

Моделирование работы газового холодильника возвратного этилена, осложненной полимерными отложениями

Уразов Р.Р.

Ишимбайский филиал Уфимского государственного авиационного технического университета, Ишимбай

На основе методов и уравнений механики многофазных сред получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая гидродинамические и тепломассообменные процессы в противоточных теплообменниках типа «труба в трубе», где по внутренней трубе течет смесь этилена и полиэтилена, а в межтрубном пространстве противотоком движется вода. Течение газовой смеси осложнено «налипанием» жидкого полиэтилена на стенках трубы. При описании процесса образования полимерной пленки рассмотрен один из возможных механизмов поступления жидких частиц полиэтилена из турбулентного ядра к поверхности трубы — турбулентная диффузия. Представлены результаты исследований по динамике накопления полиэтиленовой пленки на внутренней поверхности газового холодильника возвратного этилена. Установлено, что формирование профиля отложений носит сложный характер: максимум толщины пленки смещается к выходному сечению канала.

Ключевые слова: нефтехимия, теплообменные аппараты, возвратный этилен, полиэтилен

1. Введение

В химической промышленности полиэтилен высокого давления (ПЭВД) получают из газообразного этилена в трубчатых реакторах. Образовавшийся в реакторе расплавленный полиэтилен вместе с непрореагировавшим этиленом выводится в отделитель. Далее этилен, содержащий незначительное количество низкомолекулярного полиэтилена, поступает в систему охлаждения и очистки. Полиэтилен содержится в этилене в виде мелких капель, унесенных потоком газа из отделителя, и в растворенном виде [1].

Система очистки и охлаждения состоит из нескольких последовательно соединенных секций, каждая из которых включает холодильник и сепаратор циклонного типа. Этилен, проходя через холодильник, охлаждается и из него выделяется полиэтилен, который отгружается из сепаратора. Выделяющийся низкомолекулярный полиэтилен (особенно в последней секции) может налипать на стенки холодильника.

С целью определения мер, улучшающих работу системы охлаждения, была построена математическая модель реального объекта, более удобная для экспериментального изучения с помощью ЭВМ.

2. Течение смеси этилена и полиэтилена

Газовый холодильник высокого давления состоит из N -го количества труб типа «труба в трубе». По внутренним трубам проходит газ, по кольцевому сечению — обратная вода.

Рассмотрим течение газожидкостной смеси во внутренней трубе радиусом a , площадью поперечного сечения $S_g = \pi a^2$ и длиной L (рис. 1). Толщину полиэтиленовой пленки обозначим δ . При налипании полиэтилена на стенки холодильника радиус сечения изменяется, поэтому справедливо соотношение $a = a_0 - \delta$, кроме того S_g и, следовательно, a являются функциями координаты z и времени τ . Координату z будем отсчитывать от входного сечения в трубопровод.

Примем, что поток смеси в трубопроводе состоит из двух компонент: газообразного этилена и низкомолекулярного полиэтилена, который может



Рис. 1. Схема продольного сечения секции газопроводного холодильника

находиться в виде мелких капель и в растворенном виде в этилене. Жидкий полиэтилен является главной составляющей при образовании пленки.

При математическом моделировании течения двухфазной смеси в горизонтальном канале используем аппарат механики сплошных сред.

Основные допущения: скорости составляющих смеси параллельны оси канала; пренебрегаем энергией пульсационных движений; считаем, что давление однородно по сечению канала и является функцией только осевой координаты z ; течение в трубе квазиустановившееся; жидкость несжимаемая; температура одинакова для обеих фаз (газа и жидкости); фазовые переходы происходят в равновесном режиме.

На основании сделанных допущений запишем уравнения, описывающие квазиустановившееся течение газозвеси в горизонтальном цилиндрическом канале.

Состояние газа описывается уравнением Клапейрона–Менделеева

$$p_g = Z_g \rho_g R_g T_g.$$

где p_g — давление смеси; Z_g — коэффициент сжимаемости; ρ_g — плотность; R_g — удельная газовая постоянная; T_g — температура.

Расход смеси m_g изменяется только за счет налипания жидких частиц. Но, поскольку содержание полиэтилена в газовом потоке составляет, как правило, доли процента [1], можем считать что

$$m_g = \rho_g v_g S_g = \text{const},$$

где v_g — средняя скорость течения газа.

Уравнение сохранения импульса для смеси имеет вид:

$$m_g \frac{dv_g}{dz} = -S_g \frac{dp_g}{dz} - f, \quad f = 2\pi a \sigma, \quad \sigma = \lambda \frac{\rho_g v_g^2}{8}.$$

Здесь f и σ — сила трения между газом и стенкой трубы, отнесенная к единице длины и площади соответственно; λ — коэффициент гидравлического сопротивления стенок трубы.

При турбулентном режиме течения для определения коэффициента сопротивления λ можно пользоваться формулами П.К. Конакова, А.Д. Альтшуля и Прандтля–Никурадзе [2].

Уравнение изменения температуры вдоль канала можно записать как

$$m_g c_g \frac{dT_g}{dz} = \frac{m_g}{\rho_g} \frac{dp_g}{dz} - Q_{g\Sigma}, \quad Q_{g\Sigma} = 2\pi a q_{g\Sigma},$$

где c_g — теплоемкость газа; $Q_{g\Sigma}$ и $q_{g\Sigma}$ — интенсивность теплопередачи от газового потока к внутренней поверхности, отнесенная соответственно к единице длины и площади.

Для интенсивности теплопередачи от потока к внутренней поверхности стенки трубопровода или к поверхности пленки, когда она присутствует на стенке канала, справедливо следующее соотношение

$$q_{g\Sigma} = \alpha_{g\Sigma} (T_g - T_\Sigma), \quad (1)$$

где $\alpha_{g\Sigma}$ — коэффициент теплопередачи от газа к внутренней стенке; T_Σ — температура поверхности трубопровода.

Температура внутренней поверхности трубопровода T_Σ определяется из условия теплового баланса $q_{g\Sigma} = q_{\Sigma w}$, где $q_{\Sigma w}$ — интенсивность теплопередачи от внутренней стенки внутреннего трубопровода к воде, определяемая выражением

$$q_{\Sigma w} = \alpha_{\Sigma w} (T_\Sigma - T_w).$$

где T_w — температура воды.

Тогда, с учетом (1), получим:

$$T_\Sigma = \frac{\alpha_{g\Sigma} T + \alpha_{\Sigma w} T_w}{\alpha_{g\Sigma} + \alpha_{\Sigma w}}, \quad \alpha_{\Sigma w} = a^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_f} \ln \frac{a_0}{a} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{a_1}{a_0} + \frac{1}{a_1 \alpha_{\Sigma 1 w}} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь λ_f и λ_1 — коэффициенты теплопроводности пленки и стенки внутренней трубы; $\alpha_{\Sigma w}$ и $\alpha_{\Sigma 1 w}$ — коэффициенты теплопередачи от внутренней и внешней поверхностей внутренней трубы к воде.

3. Течение обратной воды

Оборотная вода движется в противоток этилену в межтрубном пространстве с площадью поперечного сечения S_w (рис. 1).

Используя сделанные ранее допущения для газа, запишем уравнения, выражающие балансы массы и энергии при одномерном течении воды в канале кольцевого сечения:

$$m_w = \rho_w v_w S_w = \text{const},$$

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dz} = Q_{w\Sigma 1} + Q_{w\Sigma 2},$$

$$Q_{w\Sigma i} = 2\pi a_i q_{w\Sigma i}, \quad q_{w\Sigma i} = \alpha_{w\Sigma i} (T_w - T_{\Sigma i}) \quad (i = 1, 2).$$

Здесь ρ_w — плотность воды; v_w — скорость течения; c_w — теплоемкость воды; $Q_{w\Sigma_i}$, $q_{w\Sigma_i}$ — интенсивность теплопередачи от воды к поверхности трубы; T_{Σ_i} — температура поверхности трубопровода.

Действуя аналогично выводу (2), получим:

$$T_{\Sigma_1} = \frac{\alpha_{g\Sigma_1} T_g + \alpha_{\Sigma_1 w} T_w}{\alpha_{g\Sigma_1} + \alpha_{\Sigma_1 w}},$$

$$\alpha_{g\Sigma_1} = a_1^{-1} \left(\frac{1}{a\alpha_{g\Sigma_1}} + \frac{1}{\lambda_f} \ln \frac{a_0}{a} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{a_1}{a_0} \right)^{-1},$$

$$T_{\Sigma_2} = \frac{\alpha_{w\Sigma_2} T_w + \alpha_{\Sigma_2 a} T_a}{\alpha_{w\Sigma_2} + \alpha_{\Sigma_2 a}},$$

$$\alpha_{\Sigma_2 a} = a_2^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{a_3}{a_2} + \frac{1}{a_3 \alpha_{\Sigma_3 a}} \right)^{-1}.$$

Здесь T_a — температура воздуха; $\alpha_{\Sigma_2 a}$ и $\alpha_{\Sigma_3 a}$ — коэффициенты теплопередачи от стенок внешней трубы к воздуху; λ_a — коэффициент теплопроводности воздуха; λ_2 — коэффициенты теплопроводности стенки внешней трубы.

Температура T_{Σ_3} поверхности трубопровода, контактирующей с воздухом, вычисляется с помощью уравнений:

$$T_{\Sigma_3} = \frac{\alpha_{w\Sigma_3} T_w + \alpha_{\Sigma_3 a} T_a}{\alpha_{w\Sigma_3} + \alpha_{\Sigma_3 a}},$$

$$\alpha_{w\Sigma_3} = a_3^{-1} \left(\frac{1}{a_2 \alpha_{w\Sigma_2}} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{a_3}{a_2} \right)^{-1}.$$

4. Налипание полиэтилена

Из литературы известно, что этилен, отходящий из отделителя промежуточного давления, содержит в растворенном виде полиэтилен с молекулярной массой менее 1 кг/моль, а полиэтилен с более высокой молекулярной массой попадает в обратный газ за счет капельного уноса из отделителя [1]. Поэтому примем, что в холодильник поступает полиэтилен с молекулярной массой 0,74 кг/моль, массовое содержание k_P которого в потоке задано на входе в холодильник.

Газ, подаваемый в секцию холодильника после сепаратора, не содержит конденсированной фазы. Полиэтилен в потоке находится в газообразном состоянии в виде отдельных полимерных молекул, содержащих порядка 26–27 молекул этилена. После достижения точки росы полиэтилен начинает конденсироваться, образуя в потоке высокодисперсные частицы диаметром $d_l < 0,5 \div 1$ мкм. Заметной коагуляции частиц не происходит, для этого недостаточно времени, т.к. период нахождения частиц, движущихся со скоростью 25–30 м/с, в секции холодильника составляет порядка 2–3 секунд.

Образование пленки будет происходить на тех участках канала, где в потоке присутствует жидкий полиэтилен и концентрация которого удовлетворяет условию $k_{l(P)} > 0$.

Массовое содержание жидкого полиэтилена определим из соотношения

$$k_{l(P)} = \frac{k_P - k_{g(P)}}{1 - k_{g(P)}},$$

где $k_{g(P)}$ — равновесное содержание полиэтилена в газе.

Имеющиеся данные по равновесию жидкость–пар в системе «этилен–полиэтилен» [1] иллюстрируют зависимость массового содержания полиэтилена в газе от давления и температуры системы. Экспериментальная зависимость хорошо аппроксимируется полиномом второго порядка

$$k_{g(P)} = A + B_1 p + B_2 T + B_{11} p^2 + B_{22} T^2 + B_{12} p T.$$

Методом наименьших квадратов, были получены следующие значения параметров уравнения: $A = 0,0283$, $B_1 = -9,52 \cdot 10^{-9}$, $B_2 = 7,12 \cdot 10^{-5}$, $B_{11} = 9,92 \cdot 10^{-17}$, $B_{22} = -2,27 \cdot 10^{-7}$, $B_{12} = 1,64 \cdot 10^{-11}$.

Пленка образуется за счет адгезии жидких частиц полиэтилена стенками трубы. Процесс протекает в два этапа. На первом этапе, когда стенки трубы сухие, большая часть частиц отскакивает, а осевших — сдувается. Такая картина наблюдается до тех пор, пока стенки не покроются тонкой пленкой, толщиной сопоставимой с размером самих частиц.

После образования «смазки» наступает второй этап, который характеризуется значительно возросшим коэффициентом осаждения.

Одним из возможных механизмов, обеспечивающих поступление жидкого полимера к поверхности трубопровода, является турбулентная диффузия. Поэтому для интенсивности переноса частиц запишем уравнение в форме закона Фика:

$$j_{lf}^2 = \frac{D_l}{2a} \rho_g k_{l(P)} \text{Sh},$$

$$\text{Sh} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}_{(D)}^{0,43}, \quad \text{Pr}_{(D)} = \frac{\nu_g}{D_g},$$

где D_l — коэффициент турбулентной диффузии жидких частиц; Sh — число Шервуда; $\text{Pr}_{(D)}$ — диффузионное число Прандтля; ν_g — турбулентная кинематическая вязкость газа. При записи (3) полагалось, что на поверхности трубы $k_{l(P)} = 0$.

Коэффициент турбулентной диффузии аэрозольных частиц определим на основании уравнения [3]

$$D_l = \frac{1}{1 + \omega_E \tau} D_g,$$

где D_g — коэффициент турбулентной диффузии газа, который на основании аналогии Рейнольдса принимают обычно равным кинематическому коэффициенту турбулентной вязкости $D_g = \nu_g$; ω_E — частота пульсаций крупномасштабных вихрей; τ — время релаксации частиц, определяемое для высоко- и тонкодисперсных частиц выражением

$$\tau = \frac{1}{18} \frac{\rho_l d_l^2}{\eta}$$

(ρ_l — плотность частицы; d_l — диаметр частицы; η — динамическая вязкость среды).

Частота пульсаций крупномасштабных вихрей вычисляется по формуле

$$\omega_E = \frac{v_*}{0,1a},$$

а динамическая скорость

$$v_* = v_g \sqrt{\frac{\lambda}{8}}.$$

Изменение кинематического коэффициента турбулентной вязкости в вязком подслое задается уравнением [3]

$$\nu_g = \nu \left(\frac{y_+}{14,5} \right)^3 \quad (0 < y_+ \leq 5), \quad (4)$$

где ν — кинематическая вязкость этилена; y_+ — безразмерное расстояние до стенки.

Применяя теорему о среднем к функции, задаваемой уравнением (4), получим

$$\nu_g \approx 0,01\nu.$$

Как уже было сказано выше, на первом этапе процесс осаждения сопровождается спутными явлениями, такими как отскок и сдувание частиц, кроме того, при высоких скоростях газов возможен срыв со стенки и диспергирование жидкой пленки. Для учета этого обстоятельства введем в уравнение (3) дополнительный множитель γ , характеризующий степень удержания частиц стенками трубы. Тогда для интенсивности образования полиэтиленовой пленки запишем выражение в виде:

$$j_{lf}^1 = \gamma j_{lf}^2.$$

В настоящий момент автору неизвестна надежная методика определения γ , поэтому примем $\gamma = 1$.

В дальнейшем будем полагать, что гравитационное осаждение не оказывает существенного влияния, т.к. скорость потока значительна, а размеры частиц малы. Поэтому отложения полиэтилена на верхней и нижней стенках симметричны.

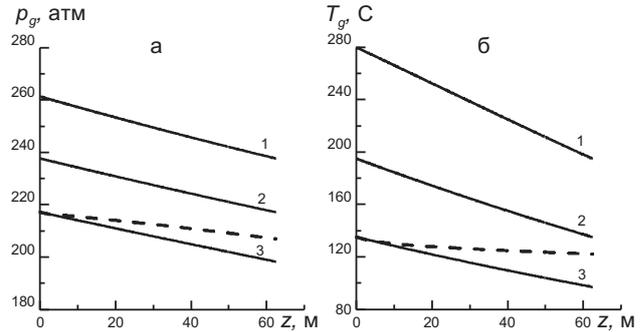


Рис. 2. Распределение давления (а) и температуры (б) этилена по длине холодильника

Изменение толщины полиэтиленовой пленки со временем определим из уравнения

$$\rho_f \frac{\partial \delta}{\partial t} = j_{lf}^k \quad (k = 1, 2),$$

где ρ_f — плотность полиэтилена.

Из-за налипания жидкого полиэтилена концентрация полимера будет снижаться, ее изменение по длине холодильника определяется выражением

$$m_g \frac{dk_P}{dz} = -J_{lf}^k, \quad J_{lf}^k = 2\pi a j_{lf}^k \quad (k = 1, 2),$$

где J_{lf}^k и j_{lf}^k — интенсивности образования полиэтиленовой пленки, отнесенные к единице длины и площади соответственно.

5. Результаты расчетов и выводы

При численном моделировании был рассмотрен трехсекционный газовый холодильник. Параметры секций: $a_0 = 2,25$ см, $a_1 = 3,5$ см, $a_2 = 3,8$ см, $a_3 = 4,25$ см, $L = 62,5$ м, $\Delta = 50$ мкм, $\lambda_1 = 18$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = 50,6$ Вт/(м·К). Характеристики газовой смеси на входе в первую секцию: $p_g = 264,5$ атм, $T_g = 553$ К, $m_g = 9$ кг/с, $k_P = 0,005$, $D_l = 10^{-10}$ м²/с. Характеристики воды на входе в секцию: $T_w = 298$ К, $m_w = 10$ кг/с. Температура воздуха $T_a = 293$ К.

На рис. 2 представлены графики, иллюстрирующие изменение давления и температуры возвратного этилена вдоль холодильника в начальный момент времени. Цифры над сплошными кривыми — номера секций.

Для определения зоны налипания полиэтилена, проследим за изменением концентрации полимера. На рис. 3(а) равновесное содержание $k_{g(P)}$ газообразного полиэтилена в потоке представлено сплошными кривыми. Общее содержание k_P — пунктирной кривой. Цифры над кривыми соответствуют номеру секций. Из рисунка видно, что

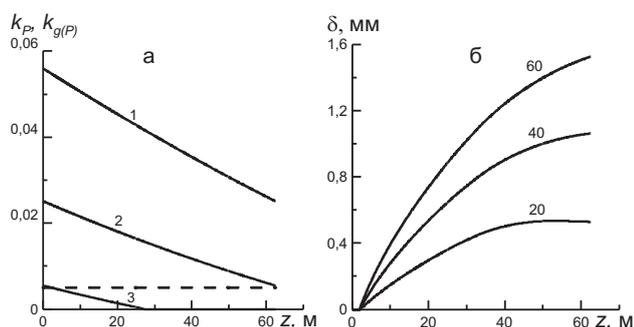


Рис. 3. Изменение равновесной концентрации газообразного полиэтилена вдоль холодильника (а). Профилограмма отложений полиэтилена на внутренних стенках 3-й секции холодильника (б)

конденсация полиэтилена начинается на начальном участке третьей секции, где выполняется условие $k_p > k_{g(P)}$.

Изменение толщины полиэтиленовой пленки со временем показано на рис. 3(б). Числа над кривыми – время в минутах от начала функционирования холодильника. Приведенные результаты имеют одну особенность. Максимум кривой, соответствующей 20-й минуте, отстоит от выхода на некотором расстоянии, а в последующие моменты времени совпадает с выходным сечением. Такое поведение обусловлено тем, что участок наиболее интенсивного налипания, соответствующий максимальной концентрации жидкого полиэтилена, со временем сме-

щается к выходному сечению.

Сопоставление результатов моделирования с наблюдениями на производстве показывает, что предложенная схема расчетов позволяет вычислить участок налипания полимера, адекватно описывает профили отложений, однако дает завышенные темпы накопления полиэтиленовой пленки. Это связано с тем, что не учитывается интенсивность уноса жидкого полиэтилена потоком.

Полученные в работе данные свидетельствуют о том, что налипание полиэтилена существенно влияет на работу холодильника. Так, уже к концу 1-го часа из-за ухудшения теплообмена, давление и температура газа в третьей секции повышаются, об этом свидетельствуют пунктирные кривые на рис. 2. Это, в свою очередь, ухудшает высаживание фракции низкомолекулярного полиэтилена, а значит «недоочищенный» возвратный этилен подается на компрессор реакционного давления.

Список литературы

- [1] Поляков А.В., Дунто Ф.И., Софиев А.Э. Полиэтилен высокого давления. Научно-технические основы промышленного синтеза. Л.: Химия, 1988. 200 с.
- [2] Вильнер Я.М., Ковалев Я.Т., Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. Минск: Высшая школа, 1985. 382 с.
- [3] Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 176 с.

Simulation of the operation of the gas refrigerator recurrent complicated ethylene polymer deposits

Urazov R.R.

Ishimbay Branch of USATU, Ishimbay

The work based on the methods and equations of mechanics of multiphase media, the resulting system of ordinary differential equations, describing hydrodynamic and heat and mass transfer processes in counterflow heat exchangers type "pipe in pipe", where the inner tube flows a mixture of ethylene and polyethylene, and in the annular space counter-current moves water. For gas mixtures is complicated by the "sticking" of liquid polyethylene on the walls of the pipe. In describing the process of formation of the polymer film is considered one of the possible mechanisms for the admission of liquid polyethylene particles from the turbulent core to the surface of the pipe, the turbulent diffusion. The results of studies on the dynamics of accumulation of the plastic film on the inner surface of gas refrigerator returnable ethylene. It is established that the formation of the profile of sediments is complex: the maximum film thickness is shifted to the output section of the channel.

Keywords: petrochemicals, heat exchangers, return ethylene, polyethylene

