильной машины, низкотемпературную сушку вентилированием, сушку средне- и высокотемпературным агентом сушки.

Минимальное вентилирование применяют для сохранения качества зерна продувкой воздуха с подачей 5–7 м³/м³ зерна в час, чтобы отвести тепло, которое способствует росту количества микроорганизмов и возникновению дыхательных реакций. При сушке зерна теплым воздухом с последующим охлаждением окружающим воздухом может случиться так, что зерно

перед хранением будет плохо охлаждено. Чтобы уменьшить рост количества микроорганизмов, возможность возникновения дыхательных реакций и препятствовать размножению насекомых, зерно в хранилище подвергают вентилированию окружающим воздухом с подачей $15\text{--}20 \text{ м}^3/\text{м}^3$ зерна в час и охлаждают его до температуры $10\text{--}15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Охлаждение подлежащего хранению зерна с помощью холодильной машины до температуры $8\text{--}10 \text{ }^\circ\text{C}$ используется преимущественно для устранения потерь из-за затхлости и размножения насекомых в сухом зерне. Доведя до охлажденного состояния при расходе холодного воздуха $10\text{--}15 \text{ м}^3/\text{м}^3$ зерна в час, можно подвергать промежуточному хранению влажное зерно, чтобы компенсировать недостаточную производительность имеющихся сушильных установок.

В отличие от способов вентилирования, которые чаще всего используются для охлаждения уже высушенного зерна, сушка вентилированием представляет собой способ, в ходе которого зерно подвергается как сушке, так и одновременно охлаждается до температуры окружающего воздуха. При сушке вентилированием зерно находится в вертикальной или плоской емкости сушильной установки, вентилируется с помощью окружающего воздуха или с помощью незначительно подогретого окружающего воздуха, расход воздуха составляет $15\text{--}90 \text{ м}^3/\text{м}^3$ зерна в час. При сушке средне- и высокотемпературным агентом зерно сначала сушится до состояния его пригодности для хранения с помощью зерносушилки, а затем в емкости сушильной установки оно охлаждается до температуры окружающего воздуха. В зависимости от конструктивного исполнения сушильные установки, в которых использован для сушки такой сушильный агент, работают в диапазоне температур $40\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$, расход воздуха составляет $600\text{--}3000 \text{ м}^3/\text{м}^3$ зерна в час.

Следующий параметр – давление агента сушки. Речь идет почти исключительно о сушильных установках нормального давления, которые работают на принципе напора или разрежения. Для преодоления сопротивления слоя зерна при прохождении через него потока сушильного агента, в зависимости от высоты слоя зерна и величины скорости воздуха, необходимо пониженное или избыточное давление в диапазоне $500\text{--}2000 \text{ Па}$. Режим работы под разрежением, по сравнению с напорным режимом, позволяет обеспечить значительно более равномерное распределение агента сушки в слое зерна, а также исключить выпуск воздуха, содержащего пыль, в окружающую среду.

Особое конструктивное исполнение имеют вакуумные сушильные установки, которые не получили большого распространения для сушки зерна из-за высоких инвестиционных затрат и незначительной производительности. За счет снижения общего давления до $20\text{--}75 \text{ мбар}$ температура точки кипения воды опускается на $30\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$, в результате чего удаление влаги из зерна идет в опущающемся режиме.

Для нагревания агента сушки используются воздухонагреватели, работающие на жидком, газообразном или твердом топливе. Нагревание агента суш-

ки может осуществляться как непосредственно, так и через теплообменник. При непосредственном нагревании агента сушки дымовые газы, образующиеся от сгорания жидкого, газообразного или твердого топлива, смешиваются с воздухом, необходимым для сушки. При этом возникает опасность того, что на зерно осядут вредные вещества из дымовых газов, например сажа, производные мазута или полициклические ароматические углеводороды. Кроме того, увеличивается степень влажности воздуха, необходимого для сушки, на то количество влаги, которое высвободилось при сгорании.

При косвенном нагревании агента сушки происходит нагревание дымовыми газами окружающего воздуха в теплообменнике. При этом ни воздух, необходимый для сушки, ни зерно, подлежащее сушке, не соприкасаются с остатками от сгорания топлива, в результате чего на зерно не могут осесть вредные вещества. Существенным недостатком сушки с использованием теплообменника является рост инвестиционных затрат и увеличение теплотребления вследствие высоких потерь тепла в теплообменнике. При этом рост теплотребления примерно на 15–20 % выше по сравнению с теплотреблением при сушке прямым нагревом.

В сушильных установках, в зависимости от их конструктивного исполнения, зерно движется внутри емкости сушильной камеры вертикально, горизонтально или под наклоном сверху вниз под воздействием силы тяжести или под воздействием механических транспортирующих механизмов. Зерно движется в виде плотного потока, при этом им заполняется вся емкость сушильной установки. В сушильных установках, где сушка происходит в псевдооживленном (кипящем) слое, скорость воздуха в зоне сушки достигает такого значения, что слой зерна начинает двигаться как псевдожидкость. За счет псевдооживления разрушаются контакты зерен между собой и зерно плавает в воздухе. В барабанных сушилках слой зерна тоже разрушается под воздействием смешивающих и транспортирующих механизмов, и зерно, как и в сушильных установках, где сушка происходит в псевдооживленном (кипящем) слое, проходит по емкости сушильной установки в виде тонкого слоя. При этом каждое отдельное зерно из слоя со всех сторон обдувается агентом сушки, за счет чего, с одной стороны, улучшается теплопередача, а с другой стороны, сушка зерна происходит более равномерно по сравнению с сушкой зерна в плотном потоке. Недостатком этого способа являются высокие инвестиционные затраты и недостаточная насыщенность отработанных газов. Поэтому следует использовать для рентабельной работы способ сушки с возвратом тепла.

Следующим отличительным признаком сушильных установок является сочетание направлений перемещения агента сушки и зерна. В зависимости от направления потока агента сушки и потока зерна, подлежащего сушке, следует различать сушильные установки с поперечным потоком, противоточные сушильные установки и прямоточные сушильные установки. Распространенным вариантом конструктивного исполнения являются так называемые шахт-

ные сушильные установки с коробами, в которых в вертикальной шахте в ряд расположены воздухопроводы, один над другим, в шахматном порядке. При этом способе агент сушки из подводящего воздухопровода проходит через слой зерна, который находится между воздухопроводами, причем агент сушки может проходить в виде поперечного, противоточного или и прямоточного потока.

С целью компенсации значительных технологических недостатков сушильных установок периодического действия были разработаны установки, где зерно постоянно перемещается. Например, к вертикальной емкости подсоединена нория, и зерно, подлежащее сушке, может отбираться в нижней части емкости, перемещаться наверх и снова засыпаться в емкость сушильной установки. За счет подмешивания сухого зерна в процессе сушки, с одной стороны, достигается более высокая равномерность сушки, с другой стороны, появляется возможность работы с более высокими температурами агента сушки. В этом случае технологический процесс сушки зерна значительно усложняется по сравнению с сушкой неподвижного слоя зерна.

Движение зерна в вертикальных емкостях сушильной установки происходит в основном под воздействием силы тяжести. В отдельных случаях, в горизонтальных или расположенных под наклоном емкостях сушильной установки, непрерывное поступательное движение зерна вызывается механическими транспортирующими механизмами, например ленточными сетчатыми транспортерами, механизмами для перелопачивания или подвижными днищами.

При этом если зерновой ворох сушится в состоянии покоя, то есть положение зерен в течение всего процесса сушки не изменяется друг относительно друга, то это неизбежно приводит к пересушиванию зерна в месте поступления агента сушки и одновременно к относительно высоким термическим нагрузкам на зерно в этой зоне [5, 6]. За счет установки устройств, обеспечивающих движение, ворошение или перемешивание зернового вороха, процесс сушки становится более равномерным; одновременно удается исключить воздействие относительно высоких термических нагрузок на часть зерна [7, 8].

Емкость сушильной установки является ее главной составной частью. По конструктивному исполнению они разделяются на горизонтальные, наклонные и вертикальные. Следующим отличительным признаком является поперечное сечение емкостей сушильных установок. Плоские и наклонные емкости имеют преимущественно прямоугольное или квадратное поперечное сечение. Вертикальные емкости могут также иметь восьмиугольное, круглое или кольцеобразное поперечное сечение.

В сушильных установках непрерывного действия, независимо от вида зерна, содержания влаги и погодных условий, зерно в одном проходе должно быть высушено до годного для хранения состояния и одновременно охлаждено до температуры окружающего воздуха [9]. Для реализации требуемой непрерывной работы сушильные установки непрерывного действия долж-

ны состоять из следующих структурных элементов: накопительного бункера сырого зерна; зоны сушки; зоны охлаждения; устройства выгрузки и подачи; вентиляторов подачи агента сушки и воздуха для охлаждения; воздухонагревателя; пылеуловителя и устройства управления и регулирования.

В настоящее время в сельскохозяйственном производстве республики преимущественно используются шахтные, колонковые, а также барабанные зерносушилки [10]. В последнее время за рубежом в типоразмерном ряде зерносушилок конвективного типа малой и средней производительности (до 9 *мл. т/ч*) все большее распространение получают передвижные бункерные сушилки периодического действия с принудительной циркуляцией высушиваемого материала (фирмы-изготовители: «Педротти» (Италия), «Моридж» и «Опика» (США), «Вертек» (Канада) и др.) [6, 11]. Зерно с помощью вертикального шнека может подвергаться циркуляции, которая способствует более равномерной его сушке. Высушенное зерно выгружается из сушилки шнеком. После разгрузки в нее подается новая порция влажного зерна. Основные достоинства передвижных бункерных зерносушилок – простота конструкции, малая удельная металлоемкость, максимальная заводская готовность к работе, не требующая сложных монтажных работ. Недостатки: более высокие по сравнению с сушилками непрерывного действия (колонковыми и шахтными) удельный расход топлива, уровень неравномерности сушки и величина повреждаемости зерна. Последний недостаток исключает применение таких сушилок для подготовки семян. Повышенная запыленность и шум во время работы требуют их установки под открытыми навесами или на открытых площадках.

Кроме разработанной классификации, была проведена оценка удельных теплотехнических показателей применяемых отечественных и зарубежных зерносушилок: удельного расхода условного топлива, тепла на сушку, агента сушки и электроэнергии. Дополнительно была определена удельная металлоемкость процесса сушки. Анализ основных теплотехнических показателей зерносушилок, массово применявшихся в хозяйствах республики, показал, что в парке преобладали энергоемкие и металлоемкие зерносушилки. Удельный расход условного топлива у них составлял 12,2–14,5 *кг/мл. т*, удельный расход тепла на сушку – 80–100 *кВт/мл. т*, удельный расход агента сушки – 4500–5750 *м³/мл. т*, удельный расход электроэнергии – 4,45–7,5 *кВт/мл. т*, удельная металлоемкость – 1330–2120 *кг/мл. т* (таблица 1).

Отечественные зерносушилки по показателям значительно уступают основным современным зарубежным аналогам, у которых удельный расход условного топлива составлял 8,2–9,5 *кг/мл. т*, удельный расход тепла на сушку – 70–75 *кВт/мл. т*, удельный расход агента сушки – 3125–4900 *м³/мл. т*, удельный расход электроэнергии – 3,28–3,9 *кВт/мл. т*, удельная металлоемкость – 312,5–666,7 *кг/мл. т* (таблица 2). Кроме того, применение современных материалов при изготовлении зерносушилок позволяет снизить удельную металлоемкость процесса сушки на 1000–1400 *кг/мл. т*.

При этом изготовление зерносушилки из дюралюминиевого сплава (фирма «Риела» (Германия)) увеличивает срок ее службы в 1,3–1,5 раза. Большое значение также имеет модульное построение конструкции зерносушилки.

Таблица 1. – Номинальные параметры и технический уровень зерносушилок, применявшихся при послеуборочной обработке зерна в сельскохозяйственных предприятиях республики в 1990–2005 гг.

Марка зерносушилки	Номинальная производительность, т /ч	Расход условного топлива, кг/т. т	Удельный расход тепла на сушку, кВт/т. т	Удельный расход агента сушки, м ³ /т. т	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т. т	Удельная металлоемкость сушки, кг/т. т
СЗПБ-2	2	12,5	100	5750	7,5	2100
СЗСБ-4	4	14,5	80	4500	7,2	1885
ЗСПЖ-8	8	13,8	78,8	4625	4,45	1325
СЗСБ-8	8	12,5	78,8	4625	7,5	1810
СЗШ-8	8	13,5	78,8	4625	5,1	1455
К4-УСА	10	12,2	79	4675	4,85	1330
СЗШ-16	16	13,4	79,4	4844	4,88	1420
М-819	20	12,2	79	5000	4,5	2010
М-839	40	12,5	79,3	5000	4,9	2120

Таблица 2. – Номинальные параметры и технический уровень современных зарубежных шахтных зерносушилок

Марка зерносушилки, фирма-производитель, страна	Номинальная производительность, т/ч	Расход условного топлива, кг/т. т	Удельный расход тепла на сушку, кВт/т. т	Удельный расход агента сушки, м ³ /т. т	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т. т	Удельная металлоемкость сушки, кг/т. т
XL110CE8000 Bonfanti (Италия)	55	9,0	72,8	3500	3,28	345,5
HR6-27-3 Tornum (Швеция)	35	9,1	71,4	3143	3,45	428,6
RCW-600 Меру (Финляндия)	20	9,5	72,5	3250	3,6	600
SKN 7A/48 DS Law-denis (Великобритания)	40	8,8	72,5	3250	3,5	500
KCD 3.20.4 Kongs-kilde (Дания)	40	8,5	70,0	3125	3,4	340
GDT300/28/2 Riela (Германия)	40	8,7	75	3000	3,35	312,5
DryJet 60 Schmidt-Seger (Германия)	25	8,2	70	3550	3,7	600
V8-12/2 Goldsaat (Германия)	45	8,5	73	3520	3,9	666,7
74M Antti (Финляндия)	35	9,2	74,3	3430	3,8	657,1

Выводы

Таким образом, способы сушки зерна и сушильные установки, разработанные для их осуществления, можно классифицировать по следующим основным технологическим признакам: принципу действия, конструктивному исполнению, параметрам сушильного агента, способам подачи сушильного агента и зерна.

Сравнительный анализ теплотехнических параметров отечественных и зарубежных зерносушилок показал, что расход тепла на каждую высушенную плановую тонну зерна в республике при использовании зерносушилок типа ЗСПЖ-8, К4-УСА, СЗШ-16, М-819 выше на 4–5 кВт, расход электроэнергии – на 0,5–1,0 кВт, теплоносителя – на 800–1500 м³.

18.06.2015

Литература

1. Muhlbauer, W. Handbuch der Getreidetrocknung / W. Muhlbauer. – Glenze: Agrimedia, 2009. – 523 s.
2. Bruswitz, G.H. Density of rewetted high moisture grains / G.H. Bruswitz // Transactions of the ASAE. – 18 (1975). – № 5. – Pp. 935–938.
3. Shedd, C.K. Resistance of grain and seeds to air flow / C.K. Shedd // Agricultural Engineering. – 1953. – № 9 (34). – Pp. 616–621.
4. Мальтри, В. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / В. Мальтри, Э. Петке, Б. Шнайдер; сокр. пер. с нем.: В.М. Комиссаров, Ю.Л. Фрегер; под. ред. В.Г. Евдокимова. – М.: Машиностроение, 1979. – 525 с.
5. Высоцкий, В.А. Обоснование выбора аэродинамической схемы шахтной зерносушилки / В.А. Высоцкий, В.П. Чеботарев // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / РУНИП «ИМСХ НАН Беларуси». – Минск, 2006. – Вып. 40. – С. 172–177.
6. Dashkov, V. Energy-saving technological process of grain and seed low temperature drying progressive eco-friendly technological processes in agricultural engineering / V. Dashkov, V. Chebotarev // The International Conference, Lithuanian Institute of Agricultural Engineering Raundondvaris, 19–20 September 2002 yr. – Lithuania, 2002. – Pp. 21–24.
7. Кршеминский, В.С. Сушка семян трав / В.С. Кршеминский, Н.Я. Попов. – М.: Колос, 1984. – 103 с.
8. Анискин, В.И. Консервация влажного зерна / В.И. Анискин. – М.: Колос, 1968. – 286 с.
9. Скороваров, М.А. Режимы сушки зерна / М.А. Скороваров. – М.: Изд-во технической и экономической литературы по вопросам хлебопродуктов, 1959. – 66 с.
10. Ловкис, В.Б. О критериях энергетической эффективности сельскохозяйственных технологий / В.Б. Ловкис, В.А. Колос // Механизация и электрификация сельского хозяйства: тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2008. – Вып. 42. – С. 13–19.
11. Колос, В.А. Анализ энергетической эффективности технологии производства картофеля в Северо-Западном регионе России / В.А. Колос, В.Б. Ловкис // Картофелеводство: сб. науч. тр. – Минск: РУП «НПЦ НАН Беларуси по картофелеводству и плодоовощеводству», 2009. – Т. 16. – С. 292–297.