

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО МИНИАТЮРНОГО СЕМИЛУЧЕВОГО ИМПУЛЬСНОГО КЛИСТРОДА ДЛИННОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ СВЧ ДИАПАЗОНА**

**\*Е.И. Булдаков, В.А. Царев**

СГТУ, Саратов, Политехническая, 77; \*ФГУП "НПП "Алмаз", Саратов, Панфилова, 1. E-mail: Evgenii-student@rambler.ru

Разработка надежных и долговечных СВЧ усилителей с предельными выходными параметрами во многом определяется способностью электронно-оптических систем (ЭОС) формировать электронные пучки с заполнением пролетного канала на уровне 0,7-0,8 и коэффициентом токопрохождения на коллектор на уровне 98-99%. К структуре электронного пучка также предъявляются особые требования, которые являются принципиальными для получения в приборах высоких значений КПД и коэффициента усиления [1].

В связи с этим встает задача проектирования и расчета на ПЭВМ электронно-оптических систем, формирующих аксиально-симметричные пучки.

Постановка задачи

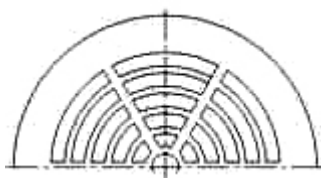
Требуется разработать ЭОС для миниатюрного семилучевого импульсного клистрода с оптимальной геометрией электродов, обеспечивающей необходимый ток эмиссии катодов и траектории движения электронов.

В данной работе для расчета использовалась программа КИТ, разработанная в СГТУ [2]. Эта программа позволяет быстро и качественно производить расчет и обладает гибким интерфейсом.

Моделирование ЭОС в программе КИТ.

Расчетный модуль основан на использовании двумерной математической модели. Расчет по программе производится для однолучевой пушки, а окончательный результат получается умножением полученных значений на семь.

В меню “Правка” задается геометрия электродов и их потенциалы. В качестве эмитирующей поверхности используется сферический катод радиусом 6.35 мм и радиусом кривизны 7 мм. Управляющая сетка располагается на расстоянии 0.17 мм от катода и имеет геометрию, представленную на рис. 1.

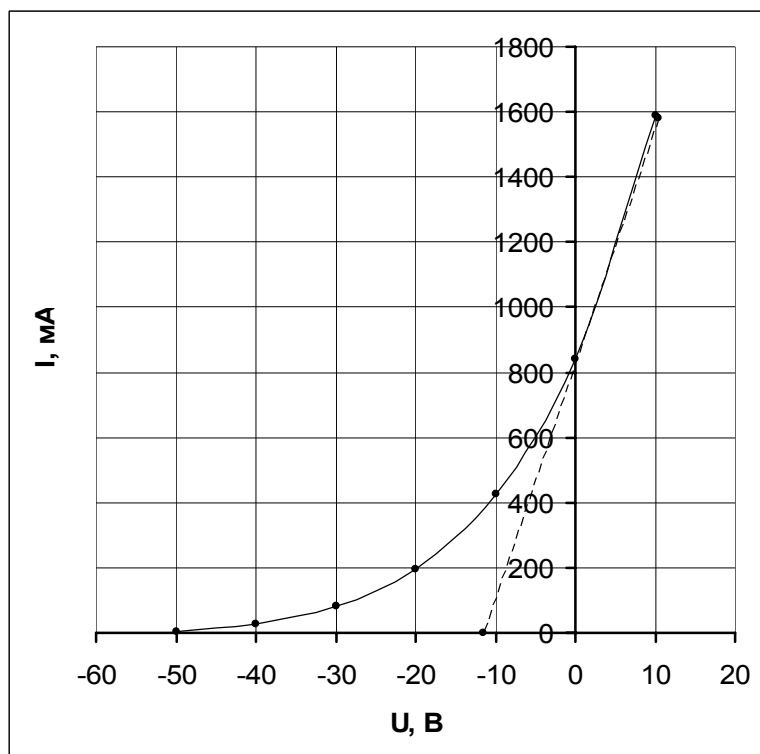


**Рис. 1.** Геометрия сетки

Для наилучшего прохождения электронного пучка подбирается магнитное поле. Оптимальное магнитное поле для проектируемой ЭОС составляет 0.006 Тл.

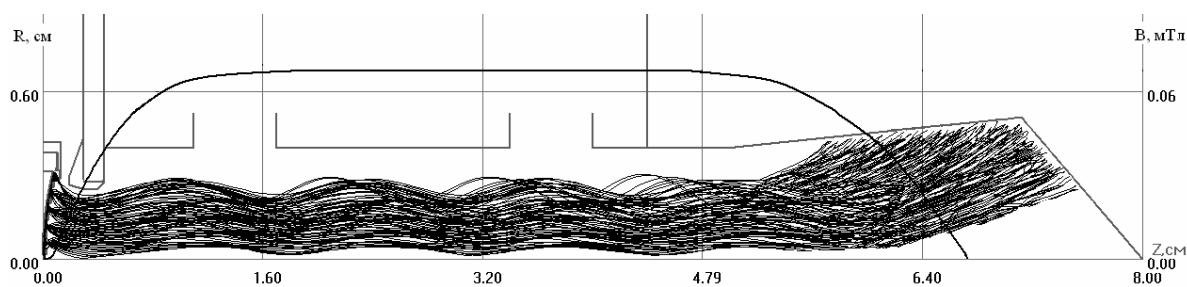
Одиночная пушка формирует пучок с микропервеансом  $1.5 \text{ мА} / B^{3/2}$  и коэффициентом заполнения канала 0.675. Максимальный ток катода при нулевом

потенциале на сетке равен 120 мА. Величина запирающего напряжения составила -11.5 В при ускоряющем напряжении 1770 В (рис. 2).



**Рис. 2.** Анодно-сеточная характеристика.

Проводился траекторный анализ всей ЭОС от катода до коллектора. Подбранное распределение однородного магнитного поля обеспечивало 100%-е токопрохождение пучка с минимальными пульсациями.



**Рис. 3.** Траектории электронов

## Заключение

Рассчитанная модель ЭОС может быть использована в семилучевом клин-строде. Прибор с такими параметрами может заменить существующие ламповые аналоги (тетроды и триоды), так как обладает лучшими показателями по долговечности, КПД и простоте изготовления.

### **Литература**

1. Григорьев Ю. А. Электронно-оптические системы с сеточным управлением / Григорьев Ю. А., Правдин Б. С., Шестеркин В. И. // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Выпуск 7. Москва: ЦНИИ “Электроника”, 1987. С. 2-3
2. Кармазин В.Ю. Моделирование и расчет электронно-оптических систем / Кармазин В.Ю., Царев В.А. // Труды Четвертой Междунар. науч.-техн. конф. Ульяновск, 2001. С. 254-257.
3. Кармазин В.Ю. Математическое моделирование режимов работы катодно-сеточных узлов в многолучевом клистроне / Кармазин В.Ю., Царев В.А. // актуальные проблемы электронного приборостроения. Междунар. Науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2002. С. 123-127

### **РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА В ПРИЛОЖЕНИИ К СЛОЖНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ**

***М.А. Асташина, \*С.Б. Нестеров, \*Ю.К. Васильев***

*Московский Энергетический Институт (ТУ), Москва, Красноказарменная, 16*

*\*ФГУП “НИИВТ им. С. А. Векшинского”, Москва, Нагорный пр-д, 7*

*E-mail: dualism@maryno.net*

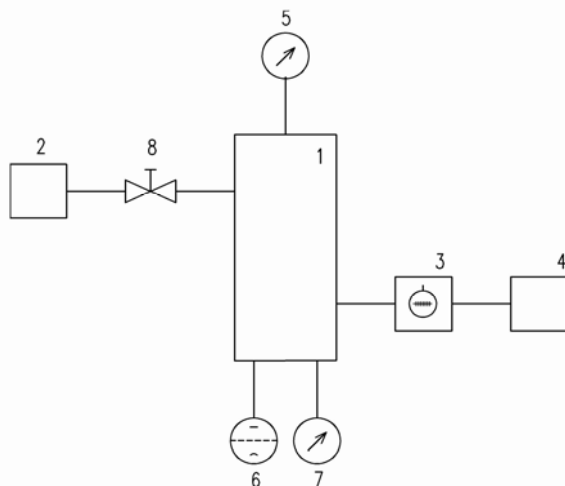
Разработка вакуумных систем для больших технологических установок, например, ускорительно-накопительных комплексов, установок физики твердого тела и т. п. является сложной задачей, при решении которой необходимо учитывать ряд факторов, характерных именно для таких систем, таких как: необходимость откачки больших объемов, существенное влияние газовыделения, структурная сложность и т. п.

Одним из наиболее достоверных способов изучения влияния таких сложных факторов как газовыделение являются экспериментальные исследования. Однако, проведение исчерпывающих экспериментальных исследований больших вакуумных систем затруднено по ряду технологических и экономических причин. Поэтому основным источником экспериментальных данных являются исследования уменьшенных модельных установок. В рамках данной работы разработан и создан экспериментальный стенд (рис. 1), состоящий из модельной вакуумной камеры, средств откачки и измерительной аппаратуры, с помощью которого решен ряд задач:

- экспериментальные исследования характеристик газовых потоков, формируемых в результате газовыделения со стенок камеры;
- изучение влияния типа присоединения откачного оборудования на его характеристики.

Кроме того, с помощью различных подходов (традиционным методом [1-2], методом пробной частицы [3] и с использованием соотношений, предложенных исследовательским отделом компании Pfeiffer [4]) проанализировано не-

сколько вариантов компоновки вакуумной системы технологической установки и выработаны рекомендации по учету основных факторов, оказывающих влияние на вакуумные характеристики технологических установок как на этапе предварительной откачки, так и в процессе работы.



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда

- 1 – вакуумная камера;
- 2 – спиральный насос XDS10;
- 3 – турбомолекулярный насос EXT255;
- 4 – мембранный насос XDD1;
- 5 – широкодиапазонный датчик WRG серии ACTIVE;
- 6 – ионизационный датчик AIGX серии ACTIVE;
- 7 – датчик Пирани APG серии ACTIVE;
- 8 – клапан.

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- зависимость газовыделения со стенок электрополированной нержавеющей стали имеет степенной характер;
- при расчете времени откачки необходимо учитывать газовыделение со стенок камеры, поскольку при высоком вакууме ( $P < 10^{-3}$  мбар), основной вклад в газовый поток вносит именно этот компонент;
- модельная вакуумная установка позволяет на этапе проектирования получать данные, которые можно использовать при расчете анализируемой системы, и, таким образом, увеличивать точно прогнозирования ее характеристик.

С учетом всех полученных данных показаны основные критерии, которые необходимо учитывать при разработке вакуумных систем для больших технологических установок.

## **Литература**

1. Вакуумная техника: Справочные материалы / Меньшиков М.И., Кузнецов В.И., Сорокин М.М. и др. – М.: Реклама, 1975, - 158с.
2. Вакуумная техника: Справочник / Фролов Е.С., Минайчева В.Е., и др. Под общ. Ред. Фролова Е.С, Минайчева В.Е. – М.: Машиностроение, 1985. - 360 с.
3. Основы вакуумной техники: Учебник для техникумов / Пипко А.И., Плисковский В.Я., и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. - 432 с.
4. Working with turbopumps. Introduction to high and ultra high vacuum production. Pfeiffer Vacuum Press, 2004.

## **РАСЧЕТ ПРОВОДИМОСТИ КАНАЛОВ ТИПА СОПЛА ЛАВАЛЯ В МОЛЕКУЛЯРНОМ РЕЖИМЕ**

**А.А. Райков, А.В. Бурмистров, М.Д. Бронштейн**

*КГТУ, г. Казань, ул. К. Маркса, 68. e-mail: burm@kstu.ru*

Одним из этапов расчета вакуумных систем является расчет проводимости ее элементов, выполняемый по формуле:  $U = W \cdot F_{ex} \cdot c / 4$ . Основная трудность заключается в нахождении коэффициента Клаузинга  $W$  для каналов сложной формы. В данной работе он вычисляется с помощью метода Монте-Карло. Расчет проводится в пакете Mathematica. В основу расчета были положены следующие допущения: режим течения газа в канале молекулярный, взаимодействие газа со стенками – диффузное и смешанное, скорость газа равна средней тепловой скорости движения. При смешанном законе отражения пользователь задает вероятность  $P$  того, что молекула отразится по диффузному закону, оставшаяся доля  $1-P$  отражается по зеркальному закону. Стенки исследуемых каналов получены вращением соответствующих кривых вокруг оси, находящейся от них на определенном расстоянии. Подавая на вход в канал большое число частиц, моделируя их прохождение через канал и подсчитывая долю вышедших частиц, можно узнать коэффициент Клаузинга, а следовательно и проводимость канала.

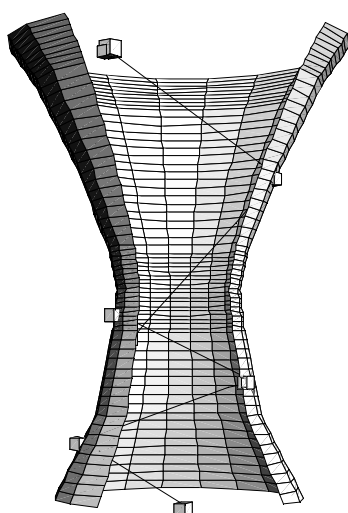
Алгоритм расчета следующий: канал разбивается на множество элементарных участков, представляющих из себя усеченные конусы. На вход первого конуса запускается частица. Рассчитывается ее траектория, с учетом диффузного отражения от стенок. Возможны переходы частицы на соседние участки. После выхода частицы с одной из сторон канала алгоритм повторяется для следующей частицы. Затем подсчитывается число вышедших в прямом направлении и вычисляется коэффициент Клаузинга.

Выбор указанных профилей для исследования диктуется потребностями совершенствования выходных каналов двухроторных и диффузионных вакуумных насосов. Меняя соотношение между геометрическими параметрами, задающими профиль стенок, можно добиться максимальной проводимости в молекулярном режиме и оптимальной – в вязкостном.

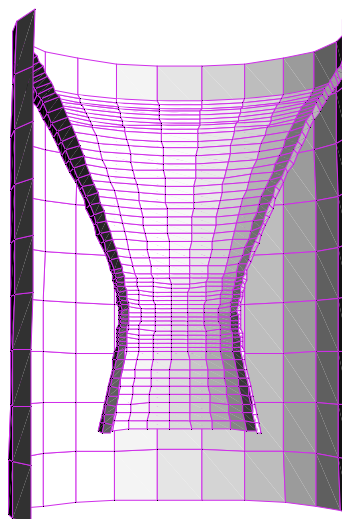
Большое теоретическое значение имеет выяснение вопроса о соотношении прямой и обратной проводимости для различных параметров, определяющих

геометрию канала и характер отражения (диффузный или смешанный). В соответствии со вторым законом термодинамики, прямой поток должен быть равен обратному, вероятности прохождения обратно пропорциональны площадям входного и выходного сечений:

$$\frac{k_{вх}}{k_{вых}} = \frac{F_{вых}}{F_{вх}}.$$



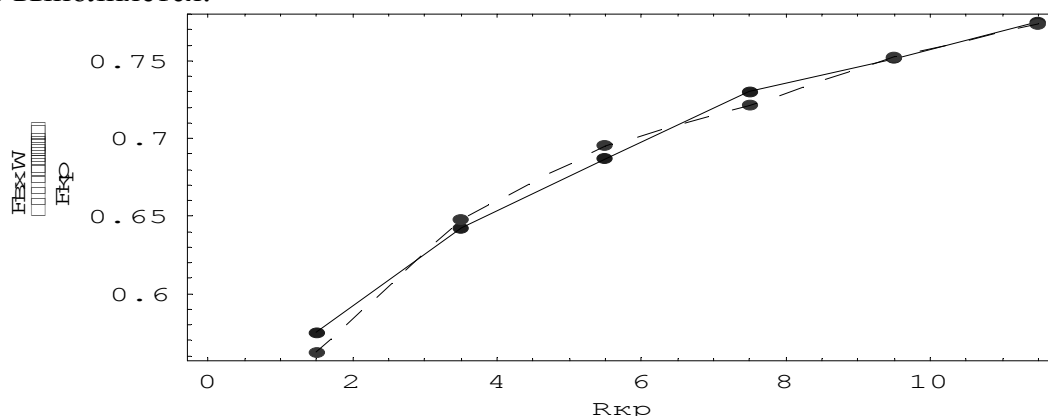
Канал 1



Канал 2

**Рис. 1.** Исследуемые каналы (пролетающие молекулы показаны кубиками).

Это соотношение проверялось в ходе численных экспериментов. Важно или дать аналитическое доказательство этому соотношению, или найти случаи, когда оно не выполняется.



**Рис. 2.** Зависимость приведенного коэффициента проводимости от радиуса критического сечения для канала 1

Проведенные численные эксперименты, показали равенство проводимостей каналов в прямом и обратном направлениях для диффузного закона отражения с погрешностью, допустимой для метода пробных частиц.

### Литература

1. Нестеров С.Б., Асташина М.А., Васильев Ю.К. Анализ различных методов расчета многокомпонентных вакуумных систем. Вакуумная техника и технология, 2002.
2. Бурмистров А.В., Ушко А.В. Расчет проводимости криволинейных каналов методом Монте-Карло. Материалы IX науч.-техн. конф. «Вакуумная наука и техника». М.:МИЭМ.2002.
3. Программный пакет *Mathematica 5.2* с приложениями от производителя пакета Wolfram Research.

## КОНТРОЛЬ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ

**А.В. Ней, К.Н. Иванов**

*Восточно-Сибирский государственный технологический университет  
Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40в. E-mail: sanedu@mail.ru*

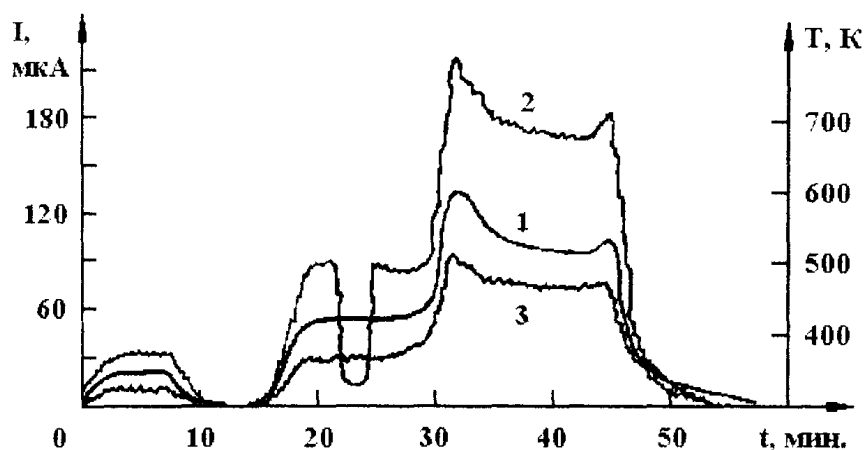
Зарегистрированы температурные зависимости эллипсометрических параметров оптически полированных образцов полупроводниковых материалов на различных стадиях очистки от адсорбированных газов и следов окисла. Очистка проводилась высокотемпературным отжигом в условиях сверхвысокого вакуума.

Цель настоящей работы - демонстрация нетрадиционного применения эллипсометрического метода - его способность к регистрации изменений температуры полупроводниковых материалов в условиях высокого вакуума, основанная на установленной прямой пропорциональной зависимости эллипсометрического параметра  $\Psi$  от температуры поверхности полупроводника.

Результатом суперпозиции напряженности электрического поля двойного приповерхностного слоя  $E_p$  и  $E_s$  - компонент электрического поля световой волны, проходящей через двойной слой, является относительное изменение отношения параметров отраженной и падающей световой волны  $E_{p,omp}/E_{p,nad}$  и  $E_{s,omp}/E_{s,nad}$ , определяемое параметром  $\Psi$ .

Меняющийся наряду с этим градиент концентрации свободных электронов вдоль нормали к поверхности, т.е. в направлении  $E_s$  - компоненты и отсутствие такового для  $E_p$  - компоненты, приводят к относительному сдвигу фаз между ними, что выражается в изменении параметра  $\Delta$ .

Измерения выполнены в цельнометаллической вакуумной ( $P_{пред} = (2 \div 3) \cdot 10^{-7}$  Па) системе, позволяющей проводить, в частности, регистрацию изменений эллипсометрических параметров со степенью покрытия их поверхностей различными адсорбатами, а также наблюдение и запись термодесорбционного масс-спектра с поверхности исследуемых образцов на любой стадии образования или удаления адсорбата. Элементы установки и способ регистрации эллипсометрических параметров также приведены выше.



**Рис. 1.** Зависимость тока ФЭУ при неизменных азимутах эллипсометра от температуры образца при разных углах падения света на образец (кривые 2 и 3).

Кривая 1 - запись температуры образца, проведенная с помощью вольфрам-рениевой термопары. Спад уровня тока ФЭУ после 20-ой минуты вызван вращением поляризатора и установкой его в исходное положение.

На рис. 1 представлена запись изменения температуры образца (монокристалл Si(111)), записанная с помощью хромель-копелевой термопары (кривая 1) и запись изменения тока фотоумножителя ФЭУ-29 для двух углов падения света на поверхность (кривые 2 и 3). Элементы эллипсометра ЛЭФ - 3М находятся в состоянии "гашения". Запись свидетельствует о наличии в достаточной степени прямой пропорциональной зависимости между током фотоумножителя и температурой поверхности образца и аналогичной зависимости эллипсометрического параметра  $\Psi$  и температуры поверхности монокристалла. Запись демонстрирует также наличие сильной угловой зависимости относительного изменения амплитуд  $E_p$  и  $E_s$  компонент светового луча эллипсометра. Кривая 2 угол падения равен  $73^\circ$ , а кривая 3 -  $65^\circ$ . Изменение тока ФЭУ вызвано изменением состояния поляризации отраженного луча, на что указывает спад уровня тока ФЭУ после 20-й минуты, когда производилось "гашение" интенсивности отраженного света изменением азимута поляризатора, соответствующего в избранной схеме измерения - азимуту  $\Psi$ . Как видно из записи чувствительность измерения составляет при указанных ранее условиях величину около  $4,2$  град/угл.мин., т.е. изменение температуры на  $4,2^\circ$  вызывает поворот осей эллипса поляризации отраженного света на одну угловую минуту, что, в свою очередь, в указанных ранее условиях, вызывает изменение тока фотоумножителя на величину, равную  $(1,0-1,5)$   $\mu\text{A}$ . Следует отметить тот факт, что чувствительность эллипсометрического параметра  $\Psi$  к изменению температуры поверхности увеличивается со степенью покрытия  $\theta$ . Прямая пропорциональная зависимость при многократных прогревах поверхности при постоянном  $\theta$  при этом сохраняется. Отжиг поверхности при более высокой температуре, приводя к уменьшению  $\theta$ , сопровождается уменьшением чувствительности, на что указывает



уменьшение углового коэффициента данной прямой пропорциональной зависимости.

В данном случае, существенным моментом является то, что влияние адсорбата в этом исключается - поляризация меняется при изменении температуры поверхности. Мы вновь имеем  $\delta\Delta$  и  $\delta\Psi$  и, в принципе, можем рассчитать изменение толщины, показателя преломления и коэффициента поглощения какой-то несуществующей пленки.

Температурную зависимость оптических постоянных можно также описывать с известными допущениями как изменение характеристик поверхностных пленок.

Разумнее, однако, представляется более простое и естественное заключение - атомы любой среды, а не только адсорбата рассматривать как определенный набор линейных гармонических осцилляторов.

## **РЕГИСТРАЦИЯ ВРЕМЕНИ УСТАНОВЛЕНИЯ РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ АДСОРБИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ТВЁРДЫХ ТЕЛ МОЛЕКУЛ**

***В.Л. Шалбаев, Ю.И. Асалханов***

*Восточно-сибирский государственный технологический университет*

*Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40в. e-mail: sanedu@mail.ru*

Цель настоящего доклада заключается в демонстрации эффективности метода эллипсометрии к исследованию процессов физической адсорбции молекул, объяснение которым может быть проведено лишь в представлении адсорбата как набора молекул, представляющих собой систему линейных гармонических осцилляторов, совершающих вынужденные колебания под воздействием электрического поля падающей световой волны. При этом суперпозиция вторичного излучения формирует поляризацию отраженного света.

Адсорбированный слой находится в поле, образованном суперпозицией энергетических уровней объема кристалла и поверхностных уровней. Молекулы, в плане адсорбции, делятся на два типа - обладающие постоянным дипольным моментом  $p_0$ , и молекулы у которых данный момент равен нулю. В отсутствие электрического поля отдельные диполи направлены в различные стороны, так что суммарный момент единицы объема адсорбированного слоя равен нулю. В кристаллическом поле решетки индуцируется добавочный дипольный момент из-за сил, действующих на электроны, что приводит к электронной поляризуемости, и неполярные молекулы приобретают дипольный момент. Электрическое поле решетки стремится выстроить отдельные диполи, создавая результирующий момент единицы объема. Если бы в адсорбированном слое выстроились все диполи, поляризация была бы чрезвычайно большой. Но этого не происходит, поскольку при обычных напряженностях полей вследствие столкновений молекул при их тепловом движении, только часть молекул слоя имеет определенную ориентацию.

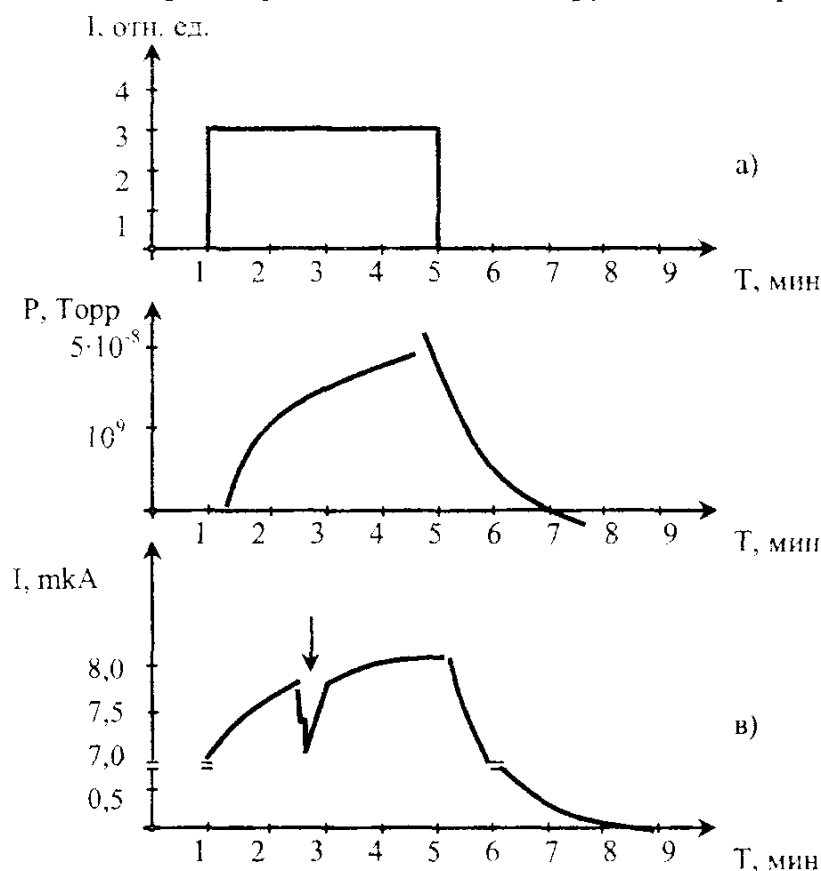


Рис. 2

На рисунке представлены результаты эксперимента.

На рис. 2(б) представлена диаграмма изменения давления газа в системе происходящего во время действия светового импульса, записанная с выхода вакуумметра ВИ-14 с датчиком МИ-27. Рис. 2.а) световой импульс; б) изменение давления в системе при освещении поверхности; в) изменение тока фотоумножителя, вызванное, изменением поляризации отраженного света (стрелка указывает момент кратковременного изменения азимута анализатора с последующей установкой его в исходное состояние).

На рис. 2(в) представлена диаграмма изменения тока фотоумножителя, находящегося в состоянии «гашения». Разрывы на кривой записи - увеличение тока фотоумножителя из-за освещения светом ртутной лампы. Высокая синхронность изменения давления газа в системе с изменением поляризации света свидетельствует, что эллипсометрический метод в состоянии регистрировать процесс изменения концентрации физически адсорбированных молекул на поверхности, непосредственно на это указывает провал, обозначенный стрелкой, на кривой записи, вызванный кратковременными изменениями азимута анализатора с последующей установкой его в исходное состояние. Видно, что после прекращения действия светового импульса и возврата давления в ячейке к исходному, ток фотоумножителя продолжает меняться еще некоторое время, после чего также принимает первоначальное

значение, но с некоторым запаздыванием, что указывает на то, что еще не все молекулы нашли состояния с минимумом потенциальной энергии.

Объяснение явления представляется следующим. Падающий свет возбуждает физически адсорбированные молекулы, к которым условно относятся молекулы, энергия связи которых с поверхностью не превышает 20 ккал/моль. Возбуждение может быть как тепловым, так и фотонным. Поскольку образцом является полупроводник, то освещенная поверхность также может способствовать десорбции. Часть молекул при освещении десорбируется, а часть совершает колебательное движение, так что ориентация их дипольных моментов носит беспорядочный характер. Еще одна часть хаотически перемещается по поверхности. Основная же часть молекул, главным образом хемосорбированных, остается в первоначальном состоянии. Если рассматривать молекулы как осцилляторы, то суперпозиция их вторичных излучений даст свой вклад в общую поляризацию отраженного света.

Молекулы, которые не установились в стационарное состояние, дают деполаризованную часть вторичного излучения. Время установления стационарного состояния, как это видно из записи, составляет порядка одной минуты, начиная с момента установления равновесного давления.

Объяснение изменения поляризации может быть дано как изменение одного или всех параметров  $n_l$ ,  $k_l$  и  $d$  тонкой пленки адсорбата при освещении. Кроме равенства цикла молекул адсорбата необходимо учитывать их взаимное пространственное расположение. Продолжение изменения поляризации после возврата давления к первоначальному.

Физически разумным представляется рассмотрение адсорбата как системы линейных гармонических осцилляторов, совершающих вынужденные колебания под действием электрического поля падающей световой волны лазера. Направление дипольного момента молекул хаотически меняется во время, и после прекращения освещения ртутной лампы, что приводит к частичной деполаризации отраженного света.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНФРАКРАСНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОВАКУУМНОЙ ПЕЧИ**

***А.В. Гагаринский, В.И. Воронин***

*СГТУ, г. Саратов, ул. Политехническая, 77. E-mail: [ems@sstu.ru](mailto:ems@sstu.ru)*

Инфракрасный нагрев с помощью кварцевых галогенных ламп широко применяется при изготовлении изделий электронной техники. Это обусловлено рядом преимуществ таких нагревателей по сравнению с нагревателями других типов (резистивных с проволочными, стержневыми или ленточными нагревательными элементами): простота конструкции, высокая ремонтоспособность, малая тепловая инерционность, возможность электропитания от промышленной сети 220/380В без применения промежуточных низковольтных трансформаторов, возможность автоматического управления процессом нагрева, отсутствие

загрязнений рабочего объема технологической камеры за счет выделения из нагревательных элементов испаряющихся веществ.

Эти преимущества инфракрасных нагревателей особенно эффективно проявляются при их использовании в высоковакуумной печи, предназначенной для бесштенгельной откачки и герметизации малогабаритных электровакуумных приборов. Герметизация этих приборов и пайка узлов осуществляется медно-серебряным припоем ПСр72, имеющим температуру плавления  $779^{\circ}\text{C}$ .

Высоковакуумная печь обеспечивает температуру нагрева  $1000\ldots 1100^{\circ}\text{C}$ .

В литературных источниках отсутствуют сведения об исследованиях электротермических характеристик инфракрасных нагревателей при их работе в вакууме  $10^{-4}\ldots 10^{-5}$  Па. Отсутствуют также сведения о влиянии конструктивного расположения и количества ламп на равномерность распределения температуры в рабочей зоне и температуре при выходе из строя некоторого количества ламп.

Измерение температуры на технологической подставке проводилась с помощью равномерно расположенных хромель-алюмелевых термопар с рабочей температурой до  $1300^{\circ}\text{C}$ . Одна из термопар закреплялась на колбе галогенной лампы.

Во избежание окисления арматуры электровакуумных приборов и узлов давление в технологической камере при нагреве не превышало  $6,6 \times 10^{-3}$  Па. Откачка технологической камеры производилась механическим насосом и паромасляным насосом. Для уменьшения обратного потока масла в технологическую камеру в качестве рабочей жидкости применялась кремнийорганическая жидкость 5Ф4Э.

Исследования электротермических характеристик проводились во время пайки замедляющей системы электровакуумного прибора.

Мощность нагревателя составляет 15 кВт, обеспечивается установкой 15 кварцевых ламп.

Одним из важных условий высокого качества паяемых узлов и особенно герметизируемых приборов является непрерывность технологического процесса, т.е. обеспечение необходимой температуры и давления в технологической камере. Технологический процесс может прерываться при выходе из строя некоторого количества кварцевых ламп. Исследовалась возможность продолжения технологического процесса при выходе из строя одной или двух кварцевых ламп в каждой фазе. За допустимую температуру на колбе кварцевой лампы принималась температура  $900^{\circ}\text{C}$ , при которой не нарушается герметичность и прочность колбы. Кварцевые лампы отключались специально при проведении эксперимента.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что при выходе из строя одной кварцевой лампы в каждой фазе теплоотдача нагревателя остается достаточной для обеспечения температуры пайки. Однако, при выходе из строя двух кварцевых ламп в каждой фазе температура подставки становится критичной для дальнейшего продолжения технологического процесса.

В связи с возможными колебаниями напряжения в электрической сети была исследована зависимость температуры подставки от величины напряжения питающей электросети и количества кварцевых ламп

Данные свидетельствуют о том, что падение напряжения до 180 В при исправном нагревателе практически не влияет на температуру подставки. Однако снижение напряжения до 180В при выходе из строя двух кварцевых ламп в каждой фазе приводит к нарушению технологического процесса. Анализ данных показывает, что даже при выходе из строя по одной кварцевой лампе в каждой фазе может быть реализован непрерывный процесс.

На расстоянии 30 мм от краев подставки устанавливать для обработки узлы и приборы не рекомендуется.

### Литература

1. Медников М.И., Муленков И.В. Электротермические характеристики ламповых нагревателей для вакуумной печи и установки камерной откачки малогабаритных ЭВП. Электронная техника, сер.7 «Технология и организация производства», 1982, вып.6, стр. 61-64.
2. Зворыкин Д.Б., Александрова А.Т., Байкальцев Б.П. Отражательные печи инфракрасного нагрева.- М.: Машиностроение, 1985.-176 с., ил.
3. Вугман С.М., Волков В.И. Галогенные лампы накаливания. М.: Энергия, 1980. 136 с.

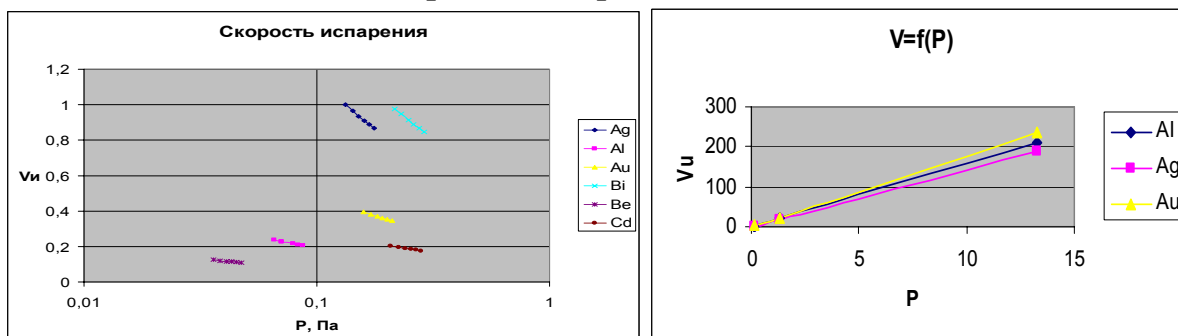
## РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ НАПЫЛЕНИИ В ВАКУУМЕ

*Т.Н. Богданова, Т.Г. Булатова*

КГТУ, Казань, ул.К.Маркса, 68. E-mail: [vacuum@kstu.ru](mailto:vacuum@kstu.ru)

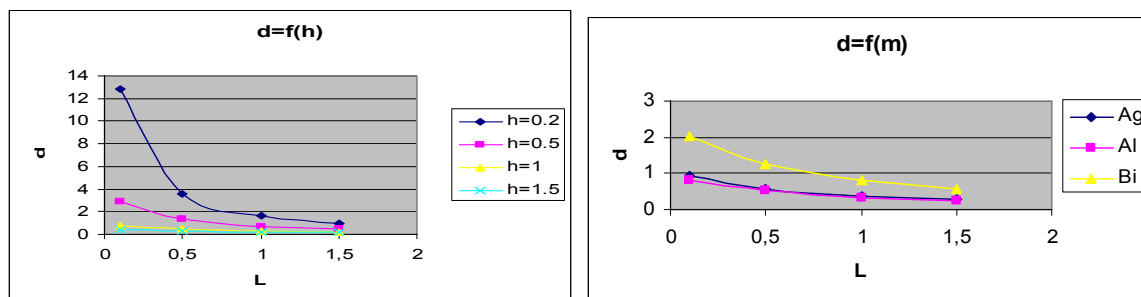
На кафедре ВТЭУ в рамках НИРС были проведены расчеты и моделирование некоторых технологических параметров характеризующих процесс получения тонких пленок в вакууме, в частности толщины напыления, скорости испарения, скорости ионизации и т.д.

### Зависимость скорости испарения от вещества, давления



Вторая часть расчетов была связана с моделированием геометрических параметров размещения источника и мишени, количества источников для получения оптимальной толщины напыления.

### Исследование зависимости толщины пленки от геометрического расположения источника напыления, мишени и материала



Полученные результаты расчетов интересны тем, что позволяют студентам спрогнозировать необходимые режимы для выполнения реальных процессов, а именно: выбрать источник испарения, материал испарения; определить давление, время; рассчитать конфигурацию расположения источника испарения и напыляемого объекта.

### Литература

- 1 А.И. Костржицкий и др. «Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме».
2. Б.С. Данилин «Вакуумное нанесение тонких пленок».

### ТЕЧЕНИЕ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА ЧЕРЕЗ ДВЕ ПЕРФОРИРОВАННЫЕ МЕМБРАНЫ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУР

*Д.В. Дробышев, Н.К. Никулин*

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5.

*e-mail: drobishev.drug@gmail.com*

Цель нашей работы состоит в численном моделировании течения газа через две параллельные перфорированные мембраны при наличии градиента температуры, т.е. через элемент термомолекулярного насоса.

Моделирование течения газа основывается на статистических методах (Монте-Карло). В данной работе разработана модель течения газа на следующих допущениях:

1. Температура с каждой стороны пластин постоянна;
2. Законом косинусов или выражением  $\cos^n$ ;
3. Распределение скоростей теплового движения частиц описывается законом Максвелла;
4. Течение газа – молекулярный режим;
5. Коэффициент аккомодации равен 1;
6. Предполагается, что мембраны представляют собой бесконечно длинные поверхности;

7. Диаметр отверстия мембраны предполагается намного больше её толщины (малая диафрагма).

Разработан алгоритм расчета и программа в среде программирования Delphi 7.0.

Течение газа оценивалось величинами вероятностей прямого и обратного потока через рассматриваемые элементы.

Все этапы были проведены по принципу постепенного усложнения:

1. Построить двумерную модель течения газа через перфорированную мембрану. Основные параметры:  $\sigma$  - расстояние между мембранами, мм;  $d_1, d_2$  - диаметры отверстий на мембранах, мм;  $m$  - расстояние между отверстиями на каждой из мембран, мм,  $l$  - расстояние между отверстием, взятым на первой мембране, относительно второй, мм;

2. Преобразовать двумерную модель в трехмерную. Те же геометрические параметры;

3. Введение в трехмерную модель физических параметров системы. Задается температура мембран (разница температур  $\Delta T \neq 0$ ). Учитывается время прохождения частицами газа обеих мембран. Частицы отражаются от поверхности мембран по закону диффузионного распределения;

4. Рассматривая различные виды взаимодействия косинусного закона, исследуется влияние на основные характеристики течения газа;

5. В ходе проведения исследований были поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Влияние геометрических параметров на течение газа;

2. Влияние градиентов температуры течение газа;

3. Оценка методов рассмотрения течения газов в двумерном и трехмерном пространстве;

4. Влияние законов отражения на течение газа;

5. Благодаря исследованию прямого и обратного потока газа выявлены характеристики откачной способности модели;

6. Влияние геометрии пластин. Рассмотрены несколько элементарных поверхностей (параболическая, сферическая, плоская);

7. Рассчитан поток частиц через рассматриваемый элемент с учетом прямого и обратного прохода частиц через него.

Разработанная математическая модель течения газа полностью соответствует реальной (с учетом принятых допущений).

## **Выводы**

1. В результате проведенного математического моделирования было выявлено сходство влияния геометрических параметров между 2-х и 3-х мерными моделями. Поэтому для упрощения дальнейшего расчета допустимо использовать двухмерную модель.

2. Результаты расчета показали, что изменение вероятности перехода через межлопаточный канал при изменении закона отражения и геометрии достигает 30% и более

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ГАЗА ПО ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА С ПОГЛОЩАЮЩИМ ДНОМ**

***П.В. Шатов, Н.К. Никулин***

*МГТУ им Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская, 5. E-mail: pasha-87@mail.ru*

Измерительные колпаки используют для определения характеристик высоковакуумных насосов.

Измерительный колпак можно представить в виде цилиндра с поглощающим дном (патрубок насоса) и датчиком, расположенным на цилиндрической поверхности, регистрирующим давление газа на входе в насос.

Цель работы: Исследовать влияние расположения датчика на измеряемые характеристики испытываемого вакуумного насоса (давление, быстрота действия).

Задача исследования: Получить зависимость вероятности попадания молекулы газа в датчик от положения датчика.

Основные допущения:

- 1) Молекулярный режим течения газа.
- 2) Отражение частиц от поверхности описывается законом «косинусов».
- 3) Распределение молекул по скоростям теплового движения подчиняется закону Максвелла.
- 4) Коэффициент аккомодации равен 1.

Задача решена при помощи метода статистического анализа (метод Монте-Карло).

В процессе работы была разработана математическая модель с учётом конструктивных особенностей вакуумного колпака и основных допущений, написана программа на языке программирования Delphi 7.0, осуществляющая необходимое число испытаний для получения результата с заданной точностью.

В результате исследования были получены плотности распределения потока молекул по цилиндрической поверхности и по дну колпака, построены их графики.

Результаты работы дают возможность оценить отличие реальной быстроты действия высоковакуумного насоса от результатов измерения, проводимых в соответствии со стандартом.

## **РАСЧЁТ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ**

***А.Е. Михайлов, С.Г. Николаев, М.Д. Бронштейн, К.Б. Панфилович***

*КГТУ, ул. К. Маркса, 68. E-mail: Panfilovitch@kstu.ru*

Потребителям «вакуума» необходимо знать, как достичь нужного давления в рабочей камере для данного технологического процесса за определённое время.

Изменение давления в откачиваемом сосуде во времени может быть найдено при решении дифференциального уравнения:



$$\frac{d(pV)}{dt} = -Sp + Q_{\Gamma} + Q_{\text{H}} + Q_{\text{T}} , \quad (1)$$

где  $p$  – давление в откачиваемом сосуде,  $S$  – быстрота откачки сосуда,  $Q_{\Gamma}$  – поток газовой выделения за счёт десорбции и диффузии,  $Q_{\text{H}}$  – поток натекания,  $Q_{\text{T}}$  – поток технологического процесса.

Далее для откачки установки от атмосферного давления до заданного рабочего давления  $p_{\text{pc}}$  выбирается тип насоса, рассчитываются потоки  $Q_{\Gamma}$  и  $Q_{\text{H}}$ . Технологический поток может быть равен нулю  $Q_{\text{T}}=0$ , может быть постоянным  $Q_{\text{T}}=\text{const}$  или переменным  $Q_{\text{T}}=\text{var}$ . Величина  $Q_{\text{T}}$  для данной вакуумной установки должна быть задана технологом. Поток натекания рассчитывается по приводимым в литературе эмпирическим зависимостям и, как правило, принимается постоянным.

Потоки газовой выделения находятся по зависимости

$$Q = ae^{-bt} . \quad (2)$$

Из решения уравнения (1) находится быстрота откачки сосуда  $S$ , при которой обеспечивается рабочее давление  $p_{\text{pc}}$  за заданное время  $t$ .

Характеристики вакуумных насосов  $S_{\text{H}}=f(p_{\text{pc}})$  производители представляют в виде графиков. Они должны быть аппроксимированы математическими соотношениями для выполнения расчетов по (1). На первом этапе мы записали уравнениями характеристики вакуумных насосов, выпускаемых ОАО «Вакууммаш».

Дифференциальное уравнение (1) решается численно с помощью процедуры NDSolve пакета Mathematica [1], поэтому необходимо оценить интервал времени, на котором желаемое давление будет гарантированно достигнуто. Эта оценка проводится путем замены дифференциального уравнения приближенным, допускающим аналитическое решение. Результаты расчетов показали, что для повышения эффективности расчетов целесообразно переходить к логарифмической шкале времени.

Основное уравнение вакуумной техники применяется для подбора вакуумного насоса

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_{\text{H}}} + \frac{1}{U} . \quad (3)$$

Можно принять ближайший насос, быстрота действия которого больше быстроты откачки, то есть  $S_{\text{H}} > S$ . Затем рассчитать  $U$  и по уравнению (3) проверить быстроту откачки  $S$ .

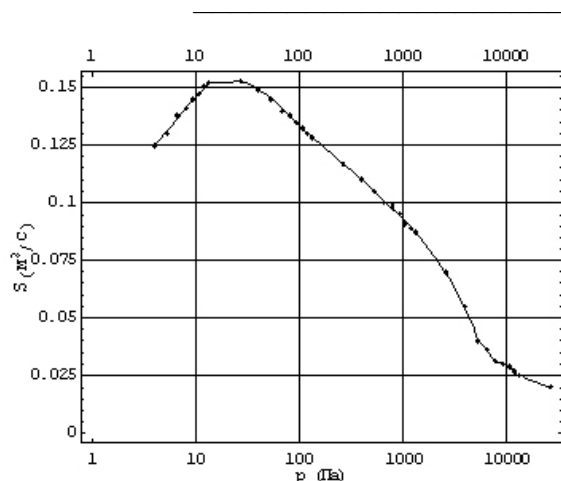


Рис. 1.

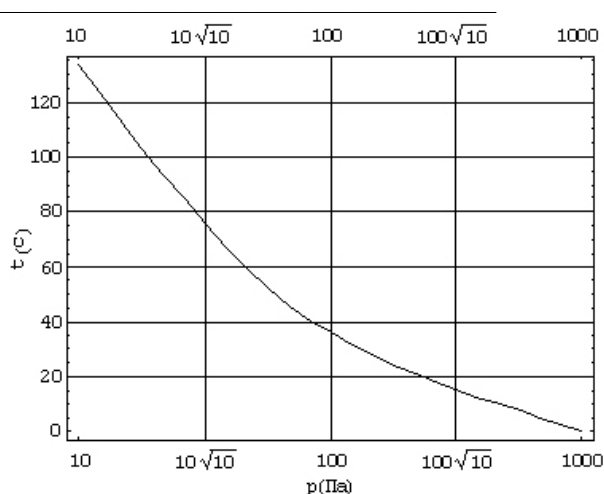


Рис. 2.

На рис. 1 показана зависимость скорости действия насоса НВД 600 (ДВН 150) от входного давления. При решении дифференциального уравнения (2) мы аппроксимировали зависимость  $S_n(P)$  полиномиальным сплайном.

На рис. 2 изображена зависимость времени откачки от давления в логарифмической шкале.

## Литература

1. Wolfram S. Mathematica. Cambridge University press. 1999. p.1470.

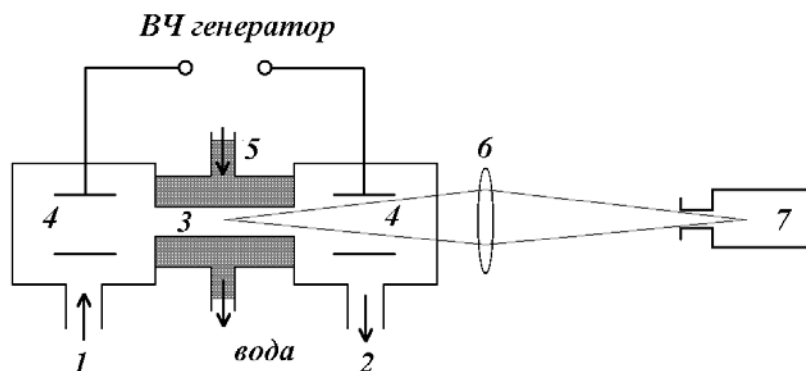
## ОЧЕРЕДНОСТЬ ДЕСОРБЦИИ ГАЗОВ ПРИ ОТКАЧКЕ НЕПРОГРЕВАЕМЫХ ВАКУУМНЫХ ОБЪЕМОВ

*А.Ю. Филиппов, Н.А. Зюзин, Р.Б. Тагиров, Р.А. Назипов*

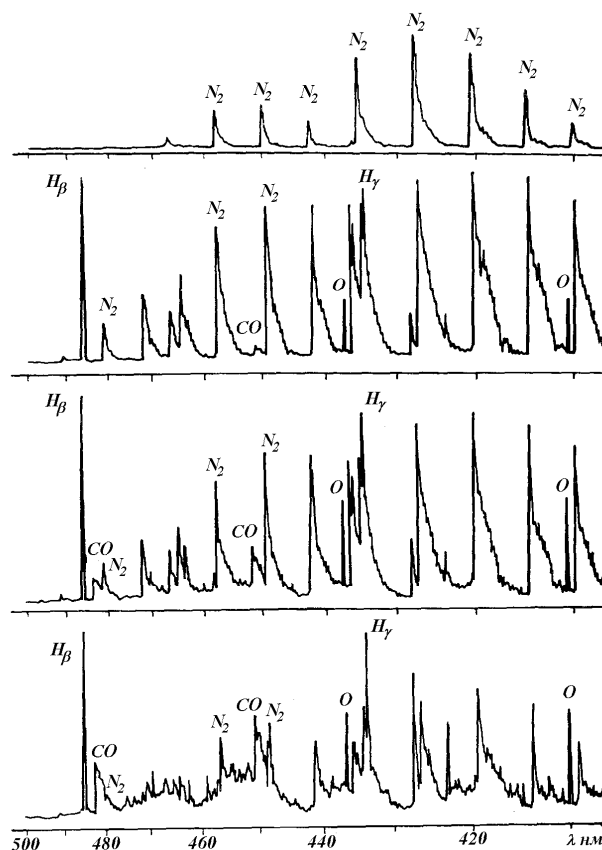
*КГУ, Казань, ул. Кремлевская, 18*

Известно, что состав остаточных газов в вакуумируемом объеме по мере понижения давления значительно изменяется. Происходит это в результате отрыва адсорбированных газов с поверхности вакуумной системы и перехода их в объем. Первыми покидают поверхность газы с малой теплотой сорбции: водород, азот, кислород, затем  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . На поверхности может быть 50 и более слоев молекул газа [1,2].

Для исследования качественного изменения состава остаточных газов в процессе откачки непрогретаемых объемов использовалась разрядная трубка (рис.1) с отводами 1 и 2 для присоединения к исследуемому объему, сужение 3, служащим для увеличения яркости излучения, металлическими электродами 4 и водяной рубашки 5, служащей для охлаждения сужения. Разряд в трубке возбуждается от высокочастотного генератора, работающего в диапазоне 20-60 МГц. Излучение высокочастотного разряда линзой 6 проектировалось на щель 7 оптического спектрографа ИСП-51.



**Рис. 1.** Оптическая схема установки: 1 – отвод для присоединения к откачиваемому объему; 2 – отвод для присоединения к форвакуумному насосу; 3 – сужение для концентрации разряда; 4 – металлические электроды; 5 – водяная рубашка охлаждения; 6 – кварцевая линза; 7 – щель спектрографа.



**Рис. 2.** Микрофотограммы спектров, снятых при различных давлениях (сверху-вниз): 30, 5, 1 и 0,5 мм рт.ст.

Воздух из исследуемого объема откачивался через разрядную трубку, что позволило получить спектры излучения остаточных газов в динамике откачки.

Спектры остаточных газов даны на рис. 2 при давлениях в объеме 30, 5, 1 и 0,5 мм рт.ст. На первом спектре в составе остаточных газов присутствует только азот, давление достаточно велико, десорбция газов с поверхности практически

еще не началась. С изменением давления происходит существенное изменение спектрального состава излучения. По мере углубления вакуума наблюдается уменьшение интенсивности линий азота и возрастание интенсивности линий СО.

При достижении вакуума порядка 1 Па ( $10^{-2}$  мм рт.ст.) линии азота исчезают вообще, и растет только сплошной фон, обусловленный рекомбинационными реакциями между СО и О [3]. Значительно возрастает интенсивность линий О и Н. Однако это повышение интенсивности обусловлено не увеличением парциального давления молекул кислорода и водорода, а скорее увеличением парциального давления  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , с разложением их в плазме разряда на СО, ОН, О и Н [4]. Об этом свидетельствует, как повышение интенсивности полос СО радикала ОН, так и данные, полученные вымораживанием [5].

Кроме того, по спектру остаточных газов можно судить о герметичности откачиваемого объема. Если есть натекание атмосферного воздуха, то спектр газов (нижний спектр) будет искажен, а относительная интенсивность линии азота возрастет.

#### **Литература**

1. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. М.: Мир, 1964, 715 с.
2. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. М.: Высшая школа, 1990, 320 с.
3. Гейдон А. Спектроскопия пламён. ИЛ, М., 1959, 350 с.
4. Кондратьев В.И. Кинетика химических газовых реакций. Изд. АН СССР. М., 1958, 520 с.
5. Машкевич С.А., Тагиров Р.Б. Физика и техника высокого вакуума. Тезисы докладов IV Всесоюзной конференции. Л., 1974, с.96-97.

### **ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ ПОТОКА ЭЛЕКТРОНОВ ЛЕНТОЧНОГО ТИПА**

***Е.С. Шолохов, В.П. Нархинов***

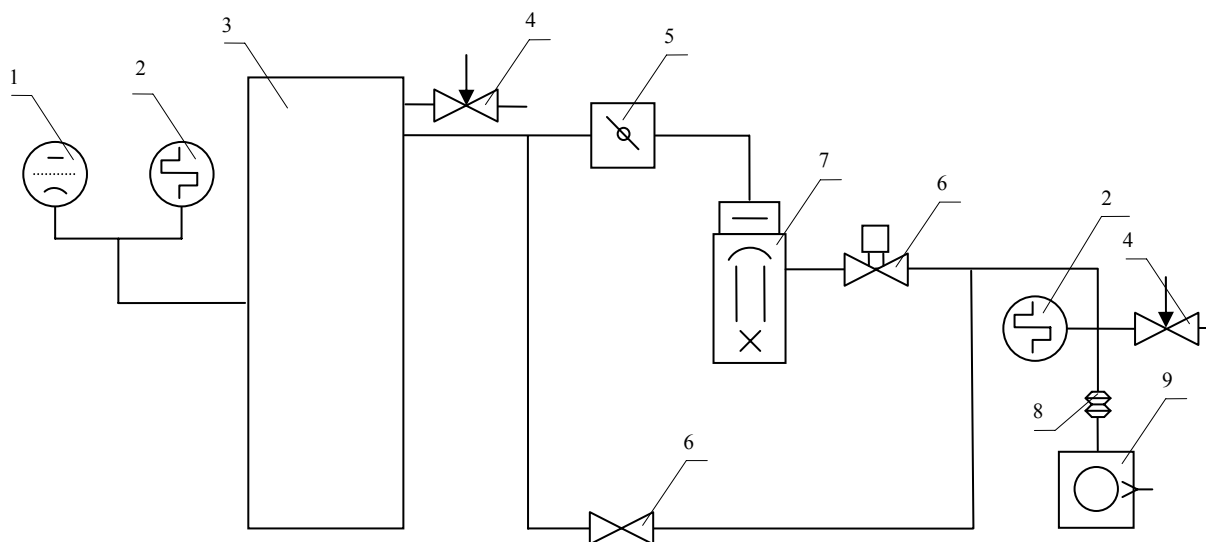
*БГУ, Улан-Удэ, ул. Цыбикова, 4-4. E-mail: e8gen@bk.ru*

Применение газоразрядной техники открывают широкие возможности для построения различных электронных источников, в которых плазма выполняет функцию катода. Вакуумная высоковольтная техника и сильноточная электроника представляет собой сочетание электротехнических устройств вакуумной системы. При этом, блоки питания разряда, высоковольтные выпрямители формируют электрические поля внешние по отношению к источникам заряженных частиц, вакуумная система создает необходимые условия внутри этих источников.

В настоящей работе представлены результаты измерений осных параметров 28 ленточных пучков: азимутального распределения тока на фиксированном участке сходимости с углом  $\Theta=12,8^\circ$  и распределения плотности тока при одно-

временном рассечении плоско симметричного потока сходящихся частиц на том же участке многолучевой системы.

На рис. 1 представлена схема лабораторного стенда для проведения экспериментальных работ.



**Рис. 1.** Двухступенчатая система с байпасной линией откачки

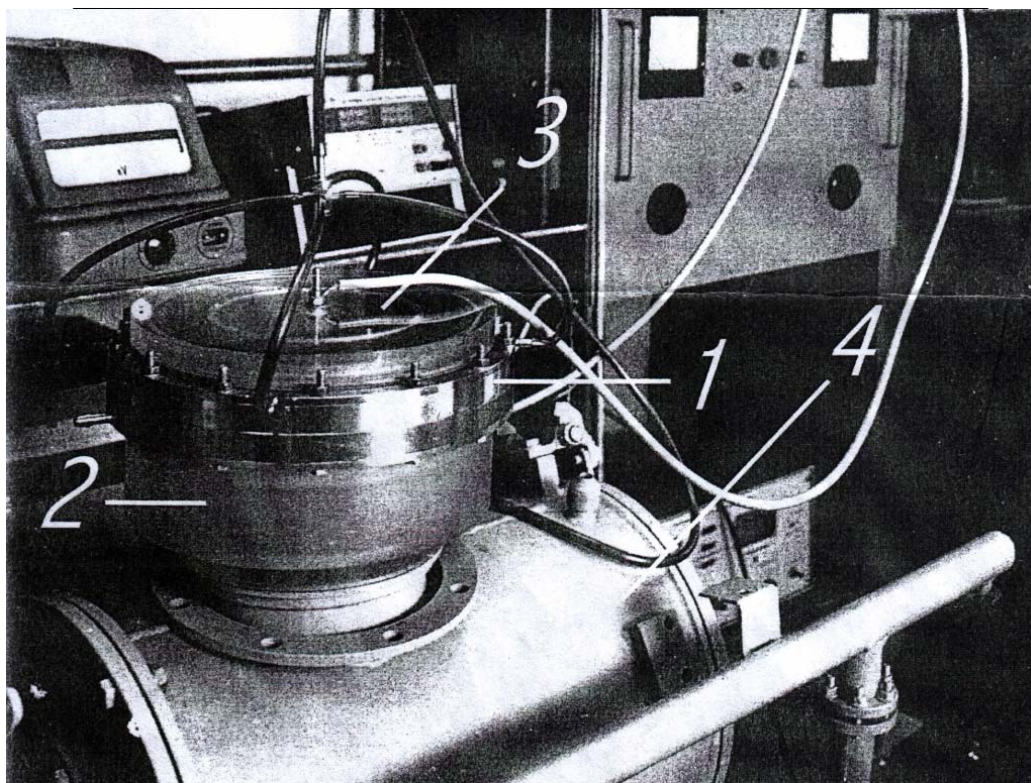
- |  |                            |
|--|----------------------------|
| 1 – преобразователь ионизационный            | 5 – высоковакуумный затвор |
| 2 – преобразователь манометрический тепловой | 6 – вакуумный клапан       |
| 3 – вакуумная камера                         | 7 – диффузионный насос     |
| 4 – вакуумный клапан для напуска воздуха     | 8 – компенсатор сильфонный |
|  | 9 – механический насос     |

В основу расчета заложены данные, полученные в результате измерения щелевых токов модифицированным методом вращающегося вокруг своей оси цилиндра Фарадея в плоскости рассеченных пучков перфорированным 28 отверстиями коллекторным электродом. Элементы измерительного устройства, устанавливаемого на патрубок вакуумной камеры, показаны на рис. 2.

Результаты измерений тока  $I(X)$  в 5 точках, аппроксимируются сглаживающим сплайном. Подставляя аппроксимированные значения на отдельных интервалах в уравнение:

$$J(R) = -\frac{10^{1/2}}{\pi r_0 t} \int_R^{10} \frac{dI(X)}{dX} \frac{dX}{(X-R)^{1/2}}$$

Решив уравнение, определяем вид распределения плотности тока  $J(R)$ . Неравномерное распределение плотности тока по сечению 140 мм, сходящегося под действием сильного электрического поля, объясняется несколькими причинами, что практически всегда имеет место в реальных, движущихся в направлении выделенной оси или плоскости симметрии, электронов.



**Рис. 2.** Лабораторный стенд

1 – генератор радиально сходящихся пучков электронов; 2 – опорный конструктивный изолятор; 3 – технологическая вакуумно-плотная крышка; 4 – вакуумная камера.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА СМЕСЕЙ ВАКУУМНЫХ РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ**

**И.Р. Ибатуллин, А.К. Мифтахова, А.А. Хубатхузин, Д.И. Сагдеев**  
КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68. E-mail: sagdeev@kstu.ru

Минеральные вакуумные масла представляют собой сложные смеси парафиновых, ароматических и непредельных углеводородов. При разработке новых сортов и марок масел одним из основных является требование к их теплофизическим и физико-химическим свойствам. Выявление закономерностей изменения этих свойств от состава и условий эксплуатации является основной задачей при исследовании реальных смесей ВРЖ.

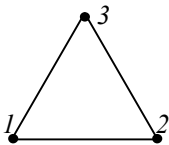
В данном сообщении в качестве примера рассматривается технология компьютерного моделирования плотности смесей вакуумных масел ВМ-1, ВМ-5С и непредельного углеводорода 1-гексена в широком диапазоне изменения температур с поверочной точкой, соответствующей концентрации по 33,3% ка-

ждого из компонентов смеси, а также показана возможность нахождения оптимальных концентраций компонентов, удовлетворяющие требованиям по выходным параметрам.

В работе [1] рассмотрена возможность компьютерного моделирования физико-химических и теплофизических свойств с применением симплекс-решетчатых планов для обработки результатов измерений плотности трехкомпонентных смесей непредельных углеводородов, что позволило нам применить данный метод для обработки плотности смеси вакуумных рабочих жидкостей с реализацией модели первого порядка (табл.1).

**Таблица 1**

**Модель 1 – Модель первого порядка**

№	Доли компонентов				$Y=A_1*X_1 + A_2*X_2 + A_3*X_3$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$		
1	1	0	0		
2	0	1	0		
3	0	0	1		

Для обработки экспериментальных данных использованы стандартные надстройки электронной таблицы «Excel» комплекта программ «Microsoft Office». Для вычислений коэффициентов симплексов использована стандартная надстройка «Поиск решения», которая минимизирует сумму квадратов разностей экспериментальных и расчетных значений плотности тройной смеси.

Дальнейшая обработка заключается в выявлении зависимости коэффициентов симплекса от температуры и получении окончательного расчетного выражения для плотности трехкомпонентной смеси вакуумных рабочих жидкостей

$$Y=A_1*X_1 + A_2*X_2 + A_3*X_3. \quad (1)$$

Расчетные коэффициенты представляют собой однопараметрические полиномы второго порядка относительно температуры (табл.2). Для коэффициента  $A_1$  и других коэффициентов выражения (1) можно соответственно записать

$$A_1 = f(t)=a_0+a_1t+a_2t^2. \quad (2)$$

Для представления полученных результатов в виде диаграммы «Состав-свойство» подготавливаем расчетную таблицу и используя надстройку «Мастер диаграмм» с опцией «Построение поверхности».

Целью оптимизации является поиск границ области в исследуемом пространстве функции со значениями, равными заданному в условиях оптимизации. Для решения данной задачи используем стандартную надстройку «Подбор

параметра», которая реализует поиск заданного значения однопараметрической функции в зависимости от значений самого параметра.

В нашем случае мы имеем трехпараметрические функции зависимости плотности смеси от ее трехкомпонентного состава. Один из трех параметров зависит от двух других, следовательно, остается определить необходимые значения одного из оставшихся и затем собственно и решить задачу.

**Таблица 2**

**Коэффициенты расчетного выражения (2)**

№ п/п	Коэффициенты уравнения (1)	Коэффициенты уравнения (2)			R <sup>2</sup>
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	
1	A <sub>1</sub>	899,47	-0,5831	0,0000	0,9999
2	A <sub>2</sub>	880,16	-0,6279	0,0000	1,000
3	A <sub>3</sub>	889,31	-0,0950	-0,0052	1,000

Необходимо построить линейные функции, которые описывают данные линии поиска. Для этого необходимо найти градиенты этих линий в системе двух независимых координат. Затем, используя это уравнение в найденной ранее зависимости (1), произвести поиск оптимального значения вдоль этой линии.

По проделанной работе можно сделать следующие выводы:

1. Располагая результатами эксперимента для чистых веществ можно предсказать значение свойства для трехкомпонентной смеси любого состава.
2. Компьютерное моделирование методом симплексных решеток позволяет получить расчетное выражение для решения задачи оптимизации состава смеси по заданному значению основного параметра - плотности.

### **Литература**

1. Сагдеев Д.И., Хубатхузин А.А., Фомина М.Г., Воробьев Е.С., Мухамедзянов Г.Х. Компьютерное моделирование методом симплексных решеток плотности и вязкости многокомпонентных смесей непредельных углеводородов в широком диапазоне изменения параметров состояния. Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения. 2002. том 3, №10, с.50-54.

## **О ПРИМЕНИМОСТИ УРАВНЕНИЯ ПУАЗЕЙЛЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОВОДИМОСТИ ВАКУУМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ**

*А.Р. Валеев, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров*

*КГТУ, Казань, ул. К. Маркса, 68. E-mail: burm@kstu.ru*

Одной из задач вакуумной техники является расчет быстроты откачки вакуумных систем (ВС) в различных сечениях. Для этого необходимы данные по



проводимости элементов, составляющих ВС, при молекулярном, переходном и вязкостном режимах течения. В качестве таких элементов наиболее часто встречаются различные типы трубопроводов. В справочной литературе по вакуумной технике [1] для расчета проводимости длинного цилиндрического трубопровода используется уравнение Гагена-Пуазейля, представленное в виде

$$U = \pi d^4 P_{cp} / (128 l \eta), \quad (1)$$

где  $d$  - диаметр трубопровода;  $P_{cp} = (P_2 + P_1)/2$  - среднее давление;  $P_2$  и  $P_1$  - соответственно давления на входе и выходе трубопровода;  $\eta$  - коэффициент динамической вязкости,  $l$  - длина трубопровода.

При выводе этого уравнения были сделаны следующие допущения: газ несжимаем; течение полностью сформировано, т.е. распределение скоростей по его сечению постоянно по всей длине; турбулентное движение отсутствует. Данные условия в ВС характерны только для длинных трубопроводов при невысокой скорости откачки вакуумных насосов, что выполняется далеко не всегда. Так в табл. 1 представлены результаты экспериментальных измерений проводимости ( $U_{\text{эксп}}$ ) цилиндрического трубопровода при откачке воздуха. Там же приведены результаты расчета проводимости по формуле (1). В табл. 1 приняты следующие обозначения:  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  - соответственно отклонения значений численного расчета, расчета по формулам (1) и (2) от эксперимента. Различие расчета и эксперимента является следствием невыполнения в реальных условиях допущений, использованных при выводе уравнения (1). В таблице также представлены значения проводимости, полученные при помощи численного расчета в пакете Fluent ( $U_{\text{числ}}$ ) и рассчитанные по формуле для короткого трубопровода [1]

$$U = \frac{\pi \cdot d^4 P_{cp}}{128 \eta l (1 + 4,54 \cdot 10^{-2} Q / (\eta R_g T l))} \quad (2)$$

где  $Q$  - поток газа через трубопровод,  $R_g$  - газовая постоянная,  $T$  - температура газа.

Можно видеть, что наилучшее согласие с экспериментом дает численный расчет.

Табл. 2 и 3 дают представление о влиянии отношений  $l/d$  и отношения давлений  $\tau$  на погрешность формул (1) и (2) относительно численного эксперимента. Здесь  $\Delta_4, \Delta_5$  - отклонения расчета по формулам (1) и (2) от численного эксперимента.

**Табл. 1.** Сопоставление результатов расчета проводимости с экспериментом

$P_1$ , Па	$\tau$	$U_{\text{эксп}}$ , л/с	$U_{\text{числ}}$ , л/с	$\Delta_1$ , %	$U_{\text{расчет по (1)}}$ , л/с	$\Delta_2$ , %	$U_{\text{расчет по (2)}}$ , л/с	$\Delta_3$ , %
2333,3	0,803	3,77	3,74	-0,80%	5,75	52,51%	4,03	6,90%
14651,8	0,923	10,36	10,2	-1,54%	33,49	223,24%	10,20	-1,55%
20951,4	0,964	15,94	15,03	-5,71%	46,84	193,83%	14,89	-6,57%
28655,7	0,981	22,3	20,93	-6,14%	63,48	184,68%	20,67	-7,31%
31732,5	0,983	22,89	22,48	-1,79%	70,23	206,79%	22,12	-3,37%
43100,4	0,992	32,89	31,36	-4,65%	94,99	188,81%	30,86	-6,16%
60444,3	0,996	50,14	46,69	-6,88%	132,89	165,04%	46,15	-7,95%

**Табл. 2.** Оценка влияния  $l/d$  на результаты расчетов по формулам (1) и (2)

$l/d$	$P_1$	$\tau$	$U_{\text{числ}}$ , л/с	$U_{\text{расчет по (1)}}$ , л/с	$\Delta_4$ , %	$U_{\text{расчет по (2)}}$ , л/с	$\Delta_5$ , %
40	9500	0,95	10,437	21,397	105,02%	10,748	2,98%
	9000	0,9	8,016	20,849	160,10%	8,262	3,08%
	8000	0,8	5,825	19,751	239,10%	6,087	4,51%
100	9500	0,95	0,970	1,070	10,27%	0,997	2,72%
	9000	0,9	0,884	1,042	17,86%	0,918	3,80%
	8000	0,8	0,749	0,988	31,83%	0,799	6,68%
1000	9500	0,95	0,105	0,107	1,84%	0,107	1,76%
	9000	0,9	0,102	0,104	2,18%	0,104	2,03%
	8000	0,8	0,096	0,099	2,46%	0,098	2,17%

**Табл. 3.** Оценка влияния  $\tau$  на результаты расчетов по формулам (1) и (2)

$P_1$ , Па	$\tau$	$U_{\text{числ}}$ , л/с	$U_{\text{расчет по (1)}}$ , л/с	$\Delta_4$ , %	$U_{\text{расчет по (2)}}$ , л/с	$\Delta_5$ , %
9990	0,999	20,64	21,93	6,30%	21,11	2,32%
9900	0,99	16,27	21,84	34,24%	16,70	2,64%
9500	0,95	10,44	21,40	105,02%	10,75	2,98%
9000	0,9	8,02	20,85	160,10%	8,26	3,08%
8000	0,8	5,82	19,75	239,10%	6,09	4,51%
7000	0,7	4,64	18,65	301,94%	4,97	7,16%
6000	0,6	3,84	17,56	357,50%	4,25	10,70%
5000	0,5	3,23	16,46	408,79%	3,72	14,92%

Использование уравнения (1) не дает возможности точно рассчитать проводимости для коротких трубопроводов и отношений давлений менее 0,99. Формула (2) нивелирует ошибку, связанную с малым отношением  $l/d$ , и при  $\tau > 0,7$  дает достаточно хорошие результаты. Для получения достоверных результатов в широком диапазоне изменения  $\tau$  рекомендуется использовать численный расчет.

### Литература

1. Вакуумная техника / Е.С. Фролов, В.Е. Минайчев, А.Т. Александрова и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 360 с. (Справочник)