

Производство концентрированных фруктовых соков в современной соковой промышленности является одним из ведущих направлений благодаря непрерывно возрастающему спросу на его продукцию и высокой технологичности процессов, способствующих эффективному внедрению новых достижений техники и передовой технологии в отрасль. Концентрирование заключается в удалении воды без существенного изменения химических, органолептических, питательных и физиологических свойств сока; это энергоемкий процесс, поэтому постоянно изыскиваются новые способы, позволяющие проводить отделение воды и производить концентраты соков надлежащего качества. В качестве одного из вариантов перспективного оборудования для концентрирования фруктовых соков может быть предложен вихревой аппарат с тангенциально-лопаточным завихрителем потока газа. Полый вихревой аппарат (рис. 1) состоит из корпуса 1, тангенциального завихрителя 2, оросителя 3. Горячий воздух, поступающий из патрубка 4, закручивается тангенциально-лопаточным завихрителем, который изготавливается в виде ряда лопастей плоской или профилированной формы, расположенных по образующей цилиндра под углом друг к другу. Ороситель, через который происходит подача жидкости (сока), находится в верхней части корпуса и представляет собой перфорированную трубу. Поступающая из отверстий оросителя жидкость дробится высокоскоростным газовым потоком на капли, которые образуют вращающийся капельный дисперсный слой. Такой характер взаимодействия фаз увеличивает поверхность межфазного взаимодействия и интенсивность процесса концентрирования. Газожидкостная смесь удаляется через патрубок 5, расположенный коаксиально в нижней части корпуса аппарата на сепарацию. Эффективность, протекающих в вихревом аппарате процессов, определяется гидроаэродинамической структурой потоков и параметрами вращения газожидкостного слоя. Однако, пространственное движение капель жидкости в закрученном потоке газа является сложным явлением и поэтому при решении подобных задач, как правило, пренебрегают взаимодействием капель между собой, их коалесценцией, дроблением, обратным влиянием дисперсной фазы на несущую среду, рассматривая движение одиночной капли сферической формы в несущем потоке по равновесной траектории. Рис. 1 - Схема вихревого аппарата: 1 - корпус; 2 - тангенциально-лопаточный завихритель; 3 - патрубки подвода жидкости (Ж); 4 - патрубки входа газа (Г); 5 - патрубок выхода газожидкостного потока (ГЖ); R - радиус аппарата; R₀ - радиус выходного патрубка ГЖ; H - высота цилиндрической части; H₀ - общая высота аппарата. Анализ сил, проведенный авторами работы [1] свидетельствует о том, что при расчете траекторий и скоростей движения капель жидкости в вихревом аппарате наибольшее влияние оказывают следующие внешние активные силы: сила аэродинамического сопротивления среды и сила тяжести. С учетом этого движение одиночной капли определяется системой дифференциальных уравнений в неподвижной

цилиндрической системе координат, жестко связанной с вихревым аппаратом (ось совпадает с осью z системы координат): (1) где r , φ , z - цилиндрические координаты; u - компоненты вектора абсолютной скорости капли; v - компоненты вектора скорости газа; d - диаметр капли; ρ - плотность газа и жидкости соответственно; C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления капли; U - скорость движения капли относительно газа, равная U . В газожидкостном слое выход капли на равновесную траекторию обеспечивается при равенстве центробежной силы, действующей на каплю, и силы сопротивления со стороны набегающего потока газа. Допустим, что влияние силы тяжести на траекторию одиночной капли незначительно, то есть, $\gamma \ll 1$; при условиях взвешивания капли на определенном равновесном радиусе r , φ , z , система дифференциальных уравнений (1) преобразуется к виду: (2) Коэффициент аэродинамического сопротивления капли в области промежуточных чисел Рейнольдса ($2 < Re < 500$) может быть рассчитан по приближенному соотношению [2]: $C_x = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.75})$, (3) где Re - критерий Рейнольдса; μ - кинематический коэффициент вязкости газа. Радиальная компонента скорости газа W_r находится из условия постоянства расхода газа Q_v в вихревом аппарате: (4) $W_r = \frac{Q_v}{2\pi R h}$, (5) где W_r - радиальная составляющая скорости газа на радиусе R (вблизи лопастей завихрителя). Геометрия криволинейного днища аппарата (рис. 1) описывается следующим соотношением: $z = R - \sqrt{R^2 - r^2}$, (6) или $z = R - R \cos \alpha$. (7) Таким образом, радиальная компонента скорости газа формуле (5) имеет вид: $W_r = \frac{Q_v}{2\pi R h} \frac{r}{R}$, (8) где α - безразмерный коэффициент, характеризующий геометрию камеры. В общем виде закономерность изменения профиля тангенциальной составляющей скорости по радиусу подчиняется закону сохранения циркуляции и может быть описана выражением [3]: $\Gamma = 2\pi r W_\theta$. (9) В периферийной зоне камеры показатель степени имеет значение порядка единицы и соответствует потенциальному вращению. В этом случае уравнение (9) принимает вид: $\Gamma = 2\pi R W_\theta$, (10) где W_θ - тангенциальная компонента скорости газа у лопастей завихрителя на радиусе R . Исследовано [4], что поток жидкости на входе приобретает часть кинетической энергии газовой фазы, что влечет снижение тангенциальной составляющей скорости газового потока. Коэффициент сохранения скорости на входе в аппарат, учитывающий изменение фактической скорости газа по сравнению с расчетной, описывается зависимостью: $\eta = \frac{W_{\theta f}}{W_{\theta r}}$, (11) где L/G - отношение массовых расходов жидкости и газа соответственно. Тангенциальная составляющая скорости газа на радиусе R определяется с учетом геометрии завихрителя: (12) $W_\theta = \frac{Q_v}{2\pi R h} \frac{r}{R} \frac{1}{\sin \alpha}$, где α - угол наклона лопастей к плоскости, касательной к боковой поверхности завихрителя; $W_{\theta f}$ - среднерасходная скорость газа в живом сечении тангенциального завихрителя с прямыми лопастями: (13) $W_{\theta f} = \frac{Q_v}{2\pi R h}$; n - количество лопастей завихрителя. В соответствии с этим получается, что: $W_\theta = \frac{Q_v}{2\pi R h} \frac{r}{R} \frac{1}{\sin \alpha} \frac{1}{n}$. (14) Тангенциальная составляющая скорости газового потока по уравнению (10) получает вид: $W_\theta = \frac{Q_v}{2\pi R h} \frac{r}{R} \frac{1}{\sin \alpha} \frac{1}{n}$. (15) С учетом полученных соотношений (8) и (15) из выражения (2) получаем уравнение для

равновесного радиуса одиночной капли в завихренном потоке газа в аппарате: (16) Авторы экспериментального исследования распределения капель жидкости по размерам, образующихся при распылении жидкости в закрученном газовом потоке [5-6], пришли к выводу, что дисперсный состав капель слабо зависит от скорости газа и скорости истечения жидкости, и дает возможность считать кривую распределения капель по размерам независимой от этих параметров. Из этого следует, что капли малого и большого диаметра, взвешивающиеся в вихревой камере, ввиду их незначительного содержания в распыле по кривой распределения соответствуют значениям функции - 1 % и 99 %, минимальный и максимальный диаметры капли, соответственно, = 0,1 мм; = 0,6 мм. Количество лопастей тангенциального завихрителя, как правило, изменяется от 6 до 18 шт. Уменьшение числа лопастей приводит к увеличению размеров завихрителя и влечет неравномерность закрутки потока в рабочей зоне аппарата, в то время как большое число лопастей ($n \geq 12$) и их значительное перекрытие обеспечивает наилучшую равномерность и осесимметричность закрутки газа [7].

Рис. 2 - Зависимость равновесного радиуса (r_p) от диаметра капли (a) при разных углах наклона лопастей тангенциального завихрителя (α).

Базовые расчетные параметры: $R = 0,3$ м; $R_0 = 0,125$ м; $H = 0,3$ м; $H_0 = 0,1$ м; $b = 3$; $n = 12$; $W_{вх} = 25$ м/с; $L/G = 1,75$; $\nu_g = 2,07 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\rho_g/\rho_{ж} = 10^{-3}$

Проведенный анализ зависимости (16) при различном количестве лопастей тангенциального завихрителя выявил, что рост числа лопастей приводит к уменьшению радиальной составляющей скорости газа у лопастей завихрителя камеры на радиусе R , и как следствие, к росту равновесного радиуса капли. В то же время при уменьшении угла наклона лопастей завихрителя наблюдается увеличение величины r_p . При $n = 12$ и $\alpha = 20^\circ$ равновесный радиус капель наибольшего диаметра соответствует радиусу исследуемого вихревого аппарата (рис. 2). Максимальная среднерасходная скорость в поперечном сечении камеры аппарата определяется величиной вторичного уноса дисперсной фазы и желательна не должна превышать 25 м/с. При малых скоростях газа (до 15 м/с), когда вес пленки сопоставим с силами аэродинамического воздействия газового потока, жидкость скапливается в виде утолщенного вращающегося кольца, и движение пленки носит ярко выраженный волновой характер, трудно подчиняющийся строгой закономерности и, соответственно, расчету [8]. В общем случае, увеличение средней расходной скорости в живом сечении завихрителя приводит к росту скорости движения капли, и согласно соотношению (16), к увеличению её равновесного радиуса. Для вихревого аппарата радиусом $R = 0,3$ м наиболее оптимальной является среднерасходная скорость в пределах от 15 до 25 м/с (рис. 3).

Рис. 3 - Зависимость равновесного радиуса (r_p) от диаметра капли (a) при различной среднерасходной скорости газа ($W_{вх}$). Базовые расчетные параметры: $R = 0,3$ м; $R_0 = 0,125$ м; $H = 0,3$ м; $H_0 = 0,1$ м; $b = 3$; $n = 12$; $\alpha = 20^\circ$; $L/G = 1,75$; $\rho_g/\rho_{ж} = 10^{-3}$; $\nu_g = 2,07 \cdot 10^{-5}$ м²/с

Изучение гидравлического сопротивления

орошаемого завихрителя позволило установить, что при соотношении нагрузок жидкости и газа L/G в диапазоне от 0,5 до 1,0 наблюдается максимальное снижение гидравлического сопротивления, которое может достигать до 50 % величины сопротивления сухого аппарата. При $L/G > 2$ происходит резкое увеличение гидравлического сопротивления в связи с раскруткой потока, а также значительным гашением турбулентных пульсаций газового потока движущимися каплями жидкости [9]. Соответственно этому, в рамках данной работы исследование проводилось при изменении отношения нагрузок L/G интервале от 0,5 до 2,0. Следуя зависимости (16), с уменьшением нагрузки по жидкости величина равновесного радиуса капли значительно увеличивается и при $L/G = 1,75$ становится сопоставимой с радиусом аппарата (рис. 4). Рис. 4 - Зависимость равновесного радиуса (r_p) от диаметра капли (a) при различных значениях отношения расходов жидкости и газа (L/G). Базовые расчетные параметры: $R = 0,3$ м; $R_0 = 0,125$ м; $H = 0,3$ м; $H_0 = 0,1$ м; $b = 3$; $\alpha = 20^\circ$; $n = 12$; $W_{вх} = 25$ м/с; $\nu_g = 2,07 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\rho_g/\rho_{ж} = 10^{-3}$ В итоге, проведенный анализ полученной зависимости (16) показал, что для вихревого полого аппарата для концентрирования фруктовых соков величина равновесного радиуса капель жидкости увеличивается с ростом диаметра капель, числа лопастей тангенциального завихрителя, среднерасходной скорости газа и уменьшается с увеличением угла наклона лопастей и расхода жидкой фазы.