

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

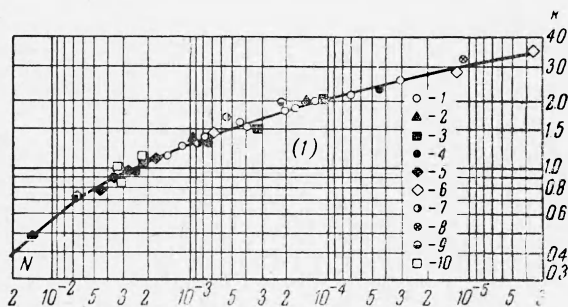
$$k = f(N), \quad N = FW^{1.25} \left(1 + \frac{31}{G^{0.55}} \right) \quad (2)$$

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

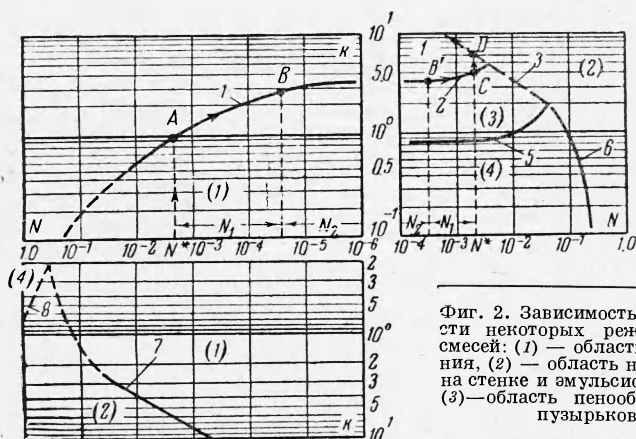
Фиг. 1. Зависимость $k = f(N)$ для начала захлебывания трубчатых аппаратов и срыва капель с поверхности стекающей пленки при встречном движении газа: (1) — область устойчивого пленочного течения; точки 1—5 — опыты Файнда [3]; точки 6—9 — опыты Камай, Ойши и Окана, принято по статье [3]; точки 10 опыта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



Точки	Среда	$\gamma', \text{ кг/м}^3$	$\sigma \cdot 10^4, \text{ кг/м}$	$\nu' \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{сек}$	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



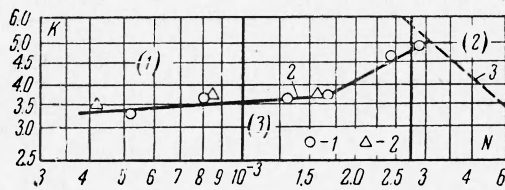
Фиг. 2. Зависимость $k = f(N)$ для границ устойчивости некоторых режимов течения газо-жидкостных смесей: (1) — область устойчивого пленочного течения, (2) — область неустойчивого пленочного течения на стенке и ампульсионного движения в центре трубки, (3) — область пенообразного режима, (4) — область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

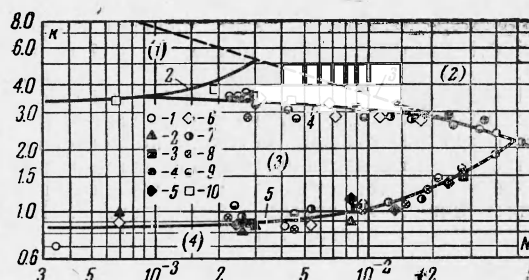
$$\frac{w_*'' \sqrt{\gamma''}}{\sqrt{g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')}} = k \leq \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\beta \alpha}} \left(\frac{\gamma' + \gamma''}{\gamma'} \right)^{1/2} \quad (6)$$

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]

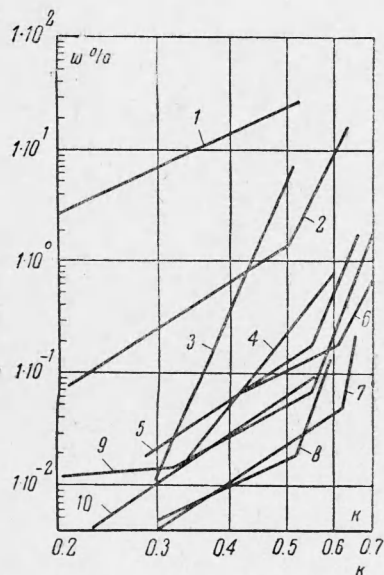


Точки	p, ата	D, мм	γ'' , кг/м ³	Точки	p, ата	D, мм	γ'' , кг/м ³
1	2.5	63.5	2.95	6	1.26	26	1.47
2	1.26	38.0	1.47	7	2.5	26	2.95
3	2.5	38.0	2.95	8	1.26	16	1.47
4	5.0	38.0	5.80	9	2.5	16	2.92
5	7.7	38.0	8.83	10	1	31.7	1.3

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

ном устройстве, характер кривых различен, однако все они стремятся к влажности 100% при значении $k \approx 0.8 \div 0.9$. Физический смысл этого выражения становится ясен при сопоставлении его с формулой Д. А. Франк-Каменецкого, определяющей скорость витания крупных единичных капель в поток газа. Формула может быть записана в виде

$$k \approx \text{const} \approx 1.28 \quad (7)$$

Так как кризис процесса барботажки наступает тогда, когда уносятся наиболее крупные капли, то, очевидно, формула (7) должна определять критическую скорость барботажки. Однако ввиду того, что при барботажке часть сечения колонки занята жидкой фазой, кризис процесса наступает при несколько меньших численных значениях критерия k . Следует отметить, что при высотах парового пространства более 700 мм в барботажных колонках оказывается существенным оседание капель жидкости на стенке и стекания жидкости по стенке в водяной объем. Унос всей влаги возможен при условии увлечения пленки жидкости по стенке вверх, т. е. при значении $k \approx 3.2$. В бесконечно большом объеме или при достаточно большом соотношении диаметра и высоты колонки процесс барботажки завершается при $k \approx 0.8 \div 0.9$.

Из описания процесса захлебывания [3] следует, что увеличение расхода жидкости (или уменьшение диаметра трубки) приводит к смыканию волн на поверхности пленки и образование пробок газа.

Если предположить, что при предельном развитии процесса захлебывания кривая 1 фиг. 2 пересечет ось абсцисс, то точка пересечения определит значение N , соответствующее нулевой скорости движения пробок газа. При дальнейшем увеличении расхода жидкости пробки газа будут сноситься вниз. На фиг. 2 кривая 1 должна перейти в кривую 8 левого нижнего квадранта, ограничивающую область пробкового течения смеси при спутном опускном движении сред. Кривая 7 фиг. 2 характеризует потерю устойчивости границы раздела сред и срыв капель с поверхности пленки при опускном движении. Она построена на основании обработки опытных данных, представленных на фиг. 6. Выше кривой 8 находится область устойчивого движения пленки, ниже — неустойчивого движения пленки и эмульсионного течения в центре трубы.

Поступила 14 V 1963

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С. С., Стрикович М. А. Гидравлика газо-жидкостных систем. ГЭИ, 1958.
2. Кутателадзе С. С., Сорокин Ю. Л. О гидродинамической устойчивости некоторых газо-жидкостных систем. Сб. под ред. Кутателадзе С. С. Вопросы теплопередачи и гидравлики двухфазных сред. ГЭИ, 1961.
3. Feind K. Stromungsuntersuchung bei Gegenstrom von Rieselfilm und Gas in lotrechten Rohren. VDI-Forschungsheft, 1960, No 481.
4. Бибииков Д. И. Лабораторные исследования конструктивных форм оросителя пленочных градирен. Тепло и сила, 1937, № 6.
5. Mahrenholtz O. Forderung eines Flussigkeitsfilm an einer senkrechten Wand durch einem Gasstrom. Kältetechnik, 1958, 10, No 5.
6. Govier G. W., Radford B. A., Dunn I. B. C. The Upwards vertical Flow of Air-Water Mixtures, I. Canad. Chem. Eng., August, 1957, vol. 35.
7. Govier G. W., W. Leigh Short. The Upwards vertical Flow of Air-Water Mixtures, II. Canad. J. Chem. Eng., 1958, vol. 36.
8. Brown R. A., Sullivan G. A., Govier G. W. The Upwards vertical Flow of Air-Water Mixtures, III. Canad. J. Chem. Eng., 1960, vol. 32, 2.
9. Hewitt G. F., King R. D., Lovegrove P. C. Techniques for liquid film and pressure drop studies in annular twophase flow. Res. Group U. K. Atomic Energy Author, NAERE-R 3921, 1962, 93 pp.
10. Костерин С. И. Исследование влияния диаметра и расположения трубы на гидравлические сопротивления и структуры течения газожидкостной смеси. Изв. АН СССР, ОТН, 1949, № 12.
11. Стерман Л. С. К теории паросепарации. Ж. техн. физ., 1958. т. XXVIII, вып. 7.
12. Стерман Л. С., Антонов А. Я., Сурнов А. В. Исследование качества пара при давлении 185 ата. Теплоэнергетика, 1957, № 3.
13. Мозаров И. А. Исследование критической скорости срыва пленки влаги со стенок парапровода. Теплоэнергетика, 1959 г., № 2.
14. Живайнин Л. Я. О толщине пленки жидкости в аппаратах пленочного типа. Химическое машиностроение, 1961, № 6.