

В связи с переходом большинства спиртовых производств на технологию низкотемпературного разваривания крахмалистого сырья, возникает необходимость получения зернового помола с меньшей крупностью частиц для сокращения времени протекания стадий разваривания и брожения. Помимо этого, уменьшение крупности помола снижает также потери крахмала на стадии брожения и уменьшает количество несброженных углеводов в бражке, и, в конечном счете, повышает выход спирта с тонны условного крахмала [1]. Авторы [2,3] отмечают возможность снижения температуры разваривания от качества измельчения и его определяющее влияние на результат брожения. Существуют различные способы измельчения зернового сырья, как на различном оборудовании, так и в различных фазовых состояниях (мокрый и сухой помол). На спиртовых заводах РФ наибольшее распространение получили молотковые дробилки, при одноступенчатом измельчении на которых обычно получают помол, характеризующийся 60%-ным проходом через сито с диаметром отверстий 1 мм. Для низкотемпературного способа механико-ферментативной обработки сырья согласно регламенту помол должен характеризоваться 80-85%-ным проходом через сито $d = 1,0$ мм, что достигается двухступенчатым измельчением [4]. При измельчении зерна, вследствие его структурных особенностей (неоднородность) и особенностей механизма разрушения частиц, получается полидисперсная система. Гранулометрический состав помола может зависеть от множества факторов (вида сырья, влажности, способа измельчения и т.п.). Дисперсный состав помола, представленный в виде опытных гистограмм, может быть описан (с той или иной точностью) при помощи известных и применяемых в практике функций распределения. Их спектр широк, одни из них лучше описывают распределение частиц по размеру, другие – распределения по объему. И соответственно, можно выбрать подходящие для каждого конкретного случая [5]. Поскольку экспериментальное определение дисперсного состава помола осуществляется с помощью ситового анализа, то большая часть экспериментальных данных в данной области представлена в виде распределения масс по размеру. В работе [4] приводятся экспериментальные данные по гранулометрическому составу помола при различных способах измельчения зерно-смесей, и, в частности, «по замкнутому контуру», когда сход (не прошедшая сито фракция) возвращается на повторное дробление. Таким образом, отсекается «хвост» распределения и осуществляется 100%-ный проход через сито с диаметром отверстий 1 мм. В результате функция плотности распределения частиц претерпевала значительные изменения и модуль крупности зернового помола уменьшался на 20-25%. Авторы в своей оценке выборки ограничиваются лишь средневзвешенным по массе диаметром, который называют «модулем крупности»: $\bar{d} = \sum d_i P_i$, где d_i – средний диаметр соседних сит (средний размер фракции), мм; $P_i = m_i / S_{mi}$ – доля каждой фракции после отсева на ситах; m_i – масса каждой фракции. Помимо средней оценки

представляет интерес и распределение по размеру внутри совокупности. Установление закона распределения позволяет вычислять распределение частиц по их числу, поверхности и объему, обоснованно рассчитывать средние показатели дисперсной системы, производить технические расчеты и моделировать дальнейшие процессы технологической цепи производства спирта – осахаривания и брожения. Для описания эмпирических распределений, получаемых при дроблении зерна, были выбраны функция Розина-Раммлера (1), функция логарифмически нормального распределения (2), гамма-функция (3) и бета-функция (4). Возможность описания опытных данных при помощи упомянутых функций обусловлена, прежде всего, возможностью нахождения параметров этих функций по представленным эмпирическим распределениям. Интегральная функция Розина-Раммлера имеет вид:
$$F(d) = \frac{d^a}{d^a + d_0^a} \quad (1)$$
 где $F(d)$ – суммарная масса частиц меньше d ; d_0 – среднее значение эквивалентного диаметра частиц какой-то группы; d – диаметр частиц, при котором масса всех частиц крупнее d составляет 37%; a – эмпирический параметр, характеризующий однородность частиц по размерам. Функции плотности трех других выглядят следующим образом:
$$f(x) = \frac{1}{s} \exp\left(-\frac{(\ln x - m)^2}{2s^2}\right) \quad (2)$$
 где m – математическое ожидание величины $\ln x$; s – среднее квадратичное отклонение $\ln x$.
$$f(x) = \frac{h^h}{\Gamma(h)} x^{h-1} \exp(-hx) \quad (3)$$
 где h – параметр формы; Γ – параметр масштаба гамма-распределения.
$$f(x) = \frac{g^g h^g}{\Gamma(g)^2} x^{g-1} (1-x)^{g-1} \exp(-gx) \quad (4)$$
 где g и h – параметры формы бета-распределения. Для установления возможности описания гранулометрического состава зерновых помолов спиртовых производств при помощи указанных статистических функций, были использованы экспериментальные данные работ [4, 6] (табл.1). Таблица 1 – Сходы с сита (содержание в %) Диаметр сита, мм № выборки 1 2 3 4 5 6 7 8 0,28 7,4 6,1 18,7 7,1 28,5 18,6 71 34,1 0,28 9,2 7,3 7,5 14,7 7,7 13,5 17,2 0,56 26,0 17,5 35,7 34,0 20,2 27,8 5 15,1 0,8 40,2 47,4 26,4 28,8 43,6 40,1 1,0 5,7 2,8 7,2 8,0 22 26,2 1,2 8,0 8,4 3,0 4,3 1,5 3,5 10,5 1,5 3,1 2 4,7 2,0 2,7 По экспериментальным распределениям рассчитывались оценки параметров указанных распределений. Параметры функции Розина-Рамлера определялись при помощи двойного логарифмирования, а статистических распределений: логарифмически нормального, гамма-распределения и бета-распределения – методом моментов. Соответствие опытных и расчетных распределений определялось по критерию Пирсона. В таблице 2 представлены значения критерия Пирсона для дифференциальной (частотной) и интегральной (накопительной) функций распределения по каждому виду функции для различных способов измельчения зерна. Таблица 2 – Значения критерия Пирсона для аппроксимирующих функций Способ дробления Система (зерносмесь) и № выборки Пирсон дифф. функции Пирсон интегр. функции Распределение Розина-Раммлера 2-ступенчатое с доизмельчением на молотковой дробилке [4] пшеница/рожь (50/50), 1 0,546 0,980 пшеница/ячмень (50/50), 2 0,139 0,959 2-ступенчатое с доизмельчением на вальцовом станке [4] пшеница/рожь (50/50), 3 0,561 0,982 пшеница/ячмень (50/50), 4 0,656 0,980 Измельчение по замкнутому

контуру [4] пшеница/рожь (50/50), 5 0,842 0,981 пшеница/ячмень 0,789 0,986 1-
 ступенчатое молотковое [6] пшеница, 7 0,865 0,978 рожь, 8 0,616 0,981
 Логарифмически нормальное распределение 2-ступенчатое с доизмельчением
 на молотковой дробилке пшеница/рожь (50/50) 0,539 0,978 пшеница/ячмень
 (50/50) 0,402 0,971 2-ступенчатое с доизмельчением на вальцовом станке
 пшеница/рожь (50/50) 0,388 0,964 пшеница/ячмень (50/50) 0,743 0,988
 Измельчение по замкнутому контуру пшеница/рожь (50/50) -0,732 0,847
 пшеница/ячмень -0,749 0,909 1-ступенчатое молотковое пшеница 0,919 0,825
 рожь 0,722 0,923 Гамма-распределение 2-ступенчатое с доизмельчением на
 молотковой дробилке пшеница/рожь (50/50) 0,746 0,990 пшеница/ячмень (50/50)
 0,555 0,981 2-ступенчатое с доизмельчением на вальцовом станке пшеница/рожь
 (50/50) 0,554 0,980 пшеница/ячмень (50/50) 0,892 0,996 Измельчение по
 замкнутому контуру пшеница/рожь (50/50) 0,883 0,859 пшеница/ячмень -0,863
 0,871 1-ступенчатое молотковое пшеница -0,188 0,935 рожь 0,687 0,948 Бета-
 распределение 2-ступенчатое с доизмельчением на молотковой дробилке
 пшеница/рожь (50/50) 0,733 0,989 пшеница/ячмень (50/50) 0,468 0,976 2-
 ступенчатое с доизмельчением на вальцовом станке пшеница/рожь (50/50) 0,666
 0,985 пшеница/ячмень (50/50) 0,882 0,994 Измельчение по замкнутому контуру
 пшеница/рожь (50/50) 0,847 0,985 пшеница/ячмень 0,922 0,997 1-ступенчатое
 молотковое пшеница 0,861 0,904 рожь 0,805 0,975 Для дифференциальных
 функций значения критерия Пирсона ниже вследствие резких колебаний
 опытных гистограмм из-за малости выборки и малого число диапазонов
 гистограмм. Это обусловлено условиями эксперимента - малое число сит не
 позволяет получить «плавную» гистограмму. На колебания «веса» фракций
 могут также влиять и другие факторы: механизм разрушения частиц и методика
 отбора проб. На рис. 1 представлено сопоставление экспериментальной и
 расчетных кривых для одного из опытов, для которого, значения Пирсона для
 интегральной функции по всем моделям выше 0,98. Соответствие же
 дифференциальных функций опытным данным визуально не очень высокое. $f(d)$
 Рис. 1 – Сопоставление опытных данных и аппроксимирующих функций $f(d)$ Рис.
 2 – Сопоставление усеченного распределения и аппроксимирующих функций
 Высокие значения Пирсона для интегральной функции обусловлены тем, что она
 «сглаживает» отклонения, т.е. суммирует отклонения противоположных знаков,
 и в итоге на последнем значении имеем малое расхождение по сумме, хотя в
 действительности там может быть большое значение случайной величины.
 Поэтому соответствие дифференциальной функции всегда хуже, особенно для
 малых выборок. При описании усеченных эмпирических распределений
 (измельчение по замкнутому контуру) при помощи гамма- и логарифмически
 нормального распределений получены значения Пирсона R_0 , что говорит о
 неприменимости их для описания выборок U-образной формы. Но эти функции
 могут быть применимы для описания одномодальных усеченных распределений.

На рис.2 представлено сравнение с экспериментом расчетных бета-функции и Розина-Раммлера. Критерий Пирсона дифференциальной функции для них составляет соответственно 0,922 и 0,789. Выводы Для полных распределений все рассматриваемые модели имеют высокие значения критерия Пирсона для интегральной функции. Гамма- и бета-функции обеспечивают несколько лучшее описание представленных опытных распределений, как дифференциальной, так и интегральной функцией. Значения критерия Пирсона для дифференциальной гамма-функции по представленным выборкам составили 0,554-0,892, а для интегральной 0,980-0,996. Усеченные распределения лучше описываются бета-распределением. Бета-функция может описывать и распределения U-образной формы. Критерий Пирсона дифференциальной бета-функции составил 0,847-0,922 и интегральной 0,977-0,985. Гамма и логарифмически нормальное распределение для описания выборок U-образной формы не пригодны.