



А.А.Цыгура, Е.А.Старокожева

О ПРИМЕНИМОСТИ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССА ГЕТЕРОКОАГУЛЯЦИИ ПЫЛЕВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ДИСПЕРГИРОВАННЫМИ ЖИДКОСТЯМИ

В статье рассмотрены существующие теории описания процессов гетерокоагуляции аэрозолей диспергированными жидкостями и предлагаемый авторами статьи механохимический подход к описанию выше названного процесса.

Наиболее эффективным путем разрушения пылевых аэрозолей в атмосфере является использование и интенсификация природных процессов, основанных на взаимодействии воды с пылью, то есть гидрообеспыливание. Многообразие способов гидрообеспыливания (орошение, увлажнение, борьба с пылью пенами и паром) говорит о его широком применении в практике. Но сейчас нет четких теоретических представлений о процессах, происходящих при взаимодействии пыли и жидкости в газовой среде (гетерокоагуляция), что затрудняет количественные расчеты по эффективности способов в практике.

В настоящее время процесс гетерокоагуляции пыли диспергированными жидкостями описывается либо гидродинамическими [1], либо термодинамическими законами [2]. Однако гетерокоагуляция дисперсных систем во многих случаях идет более сложно и может быть описана лишь через законы физикохимии [3,4].

Для обоснования физико-химического подхода к описанию процесса гетерокоагуляции пылевых аэрозолей диспергированными жидкостями следует рассмотреть недостатки существующих подходов к описанию коагуляции дисперсных систем в движущихся газовых средах. Для этого рассмотрим ряд теорий, количественно описывающих этот процесс: теории инерционного осаждения аэрозолей на препятствиях различной формы (Лэнгмюра), кинетическую теорию быстрой коагуляции (Смолуховского); теория устойчивости гидрофобных коллоидов Дерягина - Ландау - Фервея - Овербека (ДЛФО) и кинетическую теорию медленной коагуляции Фукса Н.А.

1. Физическая теория Лэнгмюра рассматривает пылевую аэрозоль и поток капель как совокупность механически движущихся физических тел [5]. Эти тела взаимодействуют (вязкое соударение), если их траектории пересекутся в определенной точке пространства, но акт взаимодействия в теории Лэнгмюра не оценивается, он подразумевается как,

безусловно, имеющий место. Учитывая, что описать встречи многих тысяч тел математически невозможно, вероятность процесса описана в виде эмпирической зависимости с позиций теории подобия, то есть через физические критерии (Стокса, Рейнольдса, Фруда и т.д.) [5]. Однако в теории инерционного осаждения нет места природе взаимодействующих частиц, которая должна проявляться через поверхностные явления.

2. Кинетическая теория Смолуховского исходит из представлений о коагуляции как о диффузионном взаимодействии (сближении частиц под действием сил диффузии) [6]. При этом скорость коагуляции любой дисперсной системы должна зависеть от количества частиц в пространстве (следствие из молекулярно-кинетической теории). Но это условие выполнимо лишь для случая, когда процесс коагуляции лимитируется стадией встречи частиц, а не взаимодействием на границе раздела фаз. Поэтому кинетическая теория хорошо описывает случай быстрой коагуляции, которая не осложнена действием стабилизаторов.

3. Теория ДЛФО рассматривает процесс коагуляции частиц с учетом их межмолекулярного взаимодействия в среде [2]. Однако физический подход к рассмотрению самого взаимодействия (учет изменения сил по расстоянию) осложнил количественное описание процесса коагуляции и не позволил оценить его через известные термодинамические функции, характеризующие поверхность. Авторам теории ДЛФО пришлось ввести новое понятие - расклинивающее давление, - характеристическую функцию тонкого «негибсовского» слоя среды. Но формирование химических связей между взаимодействующими поверхностями осталось вне рассмотрения, что не позволило представить слипание (захват) частиц как конкурирующее взаимодействие поверхности частицы (пылинки) со стабилизатором (слоем ПАВ) или с поверхностью другой частицы (капли).

4. Теория коагуляции аэрозолей Фукса И.А.

рассматривает случай медленной коагуляции гидрофобных коллоидов [7]. При этом она количественно учитывает взаимодействие частиц через введение в кинетическое уравнение параметра, характеризующего энергетический барьер. Физический смысл этого параметра заключается в том, что концентрация потока, проходящего через энергетический барьер, определяется крутизной барьера или «ямы» и поэтому уменьшается или увеличивается по сравнению с концентрацией потока в отсутствие поля. Фукс был наиболее близок к описанию коагуляции гидрофобных коллоидов как результата физико-химического превращения на границе раздела фаз.

Каждая из вышеперечисленных теорий описывает частный случай процесса гетерокоагуляции пыли диспергированными жидкостями. Теория Лэнгмюра описывает случай захвата капельным потоком грубодисперсной пыли ($d > 10$ мкм) с высокоэнергетической поверхностью, для которой не может быть ограничений по слипаемости и смачиваемости (химическому взаимодействию). Причем концентрация частиц в потоке должна быть такой небольшой, что для потока выполняется условие «бесконечности среды», а требование к пыли быть грубодисперсной позволяет пренебречь газовым пограничным слоем. В рамках этих ограничений среда вокруг частицы принимается непрерывной, несжимаемой и вязкой; в ней отсутствует также тепло- и массообмен между твердой фазой и газовой средой, что позволяет пользоваться в расчетах гидродинамическими уравнениями Навье-Стокса.

Однако пыль, полученная из большинства природных материалов, является несмачиваемой (низкоэнергетической) и к тому же тонкодисперсной [4], то есть процесс гетерокоагуляции этой пыли капельным потоком не может быть описан теорией Лэнгмюра. Этот факт был установлен на практике: гидрофобные аэрозольные частицы вымываются из воздуха дождем в 17 раз хуже, чем гидрофильные [8].

Теория Смолуховского лучше описывает случай гомо- и гетерокоагуляции потока с тонкодисперсными частицами, в котором характер движения этих частиц в среде - броуновская диффузия. При этом вблизи центральной частицы должна быть выделена сфера, вхождение других частиц в которую становится равносильно слипанию (захвату). Следовательно, в теории Смолуховского рассматривается случай коагуляции тонкодисперсных частиц с выраженным сродством между поверхностями (высокоэнергетические поверхности), а процесс коагуляции лимитируется диффузией.

Теорию ДДФО можно рассматривать как развитие теории Смолуховского. В ней основное внимание уделено рассмотрению процесса захвата на стадии взаимодействия частиц при их встрече. Но в количественных расчетах теория, ДДФО опирается не на из-

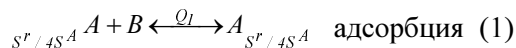
менение энергии в дисперсной системе, а на силовое взаимодействие, что не позволило её авторам описать процесс с позиций термодинамики в качестве поверхностного химического превращения.

Наши представления о гетерокоагуляции пылевых аэрозолей диспергированными жидкостями опираются на пылевой аэрозоль и его взаимодействие с диспергированной жидкостью [9].

Пылевой аэрозоль рассматривается в качестве дисперсной системы (не формально), в которой за частицу принимается твердое ядро и движущийся с ним объем газовой среды (адсорбционный и пограничный слой) [3]. В таком подходе объем частицы увеличивается по сравнению с объемом твердой частицы, принятой в физическом подходе, в $10^5 - 10^9$ раз, а при массовой концентрации 10-30 мг/м весь воздух в запыленном объеме переходит в связанное состояние. При этом твердые ядра и газ ведут себя как единая система, к которой не применимо понятие «бесконечная среда». Наличие адсорбционного и пограничного слоев на твердой частице обосновано при опоре на экспериментальные данные по характеру переноса среды. В гидродинамическом пограничном слое наблюдается ее механическое перемещение и возникает градиент скорости, в адсорбционном слое - диффузионный перенос среды, которой характеризуется градиентом концентраций ее молекул. Причем обмен молекулами среды между пограничным и адсорбционным слоями идет за счет сил адсорбции [2], которыми также определяется эффективный (учитывающий толщину адсорбционного и пограничного слоев) радиус оседающей частицы. Поэтому движение тонкодисперсных аэрозольных частиц в газовой среде можно рассматривать как результат адсорбционного взаимодействия поверхности с газом. При этом движение частиц в среде должно подчиняться условию: чем больше и полярнее поверхность, отнесенная к единице объема фаз, тем выраженнее ее сродство к среде и тем менее выражено для нее механическое перемещение (оседание).

Рассмотрим седиментационно-диффузионное равновесие в качестве механохимического, в котором перемещение является результатом поверхностного взаимодействия частицы со средой и действия сил гравитации и инерции на частицу. Изобразим движение частиц в газовой среде с помощью схем наподобие химических реакций. При этом учтем, что движется частица, а взаимодействует поверхность. Химической «реакцией» лимитирующей механохимический процесс оседания частиц в газовой среде, будем считать адсорбционно-десорбционное равновесие. Налицо процесс, включающий эле-

менты молекулярно - кинетического и поверхностного явлений, а массы, как единого свойства, не изменяющегося в превращении, недостаточно для его описания. Необходимо еще один параметр - удельная поверхность, который опишет поверхностное взаимодействие как превращение. В этих условиях оседание может быть записано в виде двух равновесных «реакций» [4]:



где А и В- частицы пыли и молекулы газа (реагенты); $A_{S^r / 4S^A} B$ поверхность, адсорбирующая молекулы газовой среды (промежуточный продукт), который оседает из потока и станет осевшей пылью (С); S^A и S^T - поверхность пылинки и молекулы газа.

В уравнении реакции (1) стехиометрия выбрана таким образом, что с 1 молем газовой среды взаимодействует такое количество частиц, которое способно адсорбировать своей поверхностью этот моль газа. Кроме того, к газовой среде и к осевшей пыли можно применить представления о бесконечно большом резервуаре вещества и их активность принять равной единице.

Кажущаяся константа равновесия суммарного процесса, включающего стадии (1) и (2), будет равна:

$$\ln Q_0 = \ln Q_1 + \ln Q_2 = -\frac{S^r}{4S^A} \ln \alpha_a^d = -\ln \alpha_a^s = \ln(1 - \eta) \quad (3)$$

где α_a^d и α_a^s - термодинамические активности пылевого аэрозоля, выраженные через частичную и поверхностные концентрации; η - эффективность оседания пыли.

Возможность установления механохимического равновесия определяется величиной свободной энергии системы пыль-газ (ΔG), причем в оседании следует учитывать одновременно энергию механического и теплового движения частиц [6], а количество пыли в седиментационно-диффузионном равновесии должно зависеть от массы и скорости движения дисперсной фазы, а также от температуры дисперсионной среды.

Рассмотрим изменение свободной энергии механически перемещающейся системы пыль-газ, отнесенные к 1 молю поверхности (ΔG_{q+r}^{MS}).

При этом (ΔG_{q+r}^{MS}) будет определяться через сумму энергий контактирующих фаз:

$$\Delta G_{q+r}^{MS} = \Delta G_{q+r}^{MS} - (\Delta G_q^{MS} + \Delta G_r) \quad (4)$$

где ΔG_q^{MS} - изменение свободной энергии твердой фазы, отнесенной и 1молю ее повер-

хности, Дж/моль; ΔG_r - изменение энергии одного моля газа, Дж/моль; ΔG_{q+r}^{MS} - изменение свободной энергии 1 моля твердой поверхности в процессе адсорбции, Дж/моль.

Величина ΔG_{q+r}^{MS} определяется адсорбцией и зависит лишь от удельной поверхностной энергии твердого тела в газовой среде (δ_{m^*}), и описывается выражением:

$$\Delta G_{q+r}^{MS} = \delta_{m^*} \cdot S_m^r \quad (5)$$

где S_m^r - поверхность, занимаемая одним молем газовой среды, мг/моль.

В случае, когда частицы начинают перемещаться в пространстве, изменение свободной энергии фазы определяется изменением суммы ее кинетической и потенциальной энергий, распределение Максвелла-Больцмана, отнесенной к молю поверхности с обратным знаком, то есть

$$\Delta G_q^{MS} = -S_m^r [0,16\rho_n \cdot r_n (2gh \pm v^2)] \quad (6)$$

где ρ_n и r_n - плотность и средний радиус пылинок; v - скорость движения пылегазового потока; g - ускорение свободного падения; h - расстояние по высоте.

Знак «плюс» перед параметром скорости движения в выражении (6) ставится в случае, когда направление внешней силы совпадает с направлением силы тяжести, а знак «минус» - при противоположном направлении действующих сил.

Для газовой среды, имеющей постоянную температуру и давление ($P = \text{const}$ и $T = \text{const}$), изменение свободной энергии не происходит то есть выполняется условие $\Delta G_q = 0$. Результирующее значение величины ΔG_{q+r}^{MS} , для системы пыль-газ с учетом выражение (5) и (6) будет равно:

$$\Delta G_{q+r}^{MS} = S_m^r [\delta_{m^*} - 0,16\rho_n \cdot r_n (2gh \pm v^2)] \quad (7)$$

а между величиной $\Delta G_{q+r}^{MS} = S_m^r [\delta_{m^*} - 0,16\rho_n \cdot r_n (2gh \pm v^2)]$ и кажущейся константой равновесия установится связь:

$$\ln Q_0 = -\Delta G_{q+r}^{MS} / RT$$

Расчет эффективности оседания пыли из газового потока (η) с направленным движением навстречу гравитационному полю будет проводиться по формуле

$$\ln(1 - \eta) = S_m^r [\delta_{m^*} - 0,16\rho_n \cdot r_n (2gh \pm v^2)] / RT \quad (9)$$

Причем оседание в системе пыль-газ будет наблюдаться при условии

$\delta_{m^*} - 0,16\rho_n \cdot r_n (2gh \pm v^2) < 0$, если же $\delta_{m^*} - 0,16\rho_n \cdot r_n (2gh \pm v^2) > 0$, то наблюдается подъем частиц в газовой среде. Граничным случаем, когда концентрация пыли в газовой среде остается неизменной ($1 - \eta$) будет выполнение равенства

$$\delta_{m\kappa} - 0.16\rho_n \cdot r_n (2gh \pm v^2) = 0 \quad (10)$$

которое позволяет рассчитать скорость восходящего газового потока, не позволяющего выпадать пылинкам со средним радиусом r_n .

$$v = \sqrt{2gh - \frac{\delta_{m\kappa}}{0.16\rho_n \cdot r_n}} \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что скорость оседания частиц (равная скорости восходящего потока с обратным знаком) зависит от разности высот, на которых фиксируется изменение концентрации поверхности пыли, что согласуется с физическим подходом к определению скорости оседания частиц. Однако второй член выражения (II) через удельную поверхностную энергию несет информацию о природе поверхности дисперсной фазы и составе газовой среды, а через радиус частиц, составляющих дисперсную фазу - информацию о количестве этой поверхности.

Расчеты, проведенные по уравнению (II) показывают, что тонкодисперсная пыль ($r_n \leq 1$ мкм) должна иметь почти постоянную концентрацию в неподвижной газовой среде значительной толщины. Так, для водного аэрозоля (его поверхностное натяжение является известной и постоянной в нормальных условиях величиной) этот слой должен быть равен 10-20 метрам. Для аэрозолей радиусом более 10 мкм толщина слоя с постоянной концентрацией поверхности должна уменьшаться и для капельного потока должна быть не более 1-5м. Из выражения (II) также следует, с что в неподвижном газовом потоке ($v = 0$), частицы определенного размера должны зависнуть на заданной высоте, причем эта высота должна определяться интенсивностью двух уравновешивающих друг друга взаимодействий: адсорбционного поверхности частицы со средой и гравитационного частицы с земной поверхностью и рассчитывать по уравнению:

$$h = \frac{\delta_{лсг}}{0.32 \cdot \rho_{лс} \cdot g \cdot R_{лс}} \quad (12)$$

Следовательно, в седиментационно-диффузионном равновесии могут находиться лишь тонкодисперсные ($R < 10$ мкм) аэрозоли, обладающие развитой границей раздела фаз и активно взаимодействующие со средой. Проверку наших представлений о процессе оседания аэрозольных частиц из газовой среды проводили на системе пыль-пар, которая при эффективной конденсации способна давать монодисперсный аэрозоль с известной удельной поверхностью и удельной поверхностной энергией [3].

Анализ экспериментальных данных характеризующих процесс оседания частиц в камере дал

следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1.

Влияние линейной скорости движения потока на основные характеристики оседающей пыли. Объемная скорость подачи пара равна $1,40 \times 10$ м/с. Средний радиус пылинок - $(3,5 \pm 1)$ мкм

Линейная скорость потока, м/с	Объемная скорость воздуха, м ³ /с 10 ²	Объемная скорость пыли, м ³ /с 10 ⁻⁹	Радиус капель, м 10 ⁻⁶	Логарифм эффективности [ln(1-η)] – числитель, эффективность оседания (η) – знаменатель	
				Расчет по уравнению (9)	эксперимент
0,5	0,9	1,9	114	-2,4/0,91	-1,1/0,68
1,0	1,9	3,8	107	-1,9/0,85	-1,7/0,82
1,2	2,3	4,6	104	-1,5/0,80	-1,2/0,69
1,5	2,9	5,8	101	-1,2/0,68	-0,9/0,58
2,1	4,0	8,0	96	-0,3/0,26	-0,3/0,26
2,4	4,6	9,2	66	0,7/-	0,4/-

Расчетная эффективность оседания пыли из потока выше, чем полученная в эксперименте. То есть, разброс значений температуры среды в 10°С сказывается на размере формирующихся капель. Наибольшее отклонение эффективности оседания между расчетом и экспериментом наблюдается при скорости парогазового потока до 0,5 м/с, когда процесс конденсации протекает недостаточно эффективно, так как система пыль-пар сохраняет повышенную температуру ($t=40^\circ\text{C}$).

Увеличение линейной скорости пылевоздушного потока с 1,0 до 2,4 м/с приводит к росту объемной скорости подачи воздуха и пыли в камеру процессов до 2,4 раза, пропорциональному снижению концентрации пара на единицу объема запыленного воздуха. Поэтому радиусы капель, образующихся в результате конденсации паров воды, уменьшаются, и тем больше, чем меньше объемная скорость подачи пара в пылевой поток. Так, радиусы капель, формирующихся в процессе конденсации, уменьшаются от 104 до 66 мкм, что приводит к росту величины поверхности в системе пыль-пар в 1,6 раза, и снижению ее склонности к оседанию до нуля. Экспериментальные и расчетные значения эффективности оседания капель в воздушной среде показывают, что если при линейной скорости потока, равной 1,0 м/с, частицы склонны к оседанию (эффективность оседания 80-85%), то при скорости 2,4 м/с вся пыль выносится из камеры процессов. Следовательно, увеличение количества частиц, на которых должно конденсироваться одно и то же количество пара, приводит к уменьшению размера формирующихся капель и снижению их линейной скорости оседания.

Таким образом, теоретически и экспериментально доказано, что поведение частиц в газовой среде определяется интенсивностью взаимодей-

ствия их поверхности со средой и массовыми характеристиками самих частиц.

К распределению частиц в реальных тонкодисперсных пылевых потоках не могут быть применены законы гидродинамики, их перераспределение в пространстве происходит за счет оседания и диффузии. При этом совершенно иной подход должен быть применен к описанию процесса разрушения пыли капелным потоком (гетерокоагуляция) [4]. Этот процесс должен рассматриваться как задача физической химии, в которой определяющими стадиями являются диффузия частиц или смачивание (поверхностное взаимодействие) на границе пыль-жидкость.

При рассмотрении теоретических и экспериментальных данных по адсорбции выясняется, что непосредственный контакт между твердым телом и каплями жидкости должен быть лишь частным случаем во взаимодействии капель и пылинок, когда контакт должен существовать между пограничными (адсорбционными) слоями [10, 11].

Основные положения физико-химического подхода к решению задачи гетерокоагуляции пыли жидкостью сводятся к следующему [4]:

1. Процесс гетерокоагуляции следует признать задачей физикохимии, в котором встреча твердых и жидких частиц описывается законами конвективной диффузии, а переход твердой частицы через жидкую поверхность признается не механическим перемещением, а механохимическим превращением.

2. Гетерокоагуляция, как любой гетерогенный процесс, протекает как минимум в три стадии, включающие доставку пыли на жидкую поверхность, химическое превращение (адсорбционно-адгезионный переход через границу раздела фаз) и отвод пылинки в объем жидкости. Причем в многостадийном процессе может быть одна или несколько скоростьюопределяющих стадий.

3. В случае если скоростьюопределяющей стадией является вторая стадия (захват гидрофобной пыли водой), то есть превращение, система пыль-жидкость характеризуется наличием переходного состояния, при котором между твердыми и жидкими частицами нет ни единой точки соприкосновения и, в то же время, эта система ведет себя как единое целое.

4. К кинетике гетерокоагуляции пыли жидкостью применимы представления химической кинетики, а концентрация пыли и жидкости описывается интегральным уравнением нулевого (процесс лимитируется превращением), первого (процесс лимитируется концентрацией пыли или жидкости) или второго (процесс лимитируется концентрацией пыли и жидкости) порядков.

Условия, в которых гетерокоагуляция может рассматриваться как физико-химическая задача, сводятся к следующему.

1. Движение (массоперенос) пылинок на жидкую поверхность описывается законами диффузии (конвективной, турбулентной или молекулярной) или инерционными эффектами. Это условие отрицает применимость представлений о бесконечности среды к пылевому фактору (по току).

2. Основное сопротивление массопереносу сосредоточено в пограничном слое, как со стороны газа, так и со стороны жидкости, что не приемлет условий непрерывности и несжимаемости среды.

3. Если на границе раздела фаз идет превращение (адсорбция или смачивание), то интенсивность массопереноса может определяться скоростью превращения, что отрицает возможность описания такого процесса с помощью кинетического уравнения Смолуховского.

Условие первое можно считать выполненным для пылевого аэрозоля, если числа Прандля гораздо больше единицы ($Pr \geq 1$) [12]. Если средний радиус пылинок в потоке принят равным $1 \div 3$ мкм, то числа Прандля будут равны $10^4 \div 10^5$, то есть пылинка на жидкую поверхность будет доставляться диффузией. Правомерность второго условия была показана ранее на примере пылевого потока. Третье условие подразумевает, что переход твердой фазы из газовой среды в жидкую зависит от интенсивности поверхностного взаимодействия (смачивания) и описывается через термодинамические характеристики поверхностного слоя (удельные поверхностные энергии на границе раздела фаз), а не отдельные фазы. Признание влияния смачивания на эффективность гетерокоагуляции является косвенным признанием второго и третьего условий физико-химического подхода к количественному описанию процесса.

Так как захват пыли жидкостью признается нами в качестве гетерогенного процесса (смена твердой фазы газовой среды на жидкую), он должен рассматриваться в качестве многостадийной реакции. Если скорость процесса лимитируется доставкой пыли на жидкую поверхность или ее отводом с поверхности, то процесс должен описываться уравнениями диффузионной кинетики. Если медленной стадией является стадия химического или физического превращения, то скорость процесса определяется кинетикой процесса. Задача доставки пыли на жидкую поверхность является решенной как для разбавленного, так и для концентрированного пылевых потоков [12]. Рассмотрим решение этой задачи для случая, когда скорость всего процесса лимитируется смачиванием. Для этого необходимо уточнить представления о со-

стоянии поверхности разных видов пыли.

Поверхностные свойства пыли во многом определяются ее удельной поверхностной энергией на границе с газовой средой (δ_{mc}). По величине δ_{mc} поверхности можно разделить на низкоэнергетические и высокоэнергетические [13]. Причем под низкоэнергетическими подразумевают поверхности, которые не полностью смачиваются водой, их поверхностное натяжение находится в пределах 15-70 мН/м. Высокоэнергетические поверхности полностью смачиваются водой и имеют поверхностное натяжение 100-500 мН/м. Для этих поверхностей выполняется условие $\delta_{mc} \gg \delta_{mc}$. Низкоэнергетические поверхности условно разделены на гидрофобные ($\cos\theta < 0$) и гидрофильные ($\cos\theta > 0$), но все пыли, полученные из таких веществ, обладает ограниченной смачиваемостью. Следовательно, смачивание может лимитировать захват только низкоэнергетической (гидрофильной и гидрофобной) пыли капельным потоком [4].

В практике гетерокоагуляции пыли капельным потоком для увеличения эффективности захвата пыли жидкостью часто повышают давление жидкости на выходе из оросителя (высоконапорное орошение), при этом преследуется одна цель - увеличение кинетической энергии летящих капель, а значит, усиление инерционного осаждения пыли на жидкую поверхность [5]. С вышеизложенных позиций можно определить относительно роли инерционных эффектов в захвате низкоэнергетической пыли жидкостью. Во-первых, инерционные эффекты усиливают массоперенос на границу раздела фаз. Во-вторых, механическое перемещение взаимодействующих капель и частиц пыли может либо осилить процесс смачивания (при встречном движении), либо его затормозить (при подтягивании удаляющейся частицы), так как в системе пыль-жидкость наблюдается диссипация энергии механического перемещения в энергию теплового взаимодействия (смачивания). То есть, процесс гетерокоагуляции пыли жидкостью следует отнести к ряду механо-химических превращений [14].

В основу механохимических представлений о гетерокоагуляции пыли каплями воды заложены положения, согласно которым гетерокоагуляция принята в качестве вероятностного многостадийного процесса для низкоэнергетических поверхностей, лимитируемого адгезией и смачиванием. Более вероятным считается состояние, в которое система пыль-жидкость имеет большее по абсолютной величине и отрицательное по знаку значение свободной энергии Гиббса, причем свободная энергия включает в себя как механическую, так и химическую составляющие. Расчеты энергетических показателей ведутся из предпо-

ложения, что взаимодействие пыли и жидкости на стадии встречи носит частный характер, а на стадии «превращения» - поверхностный [15]. При этом эффективность захвата η в равновесных условиях определяется по уравнению:

$$\ln(1 - \eta) = -\frac{S_M^T (\Delta A^S + W_p)}{RT} \quad (13)$$

где ΔA^S и W_p - изменение механической и поверхностной энергии, отнесенное к единице поверхности твердой частицы (Дж/м²);

S_M^T - площадь поверхности, занимаемой одним молекул газовой среды м²/моль;

T - температура системы (К); R - универсальная газовая постоянная (Дж • моль⁻¹ • К⁻¹).

Для нестатических условий за основу принято время взаимодействия пыли и жидкости t, которое определяется из модифицированного уравнения Аррениуса, отнесенного к механохимическому процессу:

$$\ln \frac{t}{t_0} = -\frac{S_M^T (\Delta A^S + W_p)}{RT} \quad (14)$$

где t_0 - время смачивания поверхности пылинки жидкостью за счет поверхностных сил (С).

Эффективность разрушения пыли капельным потоком (процесс лимитируется смачиванием) в нестатических условиях опишется следующим уравнением:

$$\eta = 1 - \frac{t}{t_0} \quad (15)$$

Следовательно, эффективностью разрушения пылевого аэрозоля капельным потоком в равновесных и неравновесных условиях можно управлять через энергетические параметры системы Δ пыль-жидкость (ΔA^S и W_p). Причем, коэффициент растекания жидкости W_p зависит от природы контактирующих фаз, а изменение кинетической энергии встречи ΔA^S для большинства систем зависит от скорости движения капель, которое во многих случаях, можно описать уравнениями прямолинейного неравномерного движения частиц в газовой среде [15, 16]. Между кинетической энергией капли, вылетающей из оросителя, и давлением жидкости (P) на выходе из оросителя существует прямопропорциональная связь ($\Delta A^S \sim P$).

Экспериментальная проверка показанных положений была осуществлена в работе [15]. При этом определялись: эффективность разрушения пыли жидкостью, расход и давление жидкости на выходе из оросителя, средний размер капель, а также коэффициент растекания жидкости по поверхности твердого тела.

Работу проводили на образцах пыли размером 0-20 мкм различной гидрофильности.

Таблица 1.
Влияние природы пыли на гидрофильность её поверхности

	Графит	Песок	Хлорид натрия
Коэффициент растекания (мН/м)	-0,057	-0,028	-0,007

Гетерокоагуляцию осуществляли в аэродинамической трубе, в которой запыленный воздух со скоростью 2м/с проходил через капельный поток. Факел орошения создавали оросителем Кф-5,0-75 (табл.2).

Таблица 2.
Основные характеристики факела орошения форсунки Кф-5,0-75

Давление жидкости (МПа)	Расход (м ³ /с 10 ⁴)	Средний радиус капель, (мкм)
0,25	0	3200
0,25	1,58	190
0,50	2,04	208
0,75	2,44	196
1,0	2,78	150

Среднемедианный радиус капель с увеличением давления жидкости на выходе из оросителя уменьшался по экспоненциальному закону, но в интервале давлений 0,25-1,0 МПа изменялся незначительно. Оводненность факела орошения, представляющая собой отношение воздушного пространства, через которое прошли капли, к общему объему воздуха, оставалась на уровне 0,9-0,99.

В результате проведенных исследований установлено (табл.3), что эффективность гетерокоагуляции зависит от величины кинетической энергии летящих капель и от поверхности взаимодействия.

Таблица 3.
Влияние природы пыли и давления жидкости на оросителе на эффективность гетерокоагуляции

Давление (Мпа)	Прирост удельной поверхности	Значение эффективности гетерокоагуляции (%) экспериментальные (числитель) и расчетные по уравнению (15) (знаменатель) для разных видов пыли		
		графит	Песок	NaCl
0,25	1,0	27/90,3	80/94,1	90/94,6
0,50	1,21	38/96,2	91/98,4	96/98,7
0,75	1,58	38/99,6	91/99,6	99/99,7
1,0	1,75	45/99,9	92/99,9	99/99,9

Кроме того, эффективность гетерокоагуляции для разных видов пыли различна. При

постоянном давлении жидкости эффективность гетерокоагуляции определяется гидрофильностью твердой поверхности: чем она выше, тем лучше пылевой аэрозоль разрушается капельным потоком.

Так, эффективность гетерокоагуляции графитовой пыли в 2-3 раза ниже, чем пыли хлорида натрия.

Для увеличения эффективности захвата пылинок каплями жидкости увеличивалось её давление на выходе из оросителя от 0 до 1,0 МПа. При этом начальная скорость движения капель возрастала до 40 м/с, а эффективность гетерокоагуляции - до 45-99%. Рост эффективности наблюдался как за счет увеличения удельной и общей поверхности капельного потока (табл. 2), так и за счет повышения сил инерции в жидкостном потоке. Причем более выраженный прирост эффективности гетерокоагуляции наблюдался для гидрофобной графитовой пыли (до 1,7 раза). Это подтверждает предположение о том, что если для эффективного захвата гидрофильной пыли необходимо увеличивать вероятность встречи частиц с каплями, то для гидрофобной пыли еще следует повышать кинетическую энергию соударяющихся частиц.

При оценке гетерокоагуляции пыли каплями жидкости учитывали, что захват пыли жидкостью может происходить в квазистатических и нестатических условиях. Поэтому для правильного выбора пути управления эффективностью гетерокоагуляции важно уметь оценить эти условия.

Учитывая, что весь эксперимент по захвату пыли жидкостью проводился на одной установке при одинаковой длине зоны «превращения» и скорости движения потока капель, можно ожидать, что захват будет более выражен тогда, когда скорость «превращения» в системе пыль-жидкость будет наибольшей. Увеличение давления жидкости приводит одновременно к увеличению кинетической энергии встречающихся пылинок и капель, значит, к уменьшению времени «превращения» и времени контакта. Однако если характер изменения встреч при постоянном давлении жидкости одинаков, то изменение времени «превращения» зависит от природы пыли и жидкости.

Сопоставление экспериментальных данных с расчетными (табл. 2) для механохимического равновесия (уравнение 13) показывает, что между ними не всегда устанавливается корреляционная связь. Наиболее сильно выраженное отклонение от условий равновесия при давлении жидкости на выходе из оросителя, равном 1,0 МПа, наблюдается для графитовой пыли. Наименьшее - для пыли хлорида натрия. Следовательно, выполняется условие: чем гидрофобнее пыль, тем больше отклонение от состояния равновесия. Объяс-

нить такое явление можно лишь различной скоростью смачивания поверхности пыли.

Анализ зависимостей $\eta=f(p)$, полученных экспериментальным и расчетным путем показывает, что при гетерокоагуляции пыли хлорида натрия (в условиях стенда) временных ограничений не существует, процесс протекает в равновесных условиях и успевает закончиться в активной части факела орошения, где энергетика встреч достаточна для разветвления поверхности жидкости и для смачивания поверхности пыли. Подавление графитовой пыли каплями воды носит явно выраженный кинетический характер и нуждается в ускорении процесса смачивания на молекулярном уровне (введением смачивателей различной природы).

Таким образом, в основу физико-химических представлений о гетерокоагуляции пыли водным капельным потоком должны быть положены принципы, согласно которым захват твердой частицы жидкостью следует принять в качестве вероятностного многостадийного поверхностного превращения, лимитируемого для низкоэнергетических поверхностей адгезией и смачиванием, а для высокоэнергетических - диффузией или инерцией. Поэтому гетерокоагуляция высокоэнергетической пыли жидкостью может описываться ки-

нетической (диффузионной) теорией Смолуховского, а низкоэнергетической - должна описываться с механохимических позиций, то есть в равновесных условиях через термодинамические характеристики поверхности, а в нестатических - с помощью уравнений химической кинетики.

Список использованной литературы

1. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. -280с.
2. Дерягин В.В., Смирнов Л.П. О безинерционном осаждении на сфере частиц из потока жидкости под действием сил притяжения Ван-дер-Ваальса. /Исследования в области поверхностных сил. Сб. докл. III Всес.конф. - М.: Наука, 1967. - С. 188-206.
3. Цыцур А.А. Оседание частиц в газовом потоке //ЖПХ, 1991. - № 4 - С. 827-832.
4. Цыцур А.А. Основные закономерности гетерокоагуляции пыли капельным потоком. //ЖПХ, 1990. - № 2. - С.463-465.
5. Лэнгмюр И. Искусственное осаждение кучевых облаков при температуре выше 0°С в результате цепного процесса. /Физика образования осадков. - М.: Ил, 1951.-С.147-159.
6. Эйнштейн А., Смолуховский М. Броуновское движение.: Сб.статей. - М.-Л.: ОНТИ, 1936.
7. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. - М.: Изд-во АН СССР, 1955.
8. Таубман А.Б., Никитина С.А. Физико-химическое исследование смачивателей применяющихся при пылеулавливании. /Борьба с силикозом. - М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т.2. - С.61-70.
9. Цыцур А.А. Управление процессом очистки атмосферы от пыли на основе физико-химического подхода к рассмотрению механизмов взаимодействия пылевых аэрозолей с диспергированными жидкостями. //Дисс. докт.техн.наук. - Ростов-на-Дону, СКНЦ ВШ, 1991.- 359с.
10. Хайнике Г. Трибохимия: Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. - 584с.
11. Протодьянов И.О., Ульянов В.С. Гидродинамика и массообмен в дисперсных системах жидкость-жидкость. - Л.: Наука, 1986. - 273с.
12. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. - М.: Физматгиз, 1959. -700с.
13. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. - М.: Химия, 1974. - 416с.
14. Саранчук В.И., Качан В.Н., Рекун В.В., Цыцур А.А. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли. - Киев.: Наук.думка, 1984-216с.
15. Соколова Г.Н. Повышение эффективности гидрообеспыливания изменением параметров диспергирования жидкости и применением добавок химических веществ. //Автореф. канд.диссерт. - М., 1987. - С.23.
16. Журавлев В.П., Цыцур А.А., Буянов А.Д. Комплексное обеспыливание промышленных предприятий

Статья поступила в редакцию 15.07.99.