

ЛИТЕРАТУРА

1. Х ё м и г. Физико-химические процессы в пограничном слое парообразующих труб. Водоподготовка и водный режим котлов на тепловых электростанциях. Госэнергоиздат, 1958, вып. 7.
2. П а ц у к о в Н. Г. и Н о в и Ю. И. Исследование условий, определяющих возможность отложения легкорастворимых солей на парообразующих участках горизонтальной трубы. Сб. ЭНИИ «Внутрикотловые и физико-химические процессы и водный режим котлов высокого давления». Госэнергоиздат, 1951.
3. С т ы р и к о в и ч М. А. Внутрикотловые процессы. Госэнергоиздат, 1954.
4. Р е з н и к о в М. И. Отложения легкорастворимых солей при интенсивном парообразовании. Труды МЭИ, вып. 31 (теплотехнический), Госэнергоиздат, 1953.
5. Л о й ц я н с к и й Л. Г. Механика жидкости и газа. Физматгиз, 1960.
6. К у т а т е л а д з е С. С. и Б о р и ш а н с к и й В. М. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, 1959.
7. Физический энциклопедический словарь. Гос. науч. изд. «Сов. энциклопедия», 1962.

ОБ УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОСТИ НЕКОТОРЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ
ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Ю. Л. Сорокин (Новосибирск)

В единой системе безразмерных параметров обобщаются экспериментальные данные по критическим скоростям течения, определяющим возникновение ряда кризисных явлений. Показывается, что условия возникновения этих явлений определяют также смену режимов движения газо-жидкостной смеси.

При совместном движении жидкости и газа в трубах возможны различные режимы течения смеси: пузырьковый, снарядный, пенообразный, пленочный и др. Режимы течения смеси при некоторых условиях существенно влияют на гидравлическое сопротивление, относительную скорость легкой фазы, на теплоотдачу, отложения солей в обогреваемых поверхностях нагрева и т. д.

Переход от одного режима к другому происходит обычно в результате потери устойчивости предыдущей структуры двухфазного потока. Исходя из такого представления о физической природе кризисов течения газо-жидкостных смесей [1], ниже сделана попытка рассмотреть совместно, в единой системе безразмерных координат, данные по исследованиям различных процессов. Это позволяет более обоснованно подойти к основным закономерностям течения газо-жидкостных смесей, так как объем экспериментальных данных и диапазон сопоставляемых параметров значительно увеличиваются.

Ранее было показано [2], что критическая скорость легкой фазы, соответствующая возникновению кризисных явлений, в общем случае может быть описана совокупностью следующих безразмерных параметров:

$$k = f \left(F, W, G, \frac{\gamma' + \gamma''}{\gamma'}; \frac{v'}{v''}; \frac{l_1}{l_2} \dots \right) \quad (1)$$

$$k = \frac{w_* \gamma''^{1/2}}{[g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')]^{1/4}}, \quad F = \frac{Q_m (\gamma' - \gamma'')^{3/4}}{g^{1/2} \sigma^{3/4}}, \quad G = \frac{g \sigma^{3/4}}{v'^2 (\gamma' - \gamma'')^{3/2}}$$

$$W = \frac{\sigma}{(\gamma' - \gamma'') D^2}$$

Здесь F , G , W — критерии Фруда, Галлилея и Вебера, w_* — критическая скорость легкой фазы, рассчитанная по полному сечению трубы, $м/сек$, γ' , γ'' — удельные веса тяжелой и легкой фаз, $кг/м^3$, σ — коэффициент поверхностного натяжения, $кг/м$, g — ускорение силы тяжести, $м/сек^2$, Q_m — расход жидкости на погонный метр смоченного периметра, $м^3/м сек$, D — диаметр трубы, или эквивалентный диаметр, $м$, v' , v'' — коэффициенты, кинематической вязкости жидкости и газа, $м^2/сек$, l_1 , l_2 — характерные линейные размеры аппаратов, $м$.

Из анализа имеющихся в литературе и приведенных ниже экспериментальных данных установлено, что для рассматриваемых процессов возможно использовать несколько более специализированную эмпирическую связь

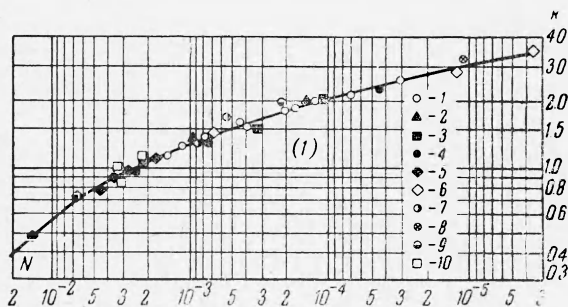
$$k = f(N), \quad N = FW^{1.25} \left(1 + \frac{31}{G^{0.55}} \right) \quad (2)$$

Некоторые обоснования зависимости (2) будут ясны из дальнейшего изложения

При стекании жидкости по стенке трубки и встречном движении газа (или пара при некоторой скорости газа наступает типичное кризисное явление, называемое «захлебыванием». Признаки начала захлебывания — резкое повышение коэффициента

гидравлического сопротивления трубки и толщины пленки жидкости на стенке. При этом амплитуды волны на поверхности пленки резко возрастают и наблюдается срыв капель жидкости. Весьма подробно явление захлебывания было исследовано К. Файндом [3], в трубках диаметром 20 и 50 мм с различными средами. Опытные данные К. Файнда приведены в координатах (2) на фиг. 1. Величины критических скоростей определялись из первичных данных автора по минимуму на зависимости коэффициента

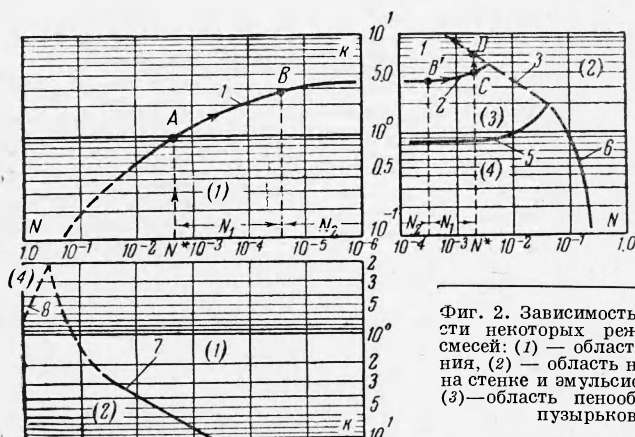
Фиг. 1. Зависимость $k = f(N)$ для начала захлебывания трубчатых аппаратов и срыва капель с поверхности стекающей пленки при встречном движении газа: (1) — область устойчивого пленочного течения; точки 1—5 — опыты Файнда [3]; точки 6—9 — опыты Камай, Ойши и Окана, принято по статье [3]; точки 10 опыта Д. И. Бибилова [4]



Точки	Среда	$\gamma', \text{ кг/м}^3$	$\sigma \cdot 10^4, \text{ кг/м}$	$v' \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{сек}$	D, мм	Длина канала, мм
1	Воздух + вода	998	74.5	1.085	50	2520
2	Воздух + вода 71 % + диэтиленгликоль 29 %	1044	55.0	2.66	50	2520
3	Воздух + вода 51 % + диэтиленгликоль 49 %	1072	54.3	5.16	50	2520
4	Воздух + вода 16 % + диэтиленгликоль 84 %	1109	50.2	19.7	50	2520
5	Воздух + вода	998	74.5	1.085	20	2500
6	Воздух + вода	1000	73.3	1.11	203	3000
7	Воздух + вода	1000	73.3	1.11	45	3400
8	Воздух + мыльный водный р-р	1000	50.4	1.1	203	3000
9	Воздух + мыльный водный р-р	1000	39.8	1.1	45	3400
10	Воздух + вода	1000	74.5	1.085	100/1000	1750

гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для газа. Для обработки использовались лишь данные, полученные в опытах при наибольшей длине рабочего участка 2.5 м. Можно считать, что при такой длине участка волновой процесс в пленке

успевает стабилизироваться. На графике также представлены данные С. Камай, Ю. Ойши и Т. Окана, заимствованные из [3]. Эти данные получены на трубах диаметром 203 и 45 мм с применением в качестве рабочих сред воздуха, воды и водного мыльного раствора. Экспериментальные данные Д. Н. Бибилова по срыву капель



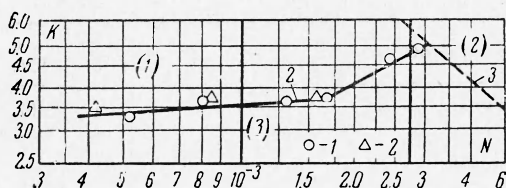
Фиг. 2. Зависимость $k = f(N)$ для границ устойчивости некоторых режимов течения газо-жидкостных смесей: (1) — область устойчивого пленочного течения, (2) — область неустойчивого пленочного течения на стенке и ампульсионного движения в центре трубки, (3) — область пенообразного режима, (4) — область пузырьково-снарядного режима

с поверхности водяной пленки [4], также приведенные на графике фиг. 1, полученные в вертикальном канале прямоугольного сечения.

Как видно из графика, все опытные данные удовлетворительно осредняются некоторой кривой, стремящейся, по-видимому, к предельному значению величины $k \approx 3.2$.

Для возможности изучения перехода процесса захлебывания в другие процессы, которые будут рассматриваться ниже, осредняющая кривая фиг. 1 приведена в левом верхнем квадранте фиг. 2 (кривая 1). Проследим развитие процесса захлебывания. Если при некотором постоянном расходе жидкости, подаваемом на стенку трубки (т. е.

при некотором постоянном N^*), постепенно от нулевого значения увеличивать скорость газа, то на графике фиг. 2 это будет соответствовать перемещению от оси абсцисс вертикально вверх вплоть до точки A . Точка A характеризует начало явления захлебывания. Дальнейшее увеличение скорости газа приводит к срыву части жидкости со стенки, что на фиг. 2 будет соответствовать перемещению по кривой 1 вправо от точки A . Абсцисса любой точки B на этом участке кривой определяет значение N_2 , характеризующее количество жидкости, текущей по стенке, и значение $N_1 = N^* - N_2$, характеризующее количество жидкости, сорванное с поверхности пленки и транспортируемое газом в виде капель. При увеличении скорости газа текущая точка B будет перемещаться по кривой 1, при этом значение N_2 будет непрерывно уменьшаться, а значение N_1 увеличиваться. При некотором малом значении N_1 наступает инверсия течения пленки, т. е. пленка начинает двигаться вверх и процесс захлебывания переходит в процесс увеличения пленки жидкости потоком газа. На фиг. 3 представлена обработка опытных данных О. Маренхольца [5] об увеличении пленки жидкости по стержню диаметром 10 мм, расположенному в центре трубки диаметром 23 мм. Осредняющая опытные точки кривая 2 представлена также на графике фиг. 2 (кривая 2) в правом верхнем квадранте, характеризующим процессы, возникающие при спутном дви-



Фиг. 3. Зависимость $k = f(N)$ для увеличения пленки вверх восходящим потоком газа (кривая 2) по работе [5] (нумерация областей режимов, как на фиг. 2)

Точки	Среда	γ' , кг/м ³	$\sigma \cdot 10^4$, кг/м	$\nu' \cdot 10^6$, м ² /сек.	D , мм
1	Воздух + вода	999	74.5	1.09	13
2	Воздух + вода 28% + + диэтиленгликоль 72%	1100	50	11.3	13

жении жидкости и газа вверх. Таким образом, процесс, характеризуемый кривой 1, переходит в процесс, характеризуемый на фиг. 2 кривой 2. Однако переход от одной зависимости к другой происходит с разрывом непрерывности у оси ординат, так как толщина пленки на стенке не может уменьшаться до бесконечно малых значений.

Величина критической скорости по захлебыванию при очень малых расходах жидкости при $N \rightarrow 0$ и соответствующая ей величина скорости по увлечению вверх малых расходов жидкости может быть получена на основании следующих соображений. Если связывать явление захлебывания с потерей устойчивости границы раздела жидкость — газ, то величину критической скорости можно определить на основании теории Гельмгольца, по которой при потенциальном движении неустойчивость возникает, когда

$$\frac{2\pi}{\lambda} \leq \frac{\gamma' \gamma'' (U_1 - U_2)^2}{(\gamma' + \gamma'') g \sigma} \quad (4)$$

где λ — длина волны, U_1 , U_2 — скорости движения газа и жидкости.

При малых расходах жидкости в момент начала захлебывания можно принять $U_2 \approx 0$. Тогда $(U_1 - U_2) \approx a w_*''$, где a — коэффициент, близкий к единице. Если допустить, что возникновение неустойчивости связано с развитием колебательного процесса капиллярных волн, и принять длину волны пропорциональной капиллярной постоянной

$$\lambda \approx \beta \left(\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''} \right)^{1/2} \quad (5)$$

то выражение (4) принимает вид

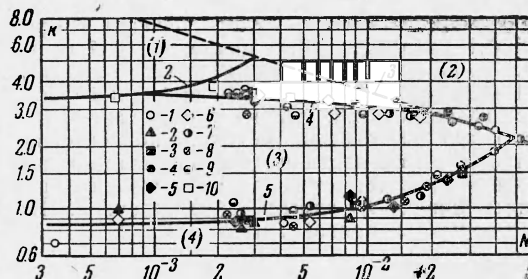
$$\frac{w_*'' \sqrt{\gamma''}}{\sqrt{g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')}} = k \leq \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\beta \alpha}} \left(\frac{\gamma' + \gamma''}{\gamma'} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Сопоставление зависимости (6) с опытными данными фиг. 2 приводит к достаточно удовлетворительному совпадению

$$\frac{1}{\sqrt{\beta \alpha}} \approx 1.3$$

Последовательное развитие процесса от захлебывания к увеличению пленки вверх с дальнейшим увеличением скорости газа при постоянном N^* будет характеризоваться перемещением по кривой 2 фиг. 2 вправо от оси ординат. Текущая точка 'B' на кривой 2, так же как и точка B на кривой 1, определяет значение N_1 и N_2 . В точке C с абсциссой N^* вся жидкость, подаваемая на стенку трубки, будет увлечена вверх. Дальнейшее развитие процесса при увеличении скорости газа на фиг. 2 будет соответствовать переме-

Фиг. 4. Зависимость $k = f(N)$ для границ устойчивости пенообразного режима (нумерация областей режимов как на фиг. 2); точки 1-9 по работам [6-8], точки 10 - по работе [9]

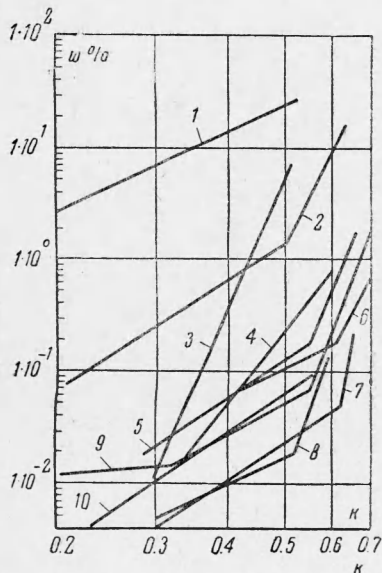


Точки	p, ата	D, мм	γ'' , кг/м ³	Точки	p, ата	D, мм	γ'' , кг/м ³
1	2.5	63.5	2.95	6	1.26	26	1.47
2	1.26	38.0	1.47	7	2.5	26	2.95
3	2.5	38.0	2.95	8	1.26	16	1.47
4	5.0	38.0	5.80	9	2.5	16	2.92
5	7.7	38.0	8.83	10	1	31.7	1.3

нию вертикально вверх от точки C. В точке пересечения вертикали с кривой 3 (точка D) наступает потеря устойчивости границы раздела сред, приводящая к срыву капель с поверхности пленки. Кривая 3, характеризующая процесс срыва капель при восходящем спутном движении жидкости и газа, ввиду отсутствия надежных опытных данных проведена предположительно. При дальнейшем повышении скорости толщина пленки на стенке будет уменьшаться из-за срыва капель и развитие процесса будет характеризоваться перемещением по кривой 3 фиг. 2 влево от точки D.

Таким образом, область (1) между кривыми 2 и 3 на фиг. 2 характеризует устойчивое движение пленки, а область выше кривой 3 - неустойчивое движение пленки на стенке.

Устойчивое пленочное течение может возникнуть в трубе также в результате последовательного развития процесса от пузырькового, снарядного и пенообразного режимов. Такая смена режимов происходит при непрерывном увеличении скорости легкой фазы при малых расходах жидкости. В связи с этим нижняя граница существования пленочного режима, рассмотренная выше (кривые 2 и 3 на фиг. 2), является одно-

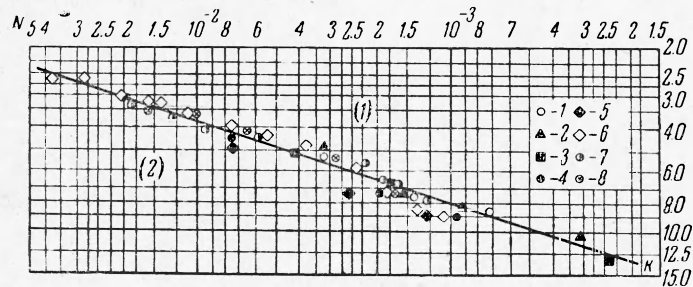


Фиг. 5. Зависимость влажности w% пара или воздуха на выходе из барботажных колон от критерия k; кривые 1-2 - опыты автора, кривые 3-9 - по работе [11], кривая 10 - по работе [12]

Кривые	Среда	p, ата	h, мм	Кривые	Среда	p, ата	h, мм
1	Воздух + вода	1	250	6	Пар + вода	91	630
2	Воздух + вода	1	560	7	Пар + вода	91	650/655
3	Пар + вода	17	470/630	8	Пар + вода	17	664/670
4	Пар + вода	91	460/465	9	Пар + вода	36	657/665
5	Пар + вода	36	470/777	10	Пар + вода	185	446/466

временно верхней границей пенообразного режима. Для подтверждения правомерности этого положения на фиг. 4 в координатах (2) представлены опытные данные [6-8], косвенно характеризующие область существования пенообразного режима. Авторами [6-8] показано, что переход от одного режима к другому сопровождается качественным изменением характера зависимости относительной потери напора на трение и «задержки» от скорости газа. На основании анализа этих зависимостей и определены значения критических скоростей газа. На фиг. 4 приведены также данные визуальных наблюдений на трубке диаметром 31.7 мм при атмосферном давлении [9]. Дополнительно на фиг. 4 перенесены кривые 2 и 3 фиг. 2.

Как видно из графика, кривая 4, так же как и кривая 2, стремится к горизонтали при значении $k \approx 3.2$. Однако при значении $N = 1 \cdot 10^3$ кривые 4 и 2 расходятся. Вероятно, это расхождение обусловлено погрешностью в определении границы между режимами. Более надежными можно считать данные непосредственного исследования пленочного процесса, в связи с чем верхней границей пенообразного режима следует принять кривую 2 и замыкающую кривую 3. Нижняя граница пенообразного режима характеризуется кривой 5 на фиг. 4 и 2.



Фиг. 6. Зависимость $k = f(N)$ для срыва капель с поверхности пленки при спутном течении жидкости и газа (нумерация режимов как на фиг. 2); точки 1—5 по работе [13], точки [6-8] по работе [14].

Точки	Среда	$\gamma',$ кг/м ³	$\sigma \cdot 10^4,$ кг/м	$v' \cdot 10^6,$ м ² /сек	D, мм	l, мм
1	Пар + вода, 5 ата	917	49.7	0.20	25	1400
2	Пар + вода, 7.5 ата	900	46.0	0.18	25	1400
3	Пар + вода, 13.5 ата	876	40.3	0.16	25	1400
4	Пар + вода, 16.0 ата	865	38.4	0.16	25	1400
5	Пар + вода, 45.0 ата	794	25.0	0.14	25	1400
6	Воздух + вода 65 % + глицерин 35 %	1083	69.0	3.0	13	830
7	Воздух + вода 53 % + глицерин 47 %	1116	68.3	4.5	13	830
8	Воздух + вода 45 % + глицерин 55 %	1140	67.3	7.0	13	830

В верхнем правом квадранте фиг. 2 представлена кривая 6, построенная по данным С. И. Костерина [10]. Она характеризует переход от пузырькового — снарядного режима течения смеси к эмульсионному режиму в центре трубы с неустойчивой пленкой жидкости на стенке. Переход от пузырькового режима к снарядному, как показано в [6-8], не имеет кризисного характера и, следовательно, не может рассматриваться в координатной системе (2).

Особенностью системы (2) является то, что ось ординат на всех фигурах характеризует процессы, происходящие в большом объеме или при нулевом осредненном расходе жидкости. Например, все кризисные точки, определяющие процесс барботажа в колонках большого диаметра, должны располагаться на оси ординат.

Кривая 5 на фиг. 2 определяет условие потери устойчивости пузыря в большом объеме и снаряда газа в трубах. Если в трубах увеличение скорости выше значений, определяемых кривой 5, приводит к образованию пенообразного режима, то в большом объеме это приведет к дроблению барботажного слоя. Из вышеизложенного следует, что при значении $k \approx 0.9$ в колонках должен происходить кризис процесса, приводящий к разрушению барботажного слоя и резкому увеличению влажности до 100% на выходе из колонки.

На фиг. 5 приведена обработка данных по уносу влаги из колонок при высоте парового пространства до 700 мм. Ввиду того что эксперименты производились при различных высотах парового пространства и различных уровнях жидкости на барботаже-

