

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ И АВТОМАТИКИ

На правах рукописи

УДК 66.047

МУРАДОВ ИСМОИЛДЖОН

**СУШКА СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА С ПРИМЕНЕНИЕМ
ФОНТАНИРУЮЩЕГО СЛОЯ**

05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ташкент - 2011

Работа выполнена на кафедре «Теплоэнергетика» Ташкентского государственного технического университета имени Абу Райхана Беруни

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мухиддинов Джалалиддин Насырович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Мирзаев Шавкат Мустахкимович.
кандидат технических наук, доцент
Бадалов Абдумалик Абдумуминович.

Ведущая организация: Бухарский инженерно – технический институт
высоких технологий.

Защита состоится «___» _____ 2011 г. в _____ часов на заседании Специализированного совета К.015.28.01 в Институте энергетики и автоматики Академии наук Республики Узбекистан по адресу: 100125, Ташкент, ул. Дурмон йули, 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института энергетики и автоматики АН Республики Узбекистан.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук

О.Х. Ишназаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность проблемы. Актуальность данных исследований обусловлена острой потребностью населения страны в качественных продуктах питания и продукции пищевой промышленности, в частности, получаемой из маслосодержащих семян подсолнечника. При этом необходимо улучшать качество конечной продукции с одновременным повышением производительности аппаратов и выхода растительного масла и снижением её себестоимости. На эти показатели значительное влияние оказывает тепловая обработка.

Одним из распространенных теплотехнологических процессов является сушка, которая существенно влияет на качество, время обработки и энергопотребление. На долю последней приходится до 60% всех энергозатрат.

Пути дальнейшего совершенствования техники сушки связаны с использованием высокоэффективных сушилок со взвешенным слоем материала, среди которых выгодно выделяются аппараты с фонтанирующим слоем, обеспечивающие не только улучшение технико-экономических показателей, но и создающие благоприятные условия для достижения высокого качества готовой продукции. Последнее требует наличия подробной и достоверной информации о значениях параметров процесса и свойствах обрабатываемого материала.

Основное направление данного исследования состоит в разработке эффективного метода сушки семени подсолнечника. Актуальность данных исследований также обусловлена все возрастающей потребностью различных отраслей промышленности в этом продукте, а также необходимостью улучшения их качества (масличность и биохимические свойства), на которое в значительной степени влияет процесс обезвоживания исходного сырья.

Реферируемая диссертационная работа посвящена комплексному исследованию свойств семян подсолнечника как объекта теплотехнологической обработки (сушки), выбору на этой основе эффективного способа и типа сушильного аппарата сушка подсолнечника.

Степень изученности проблемы сушки подсолнечника: Наибольший вклад в развитие теории и техники сушки внесли М.А.Лыков, Б.С.Сажин, Д.Н.Мухиддинов, Х.Ф. Джурев и др.

На основе анализа современного состояния вопросов гидродинамики и тепломассообмена в фонтанирующих слоях, а также различных вариантов аппаратного оформления процесса сушки можно сделать следующие выводы:

Энергетические и технологические показатели существующих сушильных установок подсолнечника не отвечают требованиям современного развития техники. Учёт форм связи влаги с материалом предопределяет правильный выбор рационального способа сушки.

Применение известных закономерностей гидродинамики и тепломассообмена к термолабильным маслосодержащим материалам связано с существенными трудностями.

Отсутствуют сушильные аппараты с фонтанирующим слоем для сушки термолабильных маслосодержащих семян, не достаточно выполнена теоретически проработана условия тепломассообмена в сушильных аппаратах фонтанирующего слоя для сушки подсолнечника, не предложены законченные инженерные методы расчета и проектирования.

Методические положения, которые позволяли бы разрабатывать научно обоснованные эффективные технологии сушки маслосодержащих семян с учетом технологических ограничений отсутствуют не только в отечественной, но и в зарубежной литературе.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР:

Работа выполнена в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ кафедры «Теплоэнергетика» Ташкентского государственного технического университета и связана с планами внедрения новых перспективных технологий Ассоциации «Узтабакжирпром».

Цель исследования. Основной целью диссертационной работы являются комплексное исследование семян подсолнечника как объекта сушки с целью выбора эффективного способа сушки, разработка рациональной технологической схемы, оценка энергетической и технико-экономической эффективности применения сушильной установки фонтанирующего слоя.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие конкретные и малоизученные задачи исследования:

- Анализ теоретических и экспериментальных работ, посвященных применению аппарата фонтанирующего слоя для технология сушки маслосодержащих семян с учетом гидродинамики процесса.
- На основе исследование термограмм и кривых сорбции-десорбции масличных семян и их комплексного анализа выбор рационального способа сушки.
- Разработка теоретически и экспериментально обоснованной математической модели процесса нагрева, сушки и охлаждения масличных семян в фонтанирующем слое.
- Экспериментальное исследование гидродинамических закономерностей и процессов сушки семян подсолнечника в фонтанирующем слое в выбранном аппарате.
- Экспериментальное исследование влияния теплотехнологических параметров на процесс сушки семян подсолнечника в выбранном аппарате.
- Определение энергетических, технико-экономических показателей разработанной технологии сушки масличных семян и разработка

инженерной методики расчета сушильного аппарата для сушки подсолнечника масличных семян.

Объект и предмет исследования: Объектами исследования являлись семена подсолнечника, процессы гидродинамики и сушки маслосодержащих семян. Предмет исследования – аппарат с фонтанирующим слоем для сушки масличных семян.

Методы исследования. При исследовании использованы научные положения процессов и аппаратов тепло-технологии, современные методы математического моделирования и оптимизации тепло-технологических процессов с применением высокоточных измерительных приборов при выполнении экспериментов.

Гипотеза исследования. Применении современного системного метода математического моделирования с учетом технологических ограничений для создания инженерных методик расчета и проектирования сушильной установки с фонтанирующим слоем семян подсолнечника.

Основные положения, выносимые на защиту: результаты тепло-технологических исследований, направленных на выявлении гидродинамических закономерностей поведения взаимодействующих фаз в ходе осуществления процесса сушки в условиях фонтанирующего слоя семян подсолнечника, изучение кинетики сушки, обоснование рациональных энергетических и технологических показателей разработанной рациональной технологической схемы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- получены термограммы процесса сушки и определены температурные пределы проведения процесса сушки и сорбционно-структурные свойства подсолнечника, кунжута и рапса;
- на основе экспериментальных данных предложены математические формулы гидродинамики сушильной камеры с фонтанирующим слоем и кинетики сушки семян подсолнечника;
- установлено на основе математического моделирования процесса сушки семян подсолнечника в условиях фонтанирующего слоя
- получены новые знания о гидродинамике и кинетике процесса сушки семян подсолнечника, в установке с фонтанирующим слоем материала;
- определены свойства и характеристика семян подсолнечника как объекта теплотехнологической обработки.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Показана целесообразность и перспективность применения аппарата с фонтанирующим слоем для сушки семян подсолнечника. Исследованы и систематизированы сведения о свойствах и характеристиках семян подсолнечника как объектов теплотехнологической обработки, знание которых имеет существенное значение процессов сушки для расчета и проектирование установок для их осуществления. Разработанная математическая модель процесса сушки с фонтанирующим слое семян подсолнечника позволяет использовать ее для широкого круга материалов, в

широком диапазоне изменения режимных параметров, существенно расширить информацию о локальных и интегральных характеристиках сложного тепломассообменного процесса, сократив при этом объем необходимых экспериментальных исследований.

На основе теоретических и экспериментальных данных разработан алгоритм инженерного расчета и проектирования сушильной установки с фонтанирующим слоем семян подсолнечника. Оценена технико-экономическая эффективность организации в промышленных масштабах сушильного аппарата с фонтанирующим слоем семян подсолнечника.

Разработан и создан лабораторный стенд для проведения экспериментов по сушке подсолнечника. Полученные теоретические расчетные зависимости сопоставлены с экспериментальными данными для проверки на адекватность.

Реализация результатов. Научные и практические результаты работы использованы при проектировании и изготовлении полупромышленной сушильной установки производительностью 100 кг/ч, испытанной на Каршинском «МЭЗ», а также при разработке технического проекта сушильного аппарата для семян подсолнечника производительностью 10000 кг/ч. Ожидаемая экономическая эффективность от внедрения одной сушилки в производство составляет 10 млн.сум в год.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались: на международной научно-технической конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики» (18-20 декабря 2006, г. Ташкент), на третьей Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики» (21-23 ноября 2007, г. Екатеринбург), на научной конференции «Интенсификация проблем интеграции науки и производств» (Бухарский технологический институт пищевой и легкой промышленности, 20-21 апреля 2007); Республиканской научно-практической конференции «Проблемы эффективного использования топливно-энергетических ресурсов» (19-20 декабря 2008, Каршинский инженерно-экономический институт), на научных семинарах кафедр «Теплоэнергетика» ТашГТУ и «Теплофизика и теплоэнергетика» Каршинского государственного университета.

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы и приложений.

Диссертация содержит 131 страниц, в том числе 21 страницу иллюстрационного материала, 13 таблиц, библиографию из 121 наименования работ отечественных и зарубежных исследователей и приложения на 19 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертационной работы обоснована актуальность проблемы, изложено современное состояние вопроса, охарактеризованы объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи исследования, описаны научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, раскрыты научная и практическая значимость результатов исследования, приведены сведения об апробации, публикациях и практической реализации результатов работы. Описаны также краткое содержание глав и сформулировано заключение.

В первой главе проанализированы современные состояния вопросов гидродинамики и тепло-массообмена в фонтанирующих слоях, а также различные варианты аппаратного оформления процесса сушки в них. Показано, что энергетические и технологические показатели существующих сушильных установок не отвечают требованиям современного состояния техники для сушки конкретных материалов. Имеющиеся эмпирические зависимости не позволяют рассчитать и сконструировать аппаратов фонтанирующего слоя с учетом связи влаги с материалом, что предопределяет правильный выбор способа сушки. В заключении главы сформулированы задачи исследования.

Во второй главе исследованы семена подсолнечника как объекта теплотехнологической обработки и осуществлен выбор на его основе рационального способа и типа сушильного аппарата по классификации материалов как объектов сушки. Уточнен анализ теплотехнических принципов оформления технологического процесса сушки.

Исследованы технологические, физико-химические, теплофизические, термографические, сорбционно-структурные свойства семян подсолнечника, рапса и кунжута, формы и виды связи влаги в них.

Для теоретического обоснования метода интенсификации процесса сушки были определены механизм связи влаги масличных семян которой, главным образом, предопределяет тепломассоперенос в процессе сушки.

Получены деривотограммы нагревания материалов, по которым можно обосновать допустимую температуру нагрева материала. На основе анализа полученных экспериментально изотерм сорбции-десорбции масличных семян произведена классификация материала по коллоидно-физическим свойствам, а также рассчитаны дифференциальные и интегральные функции распределения пор по радиусам. На основании результатов сорбции паров воды определяли параметры капиллярно-пористой структуры образцов, семян подсолнуха, кунжута и рапса. На основании результатов проведенных исследований изотерм сорбции и десорбции подсолнуха, кунжута и рапса были определены X_m -емкость монослоя, S —удельная поверхность, W -суммарный объем пор, r_k -критический радиус пор. Эти данные позволяют определить время сушки и формы связи влаги с исследованными материалами.

Капиллярно-пористая структура образцов семян подсолнечника, кунжута и рапса по данным сорбции паров воды приведены в таб.1.

Капиллярно-пористая структура семян подсолнуха, кунжута и рапса по данным сорбции воды.

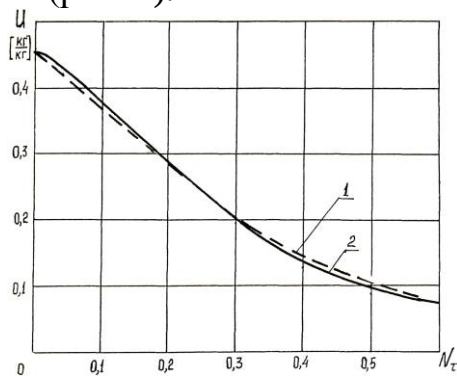
Таблица 1

Образец	Семена подсолнечника	Кунжут	Рапс
Емкость монослоя, $X_m, \text{г/г}$	0,0028	0,0052	0,0035
Удельная поверхность, $S_{уд}, \text{м}^2/\text{г}$	9,858	18,377	12,302
Суммарный объем пор, $W_o, \text{см}^3/\text{г}$	0,136	0,070	0,092
Критический радиус пор, $r_k, \text{А}$	275,9	76,2	149,5

На основании полученных экспериментальных данных относительно основных свойств семян подсолнечника как объекта тепло-технологической обработки выбраны в качестве модельных семена хлопчатника. Согласно известной классификации семена хлопчатника являются типичным представителем группы маслосодержащих материалов. Кроме того, свойства семян хлопчатника и семян подсолнечника во многом совпадают.

На основаниях комплексного анализа свойств семян подсолнечника как объекта тепло-технологического обработки по значению максимального гигроскопического влагосодержания по классификационной таблице профессора Мухиддинова Д.Н. выбран сушильный аппарат фонтанирующего слоя.

Пользуясь сорбционными и другими свойствами семян хлопчатника и подсолнечника, строим расчетную обобщенную кривую сушки для исследуемого материала в координатах $(U, N\tau)$ (где N -максимальная скорость сушки) и сравниваем ее с обобщенной кривой сушки, полученной экспериментальным путем (рис. 1).



1- расчет; 2- эксперимент

Рис. 1. Обобщенные кривые сушки для семян подсолнечника.

В третьей главе подробно рассмотрен характер движения газа в аппарате фонтанирующего слоя для установления эффективности взаимодействия его с твердой фазой.

Гидродинамическую обстановку в аппарате аппроксимируем ячеечной моделью с числом ячеек j , характеризующим интенсивность перемешивания твердой фазы в аппарате.

Число ячеек j связано с дисперсией δ_θ^2 безразмерной C - кривой $c(\theta)$:

$$j=1/\delta_\theta^2$$

Формализацию структуры гидродинамических потоков осуществлена в классе ячеечных моделей. Для оценки параметра ячеечной модели (n -число ячеек) воспользуемся формулой:

$$n=1/\sigma^2,$$

В свою очередь, $\sigma^2=(M^2)-(M1)^2$ – центральный момент 2-го порядка
Здесь: $M1=I^{(1)}/I^{(0)}$, $M2=I^{(2)}/I^{(0)}$ – начальные моменты;

$I^{(i)} = \int c(t) t^i dt$ – интегральная характеристика i -го порядка.

Интегральные характеристики экспериментальных функций отклика вычислены по формулам метода трапеции. Получено: $(1-n)=64$; $(2-n)=3,13$; $(3-n)=3,61$; $(4-n)=2,16$; $(5-n)=1,26$.

Характерной особенностью фонтанирующего слоя является интенсивная циркуляция частиц, что приближает аппарат к моделям идеального перемешивания, для которых распределение частиц по времени пребывания:

$$C/C_0 = \exp(-\tau/\tau_{cp}). \quad (1)$$

Поскольку в момент времени $\tau = 0$ концентрация частиц $C = C_0 = 1$, то уравнение (1) можно представить в виде:

$$\tau = \tau_{cp} \ln 1/C, \quad (2)$$

где C - весовая доля от первоначальной загрузки, которая остается в аппарате по истечении времен τ .

Расчетно-экспериментальная работа по уравнению (2) показывает, что за время $\tau = \tau_{cp}$ в аппарате остается еще около 40% тех частиц, которые находились в нем в начальный момент времени. Для того, чтобы в аппарате сменилось 90% частиц, требуется время $\tau = 2,4\tau_{cp}$. Иными словами, число секции фонтанирующего слоя должно быть равно 3. Это время можно найти по зависимости:

$$C/C_0 = \exp[-0.92(\tau-0.1)], \quad (3)$$

из которой следует, что 92% объема фонтанирующего слоя составляет область идеального перемешивания и 8% - застойная зона.

Процесс сушки разделяется на фазы нагрева, самой сушки и охлаждения. Нами было предложено методика расчета процесса нагрева и охлаждения частиц семян подсолнечника в фонтанирующем слое. Последний состоит из двух граничащих областей – фонтанирующего ядра и кольца.

При отсутствии тепловых потерь, внутренних источников тепла и количественных изменений в фонтанирующем слое уравнении теплообмена и теплового баланса можно записать:

$$Q = \alpha_m F \Delta t, \quad (4)$$

$$Q = Bc_m (t''_m - t'_m) = F_p G_c c_{mc} (t'_c - t''_c) \quad (5)$$

При условии постоянства температуры по всей высоте фонтанирующего слоя разность температур между теплоносителем и материалом на выходе из фонтанирующего слоя равна:

$$\Delta t = t''_c - t''_m. \quad (6)$$

Для определения t''_c необходимо совместно решить уравнения (4) и (5), приняв значение $\Delta t = t''_c - t''_m$.

Для случая, когда среднюю разность температур между материалом и средой можно принять равной конечной разности, получим

$$Q = F_p G_c c_{mc} (t'_c - t''_c) = \Delta_m F (t''_c - t''_m). \quad (7)$$

Для определения α_t в фонтанирующем ядре слоя, где критерий $Re_c > 1000$ используем уравнение

$$Nu = \alpha_m d_c / \lambda_m = A + B Pr^{1/3} Re^{0.55}, \quad (8)$$

где $A = 2/[1-(1-\epsilon)^{1/3}]$ и $B = 2/3\epsilon$.

Для кольца фонтанирующего слоя (где критерий $Re_c < 100$) можно использовать уравнение

$$Nu = 0,42 + 0,35 Re^{0.8}. \quad (9)$$

Обычно коэффициент теплопередачи в ядре фонтана на порядок выше, чем в кольце. Отсюда искомая температура теплоносителя на выходе из фонтанирующего слоя будет равна

$$t''_c = t'_c - (t'_c - t''_m)(1 - e^{-n}). \quad (10)$$

Для случая, когда среднюю разность температур можно принять равной конечной разности, получим

$$Q = F_p G_c c_{mc} (t'_c - t''_c) = \alpha F (t''_c - t''_m). \quad (11)$$

Отсюда температура теплоносителя на выходе из фонтанирующего слоя будет равна

$$t''_c = t'_c - (t'_c - t''_m) \Pi / (I + \Pi) \quad (12)$$

После того, как вычислена конечная температура теплоносителя, определить остальные искомые величины не представляет особого труда.

Удельную тепловую производительность установки можно определить по уравнению

$$Q / F_p = G_c c_{mc} (t'_c - t''_c) \quad (13)$$

Удельная весовая производительность определяется как

$$B / F_p = G_c c_{mc} / c_m \cdot (t''_m - t'_m / t'_c - t''_c). \quad (14)$$

Отсюда может быть найдена продолжительность периода нагревания частиц при нестационарном режиме. Если воспользоваться конечными условиями $\tau = \tau_n$ и $t_\tau = t'_\tau$ то получим

$$\tau_n = G_c c_m / \alpha F (I + \Pi) \ln t'_c - t'_m / t'_c - t''_m. \quad (15)$$

Для моделирования процесса сушки материала в фонтанирующем слое применен подход на основе уравнения диффузии с учетом граничного условия третьего рода (ГУ-3), в соответствии с которым интенсивность потока массы во внешней фазе около поверхности тела выражается диффузионным критерием Био-Виде.

В процессе массообмена твердой фазы с окружающей средой масса около поверхности тела не накапливается, т.е. количество вещества,

подводимого изнутри тела к его поверхности за счет массопроводности, равно количеству вещества, отводимого от поверхности тела во внешнюю фазу конвективной диффузией при $C > C_p$ (при $C < C_p$ направление потока вещества противоположное).

Рассмотрим систему уравнений для вычисления коэффициента диффузии – D_d и критерия Био $Bi = R\beta/D_d$ по моментам m_0, m_1 кинетической кривой для шара:

$$\begin{cases} m_0 = \frac{1}{15} \frac{R^2 (Bi + 5)}{DBi}, \\ m_1 = \frac{1}{315} \frac{R^4}{D^2 Bi^2} (2Bi^2 + 14Bi + 35). \end{cases} \quad (16)$$

Для вычисления моментов по экспериментальным данным до конечного времени – τ_k - применим метод средних прямоугольников, а от τ_k до ∞ по экспоненте, определенной как асимптота к концу кинетической кривой.

Полученные результаты:

При температуре $t = 70^\circ\text{C}$, $m_0 = 12,6$; $m_1 = 780,27$, $t = 125^\circ\text{C}$, $m_0 = 24,6$; $m_1 = 655,39$; $t = 200^\circ\text{C}$, $m_0 = 189,77$, $m_1 = 2275,7$

Таблица 2

Результаты параметрической идентификации

Форма	$t = 70^\circ\text{C}$		$t = 125^\circ\text{C}$		$t = 200^\circ\text{C}$	
	$D_1=D/R^2$	Bi	$D_1=D/R^2$	Bi	$D_1=D/R^2$	Bi
Шар	0,003	2,7	0,00615	3,9298	0,0216	1,798

В результате обработки и формализации скорости сушки можно предложить следующую формулу для учета характерных особенностей графика скорости сушки подсолнечника:

$$\dot{w} = C_0 + c_1 e^{\lambda_1 W} + C_2 e^{\lambda_2 W} \quad (17)$$

при $W \rightarrow W \Rightarrow W_1 = C_0$.

Если пользоваться аппроксимирующей формулой

$$\dot{w} = C_0 + c_1 e^{\lambda_1 W} + C_2 e^{\lambda_2 W},$$

то придется дискретные значения $\dot{w}$ от w аппроксимировать итерационным методом (методом Ньютона). В результате находят значения параметров $C_0, C_1, C_2, \lambda_1, \lambda_2$.

Если же использовать для аппроксимации формулу

$$W = C_0 + c_1 e^{\lambda_1 W},$$

то аналитическим путем можно определить $W(\tau)$, после чего можно аппроксимировать дискретные данные W от τ методом наименьших квадратов. В результате можно найти C_0, C_1, λ_1

при $W = 0, \quad \dot{w} = 0 = C_0 + C_1 + C_2,$

$$C_0 < 0 \text{ и } C_1 + C_2 = -C_0. \quad (18)$$

Тогда модель сушки будет иметь следующий вид:

$$\dot{W}(\tau + \Delta\tau) = W(\tau) + \Delta\tau \cdot dW/d\tau = W(\tau) + \Delta\tau / C_0 + c_1 e^{\lambda_1 W} + C_2 e^{\lambda_2 W} \quad (19)$$

Можно поступить проще и ограничиться одной экспонентой:

$$W = C_0 + c_1 e^{\lambda_1 W} \quad (20)$$

$\lambda_1 < 0$, при $W \rightarrow \infty$, $\dot{W} = \dot{W}_1 = C_0$.

Наконец, возможен лучший, но более сложный вариант:

$$W = W_0, \dot{W} = \dot{W}_1 \text{ и } \dot{W}_1 = C_0 + c_1 e^{\lambda W_0} = C_0 (1 - e^{\lambda W_0}), \quad (21)$$

$$\begin{aligned} C_0 &= \dot{W}_1 / (1 - e^{\lambda W_0}), \\ W' = 0, W = 0 &= C_0 + C_1, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= -C_0, \\ W &= W_1 (1 - e^{\lambda W}) = \alpha (1 - e^{\lambda W}). \end{aligned} \quad (23)$$

Согласно (21), (22), (23) время сушки описывается следующим уравнением,

$$\tau = \frac{-\ln(e^{\lambda W} - 1) + \lambda W}{\lambda \dot{W}_1} + \frac{\ln(e^{\lambda W_0} - 1) - \lambda W_0}{\lambda \dot{W}_1} \quad (24)$$

Интеграл решается методом Марле:

$$\int_{W_0}^W \frac{dW}{a(1 - e^{\lambda W})} = \int_0^t d\tau \quad (25)$$

Решение уравнения (17) дает нам выражение для изменения влажности во времени:

$$W'(\tau) = 1/\lambda \left\{ -\ln[-1 + e^{(\lambda + W_1 - \ln(1 - e^{-\lambda W}))}] + \lambda \tau W_1 - \ln(1 - e^{\lambda W_0}) \right\} \quad (26)$$

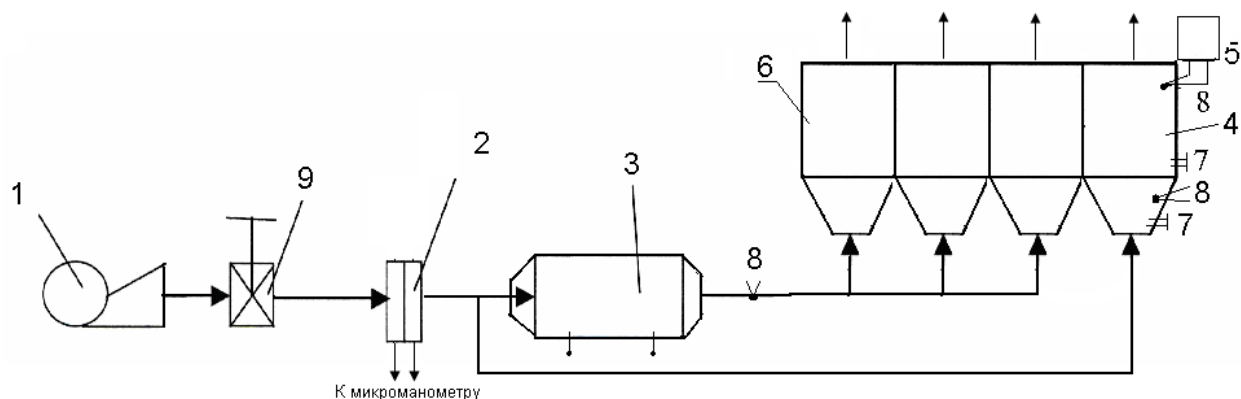
Идентификация параметров предложенной модели, осуществленная путем обработки экспериментальных данных, дала следующие результаты для $t = 70^\circ\text{C}$: $\lambda = 0,0152$, $t = 125^\circ\text{C}$, $\lambda = -0,0262$; для $t = 200^\circ\text{C}$: $\lambda = -0,0625$.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики потока газа и семян подсолнечника в фонтанирующем слое.

Исследование гидродинамической обстановки в технологическом аппарате связано с определением поля скоростей газовой фазы в рабочем объеме. От структуры поля и профиля скоростей потока газа зависит характер движения твердых частиц. Измерения поля составляющих скоростей газовой фазы в сушильных аппаратах проводились с помощью пятиканального шарового зонда. При этом применялся зонд с диаметром измерительной сферы 5 мм.

Условия существования фонтанирующего слоя следующие: эквивалентный диаметр семян не менее 7 мм. Угол раскрытия конуса сушильной камеры должен быть больше 30° и меньше угла естественного откоса семян подсолнечника ($30-45^\circ$). Отношение диаметров верхнего и нижнего оснований слоя должно быть равно соотношению $D_B/d_0=8$. Минимальная высота фонтанирующего слоя, способного фонтанировать, должна быть $H_0 > 2d_0$.

На рис. 2 показан экспериментальный сушильный аппарат фонтанирующего слоя со всеми измерительными приборами. Сушильный аппарат состоит из четырех секций фонтанирующего слоя, первые три секции предназначены для сушки; четвертая - для охлаждения частиц. Выбор четырехсекционного аппарата фонтанирующего слоя обоснован в третьей главе.



1- вентилятор; 2-стандартная диафрагма; 3-калорифер; 4-охладительная камера; 5-милливольтметр; 6-сушильная камера; 7-штуцера для снятия перепада давления; 8-термопара; 9-заслонка

Рис. 2. Экспериментальная установка для сушки в фонтанирующем слое.

Были экспериментально исследованы распределение потока газа между ядром фонтана и кольцевой зоной для изучения влияния геометрических параметров аппарата применительно к исследуемым материалам и ожижающему агенту (воздух). Известно, что по высоте центрального ядра происходит постепенное проникновение газа в периферийную часть слоя. Поэтому по мере удаления от входного отверстия расход и скорость газа в ядре убывают, а в периферийной части, наоборот, возрастают. Для исследования профиля газового потока применялся метод измерения локальных скоростей газа с использованием трубки Пито.

Экспериментально определяли соотношение между скоростью газа и перепадом давления для неподвижного свободно засыпанного (рыхлого) слоя. Принималось, что порозность кольца близка к порозности насыпного слоя, а профиль ядра (т.е. площадь его поперечного сечения) как функция высоты известен из наблюдений в цилиндрической колонне. Тогда из измеренного статического перепада давления вдоль стенки аппарата можно определить истинную скорость газа в кольце на любом уровне. Зная общий расход газа, можно определить поток через фонтан. Все измерения были выполнены непосредственно над конусом (в цилиндрической части); найдено давление и радиальные профили скоростей газа в горизонтальном сечении.

Одной из основных характеристик тепло -массообменного аппарата является время пребывания твердой фазы в рабочем объеме аппарата. Сравнивая время пребывания в аппарате со временем, необходимым для удаления влаги из материала, решают вопрос о пригодности данного

аппарата для сушки конкретного материала. Для измерения времени пребывания твердой фазы в аппарате применяли метод «отсечек», заключающийся в одновременном перекрытии подачи и выхода из аппарата газообразной и твердой фаз, а также метод, основанный на снятии «С» - кривых. После наступления стационарного режима работы производили отсечку входящих и выходящих из аппарата потоков. Затем весовым методом определяли концентрацию окрашенного вещества как функцию от времени.

Зная изменение концентрации индикатора на выходе из аппарата $c(\bar{t})$, можно рассчитать среднее время пребывания материала в аппарате.

В технике фонтанирования большое значение имеют исследования граничных режимов, условий перехода слоя сыпучего материала при продувании его газом от режима фильтрации к режиму фонтанирования.

Определены сопротивления фонтанирующего слоя, скорости воздуха, при которой начинается фонтанирование и на основе замеров строится кривая фонтанирования. Исходя из баланса сил, действующих на элементарный кольцевой слой высотой Δh в периферийной области, найдено, что в цилиндрическом аппарате при $H_0 = H_{0\max}$ отношение перепадов давлений в фонтанирующем слоях

$$\Delta p_{\phi} / g\rho_n H_0 = 0,75 \quad (27)$$

Избыточное давление по оси фонтана изменяется в вертикальном направлении:

$$\Delta p_{\phi} / g\rho_n H_0 = 0,64. \quad (28)$$

Установленные значения $\Delta p_{\phi} / g\rho_n H_0$ представляют верхний предел, который может быть достигнут с увеличением H_0 . Для фонтанирующих слоев $H_0 < H_{0\max}$, в конических цилиндрических аппаратах аналитическое определение Δp_{ϕ} значительно усложняется; экспериментально установлено:

$$\Delta p_{\phi} = 0,75 g\rho_n H_0. \quad (29)$$

где $H_0 = 250$ мм.

Порозность слоя является одним из важных показателей гидродинамики фонтанирующего слоя. Порозность в ядре фонтанирующего слоя равны $\varepsilon_{H_0} = 0,7 - 0,9$ и монотонно уменьшается по высоте слоя. Значение порозности ε_{H_0} в ядре и на поверхности слоя изменяется в довольно широких пределах - в зависимости от геометрии слоя и характеристик частиц.

В любой части периферийной зоны аппарата порозность слоя равны порозности плотного слоя, то - есть $\varepsilon_{H_0} = 0,35 - 0,45$.

Исследования межфазного тепло-массообмена между частицами материала и теплоносителя проводились в действующей модели сушильного аппарата с фонтанирующим слоем.

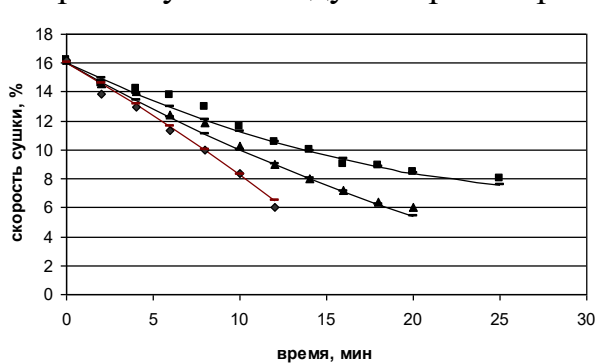
Известно, что характер протекания процесса сушки наиболее полно описывается кривыми сушки (в координатах «влажность материала — время»), кривыми скорости сушки (в координатах «скорость сушки - влажность материала»).

Экспериментальное исследование процесса сушки производилось нагретым при различных температурах теплоносителя t_c , относительной влажности $\varphi\%$, скорости движения воздуха v . Диапазон рабочих скоростей теплоносителя были получены из теоретических расчетов.

Опыты по определению кривой сушки были проведены при следующих параметрах: температура сушильного агента: 70, 125, 200 °С; скорость воздуха 35 м/с; начальная влажность материала составила $W = 15...17\%$.

Полученные данные приведены в рис. 3.

Промежутки между отборами проб составляли две минуты.



- - при температуре 70 °С;
- ▲ - при температуре 125 °С;
- ◆ - при температуре 200 °С.

Рис. 3. Кривые сушки семян подсолнечника.

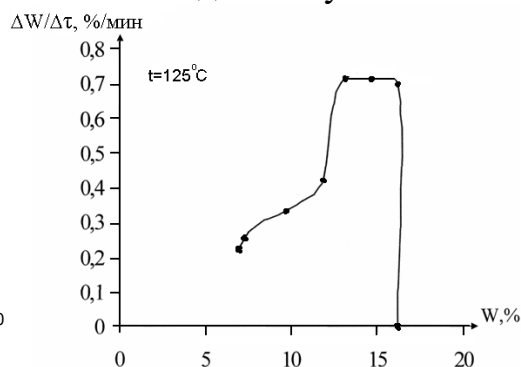


Рис. 4. Кривая скорости сушки семян подсолнечника при 125 °С.

Совпадение расчетных и экспериментальных кривых проверялось по критерию Фишера. Для семян подсолнечника $F_r=2,54$; табличное значение критерия Фишера для доверительной вероятности $P=0,95$, $F=8,74$; $F_r < F$. Следовательно, полученное уравнение адекватно. Результаты проверки адекватности математической модели сушки семян подсолнечника в фонтанирующем слое следующие: коэффициент корреляции $r=0,83$. Расчетный критерий Фишера $F_r=2,76$; табличный $F_t=3,01$. Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных кривых свидетельствует о работоспособности предложенной математической модели процесса, довольно точно отражающей главные эффекты реального процесса движения и сушки материала в фонтанирующем слое.

В пятой главе приведены результаты практического применения и обсуждения технико-экономические показатели сушильного аппарата с фонтанирующим слоем. Выбор и оценку сушильных установок проводили по параметрами о пригодности аппарата для сушки материала с известными свойствами и их энергетических характеристик, основанных на теплотехнологических принципах оформления процесса сушки.

Проведенные исследования позволили создать инженерный метод расчета аппарата фонтанирующего слоя с учетом теплового, материального балансов, среднего времени пребывания материала в аппарате и времени

протекания процесса сушки. А также разработан алгоритм расчета аппарата фонтанирующего слоя, основанный на использовании ранее описанной математической модели аппарата и формул, полученных в результате обработки экспериментальных данных.

Для сравнения технико-экономических показателей была принята в качестве базовой сушилка СКУ-10 (Россия), которая сравнивалась с сушилкой с фонтанирующим слоем СФ - 10 (Узбекистан) по удельным капиталовложениям на 1 кг испаренной влаги.

1. Расчетная окупаемость затрат составляет менее $T_{ок}=25 \cdot 10^6 / 7655 = 3266$ ч или 4,5 месяцев.

2. Годовой экономический эффект при использовании сушилки с фонтанирующим слоем 2000 часов в год составляет:

$$\mathcal{E}_{год} = 7655 \cdot 2000 - 0,22 \cdot K_{сфс} = 15,3 \cdot 10^6 - 0,22 \times 25 \cdot 10^6 = 9,8 \cdot 10^6 \text{ сумов.}$$

Здесь $E_{п}$ - приемлемая для инвестора норма доходности капитала, принята в размере 22%.

Выполненные расчеты подтверждают высокую эффективность предлагаемого проекта **сушилки с фонтанирующим слоем семян подсолнечника.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные комплексные теоретические и экспериментальные исследования по теме диссертации позволили сформулировать следующие выводы.

1. На основе результатов экспериментальных исследований физико-механических, теплофизических и сорбционно-структурных свойств семян подсолнечника, как типичного представителя группы масличных материалов, был выбран рациональный способ сушки во взвешенном состоянии и выбран тип сушильного аппарата с фонтанирующим слоем.
2. Разработана математическая модель перемещения газовой и твердой фаз в ядре и периферии фонтанирующего слоя, отнесена к классу типовых моделей с числом псевдоячеек, приближающим к модели идеального перемешивания.
3. Получена математическая модель, отражающая закономерности протекания процесса нагрева и охлаждения частиц при нестационарном режиме функционирования фонтанирующего слоя.
4. Предложена математическая модель кинетики процесса сушки с граничными условиями третьего рода, выраженными через диффузионный критерий Био, позволяющая определить необходимую продолжительность сушки в зависимости от температуры и исходной влажности частиц.
5. Обоснована геометрия сушильного аппарата с фонтанирующим слоем, что угол раскрытия конуса сушильной камеры должен быть больше 30° и меньше угла естественного откоса семян подсолнечника ($30-45^\circ$),

отношение диаметров верхнего и нижнего оснований слоя должно быть равно $D_B/d_0=8$; минимальная высота фонтанирующего слоя должна составлять $H_0>2d_0$.

6. Получены новые экспериментальные данные, отражающие характер распределения скоростей газовой и твердой фаз, гидравлического сопротивления и времени пребывания частиц твердой фазы в аппарате с фонтанирующим слоем.
7. В результате экспериментального исследования были получены кривые сушки семян подсолнечника при различной температуре теплоносителя и рабочих скоростях фонтанирования. Обработкой экспериментальных данных найдено время, необходимое для проведения процесса сушки семян подсолнечника соответствующие с расчетными данными.
8. Техничко-экономический анализ разработанного промышленного сушильного аппарата с фонтанирующим слоем свидетельствует о его преимуществах по сравнению с существующими базовыми промышленными установками.
9. На основе проведенных исследований был разработан аппарат с производительностью 10 тн/час и принят к внедрению на Каршинском МЭЗ с ожидаемым экономическим эффектом 10 млн. сум в год.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ.

1. Д.Н. Мухиддинов, Э. Ярмухамедов, И. Мурадов. Выбор метода сушки семян подсолнечника на основе комплексного анализа его теплотехнологических свойств. Сборник трудов. МНТК «Современное состояние и перспективы развития энергетики». Ташкент, 2006. с.107-109.
2. И. Мурадов. Моделирование и экспериментальные исследования гидродинамики подсолнечника в сушильной установке с фонтанирующим слоем. Республиканская научно-техническая конференция «Проблемы интенсификация интеграции науки и производство». Бухоро озик-овкат ва энгил саноат технологияси институти, Бухоро, 2007. с.67-68.
3. Мухиддинов Д.Н., Мурадов И. Исследование сорбционно-структурных свойств масличных семян. 3-я Международная научно-практическая конференция. Актуальные проблемы энергетики 2007 г. Екатеринбург. стр.402-404.
4. Д.Н. Мухиддинов. И.Мурадов.Исследование дериватографических характеристик семян кунжута и подсолнуха. Журнал Вестник Таш ГТУ, № 3, 2007. стр.71-74
5. Д.Н. Мухиддинов. И.Мурадов.Моделирование расчета процесса нагрева и охлаждения частиц подсолнечника в фонтанирующем слое. Журнал. Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. №3-4, 2007, Таш ГТУ. стр. 71-73.
6. И.Мурадов.Интенсификация процесса сушки подсолнечника в аэрофонтанной сушильной установкой..Республиканской научно-

практической конференции «Проблемы эффективного использования топливно энергетических ресурсов» КИЭИ, г. Карши. 2008. 19-20-декабрь стр. 61-63.

7. Д.Н. Мухиддинов, Ш. Нуритдинов, И. Мурадов, З.З. Хаджимуратова. Математическое моделирование процесса сушки масличных семян в фонтанирующем слое. Журнал Вестник Таш ГТУ, № 1, 2009. стр. 32-34.
8. Д.Н. Мухиддинов, Р.П. Бабаходжаев, И. Мурадов. Разработка технологии сушки семян подсолнечника в фонтанирующем слое. Сборник науч. статей республиканский научно-практический конференции. «Экологически чистые ресурсосберегающие технологии выращивания, хранения и переработки сельскохозяйственной продукции». Ташкент 2009. стр. 94-96.

Условные обозначения

U-влажность, влагосодержание; τ -время, $\bar{\tau}$ -среднее время пребывания; N-скорость сушки; β -коэффициент массоотдачи; x_r -влагосодержание воздуха; t -температура; a, b -коэффициенты; s -распределение вещества; R-радиус частицы; d-диаметр частиц; K-коэффициент; D_d - коэффициент диффузии; $Bi = R\beta/D_d$ -критерия Био; индексы: о-начальное, к- конечное, кр- критическое, *-равновесное, г-граничное, газ; в-воздуха; э-эквивалентный.

Техника фанлари номзоди илмий даражасига талабгор Мурадов
Исмоилджоннинг 05.14.04 - «Саноат иссиқлик энергетикаси» ихтисослиги
бўйича «Кунгабоқар уруғини фонтан қатлам усулида қуритиш» мавзусидаги
диссертациясининг

РЕЗЮМЕСИ

Таянч сўзлар: қуритиш, гидродинамика, қуритиш тезлиги, қатлам қаршилиги, аэродинамика, ёғлилик, формалар коэффицентлари, жадаллик.

Тадқиқот объекти: Тадқиқот объекти ёғли уруғларни қуритиш ҳисобланади.

Ишнинг мақсади: Оптимал қуритиш қурилмасини танлаш нуқтаи назаридан материал билан намлик боғланиш формасини тадқиқот қилиш ва шу асосида юқори самарадор фонтан қатламли қуритиш қурилмасини ишлаб чиқиш.

Тадқиқот усули: Қуритиш жараёнини математик моделлаштириш усуллари, тажриба натижаларига ишлов беришнинг статик усуллари, гидродинамика ва қуритиш бўйича тажриба ўтказишнинг апробиро усуллари. Тадқиқотларни бажаришда замонавий ўлчов асбобларини қўллаган ҳолда компьютерда моделлаштиришнинг замонавий усулларидан фойдаланилди.

Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги: Иссиқлик технологик ишлов бериш объекти сифатида кунгабоқар уруғи, кунжут ва рапснинг хусусиятлари, қуритиш жараёни термограммаси, сорбцион структураси тадқиқот қилинди. Материалнинг гидродинамикаси ва қуритиш кинетикасининг математик модели; уруғнинг хусусиятига қиздириш ва совутишнинг сифат ва миқдорий таъсири бўйича янги тажриба натижалари. Кунгабоқар уруғини қуритиш жараёнининг гидродинамикаси ва кинетикаси бўйича янги тажриба натижалари олинди. Олинган тажриба натижалари асосида фонтан қатламли энергетик самарадор қуритиш қурилмаси ишлаб чиқилди.

Амалий аҳамияти: Ишлаб чиқилган фонтан қатламли қуритиш қурилмаси ва унинг технологик схемаси олинаётган маҳсулот сифатини оширади, энергия ва ҳом-ашё ресурсларини тежалишини таъминлайди ва қуритиш қурилмаларини лойиҳалашда фойдаланилади.

Татбиқ этиш даражаси ва иқтисодий самарадорлиги: Ишлаб чиқилган фонтан қатламли қуритиш қурилмаси АЖ «Қаршиёғ» ишлаб чиқариш шароитида тажриба-саноат синовидан муваффақиятли ўтди. Фонтан қатламли қуритиш қурилмасини татбиқ этишдан кутилаётган иқтисодий самара 10 000 000 сўм/йил.

Қўлланилиш соҳалари: Ёғ-мой саноати.

РЕЗЮМЕ

диссертации Мурадова Исмоилджона на тему: «Сушка семян подсолнечника с применением фонтанирующего слоя» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

Ключевые слова: сушка, гидродинамика, скорость сушки, сопротивление слоя, аэродинамика, маслячность, коэффициент формы, интенсификация.

Объекты исследования: Объектом исследования является подсолнечник и процесс его сушки в фонтанирующем слое.

Цель работы: Исследование форм связи влаги с материалом с точки зрения выбора оптимальной сушильной установки и разработка на этой основе высокоэффективной сушильной установки фонтанирующего слоя.

Методы исследования: Методы математического моделирования процесса сушки, статические методы обработки экспериментальных данных, апробированные методы проведения опытов по гидродинамике и сушке. При исследованиях использованы современные методы компьютерного моделирования с применением современных приборов измерения.

Полученные результаты и их новизна: Исследованы свойства семян подсолнечника, рапса и кунжута, как объектов тепло-технологической обработки. Составлены математические модели гидродинамики и кинетики сушки материала; получены новые экспериментальные данные по качественной и количественной оценки влияния нагрева и охлаждения семян на его свойства. Получены новые экспериментальные данные по гидродинамике и кинетике процессов сушки семян подсолнечника. На основе полученных результатов разработан энергоэффективный сушильный аппарат фонтанирующего слоя.

Практическая значимость: Разработанный сушильный аппарат фонтанирующего слоя и его технологическая схема позволяет существенно улучшить качество получаемого продукта, обеспечивает энерго- и ресурсосбережение и используется при проектировании сушильных установок.

Степень внедрения и экономическая эффективность: Разработанный сушильный аппарат фонтанирующего слоя успешно прошел опытно-промышленные испытания в производственных условиях АО «Каршиёг». Ожидаемый экономический эффект от внедрения сушильных аппаратов фонтанирующего слоя составляет 10 000 000 сум/год.

Область применения: Масложировая промышленность.

RESUME

Thesis of Muradov Ismoil on the scientific degree competition
of the doctor of philosophy in technical sciences on speciality
05.14.04 – “Industrial thermal power engineering”
subject: «Improvement of technology of drying of seeds of sunflower with
application of a fountain layer»

Keywords: drying, hydrodynamics, speed of drying, resistance of a layer, aerodynamics, oil percentage, factor of the form, intensification.

Objects of the research: Object of the research is a drying of the oil seeds.

Aim of the research: Research of the form of connection of moisture with a material by point of view of a choice of optimum drying installation and development on this basis a high effective drying installation with fountain layer.

Methods of the research. Methods of mathematical modeling of process of drying, static methods of processing of the experimental data, the approved methods of carrying out of experiences on hydrodynamics and drying. At researches modern methods of computer modeling with application of modern devices of measurement are used.

Achieved results and their novelty: Properties of seeds of sunflower, rape and sesame as object of heat-technological processing on a basis of thermogram of process of drying, sorption-structural properties are investigated. Mathematical models of hydrodynamics and kinetics of dryings of a material; new experimental data on qualitative and quantitative estimations of influence of heating and cooling of seeds to its properties. New experimental data on hydrodynamics and kinetics of processes of drying of seeds of sunflower are received. On the basis of the received results it is developed energy-effective drying device with fountain layer.

Practical value: the developed drying device with fountain layer and its technological scheme allow essentially to improve quality of a received product, provides energy- and resource saving and are used in designing the drying installations.

Degree of embed and economic efficiency: Developed drying device with fountain layer has successfully passed trial tests under production conditions of joint-stock company "Karshiyog". By the decision of technical advice of open joint-stock society "Kosonyog" it is included in the plan of introduction in 2011 new technics and technology. Expected economic benefit of introduction of drying devices with fountain layer is 10 000 000 sum/year.

Sphere of usage: Fat-and-oil industry.