

*С.Н. Бруздаева*  
*S.N. Bruzdaeva*

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ  
ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ СЫПУЧИХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
И ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОДУКТОВ И МАТЕРИАЛОВ**  
**DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL  
SCHEMES FOR COOLING BULK AGRICULTURAL AND  
INDUSTRIAL PRODUCTS AND MATERIALS**

*Аннотация:*

Научно-технические изыскания, посвященные обоснованию процессов охлаждения сыпучих материалов в сельскохозяйственном и промышленном производствах, вопросы интенсификации передачи теплоты между сыпучим материалом и хладагентом, отводящим теплоту, снижения металлоемкости установок, минимального отрицательно-го воздействия на продукт остаются актуальными и требуют решения.

Охлаждение сыпучих продуктов и материалов — процесс энергозатратный и продолжительный. В статье предложены разработки конструктивно-технологических схем охладителей для сыпучих продуктов и материалов с целью интенсификации процесса охлаждения. Выполнен анализ существующего оборудования для охлаждения сыпучих продуктов и материалов в отраслях промышленности. Анализ показал, что для охлаждения используется воздух, иногда вода, что является энергозатратным, длительным процессом, не обеспечивающим качество исходного материала и продуктов; отмечено разрушение оболочки и структуры продуктов и материалов после охлаждения.

С целью устранения указанных недостатков разработаны две схемы: 1. конструктивно-технологическая схема установки для охлаждения сыпучих материалов с охладительными камерами, позволяющая транспортировать и одновременно перемешивать материал, не разрушая его структуру и обеспечивая качество; 2. конструктивно-технологическая схема охладителя с хладопроводами, позволяющая перемешивать сыпучий материал при непосредственном кипении аммиака.

Проведенные расчеты показывают, что в разработанных схемах с перемешиванием и транспортировкой материала спирально-винтовыми рабочими органами время охлаждения сокращается до 1,5—2,8 ч (для зерновых материалов), оптимальная скорость вращения частиц составляет от 720 до 960 об/мин, что позволяет увеличить коэффициент теплообмена в 2,1 раза по сравнению с типовыми установками. Регулируя скорость вращения СВРО, шнеков, скорость отделения пузырьков

пара хладагента на поверхности охладительных камер и хладопроводов, можно добиться значительного сокращения времени охлаждения с возможностью регулирования и автоматизации процесса. Данные по интенсификации теплообмена в данном исполнении могут быть полезными для разработки схем охлаждения сыпучих и вязких материалов.

*Ключевые слова:* охлаждение, теплообмен, хладагент, бесконтактный способ отвода теплоты, спирально-винтовые рабочие органы.

*Abstract:*

Scientific and technical research devoted to the substantiation of cooling processes for bulk materials in agricultural and industrial production, issues of intensifying heat transfer between bulk material and the refrigerant that removes heat, reducing the metal consumption of installations, and minimizing the negative impact on the product require solutions and remain relevant.

Cooling of bulk products and materials is an energy-intensive and long-lasting process. The article proposes the development of constructive and technological schemes of coolers for bulk products and materials in order to intensify the cooling process. An analysis of existing equipment for cooling bulk products and materials in industrial sectors was carried out. The analysis showed that air and, in some cases, water are used for cooling, which is an energy-consuming, time-consuming process that does not ensure the quality of the starting material and products; destruction of the shell and structure of products and materials after cooling is noted.

In order to eliminate these shortcomings, two schemes have been developed: 1. a constructive and technological scheme of an installation for cooling bulk materials with cooling chambers, which will allow transporting and simultaneously mixing the material without destroying its structure and ensuring quality; 2. a constructive and technological scheme of a cooler with cold ducts, which will allow mixing bulk material at direct boiling of am.

The calculations show that in the developed schemes with mixing and transporting the material by spiral-screw working bodies, the cooling time is reduced to 1.5—2.8 hours (for grain materials), the optimal particle rotation speed will be from 720 to 960 rotations per minute, which will increase the heat transfer coefficient by 2.1 times compared to standard installations. In the schemes, by regulating the speed of rotation of the cooling system, screws, the speed of separation of refrigerant vapor bubbles on the surface of the cooling chambers and cold pipes, a significant reduction in cooling time can be achieved with the possibility of regulating and automating the process. Data on the intensification of heat transfer in this design can be useful for the development of cooling schemes for bulk and viscous materials.

*Keywords:* cooling, heat exchange, refrigerant, non-contact method of heat removal, spiral-screw working bodies.

Во всех странах мира, в том числе в России, потребность в искусственном холоде нарастает высокими темпами. Актуальными для отечественной промышленности остаются вопросы разработки холодильной техники, снижения удельного энергопотребления, повышения надежности и безопасности работы в различных отраслях народного хозяйства страны — сельскохозяйственной, химической, молочной, пищевой и многих других.

Неразвитость инфраструктуры охлаждения и хранения сырья и продовольствия не позволяет комплексно перерабатывать исходное сырье и создавать оптимальные условия для хранения, что приводит к дополнительным потерям, снижению безопасности и качества продукции.

Цель данной работы: разработка рациональных конструктивных схем охладителей сыпучих сельскохозяйственных материалов и промышленных продуктов с использованием бесконтактного способа отвода теплоты, т. е. непосредственного кипения хладагента (аммиака). Аммиак в качестве хладагента используется в промышленном холоде более 130 лет и остается альтернативой многим хладагентам (фреонам), так как не относится к озонразрушающим веществам (ODP) и парниковым газам (GWP/ПГП), легко удаляется из помещения. На 1 кВт холода необходимо 100—150 г аммиака.

Теоретические исследования направлены на получение зависимостей коэффициента теплообмена и значений окружных скоростей в сочетании с экспериментальными исследованиями отдельных установок<sup>18</sup> с целью определения оптимальных режимов работы установки для охлаждения сыпучих сельскохозяйственных и промышленных материалов.

Охлаждения требуют материалы растительного происхождения и материалы различных производств, гранулированные, кристаллические, порошкообразные материалы: сухие строительные смеси, минеральные удобрения, зерновой и семенной материал, сахар, гранулят пластмассы, кормовые средства, дрожжи, фармацевтический гранулят, гранулированный концентрат, картофельное пюре сухое и многие другие материалы и продукты.

В качестве примера приведем процесс охлаждения зерна, для которого используется воздух: около 2000 м<sup>3</sup>/ч на 1 т зерна, продолжительность охлаждения — до 6 и более часов, расход энергии охлажда-

---

<sup>18</sup> *Артемов В.Г., Игонин В.Н., Исаев Ю.М.* Теоретические основы процесса выгрузки сыпучего материала пружинно-транспортирующим рабочим органом // Тр. МНТК по ТММ. 100 лет механизму Беннета. Казань, 2004. С. 198—202.

ющих устройств составляет от 3-5 кВт/ч на 1 т зерна. При охлаждении зернового материала наблюдаются забивание отверстий перфорации семенами мелкосеменных культур. Кроме того, плохая проходимость воздушного потока при движении вертикального столба охлаждаемого материала вызывает травмирование внешней оболочки зерна (а также, например, нарушение структуры кристалла сахара) при его охлаждении в охладителях барабанного типа.

В существующем оборудовании применяются технологии косвенного охлаждения: охлаждение осуществляется за счет отвода теплоты хладоносителем — водой или воздухом. Использование наиболее распространенного конвективного способа отвода теплоты от сыпучего материала в указанных установках является энергозатратным (потребление электроэнергии при использовании типового аппарата составляют 7 кВт/ч на 1 т продукта).

Таким образом, актуальны научно-технические изыскания по обоснованию процессов охлаждения сыпучих материалов в сельскохозяйственном производстве, исследования вопросов интенсификации передачи теплоты между сыпучим материалом и хладагентом, отводящим теплоту, минимального отрицательного воздействия на продукт. Все эти вопросы требуют решения.

На Рисунке 1 представлена схема охладителя сыпучих материалов с охладительными камерами.

Охладитель сыпучих материалов включает бункер 1 и охладительную шахту 2. В верхней части бункера 1 установлена крышка 3 с загрузочной горловиной 4. Нижняя часть бункера 1 снабжена выгрузной горловиной 5, установленной по оси симметрии бункера 1. Нижняя часть бункера 1 выполнена конической, с уменьшающимся диаметром в сторону выгрузной горловины 5. Во внутренней полости бункера 1 на равном расстоянии от вертикальной оси симметрии расположены охладительные камеры 6 с ворошилками 7 спирально-винтового типа, причем ворошилки 7 установлены в охладительных камерах 6 с возможностью вращения вокруг своей оси, а внешняя часть бункера 1 снабжена теплоизоляцией 8.

Во внутренней полости бункера 1 в верхней и нижней его частях диаметрально установлены перегородки 11 и 12. Охладительные камеры 6 установлены между перегородками 11 и 12. Сыпучий материал непрерывно подаются в охладитель, который заполняет пространство над перегородкой 11. Далее ворошилки 7 захватывают сыпучий материал и равномерно транспортируют его в сторону выгрузной горловины 5, охлаждая в процессе его транспортировки. Из охладительных камер 6 охлажденный сыпучий материал поступает на нижнюю коническую часть бункера 1 и самотеком выходит из бункера 1 через выгрузную горловину 5.

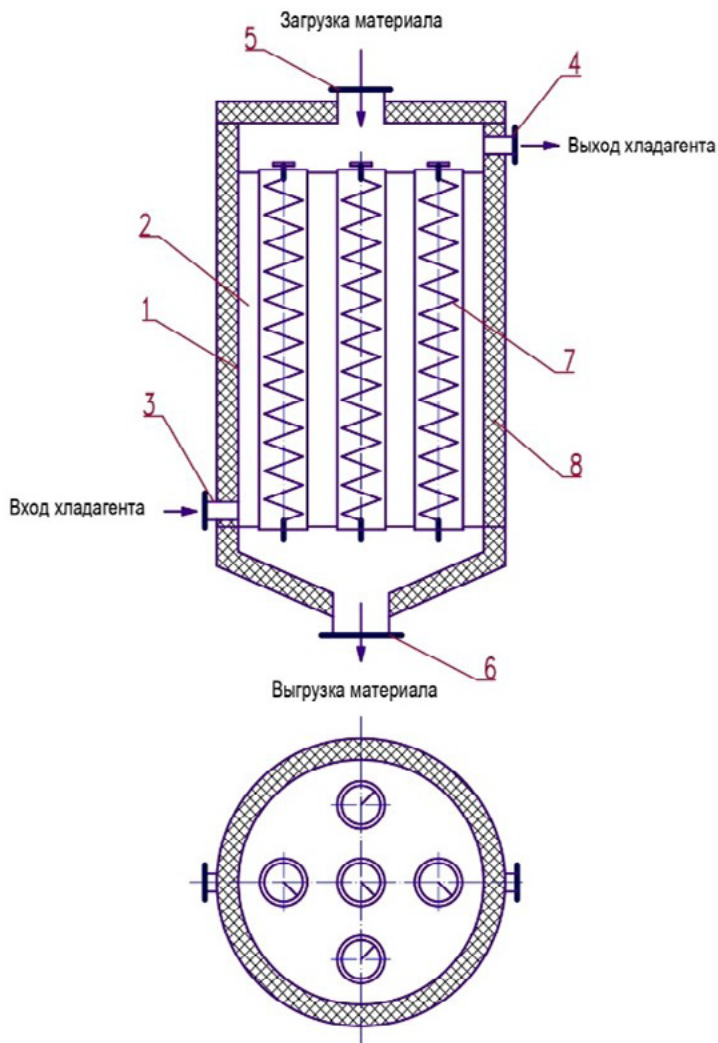


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема установки для охлаждения сыпучих материалов с охладительными камерами. 1. бункер; 2. шахта; 3. верхняя крышка; 4. загрузочное отверстие; 5. выгрузное отверстие; 6. охладительная камера; 7. спирально-винтовые рабочие органы; 8. теплоизоляционный слой; 9—10. входной и выходной патрубки для хладагента; 11—12. Верхняя и нижняя решетки.

Наличие теплоизоляции 8 позволяет исключить поступление теплопритоков наружного воздуха в хладагент и контакт с ним. Выполнение бункера 1 цилиндрическим позволяет разместить в нем равномерно охлаждающую камеру 6 и обеспечить равномерный контакт хладагента с наружной поверхностью охлаждающей камеры 6. Наличие ворошилок 7, установленных в охлаждающих камерах 6 с возможностью их вращения и автоматизации процесса, позволит перемешивать охлаждаемый сыпучий материал в процессе его транспортировки, в зависимости от температуры исходного материала изменять частоту вращения спирально-винтовых рабочих органов (СВРО) и выход материала из выгрузной горловины 5.

Для интенсификации процесса теплообмена данная разработка позволяет следующее: регулируя скорость вращения спирально-винтовых рабочих органов и скорость отделения пузырьков пара хладагента на поверхности охлаждающих камер, можно добиться значительного сокращения времени охлаждения с возможностью автоматизации процесса.

На Рисунке 2 представлена конструктивно-технологическая схема охладителя сыпучих материалов с кипением аммиака в хладопроводах. Сыпучий материал загружается в бункер 1 и при перемешивании шнековыми мешалками 4 охлаждается циркулирующим в хладопроводах аммиаком.

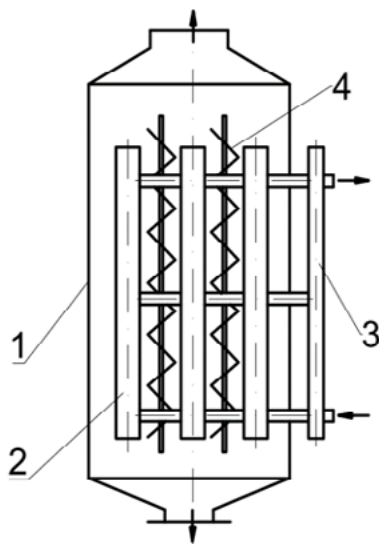


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема охладителя сыпучих материалов с хладопроводами. 1. бункер; 2. хладопроводы; 3. коллектор; 4. шнековые мешалки.

Таким образом, в исследовании предложено создание активного слоя сыпучего материала за счет перемешивания его спирально-винтовыми рабочими органами (Рис. 1) или шнековыми мешалками (Рис. 2). Непосредственное кипение аммиака в охлаждающей камере (Рис. 1) и в хладопроводах (Рис. 2) позволит значительно сократить процесс и выполнять охлаждение качественно. При конструировании теплообменной аппаратуры ставится задача создания таких скоростей потоков теплоносителей (их рабочих сред), при которых коэффициенты теплоотдачи и гидравлические сопротивления были бы экономически выгодными.

Моделирование процессов охлаждения сыпучих материалов и продуктов, а также технических средств, реализующих эти процессы, основывается на тепловых процессах, происходящих при отводе тепла от других продуктов и материалов.

При бесконтактном способе передачи теплоты в установке теплота отводится от сыпучего материала к хладагенту через поверхность охлаждающей камеры цилиндрического типа. Тепловой поток, проходящий через однослойную цилиндрическую стенку, описывается выражением:

$$Q = \frac{(t_{c1} - t_{c2})\pi l}{\frac{1}{2\lambda} \lg \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт}$$

где  $t_{c1}$ ,  $t_{c2}$  — температура стенки охлаждающей камеры, °С;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала стенки охлаждающей камеры, Вт/м \* К;  $d_2$ ,  $d_1$  — диаметр, м.

Линейная плотность теплового потока, проходящего через однослойную цилиндрическую стенку охлаждающей камеры, описывается следующим выражением:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{n+1}\pi}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \text{ [Вт/м]}.$$

Затраты энергии на процесс охлаждения в охладителях зависят от множества факторов: входных параметров исходного материала и хладагента, способа отвода теплоты от охлаждаемого материала, потерь в окружающей среде и др., а в представленных разработках — от скорости вращения СВРО или шнековых мешалок.

Критерии теплообмена описываются уравнением для цилиндрической поверхности (охладительные камеры, хладопроводы):

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr_{ст} / Pr_{ж}) \times (1 + 0,092 \varphi^{1,73}),$$

где Re, Pr — критерии Рейнольдса и Прандтля.

Выбор оптимальной скорости вращения СВРО (от 720 до 960 об/мин)<sup>2</sup> имеет большое значение для эффективной работы охладителя, так как с увеличением скорости перемешивания сыпучего материала значительно возрастают коэффициенты теплоотдачи и уменьшается скорость охлаждения. Поток перемешиваемого сыпучего материала можно отнести к турбулентному потоку, что ускоряет процессы переноса теплоты: увеличиваются тепловые потоки на теплопередающую стенку, что приводит к росту теплоотдачи, снижению термического сопротивления теплопередаче, теплообмен интенсифицируется.

Изменение теплового потока в этом случае характеризуется количеством теплоты, которое отводится при разных условиях в двух конструктивно-технологических схемах:

1. Непосредственное кипение хладагента. Предлагаемое решение должно обеспечить двустороннюю интенсификацию процессов теплоотдачи и увеличить площадь теплообменной поверхности по сравнению с гладкой цилиндрической поверхностью в среднем в 1,5—1,7 раза, металлоемкость конструкций снижается как минимум на 17 %. На основании анализа существующей литературы по данной теме можно сделать вывод о влиянии на теплоотдачу структуры поверхности межтрубного пространства, принимая во внимание не только форму и размер, но и количество каналов, расстояние между ними и т. д.

2. Перемешивание материала при охлаждении. Это позволит сократить время охлаждения и повысить качество процесса. Использование СВРО не оказывает разрушающего воздействия на оболочку и структуру материала и продуктов<sup>19</sup>.

Таким образом, рациональным направлением развития отечественных установок для охлаждения сыпучих продуктов и материалов является создание установок с непосредственным охлаждением, со схемой движения хладагента и сыпучего материала по противоточной схеме, с перемешиванием материала в процессе охлаждения с целью интенсификации теплообмена, позволяющего эффективно отводить теплоту.

Полученные зависимости позволяют сделать вывод: коэффициент теплообмена повышается с увеличением скорости вращения спирально-винтовых рабочих органов в 2,1 раза по сравнению с работой типовых установок.

---

<sup>19</sup> Бруздаева С.Н. Повышение качества сыпучих материалов путем совершенствования конструктивных и технологических параметров охладителя // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Материалы VII Международной научно-практической конференции, 4-5 февраля 2016 г., Ульяновск. Т. II. Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2016. С. 21—24.



Разработанные схемы установок-охладителей могут быть рекомендованы для применения в процессах охлаждения сыпучих материалов сельскохозяйственного и промышленного назначения в условиях соответствующих профильных предприятий. Данные по интенсификации теплопередачи в данном исполнении могут быть полезными для разработки схем охлаждения сыпучих и вязких материалов.

### *Список литературы*

1. *Артемов В.Г., Игонин В.Н., Исаев Ю.М.* Теоретические основы процесса выгрузки сыпучего материала пружинно-транспортирующим рабочим органом // Тр. МНТК по ТММ. 100 лет механизму Беннета. Казань, 2004. С. 198—202.

2. *Бруздаева С.Н.* Повышение качества сыпучих материалов путем совершенствования конструктивных и технологических параметров охладителя // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения. Материалы VII Международной научно-практической конференции, 4-5 февраля 2016 г., Ульяновск. Т. II. Ульяновск: УГСХА им. П.А. Столыпина, 2016. С. 21—24.

### *Сведения об авторе*

*Бруздаева Светлана Николаевна*, кандидат технических наук, доцент, Поволжский казачий институт управления и пищевых технологий (филиал) Московского государственного университета технологий и управления им. К.Г. Разумовского. E-mail: [bruzdaeva@mail.ru](mailto:bruzdaeva@mail.ru)

### *Information about the author*

*Bruzdaeva Svetlana Nikolaevna*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Volga Cossack Institute of Management and Food Technologies (branch) of the K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management. E-mail: [bruzdaeva@mail.ru](mailto:bruzdaeva@mail.ru)