

ГИДРОДИНАМИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В ДВИЖУЩИХСЯ ПЛЕНКАХ ПРИ ПОПУТНОМ ИЛИ ВСТРЕЧНОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

М. К. Захаров, профессор

кафедра Процессов и аппаратов химической технологии им. Н. И. Гельперина

МИТХТ им. М. В. Ломоносова

e-mail: mkzakharov@gmail.com

П

редставлен вклад профессора В.Г. Айнштейна в изучение механизма переноса импульса, теплоты и вещества в жидкостных пленках, а также в разработку методов расчета аппаратов пленочного типа различного назначения.

Part of professor V.G. Einshtein in study of hydrodynamics, heat and mass transfer in liquid films is represented.

Ключевые слова: течение жидкостных пленок, теплоперенос, массоперенос, пленочные аппараты, совместное течение двух пленок, оптимизация.

Key words: flow liquid films, heat transfer, mass transfer, film apparatuses, joint flow of two liquid films, optimization.

Процессы обработки жидкостей в тонких пленках находят широкое применение в химической, пищевой и других отраслях промышленности – как в крупных, так и в малотоннажных производствах. Проведение процессов нагрева, концентрирования и химических превращений веществ в тонких пленках является порой единственной возможностью их обработки. Прежде всего, это относится к случаям, когда обрабатываемые продукты чувствительны к высоким температурам, так что при их длительном контакте с поверхностью нагрева возможны нежелательные явления: пригорание, разложение, полимеризация и т.д. Реакции с большим тепловыделением (например, нитрование и сульфирование органических соединений) целесообразно проводить в пленочных реакторах, где благодаря малой толщине пленки обеспечивается эффективный отвод тепла от реакционной массы. Пленочные испарители и дистилляторы используются в производстве капролактама и эпоксидных смол, латексов и дрожжей, соков и мочевины. При нагреве и испарении химических продуктов в этих аппаратах вследствие кратковременного контакта с поверхностью нагрева сохраняются химическое строение, ценные физико-химические и биологические (что особенно важно для пищевых и лекарственных препаратов) свойства веществ. Применение пленочного аппарата (с малым количеством реакционной массы внутри него) в значительной степени снижает возможность образования больших взрывоопасных масс, характерных для аппаратов емкостного типа. Непрерывное ведение процесса в пленочных аппаратах способствует лучшей автоматизации технологических производств.

Многочисленными работами [1–21] ученых разных стран к настоящему времени созданы достаточно полные представления о течении жидкостных пленок и основных закономерностях тепло- и массообмена.

Однако, при расчете необходимых размеров пленочных аппаратов обычно базируются на средней скорости течения пленки. В действительности существует некое распределение скоростей жидкости по толщине пленки, поэтому время пребывания отдельных ее слоев (на разных расстояниях от стенки) в рабочей зоне аппарата не одинаково и, следовательно, глубина протекания процесса различна по толщине пленки.

Впервые неравномерность профиля скорости при ламинарном и турбулентном течении жидкостной пленки была количественно оценена в работах Айнштейна В. Г. с сотрудниками [22, 23] применительно к расчету пленочных химических реакторов. В последующих работах [24, 25] неравномерность профиля скорости была учтена при анализе работы пленочных аппаратов при существенном воздействии на пленку попутного (нисходящий и восходящий прямоток) и встречного газового потока (противоток жидкости и газа). В [26] количественно оценено влияние молекулярной диффузии вещества в жидкости на эффективность пленочных реакторов.

На основе полученных закономерностей Айнштейном В. Г. с сотр. предложены корректные методы расчета секционированного пленочного аппарата [27], пленочного ротационного реактора [28] и других пленочных аппаратов [29–36].

Проведенный нами в [37] анализ влияния неравномерности профиля скорости на размеры **пленочных** химических реакторов позволил исправить ошибочное мнение [38] об отсутствии влияния продольного перемешивания на размеры аппаратов при проведении в них химических реакций нулевого порядка. Было показано [37], что как для пленочных, так и для **трубчатых** реакторов – в общем, для любых реакторов с продольным перемешиванием – их размер (объем) при заданной степени превра-

щения зависит от величины перемешивания. Расчеты показали [37], что для реакций нулевого порядка (как и для первого, второго [38]) необходимый объем (длина) химического реактора может увеличиваться в сравнении с реактором идеального вытеснения в несколько раз при возрастании интенсивности продольного перемешивания.

При изучении теплопереноса в жидкостной пленке, в том числе и при существенном гидродинамическом воздействии газового потока, был установлен [39] балансовый характер теплообмена, а именно: тепловая нагрузка пленочного аппарата в случае ламинарных пленок вплоть до границы с турбулентным режимом определяется лишь массовым потоком жидкостной пленки G и ее теплоемкостью c . Такой вывод подтвержден экспериментальными данными [40] по нагреванию воды в пленочном аппарате диаметром 70 мм и длиной 1,05 м при постоянной температуре стенки в каждом опыте.

Пропускная способность стадии подвода (отвода) теплоты с жидкостной пленкой (Gc) при этом значительно меньше пропускной способности поверхностной стадии передачи теплоты от потока к стенке ($aF \equiv \lambda F / \delta$) из-за малой толщины ламинарной пленки δ (десятые доли мм). Поэтому тепловая нагрузка аппарата изменяется пропорционально расходу жидкостного потока (отсюда еще одно название: «потокосная» задача). Ошибочная интерпретация опытных данных по теплоотдаче в условиях балансовой (потокосной) задачи часто приводила к неправомерному утверждению [41] об «экспериментально зафиксированном увеличении коэффициента теплоотдачи» с ростом плотности орошения (т.е. к выводу, противоречащему физическому смыслу). Все дело в неосознанной «подмене» задачи [42–44]: расчет проводили в терминах конвекции (aF), тогда как в действительности процесс лимитирует пропускная способность потока жидкости (Gc). В этом случае из равенства $aF = Gc$ формально следует, что $a = Gc/F$. Поскольку опыты по теплоотдаче проводят в каком-либо аппарате при неизменной (!) поверхности теплообмена F , то с увеличением G , очевидно, должен происходить пропорциональный «рост a ». Из этого следует, что в условиях балансовой задачи теряют смысл представления о коэффициенте теплоотдачи и тем более установление на основе экспериментальных данных зависимостей типа $Nu = A Re^m Pr^n$.

К сожалению, такие «экспериментально установленные зависимости» с показателем степени m , равным единице и близким к ней, встречаются в литературе. Так, в [41] приведены следующие численные значения коэффициентов A и показателей степени m и n , экспериментально установленные Глазером и Вильке при нагревании пленок воды и

растворов этиленгликоля в вертикальной трубе длиной 2,4 м.

Показатель степени при Re , практически совпадающий с единицей, свидетельствует о том, что и при $Re > 1600$ (турбулентная пленка) теплообмен с большой вероятностью протекает в условиях балансовой задачи (подчеркнем еще раз, что это возможно для достаточно длинных труб; в цитируемой работе $H=2,4$ м – труба длинная).

A	m	n	Область применения
0.00085	6/5	0.344	$1600 < Re < 3200$
0.00724	14/15	0.344	$Re > 3200$

* α – коэффициент теплоотдачи в пленке, $\alpha = \lambda / \delta$;
 λ – коэффициент теплопроводности жидкости;
 F – поверхность теплообмена.

Балансовый характер теплообмена в стекающих пленках позволил по-новому [39] объяснить увеличение интенсивности теплообмена в случае конденсации паров на охлаждаемых поверхностях, при выпаривании растворов в тонких пленках, особенно в роторных пленочных аппаратах.

Учитывая общность процессов переноса теплоты и вещества, естественно было предполагать, что и массообмен в определенных условиях, в частности – в достаточно протяженных жидкостных пленках, будет носить потоковый характер; при этом его интенсивность будет прямо пропорциональна плотности орошения. Проведенный анализ [45] эффективности массопереноса в жидкостных пленках подтвердил высказанное предположение.

В работах учеников В. Г. Айнштейна в области пленочных аппаратов просматриваются два направления. Первое – это практическое применение пленочных реакторов [46] для проведения химических реакций с большим тепловыделением: нитрование, сульфирование, сульфатирование и других. Так, был разработан, изготовлен и до сих пор эксплуатируется на Скоропусковском опытном заводе (Московская область) однотрубный пленочный реактор с восходящей пленкой лаурилового спирта для его сульфатирования триоксидом серы [47]. Проведенные опытные работы по сульфированию алкилбензолов также показали возможность получения продуктов заданного качества.

Второе направление – это разработка методов расчета пленочных аппаратов при течении неньютоновских жидкостей [48] и создание условий, приближающих течение жидкостной пленки к режиму идеального вытеснения. Одним из способов приближения к такому режиму является движение пленки рабочей жидкости не по стенке аппарата, а по тонкой пленке «смазывающей» стенку жидкости, не обладающей взаимной растворимостью с рабо-

чей и являющейся инертной в химическом и диффузионном смысле по отношению к реагентам и продуктам реакции [30]. Нисходящее течение двух пленок взаимнонерастворимых жидкостей с учетом воздействия встречного газового потока подробно рассмотрены в [49, 50].

Получены зависимости для расчета оптимального (в смысле выравнивания профиля скорости рабочей пленки) воздействия газового потока на рабочую пленку в случае ньютоновских [49] и неньютоновских (псевдопластичных) [50] жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Nusselt, W. Die Oberflächen Kondensation des Wasserdampfes / W. Nusselt // Ztschr. des Vereines Deutscher Ingenieure. – 1916. – Bd 60, № 28. – S. 569–575.
2. Капица, П. Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости / П. Л. Капица // Журн. эксперим. и теорет. физики. – 1951. – Т. 21, № 9. – С. 964–978.
3. Семенов, П. А. Течение жидкости в тонких слоях / П. А. Семенов // Журн. теорет. физики. – 1944. – Т. 14. – С. 427–437.
4. Семенов, П. А. Определение толщины слоя жидкости в аппаратах пленочного типа / П. А. Семенов, М. С. Рейбах, А. С. Горшков // Хим. промышленность. – 1966. – № 3. – С. 213–219.
5. Бояджиев, Х. Б. Массоперенос в движущихся пленках жидкости / Х. Б. Бояджиев, В. Н. Бешков. – М.: Мир, 1988. – 136 с.
6. Бешков, В. Н. К теории ламинарного течения тонких пленок жидкости / В. Н. Бешков, Х. Б. Бояджиев // Инженерно-физический журнал. – 1974. – Т. 27, № 4. – С. 702–706.
7. Кулов, Н. Н. Гидродинамика и массообмен в нисходящей двухфазной пленке / Н. Н. Кулов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1984. – Т. 27, № 2. – С. 243–246.
8. Холпанов, Л. П. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела / Л. П. Холпанов, В. Я. Шкадов. – М.: Наука, 1990. – 271 с.
9. Исследование гидродинамики и массообмена в пленке жидкости с учетом входного участка / Л. П. Холпанов [и др.] // Теор. основы хим. технологии. – 1976. – Т. 10, № 5. – С. 659–664.
10. Живайкин, Л. Я. К вопросу о методике расчета гидравлического сопротивления пленочных аппаратов / Л. Я. Живайкин // Теор. основы хим. технологии. – 1969. – Т. 3, № 1. – С. 145–147.
11. Cerro, R. L. Entrance region flows with a free surface: the falling liquid film / R. L. Cerro, S. Whitaker // Chem. Eng. Sci. – 1971. – Vol. 26. – P. 785–789.
12. Whitaker, S. Some comments on the hydrodynamics of thin liquid films / S. Whitaker, R. L. Cerro // Ibid. – 1974. – Vol. 29. – P. 963–965.
13. Кабанов, Г. П. Унос жидкости в трубчатых контактных элементах при восходящем прямотоке фаз / Г. П. Кабанов, В. Ф. Харин, Н. А. Николаев // Хим. промышленность. – 1979. – № 1. – С. 45–47.
14. Кишиневский, М. Х. Абсорбция газов свободно стекающей турбулентной пленкой жидкости / М. Х. Кишиневский, Т. С. Корниенко // Журн. прикл. химии. – 1987. – Т. 60, № 11. – С. 2474–2482.
15. Пленочная тепло- и массообменная аппаратура: (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии): монография / Под ред. В. М. Олевского. – М.: Химия, 1988. – 240 с.
16. Asbjornsen, O. A. Taylor diffusion in falling liquid films / O. A. Asbjornsen // Chem. Eng. Science. – 1973. – Vol. 28, № 9. – P. 1763–1764.
17. Prenosil, J. Taylor diffusion in laminar falling film / J. Prenosil // Chem. Eng. Science. – 1973. – Vol. 28, № 9. – P. 1699–1706.
18. Собин, В. М. Тепломассообмен при охлаждении стекающих пленок воды противоточным потоком воздуха / В. М. Собин, Г. В. Дашков // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 4. – С. 27–36.
19. Интенсификация переноса массы в пленке жидкости, двигающейся прямоточно с высокоскоростным потоком газа или пара / Н. А. Николаев [и др.] // Теор. основы хим. технологии. – 1989. – Т. 23, № 5. – С. 563–568.
20. Алексеенко, С. В. Волновое течение пленок жидкости / С. В. Алексеенко, В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев. – Новосибирск: Наука, 1992. – 255 с.
21. Новожилов, В. Н. Особенности ламинарного течения пленки жидкости / В. Н. Новожилов // Теор. основы хим. технологии. – 1990. – Т. 24, № 1. – С. 20–29.
22. Захаров, М. К. Расчет высоты пленочных реакторов при ламинарном течении пленки / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн, Л. М. Тишаева // Теор. основы хим. технологии. – 1988. – Т. 22, № 2. – С. 194–200.
23. К расчету пленочных химических реакторов при турбулентном режиме течения жидкости / М. К. Захаров [и др.] // Теор. основы хим. технологии. – 1994. – Т. 28, № 1. – С. 73–76.
24. Захаров, М. К. Расчет высоты пленочных реакторов при нисходящем ламинарном течении пленки / М. К. Захаров // Теор. основы хим. технологии. – 1989. – Т. 23, № 5. – С. 591–599.
25. Захаров, М. К. Расчет высоты пленочных реакторов при восходящем ламинарном течении пленки жидкости под воздействием газового потока / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн // Теор. основы хим. технологии. – 1990. – Т. 24, № 2. – С. 170–175.
26. Влияние молекулярной диффузии вещества в жидкости на эффективность пленочных реакторов / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн, Т. В. Данилова - Данильян, В. В. Шевелев // Изв. вузов.

Химия и хим. технология. – 1992. – Т. 35, вып. 6. – С. 93–97.

27. Захаров, М. К. К расчету секционированного пленочного реактора / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн // Теор. основы хим. технологии. – 1990. – Т. 24, № 5. – С. 619–625.

28. Захаров, М. К. Оценка эффективности пленочного ротационного реактора / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн, И.Ю. Пригоркина // Хим. промышленность. – 1994. – № 2. – С. 48–53.

29. Захаров, М. К. Расчет и оптимизация пленочных химических реакторов / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн, С. Г. Шелестян // Хим. промышленность. – 1991. – № 6. – С. 377–380.

30. Захаров, М. К. Расчет пленочных реакторов при ламинарном течении пленки с проскальзыванием на стенке / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн // Теор. основы хим. технологии. – 1992. – Т. 26, № 5. – С. 640–648.

31. Захаров, М. К. О характеристиках взаимодействия газового потока и тонкой жидкостной пленки при ее гравитационном течении / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн, О. А. Юрьева // Теор. основы хим. технологии. – 1994. – Т. 28, № 1. – С. 51–55.

32. Захаров, М. К. Расчет высоты пленочных реакторов при пластичном течении пленки бингамовской жидкости / М. К. Захаров, Е. Ю. Харкац, В. Г. Айнштейн // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 1994. – Т. 37, № 2. – С. 104–110.

33. Захаров, М. К. Расчет высоты пленочных реакторов при течении пленки псевдопластичной жидкости / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн, М. А. Зиновьева // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 1994. – Т. 37, № 2. – С. 111–115.

34. Айнштейн, В. Г. Оценка длины участка гидродинамической стабилизации при гравитационном течении пленки жидкости / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров // Теор. основы хим. технологии. – 1990. – Т. 24, № 3. – С. 395–397.

35. Захаров, М. К. Расчет узла подачи жидкости в пленочный аппарат с нисходящей пленкой / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн // Химич. и нефтегаз. машиностроение. – 1990. – № 12. – С. 13.

36. Айнштейн, В. Г. Расчет высоты пленочных реакторов для обратимых химических реакций / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, В. В. Шевелев // Теор. основы хим. технологии. – 1997. – Т. 31, № 3. – С. 265–268.

37. Захаров, М. К. Влияние структуры потоков на размеры химического реактора в случае реакций нулевого порядка / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн // Теор. основы хим. технологии. – 1991. – Т. 25, № 1. – С. 51–55.

38. Левеншпиль, О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль. – М. : Химия, 1969. – 621 с.

39. Захаров, М. К. Балансовая и смешанная задачи теплопереноса при гравитационном течении жидкостных пленок / М. К. Захаров, В. Г. Айнштейн // Теор. основы хим. технологии. – 1995. – Т. 29, № 2. – С. 129–135.

40. Захаров, М. К. Процессы переноса в аппаратах пленочного типа : дисс. ... докт. техн. наук : 05.17.08: защищена 29.03.94. : утв. 10.06.94. / Захаров Михаил Константинович. – М., 1994. – 448 с.

41. Воронцов, Е. Г. Теплообмен в жидкостных пленках / Е. Г. Воронцов, Ю. М. Тананайко. – Киев : Техника, 1972. – 194 с.

42. Гельперин, Н. И. О распространенной методике обобщения экспериментальных данных по тепло- и массообмену / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн // Хим. промышленность. – 1966. – № 1. – С. 44–49.

43. Гельперин, Н. И. К вопросу о распространенной методике обобщения экспериментальных данных по тепло- и массообмену / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн // Хим. промышленность. – 1966. – № 3. – С. 209–214.

44. О соотношении пропускных способностей стадии теплопереноса / В. В. Захаренко, Т. И. Процкая, В. В. Носова, В. Г. Айнштейн // Теор. основы хим. технологии. – 1988. – Т. 22, № 3. – С. 368–372.

45. Айнштейн, В. Г. О лимитирующих стадиях в процессах массопереноса при течении тонких пленок / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров // Теор. основы хим. технологии. – 1996. – Т. 30, № 6. – С. 624–633.

46. А. с. 1699593 СССР, МКИ Многотрубный пленочный реактор / Б. С. Кругляков, В. В. Булавцев, М. К. Захаров, В. А. Афонин В. А. (СССР). – № 1699593; заявлено 15.12.89 ; опубл. 23.12.91, Бюл. № 47.

47. Захаров, М. К. Процессы переноса в пленочных аппаратах / М. К. Захаров, В. В. Булавцев // Ученые записки МИТХТ. – 2002. – Вып. 6. – С. 42–54.

48. Захаров, М. К. Анализ структуры потоков в аппаратах при ламинарных режимах течения неньютоновских жидкостей / М. К. Захаров // Теор. основы хим. технологии. – 2006. – Т. 40, № 3. – С. 343–348.

49. Захаров, М. К. Анализ структуры потоков при совместном течении двух пленок взаимнонерастворимых жидкостей по вертикальной поверхности с учетом воздействия газового потока / М. К. Захаров, А. Ю. Комков, Д. М. Павленко // Вестник МИТХТ. – 2008. – Т. 3, № 4. – С. 70–74.

50. Захаров, М. К. Анализ структуры потоков при совместном течении двух пленок неньютоновских жидкостей по вертикальной поверхности с учетом воздействия газового потока / М. К. Захаров, А. Ю. Комков // Теор. основы хим. технологии. – 2009. – Т. 43, № 1. – С. 37–46.