

Введение Рассмотрим слой жидкости на плоскости контактного устройства. В перекрестном токе с жидкостью в турбулентном режиме движется поток второй фазы (пар, газ). Между фазами происходит обмен импульсом и массой.

Турбулентный поток второй фазы в результате взаимодействия со слоем жидкости увлекает ее приграничные слои. На поверхности раздела фаз со стороны жидкости и газа формируются турбулентные пограничные слои. В турбулентном пограничном слое скорость жидкости падает от на границе раздела до нуля за пределами пограничного слоя, а в пограничном слое второй фазы, наоборот, возрастает от до значения в ядре потока. Газ, поступающий в слой жидкости при высокой скорости, на коротком участке слоя имеет структуру газожидкостной струи (факела), которая после передачи импульса распадается на пузыри, имеющие малую скорость движения, определяемую скоростью газа в колонне и скоростью подъема пузыря. В турбулентном пограничном слое на поверхности раздела фаз формируются вязкий и диффузионный подслои, имеющие толщину δ , соответственно. Определение кинетических параметров массопереноса Толщину диффузионного слоя δ , образующегося на границе раздела фаз, будем определять из соотношения: $\delta = \sqrt{\frac{2D}{u}}$, (1) где D – коэффициент молекулярной диффузии. Толщина вязкого слоя связана с толщиной диффузионного соотношением: $\delta_v = \sqrt{\frac{2\nu}{u}}$, (2) где ν – критерий Шмидта. В процессе взаимодействия газа и жидкости на межфазной поверхности со стороны жидкой и газовой фазы образуются пограничные слои жидкости и газа. В турбулентном пограничном слое турбулентные пульсации по мере приближения к межфазной поверхности постепенно затухают [8]. Коэффициент турбулентной диффузии (K_t – газовая фаза, K_l – жидкая фаза) в вязком подслое пограничного слоя связан с пульсационной скоростью соотношением: $K_t = \frac{u' \delta}{2}$, которое для пограничного слоя на поверхности раздела фаз имеет вид [9]: $K_t = \frac{u' \delta}{2}$, где u' – пульсационная скорость на границе раздела фаз, δ – масштаб турбулентных пульсаций, δ_v – толщина вязкого подслоя, y – поперечная координата пограничного слоя. Выражая, пульсационную скорость на границе вязкого подслоя через динамическую скорость u и, считая одинаковыми потоки импульса внутри вязкого подслоя и на его границе, коэффициент турбулентной диффузии получим в виде $K_t = \frac{u \delta_v}{2}$. (3) Значения коэффициентов массоотдачи определяются сопротивлением в вязком подслое [1]: $K_t = \frac{u \delta_v}{2}$, (4) где K_l и K_t – коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии в вязком подслое пограничного слоя. Подставляя значение коэффициента из выражения (3) в (4), получим: $K_t = \frac{u \delta_v}{2}$, (5) где δ_v – критерий Рейнольдса вязкого подслоя ($\delta_v = \frac{u \delta_v}{\nu}$ – газовая фаза, $\delta_v = \frac{u \delta_v}{\nu}$ – жидкая фаза), ν – критерий Шмидта. Для определения параметра рассмотрим двухслойную модель турбулентного пограничного слоя на границе раздела фаз. Законы трения для турбулентного пограничного слоя консервативны к внешним возмущениям и изменению граничных условий [2]. Поэтому возможно их распространение на

более сложные граничные условия на поверхности раздела фаз. В плоском пограничном слое без давления и пограничном слое с давлением столба жидкости структура описания закона трения не изменяется. Изменение давления оказывает влияние на параметры описания закона трения. Используем этот прием при определении числа Рейнольдса для пограничного слоя с давлением столба жидкости. Сначала определим закон трения на твердой стенке, обтекаемой потоком газа и жидкости со скоростью U , а затем на границе газ-жидкость. Используя известное распределение коэффициента трения на твердой стенке τ_w , найдем коэффициент трения и число Рейнольдса для пограничного слоя на границе раздела в системе газ-жидкость. Запишем поток импульса в вязком подслое пограничного слоя: $\tau_w \delta$, где δ – скорость фазы на границе вязкого подслоя; δ – толщина подслоя. Выразим касательное напряжение через коэффициент сопротивления: $\tau_w = \frac{1}{2} \rho U^2 C_f$. (8) Из уравнения (8) получим $C_f = \frac{2\tau_w}{\rho U^2}$. (9) Учитывая консервативность законов трения к внешним возмущениям, запишем выражение для пограничного слоя на твердой стенке и на межфазной поверхности газ-жидкость: $\tau_w = \frac{1}{2} \rho U^2 C_f$. (10) Скорости U и на границах вязкого подслоя в пограничном слое на твердой стенке и границе газ-жидкость отличаются друг от друга при одинаковой скорости внешнего потока на разность пульсационных скоростей u' и u'_g : $U = U_g + u'$, $U_g = U_g + u'_g$. Примем пульсационные скорости в турбулентной области $u' = u'_g$, тогда $U = U_g$. Из выражений (10) найдем отношение коэффициентов сопротивлений: $\frac{C_{f,g}}{C_{f,w}} = \frac{\tau_{w,g}}{\tau_{w,w}}$, (11) где $\tau_{w,g}$ – толшины вязкого подслоя в пограничном слое на твердой стенке и границе раздела в системе газ-жидкость. Из определения параметра δ , записанного для пограничного слоя на твердой стенке и на межфазной поверхности газ-жидкость, с учетом (11) получим $\delta_g = \delta_w \sqrt{\frac{\rho_w}{\rho_g}}$, (12) где U_g – динамическая скорость в пограничном слое на твердой стенке и на межфазной поверхности газ-жидкость соответственно. Значение числа для пограничного слоя на твердой стенке без градиента давления при турбулентном режиме, как известно, равно $Re_{\tau_w} = \frac{\rho_w U \delta_w}{\mu}$, а коэффициент сопротивления имеет вид $C_{f,w} = \frac{0.0576}{Re_{\tau_w}^{1/4}}$. (13) Динамическую скорость на твердой стенке выразим через коэффициент сопротивления: $U = \sqrt{\frac{2\tau_w}{\rho C_{f,w}}}$. (14) Коэффициент сопротивления в пограничном слое на межфазной поверхности газ-жидкость равен $C_{f,g} = \frac{0.0576}{Re_{\tau_g}^{1/4}}$. (15) Из уравнений (12), (14), (15) получим выражение для определения числа в пограничном слое на границе газ-жидкость: $Re_{\tau_g} = \frac{\rho_g U_g \delta_g}{\mu_g}$, (16) где U_g – жидкая фаза, μ_g – газовая (паровая) фаза. Скорость на внешней границе пограничного слоя газа примем равной скорости на оси струи U_g , а на внешней границе пограничного слоя жидкости – скорости на границе раздела фаз U . Среднее значение параметра в газовой фазе согласно (16) вычисляется по формуле [3] $Re_{\tau_g} = \frac{\rho_g U_g \delta_g}{\mu_g}$, (17) где δ_g – высота газового факела. Неизвестной величиной в формуле для определения является средняя скорость на границе раздела фаз U . Среднюю скорость на границе раздела фаз выражаем через динамическую скорость U_g . Для определения используем обобщение аналогии Рейнольдса об единстве процессов переноса массы и импульса в турбулентных потоках.

Применим аналогию Рейнольдса для описания процессов переноса в турбулентном пограничном слое жидкости на границе раздела фаз. Запишем потоки импульса и массы в турбулентной области пограничного слоя, в которой механизм переноса импульса и массы определяется пульсациями жидкости: , (18) , (19) где – количество жидкости, переносимое турбулентным механизмом; и – потоки массы и импульса; и – концентрация и скорость жидкости на границе вязкого подслоя; и – соответственно в ядре потока. Поделим уравнение (18) на уравнение (19). Получим соотношение аналогии Рейнольдса: . (20) Поток импульса в вязком подслое пограничного слоя жидкости постоянен , (21) где выражается через число : . Запишем поток массы в диффузионном подслое: . (22) Движущие силы переноса массы в вязком подслое и турбулентной области в уравнениях (20), (22) запишутся в виде , . Сложим эти уравнения, найдем движущую силу переноса массы в турбулентном пограничном слое: , отсюда найдем поток массы: , (23) где – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе. Выражая поток импульса через динамическую скорость и принимая во внимание значение из уравнения (18), уравнение (22) перепишем в виде . (24) Средняя скорость жидкости на границе вязкого подслоя согласно линейному профилю имеет значение . (25) Среднее значение коэффициента массоотдачи в (23) найдем из (7). Разлагая тригонометрическую функцию в (7) в ряд и пренебрегая членами высшего порядка малости, получим . Подставим значения выражений (24), (7) в уравнение (23), получим . (26) Принимая во внимание значение числа для жидкости , запишем приближенное равенство: . Из уравнения (26) найдем среднюю скорость на границе раздела фаз: . (27) Подставляя значение в выражение для определения , получим , (28) где , . Динамическую скорость трения на границе раздела газ-жидкость найдем из уравнений движения газа в струе-факеле. Интеграл уравнений движения вязкого газа в поле сил гидростатического давления столба жидкости запишем в форме обобщенного уравнения Бернулли для вязкой среды [4]: , (29) где , , – давление и средняя скорость газа в сечениях входа в барботажный слой I-I и распада струи на пузыри II-II рис. 1; – потеря импульса газа на участке , расходуемая на преодоление сил вязкого трения в объеме газа и на границе раздела фаз. Потеря энергии на преодоление сил внутреннего трения мала по сравнению с сопротивлением на границе раздела фаз. Пренебрегая действием сил внутреннего трения, удельную потерю импульса в струе запишем в виде , (30) где , – плотность газа и жидкости; – динамическая скорость трения на границе газ-жидкость. Перепад давления газа на высоте факела определяется в виде . Подставляя значения и перепада давления в уравнение (29), получим . Среднее значение динамической скорости в пограничном слое газа и жидкости вычислим в середине высоты факела [6]: , (31) где – жидкая фаза, – газовая фаза. Средняя скорость газа в сечениях газовых струй при распаде их на пузыри составляет , где – газосодержание в данном сечении; – средняя скорость газа в колонне.

Высоту газового факела определим по уравнению [5] , (32) где – эквивалентный диаметр отверстия. Определим толщину вязкого и диффузионного , образующихся со стороны газа и жидкости, при разделении многокомпонентной смеси (компоненты питания пропан, изобутан, бутан, изопентан, пентан, гексан) на 71 клапанной двухпоточной тарелке при различных составах и расходах питания в колонне диаметром 3,8м. Давление верха, кПа – 587.7; давление кубового остатка, кПа – 638.3; температура верха, 0С – 58; температура куба, 0С – 106; температура питания, 0С – 82. Принимаем исходную смесь как сумму двух ключевых компонентов: бутановая фракция, ключевой компонент – бутан; пентановая фракция, ключевой компонент – изопентан. Содержание НК компонента (пропана, изобутана и бутана) в мол.д. составляет: , . Расчет будем производить для верхней секции колонны по средним значениям концентрации, температуры и давления. Рис. 2 – График зависимости коэффициента массоотдачи в жидкости в зависимости от флегмового числа при различных составах и расходах питания. Рис. 3 – График зависимости толщины диффузионного слоя в жидкости в зависимости от флегмового числа при различных составах и расходах питания. На рис. 2 – 4 представлены графики зависимости коэффициента массоотдачи (7) в жидкости, толщины диффузионного (1) и вязкого (2) слоев в зависимости от флегмового числа при различных составах и расходах питания (кривая 1 – масс.д., т/ч; 2 – масс.д., т/ч; 4 – масс.д., т/ч; 5 – масс.д., т/ч;). Левая граница графиков определяется минимальным флегмовым числом. Рис. 4 – График зависимости толщины вязкого слоя в жидкости в зависимости от флегмового числа при различных составах и расходах питания. Коэффициент массоотдачи в жидкости имеет минимум, что свидетельствует о высоком сопротивлении массоотдачи при соответствующих флегмовых числах, при этом толщина диффузионного и вязкого слоев максимальна, что подтверждается рис. 3 и рис. 4.