

## Исследование процесса осаждения в комбинированном сусловарочном аппарате

А.Н. Чепелюк, С.А. Удодов, В.М. Таран

**Abstract:** *The question of beer mash defecation (hop fraction and hot protein deposit separation) in hybrid mashbrewing apparatus with gate-impeller mixer was considered. Here presented the researches results of speed of rotation influence on the separation quality.*

**Key words:** *hybrid mashbrewing apparatus, deposit, beer mash defecation, mixing device, apparatus bottom.*

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка нового оборудования, способного обеспечить проведение нескольких операций, является актуальным заданием для предприятий малой мощности, в частности, мини-пивзаводов, где есть острая необходимость в многофункциональном оборудовании. На рынке оборудования для мини-пивзаводов представлены аппараты, разработанные в Германии, Словакии, России, которые объединяют функции: фильтрования с промыванием, отделение зависших частиц, фильтрование под атмосферным и избыточным давлением; фильтрационного аппарата и бойлера; заторно-сусловарочного и фильтрационного аппаратов.

Нами разработан комбинированный сусловарочный аппарат, конструкция которого представлена на рис.1. Он предназначен как для нагревания и кипячения сусла с хмелем, так и для отделения хмелевой дробины и белкового осадка [1].

Процесс оседания твердых частиц и параметры слоя осадка можно исследовать как экспериментально, так и теоретически. Математическое описание процесса осветления сусла должно учитывать влияние конструктивных и режимных параметров работы аппарата. Традиционно используемые модели осаждения частиц описывают процесс в неподвижной жидкости и не могут быть использованы для описания процесса осветления в аппарате с перемешивающим устройством. Поэтому была поставлена задача – создать адекватную математическую модель процесса отделения от сусла твердых частиц в разработанном аппарате.

Для изучения процесса использованы теория пограничного слоя и полуэмпирическая теория движения речных наносов. В приведенных расчетах приняты такие конструктивные параметры и режимы работы аппарата: радиус  $R=0,24$  м, частота вращения мешалки  $n=40-0$  об/мин.

Математически описывать движение в аппарате целесообразно в цилиндрической системе координат. Общая постановка задачи включает уравнение движения и условия однозначности. Поскольку движение частиц твердой фракции к центру аппарата происходит в очень тонком слое, этот процесс зависит от распределения поля скорости поблизости дна.

Из теории движения вязкой жидкости известно, что вблизи твердой поверхности образуется пограничный слой, в середине которого скорости частиц жидкости изменяются от нуля (для неподвижной границы) до определенного распределения, типичного для каждой отдельной задачи. Воспользуемся для расчета области накопления осадка результатами известной задачи, решенной У.Т. Бедевадтом [3], о вращении жидкости над неподвижным основанием (дном). Пусть жидкость вращается с угловой скоростью  $\omega$  над неподвижным основанием. Поскольку изменение угловой скорости у мешалки есть очень медленным, можно приближенно принять, что на протяжении определенного времени  $|\dot{\omega}| = const$ .

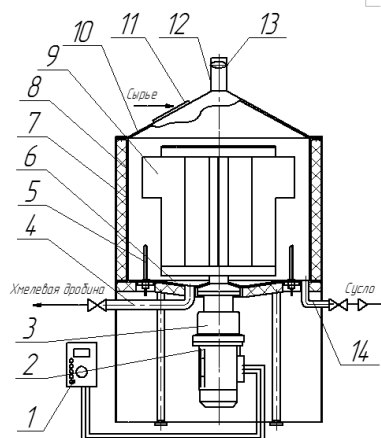


Рис. 1. Схема комбинированного суловарочного аппарата:  
 1 – частотный преобразователь; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – патрубок для отвода хмелевого остатка; 5 – ТЭН; 6 – днище; 7 – корпус; 8 – изоляция; 9 – рамная мешалка; 10 – коничная крышка; 11 – окно; 12 – пароводная труба; 13 – шибер; 14 – патрубок для отвода сусла.

Граничные условия для компонент скорости:

$$v_r = 0; v_\varphi = 0; v_z = 0 \text{ при } z=0 \text{ и } v_r = 0; v_\varphi = r\omega \text{ при } z=\infty.$$

Введя вместо координаты  $z$  безразмерную величину  $\xi = z\sqrt{\omega/v}$ , а для составляющих скорости взяв следующие выражения:  $v_r = r\omega F(\xi)$ ;  $v_\varphi = r\omega G(\xi)$ ;  $v_z = \sqrt{v\omega} H(\xi)$ , и учитывая известные допущения о распределении давления, можно найти с помощью рядов искомые функции  $F(\xi)$ ,  $G(\xi)$ ,  $H(\xi)$ . Их графики наведены на рис. 2.

В качестве толщины пограничного слоя  $\delta$  принята та высота, на которой наблюдается движение сусла к центру аппарата. За данными Дж. Е. Нидала, это явление происходит до значения  $\zeta = 3,1$ . Тогда для вращательного движения жидкости над неподвижным основанием  $\delta = 3,1\sqrt{v/\omega}$ . Отсюда становится ясно, что в случае нашей задачи толщина  $\delta$  составляет приблизительно 0,0017...0,0024 м при частоте вращения мешалки 20...10 об/мин. При замедлении движения, когда угловая скорость уменьшается до 4 об/мин, эта толщина будет составлять 0,0026 м. Таким образом расчеты показывают, что можно использовать результаты упомянутой упрощенной задачи.

Осаждение происходит при замедленном вращательном движении сула в аппарате. В кольцевой области, где происходит осаждение твердой фракции, величины вертикальной компоненты скорости незначительны. Они во много раз меньше величины вращательной и радиальной компонент скорости в придонном слое (см. рис. 2). Это обуславливает характер процесса осаждения: он напоминает, определенной мерой, процесс осаждения речных наносов.



**Рис. 2. Распределение скоростей в придонном слое, образующемся при вращении жидкости вблизи неподвижного основания.**

скорость влечения. При этом частица должна иметь плоскую форму, поскольку частице сферической формы проще катится по дну, чем скользить. В гранулированном хмеле, осаждение которого исследовалось, преобладают частицы плоской формы. Таким образом, для этих частиц нужно рассматривать скольжение как основной тип движения.

Граничному равновесию или начальному моменту движения частицы соответствует равенство активной силы лобового действия на частицу и силы трения частицы по поверхности дна. С учетом известных соотношений, получим:

$$v_{нач.дв.} = a_{вл} \sqrt{\frac{\rho_ч - \rho}{\rho}} gb.$$

По Г.И. Шамову [2], движущиеся частицы оседают при скорости потока  $v_{отл.}$ . При этом:

$$v_{отл.} = 0,84 \cdot v_{нач.дв.} = 0,84 \cdot a_{вл} \sqrt{\frac{\rho_ч - \rho}{\rho}} gb \quad (1)$$

Используя формулу (1), можно сделать вывод: попадая в зону аппарата, где  $v < v_{отл.}$ , частица, касаясь дна, оседает на нем. На основе этого вывода осуществляется окончательная формулировка задачи нахождения законов движения частицы в непосредственной близости от дна. Из теории влечения и осаждения речных наносов следует, что модуль скорости, при которой происходит

Рассмотрены процессы осаждения частиц твердой фракции (когда вертикальная скорость сула меньше за равномерную скорость осаждения частиц) и процесс попадания частиц твердой фракции в область, где величины горизонтальной составляющей скорости не превышают скорость отложения  $v_{отл.}$

В речной гидравлике скорость течения, при которой частица на дне начинает движение, называют начальной скоростью  $v_{нач.дв.}$

Если скорости потока превышают скорость равномерного осаждения и начальную скорость движения, тогда частица находится в зависимом состоянии. Если же вертикальная составляющая скорости меньше скорости осаждения, частица скользит по дну.

Из экспериментов известно, что скольжение происходит только при условии, что скорость потока равна или незначительно превышает начальную

процесс осаждения твердой фракции на дно, зависит от параметров частиц, а также от характеристик поверхности дна.

В случае, когда рассматриваются приблизительно одинаковые по форме и размерами частицы твердой фракции, их параметры можно охарактеризовать эмпирическим коэффициентом влечения  $a_{вл}$ . Также при условии равномерного распределения частиц по объему жидкости, процесс осаждения будет зависеть лишь от поля скорости, а точнее величины ее горизонтальной составляющей.

Определим радиус области образования осадка. Скорость отложения определяется по формуле (1). С другой стороны, абсолютное значение вектора скорости  $|\vec{v}| = \sqrt{v_r^2 + v_\phi^2 + v_z^2} \approx \sqrt{v_r^2 + v_\phi^2} = r \cdot \omega \cdot \sqrt{F^2(\zeta) + G^2(\zeta)}$

Обозначив радиус, который характеризует зону осаждения для частиц определенного размера в зависимости от частоты вращения мешалки  $r^*$ , получим:

$$r^* = \frac{0,84a_{вл} \sqrt{\frac{\rho_ч - \rho}{\rho} \cdot g \cdot b}}{\omega \cdot \left( \sqrt{F^2(\zeta) + G^2(\zeta)} \right)^{\frac{1}{n}}},$$

где  $\sqrt{F^2(\zeta) + G^2(\zeta)} = \max \sqrt{F^2(\zeta) + G^2(\zeta)}$ . Для  $\zeta \approx 3,1$   $\sqrt{F^2(\zeta) + G^2(\zeta)} = 1,26$ .

По расчетным данным осаждение начинается при скорости вращения мешалки меньше 35 об/мин в радиусе 35 – 80 мм от оси аппарата, тогда как по экспериментальным данным – при частоте вращения меньше 18–23 об/мин. Это можно объяснить дополнительной турбулизацией суслу мешалкой, что не позволяет частицам оседать на дно аппарата. Однако экспериментальные результаты при скоростях вращения меньше 15 об/мин полностью соответствуют аналитическим данным, полученным с использованием математической модели. Так при  $n=10$  об/мин на дно начинают оседать частицы всех размеров. По всей поверхности дна аппарата оседают самые большие частицы гранулированного хмеля (размером 2,8 – 8 мм). Расчетный радиус их осаждения, рассчитанный по формуле 6, почти равен радиусу аппарата (соответственно 239 и 240 мм). Частицы размером 2,0 – 2,8 мм оседают в зоне  $r^* = 0,2$  м. А частицы, которые составляют почти 63% от общего количества частиц (их размер 0,28 – 2 мм), оседают в радиусе  $r^* = 0,12-0,17$  м. Меньшие частицы оседают в зоне, не превышающей 0,1 м.

Дальнейшее замедление частоты вращения мешалки расширяет зону осаждения средней и мелкой фракции. Так, при  $n=5$  об/мин осаждение частиц с размерами 0,28 – 2 мм осуществляется почти по всему днущу аппарата (94 % площади). При скорости 4 об/мин площадь осаждения всех частиц равна площади аппарата, происходит процесс осаждения самых мелких частиц размерами меньше 0,28 мм.

Адекватность созданной математической модели осаждения твердых частиц подтверждается экспериментальными результатами.

Дальнейшие исследования будут направлены на установление влияния геометрии днуща комбинированного суслварочного аппарата на процесс формирования слоя осадка.

Создание нового пищевого оборудования требует фундаментальной научной проработки всех этапов его проектирования.

При проектировании машин хлебопекарной промышленности, а в частности – для замеса хлебного теста, необходимо учесть и согласовать несколько аспектов: равномерное перемешивание компонентов, соблюдение оптимальной длительности этапов процесса замеса теста, сообщение продукту достаточной удельной энергии и пр.

В ходе создания новых тестомесильных машин расходуется много материальных ресурсов и времени, так как одной из основных задач есть проведение экспериментальных исследований, которые, в свою очередь, не дают полной картины процесса замеса хлебного теста.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

При исследовании процесса осаждения твердой фракции суслу использовано известное распределение поля скорости вблизи дна аппарата, что целесообразно делать для решения инженерных задач. Аналитически получена зависимость для определения радиуса осаждения частиц, в которой учтены их характеристики и режим работы перемешивающего устройства. Разработанная модель адекватна реальному процессу осаждения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1]. Чепелюк О. Комбінований суслварильний апарат / О. Чепелюк, С. Удодов, В. Таран // Харчова і переробна промисловість. – 2009. – №2 – 3. – С. 27–29.
- [2]. Шамов Г.И. Речные наносы / Шамов Г.И. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 365с.
- [3]. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Герман Шлихтинг; под ред. Л.Г. Лойцянского. – М.: Наука, 1974. – 711 с.

### **За контакти:**

1. Чепелюк Александр Николаевич: ассистент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» Национального университета пищевых технологий, Украина, г. Киев. Телефон 066 – 297 – 36 – 36. E-mail: acherelyuk@ukr.net
2. Удодов Сергей Александрович: доцент кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» Национального университета пищевых технологий, Украина, г. Киев. Телефон 044 – 287 – 94 – 85.
3. Таран Виталий Михайлович: профессор, заведующий кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» Национального университета пищевых технологий, Украина, г. Киев. Телефон 044 – 289 – 56 – 00.

**Докладът е рецензиран.**