

Введение К явлениям переноса импульса, массы и энергии не ослабевает интерес многих исследователей, как с точки зрения развития различных теорий, так и для прикладных расчетов гидравлических и тепло-массообменных характеристик промышленных аппаратов. Несмотря на широкое развитие численных методов и пакетов прикладных программ при расчетах и проектировании промышленных аппаратов наибольшее применение все еще находят приближенные методы. Приближенное математическое описание процессов переноса при расчете тепло- и массообменных аппаратов в первую очередь связано с теорией подобия, а также моделями Прандтля и Кармана, гидродинамической аналогией Рейнольдса и Чилтона-Кольборна и моделью диффузионного пограничного слоя Ландау-Левича. Кроме этого важное значение имеют консервативные свойства пограничного слоя – т.е. весьма слабые зависимости некоторых характеристик осредненного течения по отношению к внешним возмущениям, на которые одними из первых обратили внимание С.С. Кутателадзе и А.И. Леонтьев. Теоретическая основа рассматриваемого далее подхода заключается в использовании известных свойств консервативности законов трения к возмущающим воздействиям (например, продольному градиенту давления), т.е. структура математического описания элементарных актов переноса инвариантна к различным возмущениям и масштабу аппарата. Влияние возмущений не изменяет форму математического описания пограничного слоя, а учитывается параметрически. Определение корректирующих параметров выполняется путем баланса импульса. В статье рассматриваются пограничные слои на стенках и контактных устройствах аппаратов при движении несжимаемой вязкой жидкости с постоянными физическими свойствами. Обобщение гидродинамической аналогии

Соотношение между потоками импульса, массы компонента и теплоты называют аналогией. Для турбулентного пограничного слоя в случае и следует подобие безразмерных профилей скорости и температуры и полная аналогия переноса (аналогия Рейнольдса): , (1) где число Стантона; τ_w – коэффициент трения. При $Pr \neq 1$ используется поправка Чилтона – Кольборна: или , (2) где неоднородность полей, вызванная молекулярным механизмом переноса, учитывается числом Прандтля. Показатель степени этого числа зависит от гидродинамических условий взаимодействия фаз. Чилтон и Кольбор полагали $St_t \sim Pr^{-2/3}$, т.е. $m=3$. Из уравнений (2) выражение для коэффициента теплоотдачи . (3) Выражения аналогичные (2) и (3) следуют и для переноса массы компонента (массоотдачи). Гидродинамическая аналогия Рейнольдса и Чилтона – Кольборна справедлива для потоков при отсутствии продольного градиента давления, что ограничивает область ее применения. Например, в шероховатых каналах, трубах с кольцевыми накатками и насадочных слоях коэффициент возрастает в большей степени, чем характеристики теплообмена [1-4], и применение классической аналогии (2) на основе известной связи дает значительную погрешность. В работах [5-7]

рассмотрена модифицированная аналогия Рейнольдса для внутренних пограничных слоев, развивающихся после отрыва и присоединения потока за малыми препятствиями на стенках каналов. Для этого используется выражение аналогии в виде $\frac{\tau}{\rho u^2} = K \frac{\delta}{x}$, где коэффициент K показывает степень различия в интенсивности переноса импульса и теплоты в отрывном потоке. В прикладной аэрогазовой динамике [8,9] получил применение метод «эффективной длины». В этом случае влияние градиента давления учитывается соответствующей эффективной длиной при условии равенства толщин потери энергии пограничных слоев. При известной эффективной длине характеристики пограничного слоя рассчитываются с помощью соответствующих формул для пластины. Следовательно, чтобы применить аналогию (2), воспользуемся известными свойствами консервативности законов трения к различным возмущениям. Для этого осредним параметры градиентного потока по длине обтекаемого тела и приведем их к плоскому пограничному слою без гидродинамических возмущений [10-12]. Предположим, что средний поток импульса (касательное напряжение) на поверхности тела известен. Тогда в рамках плоского пограничного слоя запишем средний коэффициент трения для турбулентного пограничного слоя [13] (4) Из выражения (4) получим «эффективную скорость» (5) В данном случае эквивалентными параметрами градиентного и безградиентного потока являются среднее касательное напряжение и характерный размер тела, а влияние возмущений учитывается эффективной скоростью. Используя аналогию (3) с получим выражение для коэффициента теплоотдачи (6) Аналогично запишем для трубы используя коэффициент сопротивления по Блазиусу (7) Отсюда имеем (8) и коэффициент теплоотдачи из выражения (3) получит вид (9) Если с поверхности тела происходит диффузия веществ, то уравнения, аналогичные (6) и (9), следуют и для коэффициентов массоотдачи. Далее рассмотрено применение полученных выражений для различных случаев обтекания поверхностей (элементов аппаратов) при тепломассообмене. Насадочные и зернистые слои Турбулентный режим В качестве примера использования полученных выше выражений рассмотрим первоначально турбулентное движение однофазного потока в круглом канале (колонке) с неупорядоченной насадкой или зернистым слоем. При турбулентном режиме ($Re_{\text{Э}} > 40$) касательное напряжение на поверхности насадки или стенке канала найдем по выражению [11,14] (10) где средняя объемная скорость диссипации энергии в слое. Тогда с [15] получим (11) В результате из выражений (9) и (11) при имеем (12) Полученное выражение (12) практически полностью соответствует известному критериальному уравнению для насадочного слоя [15,16], (13) где по данным Гильденблата $\alpha = 0,407$, $m = 0,655$; по данным Аэрова и Умника $\alpha = 0,395$, $m = 0,64$ и по данным Шулена $\alpha = 0,45$, $m = 0,64$ (при $Re_{\text{Э}} = 40 \div 104$). При больших числах Рейнольдса, $Re_{\text{Э}} = 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^5$, по данным Аэрова $\alpha = 0,287$, $m = 0,67$. Результаты расчета по выражению (12)

согласуются с опытными данными [17]. Выражения для расчета коэффициента даны в литературе [15,16]. Следует отметить, что применение классической аналогии (2) с (10) дает завышенное значение на два порядка по сравнению с расчетом по формулам (12) и (13). Выполняя аналогичные преобразования из (9) и (11) при получим выражение для числа Шервуда при массообмене в газовой фазе насадочных колонн. (14) Результаты расчета по формуле (14) для сухой насадки (испарение нафталина в воздух) и сравнение с экспериментальными данными представлено на рис.1. Рис. 1 - Корреляция данных по массоотдаче в газовой фазе насадочных колонн: 1 – расчет по уравнению (14); 2 – эксперимент [15] Ламинарный режим Средний коэффициент сопротивления пластины [13] (15) Отсюда эффективная скорость (16) C (16) из выражения (3) коэффициент теплоотдачи получит вид . (17) Для насадочного слоя при ламинарном режиме ($Re \leq 40$) среднее касательное напряжение [14] (18) Из (17) и (18) получим , (19) где длина пути потока, обтекающего насадочный элемент . Критериальное выражение для рассмотренного случая имеет вид [16] . (20) Результаты расчетов по (19) и (20) согласуются в пределах $\pm 15\%$ при 2