

КРИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МОДЕЛЕЙ УНОСА ЖИДКОСТИ В ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОМ ТЕЧЕНИИ

А.В. Черданцев

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

При течении газожидкостной смеси с высоким содержанием газовой фазы реализуется кольцевой режим течения, при котором поток газа движется с высокой скоростью в центральной части канала, а жидкость распространяется в виде пленки по стенкам канала. При высоких расходах фаз происходит отрыв капель с поверхности пленки и унос их в ядро газового потока. Такая конфигурация потока реализуется в широком спектре промышленных установок, включая аппараты теплообмена, химические реакторы, системы добычи и транспортировки нефти и газа, тепловые тракты АЭС. Унос жидкости приводит к повышению перепада давления в канале, интенсификации теплообмена и перемешивания жидкости, утонению пристенной пленки. Удары капель, осаждающихся из газового ядра на пленку, могут приводить к захвату пузырьков воздуха и образованию сухих пятен на стенках канала. Развитие теоретических моделей, предсказывающих интенсивность уноса жидкости в дисперсную фазу, является важной практической задачей, возникающей при проектировании и эксплуатации промышленных аппаратов. Ввиду высокой сложности гидродинамических процессов, приводящих к отрыву капель, основная масса таких моделей представлена эмпирическими корреляциями (напр., [1-2]). Однако в последнее время наметилась тенденция к развитию физических моделей ([3-10]), предсказывающих интенсивность уноса посредством анализа волновой структуры пленки жидкости и взаимодействия потока газа с гребнями волн. Данная работа посвящена критическому анализу базовых предположений, используемых в таких моделях.

На поверхности пленки жидкости в дисперсно-кольцевом течении доминируют крупномасштабные волны возмущения, распространяющиеся с высокой скоростью. Считается общепринятым, что первичный унос капель происходит с поверхности волн возмущения, однако существуют значительно различающиеся интерпретации структуры волн возмущения и процесса отрыва. В основе моделей [3-9] лежит умозрительная гипотеза [11] о срыве гребней волн возмущения потоком газа. Объем жидкости, срываемой за один акт отрыва, рассчитывается исходя из баланса силы трения со стороны газа, силы тяжести и силы поверхностного натяжения. Предполагается, что волны возмущения имеют синусоидальную форму, а длина волны соответствует длине волны нейтральных возмущений с нулевым инкрементом нарастания амплитуды. Последняя определяется из невязкого анализа неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [12]. Амплитуда волны оценивается на основе предположения о сдвиговом профиле скорости в волне возмущения и максимальной скорости жидкости, равной среднерасходной скорости жидкости в пленке [11]. Волны возмущения предполагаются трехмерными; их размер в поперечном направлении равен либо их продольному размеру ([3-7]), либо амплитуде волны ([8]). В модели [9] волны возмущения считаются двумерными, однако вводится поперечный масштаб неравномерности, пропорциональный толщине пленки. Модели [3-9] во многом используют один и те же предположения, за некоторыми исключениями. Так, модель [4] использует описанные выше предположения лишь для одного из трех рассматриваемых сценариев уноса, а модель [9] отличается способом расчета длины волны возмущения и оценки объема срываемой жидкости. В модели [10] закладывается иной механизм отрыва

капель: "выметание" капель из пленки вихрями в газовой фазе.

Рассчитанный по таким моделям расход дисперсной фазы, как правило, превышает экспериментальные данные на несколько порядков. Авторы объясняют такое расхождение либо отличием среднего размера срываемых капель от максимального, закладываемого в модели ([3]), либо осаждением части капель на пленку сразу после отрыва ([8]). Для снижения расхождения модели подвергаются эмпирической коррекции, что приводит к соответствию между теорией и экспериментом в рамках интервала $\pm 50\%$ для большинства экспериментальных точек, использовавшихся для корректировки. Такое расхождение для величины, по определению принадлежащей интервалу от нуля до единицы, свидетельствует о том, что модель не работает даже с эмпирическими поправками.

Анализ современных экспериментальных исследований волновой гидродинамики и процессов отрыва капель в дисперсно-кольцевом течении показывает, что большая часть предположений, используемых в таких моделях, не соответствует действительности. Так, формирование волн возмущения происходит посредством каскада слияний начальных волн [13], и итоговое расстояние между волнами никак не связано с длиной волны нейтральных возмущений. Расхождение между моделью и экспериментом по этому параметру составляет 2-3 порядка величины. Профиль скорости в пленке сильно отличается от линейного [14-15]; выбор предельной скорости в работе [11] ничем не обоснован. Сами волны возмущения представляют собой уединенные, относительно невысокие плато [16-17], покрытые высокими короткими волнами быстрой ряби, которые генерируются на задних склонах волн возмущения [18]. Продольный размер волн ряби на порядок меньше размера волн возмущения; тем не менее, он все еще на 1-2 порядка больше оценки длины волны нейтральных возмущений. Поперечный размер волн быстрой ряби на порядок больше продольного [19]. Именно разрыв волн быстрой ряби на поверхности волн возмущения приводит к уносу [19-20]. Такой разрыв может осуществляться по одному из двух сценариев [21-22]; выбор сценария определяется взаимным расположением волн быстрой ряби [19]. В каждом из случаев разрыв волны ряби приводит к образованию большого количества капель с широким спектром размеров и скоростей.

Фактически, все предположения, используемые при построении моделей [3-10], не подтверждены экспериментально. Такие предположения базируются на представлении о волне возмущения как гладкой волне с ярко выраженным гребнем, которое, в свою очередь, возникло благодаря экспериментальным записям, полученным методами с низким пространственным разрешением. Напротив, прямое сравнение этих предположений с экспериментальными данными дает значительное расхождение, зачастую на 1-2 порядка величины. В результате оценка расхода жидкости, движущейся в виде капель, превышает измеренные значения на несколько порядков.

По мнению автора, при физическом моделировании явления уноса должна использоваться современная интерпретация волн возмущения [16-17]. В таких моделях должны быть последовательно рассмотрены следующие волновые процессы: возникновение начальных волн вблизи точки первоначального контакта фаз; формирование волн возмущения посредством слияния начальных волн [13]; формирование волн быстрой ряби на задних склонах волн возмущения; разрушение волн быстрой ряби газовым потоком. Такой подход требует более сложных моделей и больших затрат машинного времени. Однако лишь такой подход можно назвать физически обоснованным.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-19-10449.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kataoka I., Ishii M., Nakayama A.** Entrainment and deposition rates of droplets in annular two-phase flow // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2000. Vol. 43, P. 1573-1589.
2. **Cioncolini A., Thome J.R.** Prediction of the entrained liquid fraction in vertical annular gas-liquid two-phase flow // *Int. J. Multiphase Flow*. 2010. Vol. 36, P. 293-302.
3. **Holowach M.J., Hochreiter L.E., Cheung F.B.** A model for droplet entrainment in heated annular flow // *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2002. Vol. 23, P. 807-822.
4. **Lane J.W., Aumiller Jr D.L., Cheung F.B., Hochreiter L.E.** A self-consistent three-field constitutive model set for predicting co-current annular flow // *Nucl. Engng. Design*. 2010. Vol. 240, P. 3294-3308.
5. **Baniamerian Z., Aghanajafi C.** Studying the influence of refrigerant type on thermal efficiency of annular two-phase flows; mass transfer viewpoint // *Korean J. Chem. Eng.* 2011. Vol. 28, P. 49-55.
6. **Wang K., Bai B., Ma W.** A model for droplet entrainment in churn flow // *Chem. Engng. Sci.* 2013. Vol. 104, P. 1045-1055.
7. **Liu L., Bai B.** Generalization of droplet entrainment rate correlation for annular flow considering disturbance wave properties // *Chem. Engng Sci.* 2017. Vol. 164, P. 279-291.
8. **Ryu S.-H., Park G.-C.** A droplet entrainment model based on the force balance of an interfacial wave in two-phase annular flow // *Nucl. Engng. Des.* 2011. Vol. 241, P. 3890-3897.
9. **Yagov V.V., Minko M.V.** Simulating Droplet Entrainment in Adiabatic Disperse-Annular Two-Phase Flows // *Thermal Engineering*. 2013. Vol. 60, P. 521-526.
10. **Zhang R., Liu H., Liu M.** A probability model for fully developed annular flow in vertical pipes: Prediction of the droplet entrainment // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2015. Vol. 84, P. 225-236.
11. **Ishii M., Grolmes M.A.** Inception criteria for droplet entrainment in two-phase concurrent film flow // *AIChE J.* 1975. Vol. 21, P. 308-318.
12. **Hewitt G.F., Hall Taylor N.S.** *Annular Two-phase Flow*. Pergamon, Oxford, 1970.
13. **Alekseenko S.V., Cherdantsev A.V., Cherdantsev M.V., Isaenkov S.V., Markovich D.M.** Study of formation and development of disturbance waves in annular gas-liquid flow // *Int. J. Multiphase Flow*. 2015. Vol. 77, P. 65-75.
14. **Ashwood A.C., Vanden Hogen S.J., Rodarte M.A., Kopplin C.R., Rodriguez D.J., Hurlburt E.T., Shedd T.A.** A multiphase, micro-scale PIV measurement technique for liquid film velocity measurements in annular two-phase flow // *Int. J. Multiphase Flow*. 2015. Vol. 68, P. 27-39.
15. **Zadrzil I., Markides C.N.** An experimental characterization of liquid films in downwards co-current gas-liquid annular flow by particle image and tracking velocimetry // *Int. J. Multiphase Flow*. 2014. Vol. 67, P. 42-53.
16. **Hewitt G.F., Jayanti S., Hope C.B.** Structure of thin liquid films in gas-liquid horizontal flow // *Int. J. Multiphase Flow*. 1990. Vol. 16, P. 951-957.
17. **Schubring D., Shedd T.A., Hurlburt E.T.** Planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part II: Analysis and comparison to models // *Int. J. Multiphase Flow*. 2010. Vol. 36, P. 825-835.
18. **Alekseenko S.V., Antipin V.A., Cherdantsev A.V., Kharlamov S.M., Markovich D.M.** Investigation of waves interaction in annular gas-liquid flow using high-speed fluorescent visualization technique // *Microgravity Sci. Technol.* 2008. Vol. 20, P. 271-275.
19. **Cherdantsev A.V., Hann D.B., Azzopardi B.J.** Study of gas-sheared liquid film in horizontal rectangular duct using high-speed LIF technique: Three-dimensional wavy structure and its relation to liquid entrainment // *Int. J. Multiphase Flow*. 2014. Vol. 67, P. 52-64.
20. **Woodmansee D.E., Hanratty, T.J.** Mechanism for the removal of droplets from a liquid surface by a parallel air flow // *Chem. Eng. Sci.* 1969. Vol. 24, P. 299-307.
21. **Azzopardi B.J.** Mechanisms of entrainment in annular two-phase flow. 1983. UKAEA Report AERE-R 11068
22. **Pham S.H., Kawara Z., Yokomine T., Kunugi T.** Detailed observations of wavy interface behaviors of annular two-phase flow on rod bundle geometry // *Int. J. Multiphase Flow*. 2014. Vol. 59, P. 135-144.