

Вакуумный концентратор микрообъемов жидкости

Аннотация

Статья посвящена исследованию процесса концентрирования микрообъемов жидкости при взаимодействии потока газа с парами испаряемой жидкости. Такое взаимодействие приводит к значительному увеличению скорости испарения жидкости. Рассмотрены вопросы теоретического, численного и экспериментального исследования факторов, влияющих на процесс испарения жидкости из пробирки в концентраторе жидкостей.

Введение

С каждым годом увеличивается значимость научных исследований в областях, связанных со здоровьем и жизнедеятельностью человека. Необходимость своевременного выявления присутствия в организмах новых вирусов и бактерий и нахождения лекарства от них отчетливо отражается в направлении развития современных технологий. Задачей анализа образцов является определение содержания тех или иных элементов в исследуемых материалах. Один из этапов такого анализа – пробоподготовка. Оборудование для подготовки проб является неотъемлемой частью оснащения клинико-диагностических лабораторий (КДЛ). Цель пробоподготовки – разрушение образца до такого состояния, которое обеспечивает высокую (близкую к 100 %) вероятность определения наличия или отсутствия соответствующих компонентов при дальнейших микробиологическом, бактериологическом, биохимическом и других анализах [1]. Чаще всего в результате процесса пробоподготовки образуется смесь микроколичества разрушенного образца и значительно большего объема растворителя. Для проведения последующих исследований с необходимой скоростью и точностью получаемого результата необходимо максимально сократить количество растворителя.

Один из самых эффективных способов удаления жидких растворителей из раствора – испарение [2]. В результате обзора работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов испарения со свободной поверхности жидкости (например [3], [4]), было определено, что основные параметры, влияющие на скорость испарения жидкости, – это температура жидкости и изменение (градиент) концентрации пара в направлении, перпендикулярном свободной поверхности жидкости. Поскольку изменение температуры жидкости при концентрировании многих проб возможно только в достаточно узком диапазоне, существенного увеличения скорости испарения можно добиться за счет увеличения градиента концентрации. Повышения градиента концентрации можно достичь двумя способами: увеличением парциального давления паров жидкости у межфазной границы за счет понижения общего давления (принцип действия вакуумных концентраторов) или сокращением расстояния между точками с максимальной и минимальной концентрацией паров (принцип действия пневматических концентраторов). Наиболее эффективными, по мнению авторов, являются пневматические концентраторы, поскольку взаимодействие потока рабочего газа с жидкостью позволяет не только повысить скорость испарения, но и обеспечить подогрев жидкости от рабочего газа [5].

В статье освещены вопросы моделирования процессов испарения жидкости в разрабатываемом авторами концентраторе микрообъемов жидкости с целью выявления факторов, позволяющих максимально сократить продолжительность этапа концентрирования образца, а также определить допустимые диапазоны их изменения и конфигурацию прибора, которые позволят исключить возможность перекрестного загрязнения (контаминации) проб.

Теоретическое исследование

При разработке нового концентратора авторы основывались на принципах работы существующих концентраторов и максимально учитывали их недостатки, в частности не позволяющие использовать эти приборы при выпаривании жидкости в условиях лабораторий различной оснащенности.

Первым фактором, влияющим на скорость испарения жидкости из пробирок, является направление течения потока рабочего газа относительно границы раздела фаз. Отклонение направления потока рабочего газа от перпендикулярного оси пробирки с жидкостью позволяет значительно сократить расстояние между точками с максимальной и минимальной концентрациями пара (толщину зоны градиента концентрации).

Вторым фактором, определяющим скорость испарения, является наличие в рабочем газе паров испаряемой жидкости. Поскольку в предлагаемом авторами концентраторе необходимо было использовать воздух, а многие исследуемые растворы – водные, влажность лабораторного воздуха являлась существенным фактором, влияющим на величину градиента концентрации пара. Для сокращения содержания паров в рабочем газе необходимо использовать фильтры и осушители.

Скорость и давление рабочего газа также оказывают существенное влияние на работу концентратора. Увеличение давления рабочего газа приводит к росту скорости его потока, что влечет за собой более быстрый захват молекул пара с поверхности жидкости, а также смену режима диффузии с молекулярного на турбулентный, который является более эффективным [6]. Однако значительное повышение давления сокращает парциальное давление паров жидкости и может привести к выбросу капель жидкости из пробирки.

Повышение температуры жидкости, которого можно достигнуть как подогревом самой пробирки, так и подогревом рабочего газа, приводит к увеличению концентрации паров на границе раздела фаз. Однако применение этого способа интенсификации процесса испарения затруднено вероятностью разрушения исследуемых образцов под действием высоких температур.

Математическое описание процесса испарения с поверхности жидкости в ячейке концентратора основывалось на законе Дальтона, описывающем связь парциальных давлений компонентов парогазовой смеси с полным ее давлением, и законе Фика, позволяющем определить зависимость потока массы пара с единичной поверхности от градиента концентрации. Основной проблемой при описании испарения жидкости со свободной поверхности при взаимодействии с потоком рабочего газа является определение толщины зоны градиента концентрации.

В случае течения рабочего газа параллельно границе раздела фаз значением этой толщины можно с достаточной степенью точностью считать расстояние от среза пробирки до поверхности жидкой фазы, поскольку при подобном характере течения движение парогазовой смеси внутри пробирки обусловлено лишь потоком Стефана. При отклонении направления потока от параллельного границе раздела фаз газ начинает проникать в пробирку, образуя там вихревые течения, перемешивающие парогазовую смесь и удаляющие ее из пробирки.

Для определения характера течения в рабочей ячейке необходимо было составить и решить следующие уравнения:

- уравнение движения потока рабочего газа

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (1)$$

где ν – скорость; ρ – плотность; p – давление; ν – кинематическая вязкость жидкости; t – время;

- уравнение неразрывности рабочего газа

$$\text{div}(\rho \vec{v}) = 0; \quad (2)$$

- уравнение энергии течения рабочего газа

$$\rho \left(v_x \frac{\partial h}{\partial x} + v_y \frac{\partial h}{\partial y} + v_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \frac{\delta}{\delta y} \left[h \rho \left(1 - \frac{1}{Le} \right) \frac{\partial c}{\partial y} \right]. \quad (3)$$

Решение данных уравнений, дополненных граничными условиями, для рабочей ячейки концентратора жидкостей в совокупности с уравнениями, описывающими процессы диффузии паров, позволит получить распределение концентрации паров жидкости в ячейке.

Решение составленных уравнений, описывающих течение газа в рабочей ячейке, диффузию пара из жидкости и их взаимодействие, невозможно осуществить аналитическими методами для предлагаемой геометрии. Поэтому были применены численные методы, основанные на принципе разбиения расчетной области на множество маленьких примитивов (сетку) и преобразовании исходных дифференциальных уравнений в линейные для каждого из элементов сетки. Общий вид расчетной области и ее сетки представлен на *рис. 1*.

Расчетная область представляет собой цилиндрическую ячейку рабочего газа, ограниченную стенками пробирки 1, направляющей трубки 2 и поверхностью раздела фаз 3. Входная граница расчетной области 4 совпадает с поверхностью среза пробирки, выходная 5 – с верхней границей направляющей трубки. С целью сокращения объема вычислительных процедур при расчетах используется только четверть данной области, что не влияет на точность решения. С помощью сеточного построителя ICEM CFD данная область была разбита на множество гексаэдров. Для более точного описания течения в пристеночном слое сетка локально измельчена вблизи поверхностей, граничащих с твердыми или жидкими поверхностями.

В процессе испарения жидкости положение нижней границы расчетной области понижается. Но для упрощения проведения численного эксперимента уровень жидкости принят неизменным в течение малого промежутка времени, и проведена серия стационарных расчетов с различным положением нижней границы. В качестве граничных условий заданы статическое давление на выходе из ячейки и расход газа на входе для обеспечения лучшей сходимости расчета. На *рис. 2* представлено распределение скоростей газа внутри ячейки при различных граничных условиях на входе.

При низкой скорости потока рабочего газа он практически не проникает в пробирку и образует тем самым замкнутую полость практически неподвижного газа. Высота этой полости и является искомой толщиной зоны градиента концентрации h . По мере увеличения скорости в пробирке образуются вихревые течения, тем самым уменьшается толщина зоны гради-

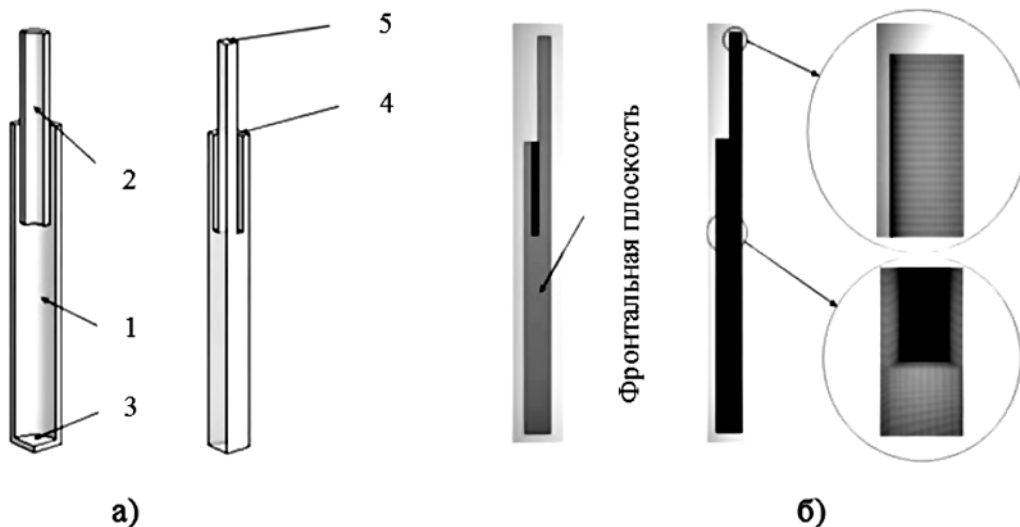


Рис. 1. Расчетная область и ограничивающая ее геометрия (а); построение сетки расчетной области (б)

ента концентрации и увеличивается массовый поток пара.

В результате проведения численного эксперимента было рассчитано поле давления рабочего газа над поверхностью жидкости, что позволило определить диапазон изменения параметров потока рабочего газа (скорости и давления), при котором отсутствует вероятность отделения капель жидкости от основного ее объема.

Экспериментальное исследование

Для проверки соответствия результатов, полученных при численных исследованиях, реальным данным была проведена серия физических экспериментов по испарению жидкости из пробирок в концентраторе жидкостей. Общий вид концентратора представлен на рис. 3. Прибор состоит из пневматического блока с закрепленными

в нем направляющими трубками и планшета для размещения пробирок [7]. Рабочий газ подается в пробирки через кольцевой зазор между ними и направляющими трубками и удаляется по последним в сборную камеру, откуда потом выбрасывается в специализированную вытяжную систему. При необходимости подогрева жидкости в пробирках концентратор может устанавливаться на термостатирующем устройстве.

Экспериментальные исследования заключались в последовательном измерении массы пробирок с жидкостями через равные промежутки времени в процессе работы концентратора. В заранее взвешенные пробирки помещали определенный объем исследуемой жидкости (0,5...1,5 мл), после чего их помещали в концентратор. Подключением побудителей расхода рабочего газа к сети постоянного тока при различных значениях напряжения

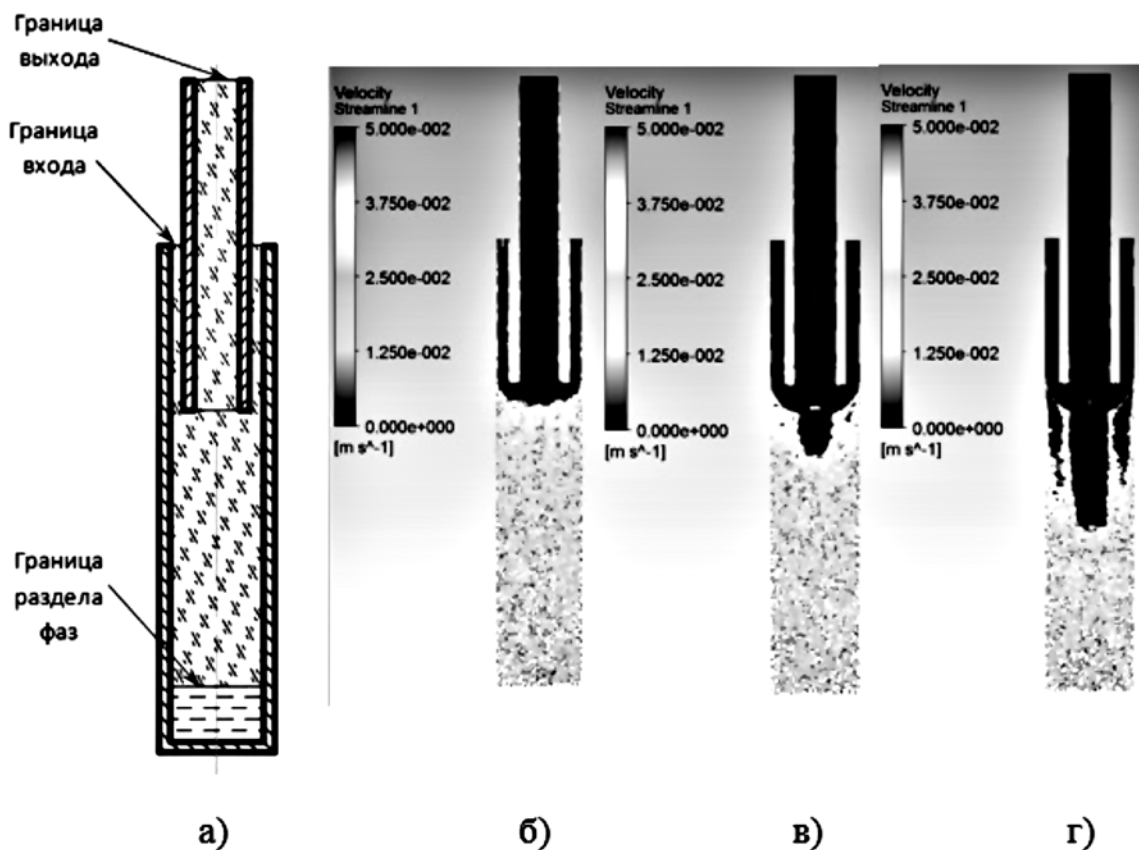


Рис. 2. Схема расчетной области (а); распределение скоростей газа в ячейке при значении скорости газа на входе: б) 0,1 м/с; в) 1 м/с; г) 2 м/с



Рис. 3. Общий вид концентратора жидкостей: без термостатирования (слева) и с термостатированием (справа)

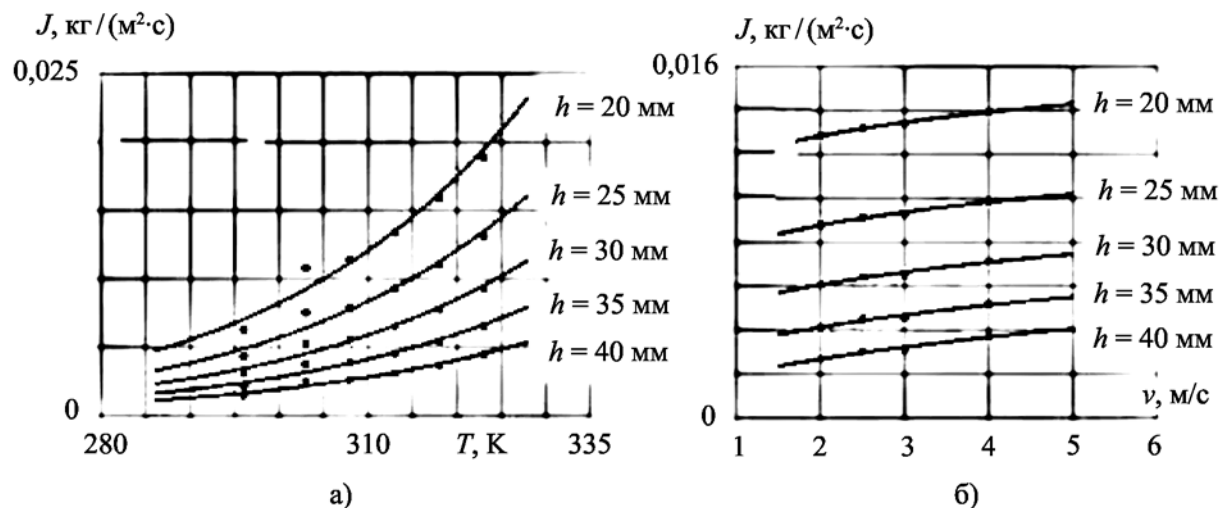


Рис. 4. Зависимость массового потока пара жидкости от: а) температуры жидкости при различных значениях h и скорости потока рабочего газа $v = 3$ м/с; б) скорости потока рабочего газа при различных значениях h и температуре жидкости $T = 40$ °С

(6...9 В) добивались различных значений давления и скорости потока рабочего газа. Измерение массы различных жидкостей в зависимости от времени процесса концентрирования при различных их температурах и давлениях рабочего газа на входе в концентратор позволило определить зависимость массового потока пара от температуры и толщины зоны градиента концентрации, которая зависит от давления и скорости потока рабочего газа.

Сравнение результатов, полученных при экспериментальном и численном исследованиях, представлено на рис. 4.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных и численных исследований были определены зависимости полного потока массы паров жидкости от ее температуры, скорости потока рабочего газа и сопоставлены между собой. Это позволило подтвердить адекватность составленной математической модели. Также была определена зависимость потока массы паров жидкости от толщины зоны градиента концентрации.

Эти данные позволили подтвердить правильность выбора конструктивной схемы концентратора жидкости, позволяющей направлять поток рабочего газа перпендикулярно границе раздела фаз, подавая его вдоль стенок пробирок, что позволяет исключить вероятность контаминации растворов. Также было выявлено, что для сокращения времени испарения жидкости, необходимо сокращать толщину зоны градиента концентрации. Это можно осуществить либо увеличением скорости потока рабочего газа, что приведет к более глубокому проникновению вихревого течения в пробирки, либо перемещением направляющих трубок к поверхности раздела фаз в процессе испарения.

Широкое распространение подобный концентратор может получить в КДЛ, в которых отсутствует необходимость применения высокопроизводительных установок. Для определения оптимального (быстрого и безопасного для образца) режима работы устройства с различными жидкостями возможно разработать рекомендации по использованию концентратора жидкостей.

Список литературы:

1. Карпов Ю.А., Савостин А.П. Методы пробоотбора и пробоподготовки. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 244 с.
2. Мицуике А. Методы концентрирования микроэлементов в неорганическом анализе. – М.: Химия, 1986. 151 с.
3. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. – М.: Академия наук СССР, 1958. 93 с.
4. McBain G.D., Shuercke H., Harris J.A. Evaporation from an open cylinder // Heat and mass transfer. 2000. № 43. PP. 2117-2128.
5. Борисов Ю.А., Чернышев А.В., Друца В.Л. Исследование и математическое моделирование рабочих процессов вакуумного концентрирования реакционных смесей // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2012. СВ № 4. С. 45-54.
6. Кафаров В.В. Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1972. 496 с.
7. Борисов Ю.А., Чернышев А.В., Орлов С.А., Друца В.Л. Микропариватель / Патент № 149825 РФ. 2015. Бюл. № 2.

Юрий Александрович Борисов,
аспирант,
Андрей Владимирович Чернышев,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра Э5 «Вакуумная и компрессорная техника»,
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва,
e-mail: boricovyu@gmail.com