

Разработка пневмовакуумной испарительной установки концентрирования реакционных смесей

© Ю.А. Борисов, А.В. Чернышев, А.В. Полынков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены вопросы исследования рабочих процессов в установке вакуумного концентрирования химических и молекулярно-биологических образцов. Исследовано влияние направленности потока рабочего газа по отношению к границе раздела фаз на процесс испарения. Проведен обзор научно-технической и патентной литературы с целью выявления высокоэффективных схем концентрирования, существующих в настоящее время. Проведено обоснование выбора схемы установки. Разработан и испытан экспериментальный образец пневмовакуумного концентратора реакционных смесей. Определены зависимости объема испарившейся жидкости от времени при различных температурах раствора, скорости и давления рабочего газа. Рассмотрены вопросы математического моделирования рабочих процессов в пневмовакуумной испарительной установке. Составлена математическая модель, результаты расчетов которой хорошо согласуются с результатами экспериментов на опытном образце пневмовакуумного концентратора, а также с данными, опубликованными изготовителями аналогичных установок.

Ключевые слова: концентрирование, испарение, микрообъемы вещества, математическая модель, смесь, рабочие процессы.

При проведении исследований в таких областях естественных наук, как молекулярная биология, биохимия и геновая инженерия, связанных с изучением свойств микроколичеств вещества, из исходной пробы необходимо выделить максимальное количество исследуемого материала с минимальным количеством примесей. В дальнейшем исследуемый материал помещают в буферный раствор. Объем раствора, получившийся в результате этих действий, в сотни раз превышает объем исследуемого материала. В большинстве случаев при проведении последующих процедур буферный раствор удаляется из смеси.

Методы повышения концентрации исследуемого материала из раствора и оборудование, применяемое для этих целей, приведены в работах [1, 2]. Это оборудование получило широко распространенное название — концентраторы.

После проведенного анализа существующих концентраторов, их достоинств и недостатков было предложено несколько схем устано-

вок, подробно описанных в [1–3]. Расчетно-теоретические исследования рабочих процессов, предложенных схем установок и экспериментальные исследования макетных образцов подтвердили их работоспособность. Однако выяснилось, что получившаяся величина массового потока пара испаряемого буферного раствора ниже значения, требуемого для концентрирования реакционных смесей.

На основе анализа полученных результатов было принято решение изменить конфигурацию проточной части испарительной установки, чтобы добиться максимального градиента концентрации пара на минимальном расстоянии h . Для этого эффекта было предложено сменить направление потока рабочего газа на перпендикулярное поверхности раздела фаз. В этом случае высокоскоростной поток рабочего газа захватывает молекулы пара в непосредственной близости от межфазной границы, что значительно сокращает расстояние между точками максимальной c_{1c} и минимальной $c_{1\infty}$ концентраций пара. Схемы течения рабочего газа представлены на рис. 1.

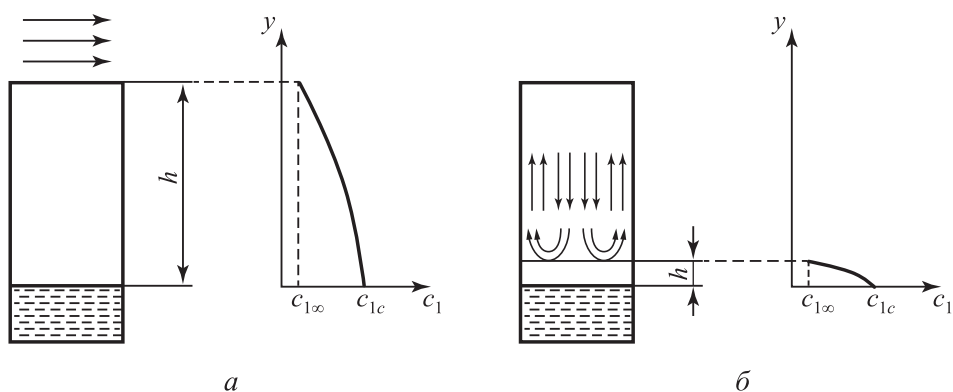


Рис. 1. Схемы течения газа в рабочей ячейке:

а — параллельно межфазной границе; *б* — перпендикулярно межфазной границе

Обзор научно-технической и патентной литературы показал, что установки, подобные по принципу действия концентратору предлагаемой схемы, производятся зарубежными компаниями Stuart (UK) и Techne (USA). Они представляют собой твердотельный нагреватель, в который устанавливаются стеклянные пробирки объемом 15 мл. Сверху над пробирками располагается газовый блок с закрепленными в нем иглами. Блок устанавливается таким образом, чтобы иглы погружались в пробирки, но были на достаточном расстоянии от границы раствора. Через иглы в пробирки подается инертный газ из баллона через регулятор давления, обеспечивающий на выходе давление 14 кПа и расход около 15 л/мин. Общий вид установки представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид концентратора проб

В [4, 5] представлены результаты экспериментальных исследований. В частности, на рис. 3 изображен график значений количества испарившегося водного раствора спирта v в зависимости от времени t и при различном процентном содержании спирта при температуре раствора $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Однако данная схема имеет ряд существенных недостатков. Основным из них является использование в качестве рабочего тела

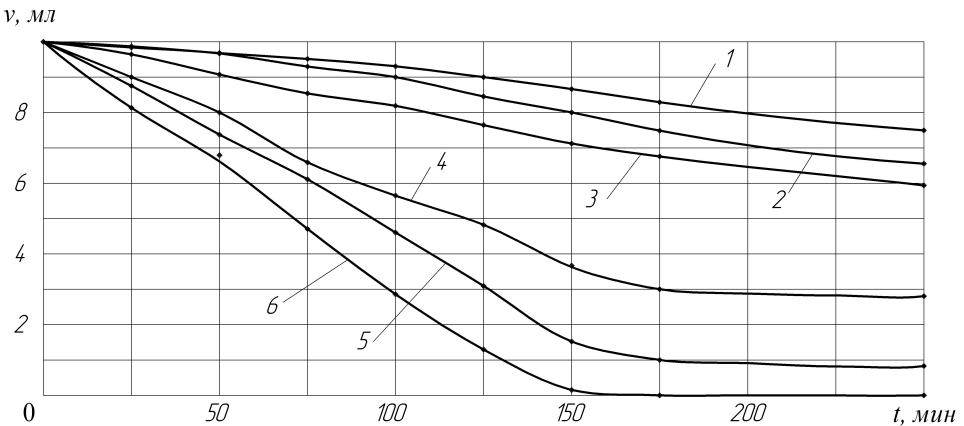


Рис. 3. Зависимость объема водного раствора спирта в пробирке от времени при различном % содержании этилового спирта в растворе:
 1 — 0%; 2 — 20%; 3 — 40%; 4 — 60%; 5 — 80%; 6 — 100%

инертного газа. Применение тонких игл также уменьшает производительность установки.

Целями данной работы являются: создание концентратора реакционных смесей с более быстрыми темпами испарения буферного раствора и высокими эксплуатационными характеристиками; экспериментальное определение зависимостей потока массы испаряющейся из цилиндра жидкости от параметров процесса испарения. В работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса испарения жидкости из пробирки, рассмотрены способы интенсификации массоотдачи.

В разработанной установке предлагается удалять пары жидкости потоком рабочего газа, прошедшего предварительную очистку и направленного перпендикулярно к границе испаряемой жидкости, как показано на рис. 1, б. Для предотвращения возникновения процесса сублимации раствора к нему подводится теплота через стенки пробирок от твердотельного термостата. Общий вид макетного образца установки представлен на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид установки

Следует отметить, что при смене направления потока рабочего газа по отношению к межфазной границе особое влияние начинает оказывать характер диффузии пара. В работе [6] отмечено, что существуют два типа диффузии: молекулярная и турбулентная. При увеличении скорости потока рабочего газа возрастает влияние турбулентной диффузии, частицы пара начинают активно перемешиваться с газом и скорость испарения многократно возрастает.

Исходными зависимостями для построения математической модели процесса испарения являются [1]:

— закон Дальтона: $p = p_{1c} + p_{2c}$, (1)

где p — давление смеси пара и воздуха; p_{1c} — парциальное давление пара около поверхности раздела фаз; p_{2c} — парциальное давление воздуха около поверхности раздела фаз;

— закон Фика: $j_{1c} = -\rho D \left(\frac{\partial c_1}{\partial n} \right)_c$, (2)

где c_1 — концентрация пара; ρ — плотность смеси; D — коэффициент диффузии;

— закон Ньютона — Рихмана: $q_c'' = \alpha (t_c - t_\infty)$, (3)

где q_c'' — удельный тепловой поток от межфазной границы в паровоздушную среду в единицу времени; α — коэффициент теплоотдачи; t_c — температура границы раздела фаз; t_∞ — температура на расстоянии h от границы раздела фаз;

— формула Стефана: $J_1 = \frac{pM_1D}{RTh} \ln \left(\frac{1 - p/p_{1\infty}}{1 - p/p_{1c}} \right)$, (4)

где J_1 — полный поток массы; M_1 — молярная масса пара; R — универсальная газовая постоянная; T — температура смеси; $p_{1\infty}$ — давление паров на расстоянии h от границы раздела фаз.

Проверка адекватности математической модели, созданной на базе приведенных выше исходных зависимостей, проводилась путем сопоставления результатов ее решения с результатами экспериментальных исследований по испарению микроколичеств жидкости из пробирок. Для этой цели в ходе исследовательской работы изготовлен экспериментальный стенд с помощью технологии быстрого прототипирования [7], расчетная схема которого соответствует составленной математической модели. Предложенная методика эксперимента позволяет с достаточной степенью точности измерить скорость испарения раствора из пробирок.

В процессе эксперимента было проведено исследование скорости испарения жидкости в зависимости от температуры жидкости T , давления $p_{2\infty}$ и скорости $v_{2\infty}$ рабочего газа и расстояния h от границы раздела фаз.

Для определения расхода G_B и давления p_B рабочего газа в полости над рабочей ячейкой использовались характеристика побудителя расхода и гидравлическое сопротивление проточной части испари-

тельной установки. Для определения коэффициента гидравлического сопротивления проточная часть установки разбивалась на несколько элементарных участков, значения коэффициентов сопротивления которых приведены в работе [8], а затем эти значения суммировались. На рис. 5 показана зависимость давления рабочего газа (кривые 1...3) от его расхода на выходе побудителя расхода газа при различных значениях напряжения и характеристики гидравлического сопротивления системы (кривые 4, 5) при значениях $h = 10$ и 5 мм соответственно. Значения p_v и G_v в точках пересечения этих графиков приняты за параметры потока в системе.

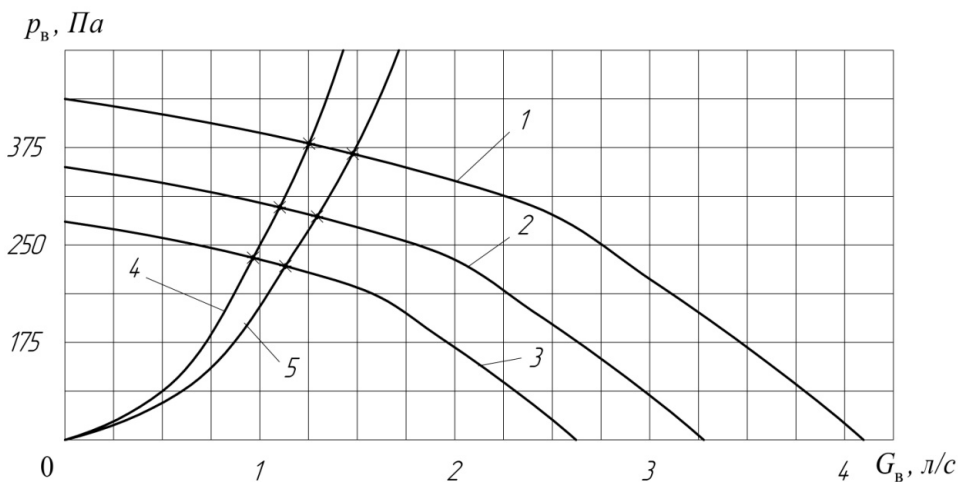


Рис. 5. Характеристики сопротивления системы при различном значении h и зависимости давления рабочего газа от его расхода на выходе побудителя расхода газа при рабочих напряжениях:

1 — 12 В; 2 — 8 В; 3 — 4 В; характеристики сопротивления системы при различных значениях h : 4 — $h = 5$ мм; 5 — $h = 10$ мм

Эксперимент для определения значения потока пара из пробирки проводился в следующем порядке: в ячейки термостатирующего устройства помещали одинаковые по массе пробирки, которые были предварительно взвешены на высокоточных (с разрешением 0,001 г) весах. В каждую пробирку помещали определенное количество (от 200 до 500 мкл) дистиллированной воды, после чего измеряли массу пробирки с жидкостью и расстояние h . С помощью термостата закрытые пробирки нагревались до значений температуры 20, 30 и 35 °С. После стабилизации температуры пробирки открывали, включали установку и засекали время. Через равные промежутки времени измеряли массу пробирок, в результате чего была определена скорость испарения жидкости в зависимости от ее уровня. Зная диаметр d пробирки и скорость испарения жидкости, можно определить зна-

чение полного потока массы J_1 для каждого из исследуемых случаев. На рис. 6 и 7 представлены экспериментальные данные, полученные в результате продувки пробирок при различном расстоянии h . Средний массовый поток пара из пробирки при температуре 30 °С составляет 0,35 и 0,42 мл/(см² · ч) при значениях h 10 и 5 мм соответственно.

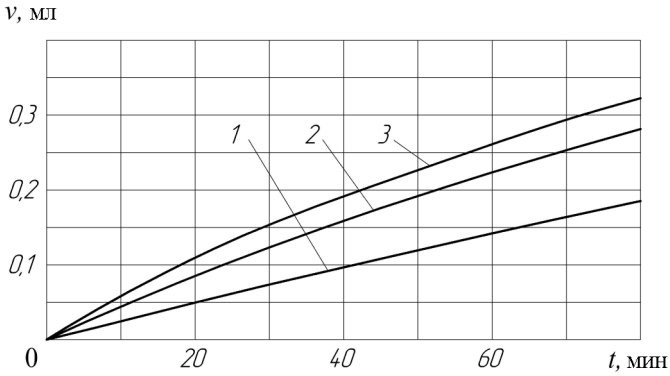


Рис. 6. Зависимость объема испарившейся жидкости от времени при значении $h = 5$ мм при температурах жидкости:
1 — 20 °С; 2 — 30 °С; 3 — 35 °С

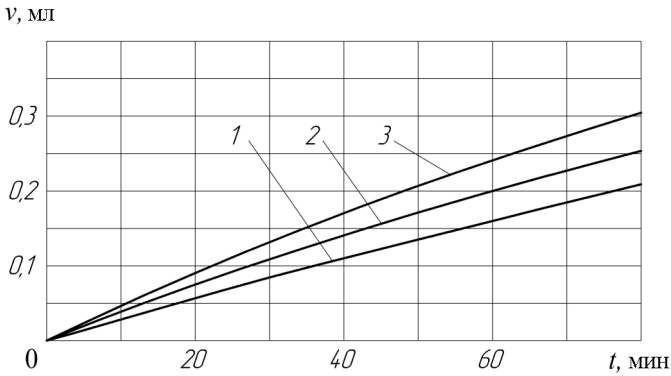


Рис. 7. Зависимость объема испарившейся жидкости от времени при значении $h = 10$ мм при температурах жидкости:
1 — 20 °С; 2 — 30 °С; 3 — 35 °С

Полученные в ходе обработки экспериментальных данных значения массового потока пара хорошо согласуются с результатами расчетно-теоретических исследований, а также данными компании Techne [4, 5].

Также на созданной установке были проведены исследования по определению влияния параметра h и расхода рабочего газа G_b и их сочетания, которые не приводят к выплескиванию испаряемой жидкости.

В ходе научно-исследовательской работы были предложены схемы испарительных установок, в основе работы которых лежит удаление испаряемой жидкости потоком рабочего газа. Результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований показали недостаточную эффективность продувки рабочих ячеек потоком газа, параллельным межфазной границе. В ходе дальнейших исследований был проведен поиск альтернативных решений и разработана установка, позволяющая удалять пары жидкости потоком рабочего газа, направленного перпендикулярно границе раздела фаз. Создан экспериментальный образец концентратора. Получены экспериментальные и расчетно-теоретические характеристики работы созданной установки при различных температурах жидкости и параметрах потока рабочего газа. Адекватность математической модели подтверждается сопоставлением результатов расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Исследование и математическое моделирование рабочих процессов вакуумного концентрирования реакционных. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, спец. вып. № 4, с. 45–54.
- [2] Борисов Ю.А. Моделирование рабочих процессов в установке вакуумного концентрирования. *Сб. трудов 4-й всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»-2011, 26–29 сентября 2012 г.* Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, с. 180–181.
- [3] Борисов Ю.А., Чернышев А.В. Разработка пневмовакuumной испарительной установки на основе газоструйного насоса с применением технологии 3D-моделирования и быстрого прототипирования. *Сб. статей Молодежной научно-инженерной выставки «Политехника»-2011. 21–24 ноября 2011 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана.* Москва, НТА «АПФН», 2011. Сер. «Профессионал», с. 43–46.
- [4] http://www.biostep.de/static/files/1_laborgeraete/seite_6/probenkonzentrator.pdf
- [5] <http://www.biostep.de/DocumentDownloadServlet?docid=70>
- [6] Кафаров В.В. *Основы массопередачи.* Москва, Высшая школа, 1972, 496 с.
- [7] Разработка вакуумного и пневмоэлектромеханического оборудования с применением технологии быстрого прототипирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № 3, с. 3–16.
- [8] Идельчик И.Е. *Справочник по гидравлическим сопротивлениям.* Москва, Машиностроение, 1992, 672 с.

Статья поступила в редакцию 31.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Борисов Ю.А., Чернышев А.В., Полинков А.В. Разработка пневмовакuumной испарительной установки концентрирования реакционных смесей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 5. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/756.html>

Борисов Юрий Александрович окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2011 г. Аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана по специальности «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты». Автор 8 печатных работ. Область научных интересов: моделирование рабочих процессов различных систем и разработка вакуумной техники.

Чернышев Андрей Владимирович родился в 1952 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области математического моделирования и исследования рабочих процессов, разработки и проектирования вакуумного и электропневматического оборудования различного назначения. e-mail: av-chernyshev@yandex.ru

Полынков Алексей Викторович родился в 1955 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1980 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда работ в области разработки и испытаний навигационных акселерометров. Область научных интересов: прецизионные электронные устройства элементов приборов и систем.