

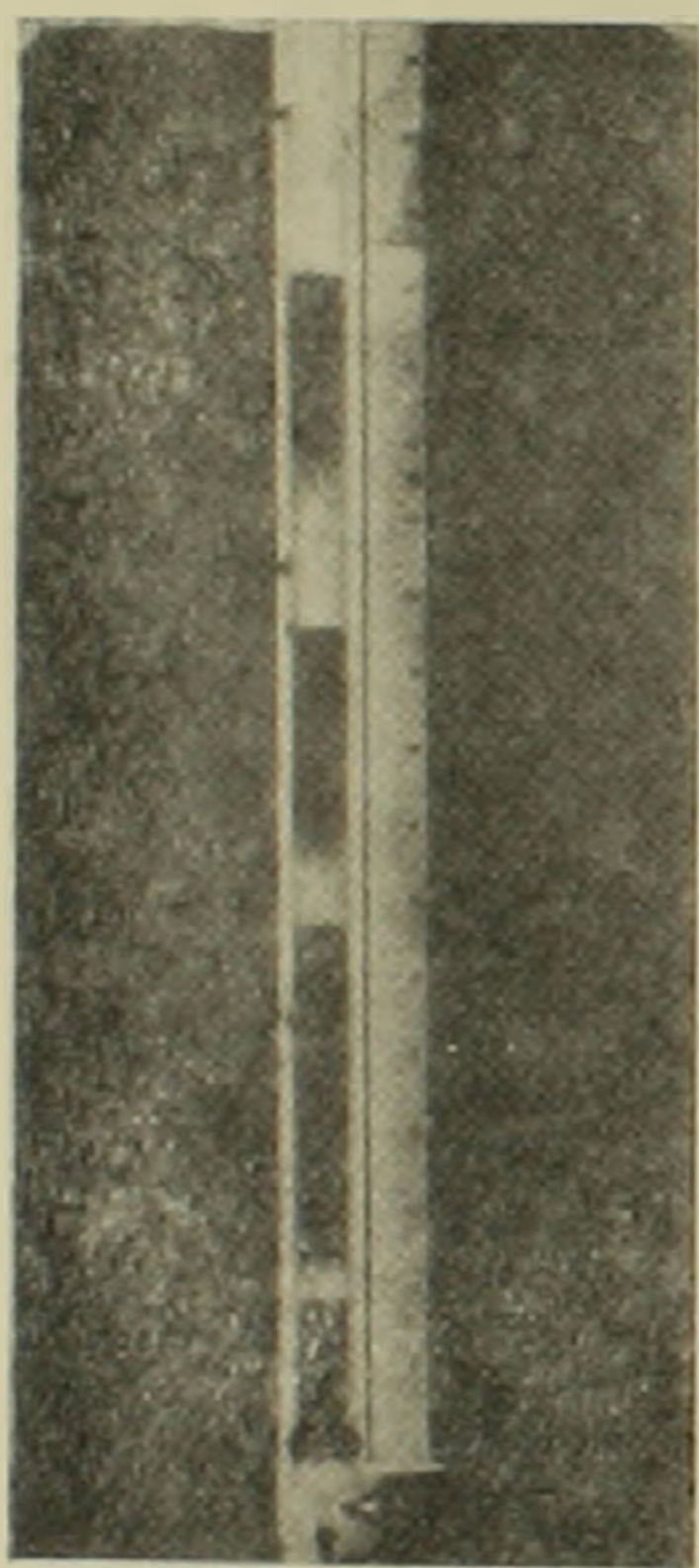
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А. М. Гаспарян и Р. М. Мирзаханян

О физической сущности псевдооживления в поршневом режиме

(Представлено академиком АН Армянской ССР И. В. Егiazаровым 10/II 1966)

Если в цилиндрическую колонку со сетчатым дном засыпать зернистый материал и потоком воздуха привести его в псевдооживленное (ПО) состояние, то получится картина, приведенная на фиг. 1. Такое



Фиг. 1.

псевдооживление (ПО), когда в колонке образуются сгустки частиц (темные участки), называемые «поршнями», и пустоты, заполненные воздухом и называемые «пузырями», представляет собой неравномерное ПО в поршневом режиме. Это явление исследовано многими авторами, но его теория еще нуждается в дальнейшей разработке.

Литература, посвященная псевдооживлению, обобщена в монографиях М. Лева (¹), С. С. Забродского (²) и Дэвидсона и Харрисона (³). Забродский (⁴) впервые указал, что неподвижный столб материала оживляется постепенно, начиная с верхних слоев, однако данное им объяснение этого явления, на наш взгляд, неправильно.

Высказанное многими авторами предположение о том, что непрерывная фаза неравномерно псевдооживленного слоя (в нашем случае поршни) имеет концентрацию, характерную для начала псевдооживления, нами подтверждено прямыми измерениями.

Авторами вышеупомянутых работ подчеркивается, что объяснение зарождения пузырей в ПО системах остается недостаточным. Нам кажется, что настоящее сообщение ликвидирует этот пробел.

Лева, Дэвидсон и Харрисон и другие авторы высказывают мнение, что на степень равномерности ПО влияют плотность и вязкость оживающего агента. В подтверждение этого приводятся данные Льюнга (⁵), который показал, что сферы из фенольных пластмасс, при обычном давлении

зии, углекислотой ожижаются неравномерно, а при давлении 42,2 ат. псевдоожижение становится равномерным. Дэвидсон и Харрисон склонны это объяснить увеличением плотности углекислоты в 70 раз. Нам кажется, что опыты Льюнга являются подтверждением изложенного в пункте 4 настоящего сообщения о влиянии давления на степень неоднородности ПО.

Дэвидсон и Харрисон наиболее полно развили теорию двухфазного псевдоожижения. При этом, как подчеркивают они, «в качестве исходного положения принято, что поведение псевдоожиженных систем может быть объяснено на основе анализа поведения пузырей ожижающего агента, движущихся через слой частиц». Нам же кажется, что поведение псевдоожиженного слоя обуславливается свойством твердой фазы — образовать сгустки (поршни, «непрерывная фаза») постоянной концентрации, а также динамикой процесса и закономерностями стесненного падения, как это видно из настоящего сообщения.

1. *О процессе псевдоожижения неподвижного слоя.* Если сразу прекратить подачу воздуха в колонку, то частицы, осаждаясь, образуют неподвижный слой. Нашими опытами установлено, что при этом образуется наиболее рыхлый неподвижный слой с концентрацией частиц 70. Если вновь начинать подачу воздуха с постепенным увеличением его скорости V , то наступит момент, когда верхний слой осадка с небольшой толщиной придет в ПО состояние. Скорость воздуха в этот момент, в верхнем ПО слое, где давление P_0 , пусть равняется V_0 . В более нижних слоях скорость воздуха будет меньше V_0 , эти слои еще не ожижены. Дальнейший рост скорости воздуха приводит к ПО следующих слоев материала, но при этом в верхнем слое скорость воздуха становится больше V_0 и в результате этого происходит зарождение первого поршня и первого пузыря под ним. Когда дальнейшим ростом V весь слой приводится в ПО состояние, то возникает картина, приведенная на фиг. 1.

Таким образом, неподвижный слой материала значительной высоты псевдоожижается постепенно, сверху вниз, и поршневой режим возникает еще до полного ПО всего слоя.

2. *Зарождение и исчезновение поршней.* Общая высота ПО слоя (сумма высот поршней и пузырей) зависит от скорости подачи воздуха и при данной V колеблется в определенных пределах. Разность в максимальной и минимальной высотах равна, приблизительно, высоте самого верхнего пузыря. При установившемся режиме непрерывно имеет место следующее: все поршни и пузыри двигаются вверх; с нижней стороны поршней отдельные частицы и их группы отрываются и, проходя сквозь пузырь, падают на нижерасположенный; в результате самый нижний поршень, опирающийся на дно колонки, только растет и, доходя до определенной высоты, зарождает новый поршень и пузырь. Самый верхний поршень только уменьшается и, дойдя до определенной минимальной высоты, вдруг рассыпается (как бы взрывается) и исчезает вместе с самым верхним пузырем.

Так происходит непрерывное зарождение поршней и пузырей внизу, и их исчезновение вверху колонки.

3. *Объемная концентрация частиц в поршнях.* Экспериментально нами было установлено, что общая высота ПО слоя меняется только за счет высоты пузырей. Независимо от скорости V и общей высоты слоя, сумма высот поршней постоянна и практически равна высоте неподвижного рыхлого слоя. Отсюда следует очень важный вывод: объемная концентрация (доля) φ_n частиц в поршнях ПО слоя постоянна и практически равна концентрации рыхлого неподвижного слоя φ_0 .

Наши многочисленные опытные измерения φ_n и φ_0 различных материалов различными методами не обнаружили ощутимую разницу в них.

Таким образом, при ПО слоя воздухом (газом) частицы материала практически не удаляются друг от друга или удаляются так мало, что экспериментом не обнаруживаются, и хотя они приобретают некоторую подвижность относительно друг друга, плотность их подвижной упаковки меняется неощутимо.

4. *Пропускная способность поршней по воздуху.* Допустим, что несмотря на поступательное движение поршней вверх, трение между поршнем и стенками колонки отсутствует. Тогда разность давлений в поршне ΔP определится только весом поршня:

$$\Delta P = h \cdot \gamma \cdot \varphi_n, \quad (1)$$

где h — высота поршня, а γ — удельный вес частиц.

Благодаря наличию этого ΔP воздух протекает через поршень с определенной средней скоростью V_n . Очевидно, последняя должна быть равной скорости стесненного падения C взвеси с концентрацией φ_n . С или V_n и будет объемной пропускной способностью поршня по воздуху, через единицу поперечного сечения. Эта способность при ламинарности режима падения частиц одинакова для всех поршней и не зависит от их местонахождения в слое. Но давление в поршне зависит от этого: чем ниже расположен поршень, тем больше давление в нем. Следовательно, весовая пропускная способность поршней разная; у самого нижнего поршня она максимальная, а у самого верхнего порошня она минимальная.

Можно показать, что в турбулентной области падения частиц весовая пропускная способность поршней с высотой их расположения также уменьшается, пропорционально степени 0,5 от давления. При ламинарности же эта способность пропорциональна давлению.

Если данный поршень пропускает, скажем, G г/сек воздуха, а расположенный над ним поршень пропускает $G' = G - \Delta G$, то естественно, что между этими двумя поршнями должен накапливаться ΔG г/сек воздуха в виде пузыря.

Таким образом, становится очевидным, что возникновение пузырей и, как следствие этого, образование поршней являются прямым следствием одинаковости объемной концентрации частиц во всех поршнях, приводящей к неодинаковости весовой пропускной способности по воздуху этих поршней.

Для вышеизложенного гипотетического случая (когда трение поршней о стенки отсутствует) решен пример, результаты которого приведены в табл. 1. Условия примера таковы: слой материала в колонке равен 0,8 м $\gamma = 1200 \text{ кг/м}^3$, C или V_n при $P = 1 \text{ ата}$ равна 1,25 м/сек режим падения частиц турбулентен, при псевдоожигении всего слоя образуются 4 устойчивых по времени поршня с высотой по 0,2 м. Скорость подачи воздуха равна скорости стесненного падения C самого нижнего слоя, находящегося под давлением $P_0 + \Delta P$, где P_0 давление над слоем а ΔP — приращение давления из-за веса слоя материала. Согласно условиям примера, разрушение и возникновение новых поршней не будет иметь места: нижний все время находится на дне колонки, а остальные идут вверх по колонке из-за увеличения высоты трех пузырей.

Таблица 1

Расчетные значения роста пузырей гипотетического примера в см/сек

№ пузырей	$P_0 \text{ ата}$				
	0,5	1	2	10	100
1	2	3	4	5	6
1	1,98	0,79	0,291	0,028	0,0
2	2,14	0,81	0,296	0,028	0,0
3	2,32	0,83	0,302	0,028	0,0
Сумма		2,43	0,889	0,084	0,0

Примечание: В столбце 1 таблицы приведены номера пузырей, считая снизу. В остальных столбцах приведены значения роста высоты пузырей в см/сек.

Хотя решенный пример не является реальным по ряду причин, тем не менее по данным табл. 1 можно сделать уверенные выводы: а) с увеличением давления в колонке резко уменьшается разница в весовых пропускных способностях отдельных поршней по воздуху и б) для любого слоя материала, псевдоожигаемого воздухом, в цилиндрическом аппарате существует такое давление P_0 , при котором псевдоожигение становится равномерным.

5. *Размер пузыря*, очевидно, зависит от продолжительности его существования и от разности пропускных способностей двух соседних поршней. Этот размер меняется от нуля (при зарождении) до некоторого максимума (при исчезновении).

На основании табл. 1 можно сделать вывод, что суммарная высота пузырей в ПО слое при минимальном псевдоожигении (когда самый нижний слой только что приходит в ПО состояние) зависит от давления P_0 . Это обстоятельство было подтверждено экспериментом: в стеклянную колонку $D = 21 \text{ мм}$ были засыпаны частицы с $d = 2 \text{ мм}$, с высотой неподвижного рыхлого слоя в 72,5 см. При $P_0 = 0,5 \text{ ата}$ общая высота ПО слоя доходила до 85 см, а при $P_0 = 5 \text{ ата}$ до 78 см, то есть суммарная высота пузырей составляла 12,5 и 5,5 см.

6. Влияние трения поршней о стенки колонки на пропускную способность очень значительно. Наличие трения приводит к возрастанию перепада давления в поршне и взамен уравнения (1) будем иметь:

$$\Delta P = h\gamma\varphi_n + \Delta P_{\text{тр.}} \quad (2)$$

Ввиду того, что, как это показали измерения, скорость движения поршня не влияет ощутимым образом на среднюю величину φ_n , то, следовательно, с ростом этой скорости должна расти также пропускная способность поршня по воздуху, в результате наличия и роста $\Delta P_{\text{тр.}}$. В таком утверждении как будто есть противоречие: трудно представить возможность постоянства φ_n при различных скоростях прохождения воздуха сквозь поршень. Причем эти скорости превышают скорость стесненного падения для φ_n . Поршень себя ведет так, как будто составляющие его частицы какими-то силами удерживаются вместе и возрастающий поток воздуха не приводит к изменениям среднего расстояния между частицами. Не вдаваясь в объяснение этого явления, ограничимся констатацией факта. Обработка 885 кадров киносъемки ПО слоя в поршневом режиме показала следующее: за 27,7 секунды установившегося режима верхний поршень и находящийся под ним пузырь исчезали 21 раз. Высота этих пузырей в момент исчезновения колебалась от 10 до 65 см. Суммарная высота всех исчезнувших пузырей составляла 640 см (средняя высота 30,5 см) с объемом 8050 см³ или 290 см³/сек. Общий расход воздуха составлял 2442 см³/сек, из которого сквозь верхний поршень прошел 2442—290=2152 см³/сек. Скорость стесненного падения верхнего поршня составляла $C=125$ см/сек. Его пропускная способность при отсутствии $\Delta P_{\text{тр}}$ была бы 125·12,6=1570 см³/сек (12,6 см² — сечение колонки), а в виде пузырей должно было пройти 2442—1570=872 см³/сек.

Фактически в виде пузырей ушло 290 см/сек, т. е. в 3 раза меньше, а сквозь верхний поршень прошло 2152, т. е. в 1,37 раза больше.

Таким образом, наличие непрерывного движения поршней вверх и возникновение при этом сил трения между поршнем и стенками колонки приводит к увеличению пропускной способности поршней по воздуху и, следовательно, к уменьшению избытка воздуха, проходящего через слой в виде пузырьков.

7. О путях получения равномерного ПО слоя воздухом. Из изложенного выше следует, что получение равномерного слоя в цилиндрической колонке теоретически невозможно из-за непрерывного уменьшения весовой пропускной способности слоя по высоте. В пункте 4 показано, что все же можно добиться практически почти равномерного ПО путем повышения P_0 до такой степени, когда перепад давления в слое по сравнению с P_0 становится ничтожным и скорость движения воздуха через слой почти постоянной.

Можно показать, что существует другой, теоретически обоснованный и практически осуществимый способ получения равномерного ПО слоя воздухом. Для этого нужно обеспечить выполнение одного условия:

постоянство весовой пропускной способности слоя по воздуху по всей высоте слоя. Не трудно заметить, что это условие можно выполнить путем непрерывного увеличения поперечного сечения колонки по определенной закономерности. Эта закономерность определяется в зависимости от ряда свойств неподвижного слоя и составляющих его частиц и может быть представлена в виде системы уравнений. Не останавливаясь на этих уравнениях, только укажем, что нами были рассчитаны и изготовлены три следующие колонки:

1) для свинцовых сфер $d = 1-1,6$ мм, высотой 90 см, с начальным и конечным диаметрами в 15 и 17 мм;

2) для кварцевого песка $d = 0,25-0,35$ мм, высотой 120 см и диаметрами 32,8 и 34 мм;

3) для алюмосиликатных сфер $d = 3-5$ мм, с удельным весом частиц 1,26, высотой 70 см и диаметрами 102,5 и 104 см.

Экспериментально было показано, что в этих колонках слои, состоящие из соответствующих частиц, воздухом псевдоожижаются сразу по всей высоте и равномерно, при скорости подачи воздуха, соответствующей скорости стесненного падения слоя.

Институт органической химии
Академии наук Армянской ССР

Ա. Մ. ԿԱՍՊԱՐՅԱՆ ԵՎ Ի. Մ. ՄԻՐՉԱԽԱՆՅԱՆ

Մխոցային պսևդոհեղուկացման ֆիզիկական էությունը

Ներկա հաղորդման մեջ տրված է մխոցային ուժիմում անհամասեռ պսևդոհեղուկացման ֆիզիկական էության բացատրությունը: Այդպիսի պսևդոհեղուկացում ստացվում է, երբ հատակին ցանց ունեցող և հատիկավոր նյութով լցված զլանաձև խողովակի ներքևից տրվում է օդի հոսանք: Այդ դեպքում ստացվում են մասնիկների կուտակումներ՝ «մխոցներ» և օդային տարածություններ՝ «բշտիկներ» (նկ. 1), որոնք առաջանում են խողովակի ներքևում և վերև բարձրանալով անհայտանում են:

Կատարված հետազոտություններից պարզվել է, որ

1. Որոշակի բարձրության հատիկավոր նյութի անշարժ շերտը պսևդոհեղուկացվում է աստիճանաբար, վերևից ներքև, և մխոցային ուժիմը առաջանում է դեռևս նախքան ամբողջ շերտի պսևդոհեղուկացումը:

2. Մասնիկների ծավալային կոնցենտրացիան φ_n պսևդոհեղուկացված շերտի մխոցներում հաստատուն է և պրակտիկորեն հավասար է ամենանոսր անշարժ շերտի (նոստվածքի) φ_0 կոնցենտրացիային:

3. Մխոցների օդ անցկացնելու կշռային ունակությունը տարբեր է ամենաներքևի մխոցի ունակությունը ամենամեծն է, ամենավերևի մխոցինը՝ ամենափոքրը: Այս հանգամանքը անհրաժեշտորեն բերում է մխոցների ու բշտիկների գոյացման:

4. Խողովակում ճնշման մեծացման հետ փոքրանում է առանձին մխոցների օդ անցկացնելու ունակությունների տարբերությունը: Կլանաձև խողովակում օդով պսևդոհեղուկացված ամեն մի նյութի համար գոյություն ունի այնպիսի ճնշում, որի դեպքում պսևդոհեղուկացումը դադարում է համասեռ:

Հիմնվելով այս եզրակացությունների վրա առաջարկված է տեսականորեն հիմնավորված և պրակտիկորեն իրագործելի մեթոդ՝ գազով հավասարաչափ պսևդոհեղուկացում ստանալու համար: Դրա համար անհրաժեշտ է ապահովել մի պայման՝ շերտի ամբողջ երկարությամբ օդի անցկացման կշռային ունակության հաստատունություն: Այդ պայմանը հնարավոր է իրագործել խողովակի ընդլայնական կտրվածքի անընդհատ մեծացմամբ, որոշակի օրինաչափությամբ: Հաշված և

պատրաստված են երեք ալգորիսի խողովակներ, երեք տարրեր նյութերի համար, որոնցում ալ
նյութերի շերտերը պսևդոհեղուկացել են միանգամից ամբողջ բարձրությամբ և համասեռ:

Այս հետազոտությունների արդյունքները համեմատվել են պսևդոհեղուկացմանը նվիրված
դրականության մեջ բերված տվյալների հետ:

Л И Т Е Р А Т У Р А — Գ Ր Ա Կ Ա Ն Ո Ւ Թ Յ ՈՒ Ն

¹ Макс Лева, Псевдооживление, М., 1961. ² С. С. Забродский, Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое, М., 1963. ³ Дэвидсон и Харрисон, Псевдооживление твердых частиц, М., 1965. ⁴ С. С. Забродский, Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое, стр. 56, 1963. ⁵ Дэвидсон и Харрисон, Псевдооживление твердых частиц, стр. 100, 1965.