

А. З. Берлин, И. Ф. Зенков

## Гидродинамический расчет испарительной камеры в виде криволинейного канала

Испарительная камера наркозного аппарата должна обеспечивать максимальное насыщение парами анестетика проходящего через нее потока газа-носителя при ограниченном сопротивлении и габаритах. С учетом указанных требований, предложена испарительная камера в виде криволинейного канала [3], геометрия которого выбирается так, чтобы обеспечить ламинарное безотрывное течение газа. В статье предлагается методика гидродинамического расчета криволинейного канала, составленная на основе приближенного решения уравнений пограничного слоя.

Рассмотрим установившееся стабилизированное изотермическое ламинарное течение вязкой несжимаемой жидкости (воздуха) в криволинейном канале прямоугольного поперечного сечения (рис. 1). Примем  $B \ll h$ ,  $B \ll R_{кр}$ ,  $\rho = \text{const}$ ,  $\mu = \text{const}$ , где  $B$ ,  $h$  и  $R_{кр}$  — соответственно полуширина, высота и радиус кривизны канала,  $\rho$  — плотность жидкости,  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости. Такое течение описывается системой уравнений движения в пограничном слое [7].

Известно [8], что в криволинейных каналах под действием центробежных сил инерции возникают вторичные циркуляционные потоки, направленные перпендикулярно к главному потоку. Вследствие неразрывности течения вторичный поток может ока-

зать существенное влияние на основной поток, и, в частности, вызвать смещение максимума скорости к внешней вогнутой поверхности канала и отрыв пограничного слоя от внутренней выпуклой поверхности. Поэтому будем рассматривать течение в криволинейном канале в виде суммы основного потока, направленного вдоль канала и состоящего из двух сомкнувшихся пограничных слоев (толщиной  $\delta_1$  на выпуклой поверхности и  $\delta_2$  — на вогнутой, причем,  $\delta_1 + \delta_2 = 2B$ ), и перпендикулярного ему вторичного потока, состоящего, в свою очередь, из двух циркуляционных течений (см. рис. 1).

Для определения величины скорости вторичного потока положим, что оси циркуляционных течений расположены в плоскости раздела пограничных слоев основного потока и на расстоянии  $\delta_2$  от торцевых поверхностей канала. Сопоставляя, подобно Прандтлю [5], силы давления, обусловленные центробежными силами инерции, и силы трения, возникающие при движении вторичного потока вдоль поверхностей канала, найдем следующее приближенное значение скорости в центральной полосе вторичного потока:

$$v_{ц} = (3/32) \bar{u} \text{Re} \delta_2^3 / R_{кр} (4B + h)(h - 2\delta_2), \quad (1)$$

где

$$\text{Re} = \dot{V}/h \nu, \quad \nu = \mu/\rho, \quad \bar{u} = \dot{V}/2Bh;$$

$\dot{V}$  — объемный расход жидкости через канал;  
 $\bar{u}$  — средняя продольная скорость.

Следует заметить, что при выводе формулы (1) трение, в отличие от работы [5], рассчитывалось по формуле для течения в плоской щели шириной  $\delta_2$ .

Для определения скорости основного потока воспользуемся интегральным соотношением импульсов для пограничного слоя со вдувом на выпуклой и отсосом на вогнутой стенках [1, 2]:

$$\frac{d\delta^{**}}{dx} + \frac{1}{u_0} \cdot \frac{du_0}{dx} (2\delta^{**} + \delta^* - \delta) = -\frac{1}{\rho u_0^2} \left( \delta \frac{dp}{dx} + \tau_{ct} + \rho v_{\text{ц}} u_0 \right), \quad (2)$$

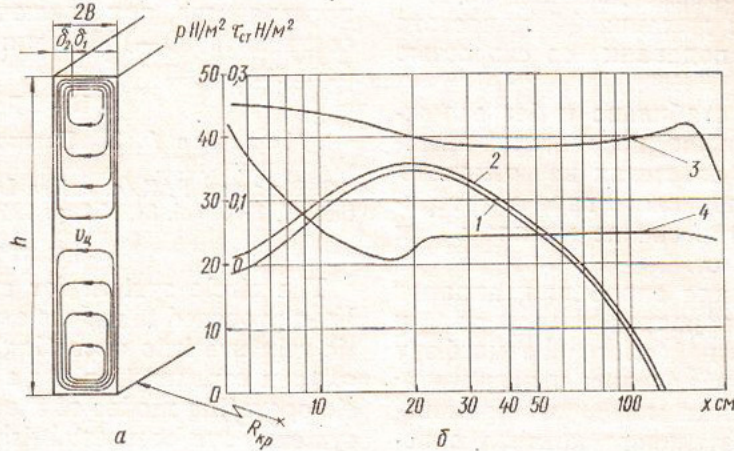


Рис. 1. Геометрические (а) и гидродинамические (б) характеристики криволинейного канала:

1, 2 — кривые давления  $p$  на выпуклой и вогнутой стенках;  
 3, 4 — кривые трения  $\tau_{ct}$  на вогнутой и выпуклой стенках

где

$$\delta^*(x) = \delta - \int_0^{\delta} (u/u_0) dy, \quad \delta^{**}(x) = \int_0^{\delta} \frac{u}{u_0} \left( 1 - \frac{u}{u_0} \right) dy;$$

$\delta(x)$  — толщина пограничного слоя;  
 $u(x, y)$  — составляющая скорости вдоль оси  $Ox$ ;  
 $u_0(x)$  — значение скорости на границе пограничного слоя;  
 $p(x)$  — давление в пограничном слое;  
 $\tau_{ct}(x)$  — касательное напряжение на стенке.

Сделаем обычные допущения для стабилизированного течения [1] (последующие расчеты подтвердили их справедливость):

$$\delta^{**}/\delta = \text{const}, \quad \frac{1}{u_0} \cdot \frac{du_0}{dx} = -\frac{1}{\delta} \cdot \frac{d\delta}{dx}.$$

Тогда уравнение (2) примет следующий вид:

$$\frac{d\delta}{dx} (1 - \tilde{\delta}^* - \tilde{\delta}^{**}) = \frac{1}{\rho u_0^2} \left( \delta \frac{dp}{dx} + \tau_{ct} + \rho v_{\text{ц}} u_0 \right), \quad (3)$$

где  $\tilde{\delta}^* = \delta^*/\delta$ ,  $\tilde{\delta}^{**} = \delta^{**}/\delta$ .

Чтобы решить уравнение (3), необходимо знать профиль скорости по поперечному сечению пограничного слоя. Найдем этот профиль из выражения для касательных напряжений, которое зададим, по аналогии с работой [2], в виде

$$\tau(\xi, x) = (1 - \xi^2) \tau_{ct} + \delta \frac{dp}{dx} \xi (1 - \xi) + \rho v_{\text{ц}} u(\xi) (1 - \xi), \quad (4)$$

где  $\xi = y/\delta$ ,  $0 \leq \xi \leq 1$ .

Раскрывая  $\tau$  через  $u$ , получим после интегрирования

$$u(\xi, x) = \frac{B}{\mu} e^{-0,5 \text{Re}_{\text{ц}} (1 - \xi)^2} \int_0^{\xi_1} e^{0,5 \text{Re}_{\text{ц}} (1 - \xi)^2} \times (1 - \xi) F(\xi, x) d\xi, \quad (5)$$

где

$$F(\xi, x) = \tau_{ct} (1 + \xi) + \delta \frac{dp}{dx} \xi, \quad \text{Re}_{\text{ц}}(x) = v_{\text{ц}} B/\nu.$$

На оси канала при  $\xi_1 = 1$

$$u_0(x) = \frac{B}{\mu} \int_0^1 e^{0,5 \text{Re}_{\text{ц}} (1 - \xi)^2} (1 - \xi) F(\xi, x) d\xi. \quad (6)$$

Используя формулы (5) и (6), получим выражения для  $\tilde{\delta}^*$  и  $\tilde{\delta}^{**}$ . Подставляя последние в выражение (3) и используя формулу (6), выведем после преобразований следующее уравнение для пограничного слоя:

$$\frac{d\delta}{dx} \int_0^1 \left\{ e^{-0,5 \text{Re}_{\text{ц}} (1 - \xi)^2} \int_0^{\xi_1} e^{0,5 \text{Re}_{\text{ц}} (1 - \xi)^2} (1 - \xi) \times \left[ \tau_{ct} (1 + \xi) + \delta \frac{dp}{dx} \xi \right] d\xi \right\}^2 d\xi_1 = -\frac{\mu^2}{\rho \delta^2} \left\{ \frac{dp}{dx} \delta + \tau_{ct} + \text{Re}_{\text{ц}} \int_0^1 e^{0,5 \text{Re}_{\text{ц}} (1 - \xi)^2} (1 - \xi) \times \left[ \tau_{ct} (1 + \xi) + \delta \frac{dp}{dx} \xi \right] d\xi \right\}. \quad (7)$$

Аналогично из формулы (6) и соотношения

$$\dot{V}_{\delta}(x) = u_0 h \delta (1 - \tilde{\delta}^*),$$

где  $\dot{V}_{\delta}$  — расход через пограничный слой, получим еще одно уравнение:

$$\int_0^1 e^{-0,5 \text{Re}_{\text{ц}} (1 - \xi)^2} \left\{ \int_0^{\xi_1} e^{0,5 \text{Re}_{\text{ц}} (1 - \xi)^2} (1 - \xi) \times \left[ \tau_{ct} (1 + \xi) + \delta \frac{dp}{dx} \xi \right] d\xi \right\} d\xi_1 = \frac{\mu \dot{V}_{\delta}}{h \delta^2}. \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) содержат четыре неизвестных:  $\delta(x)$ ,  $p(x)$ ,  $\tau_{ст}(x)$  и  $\dot{V}_\delta(x)$ . Если подставить в них сначала параметры слоя на выпуклой стенке,  $\delta_1, p_1, \tau_{ст1}, \dot{V}_{\delta_1}$ , а затем — на вогнутой стенке,  $\delta_2, p_2, \tau_{ст2}, \dot{V}_{\delta_2}$ , то получим систему из четырех уравнений для восьми неизвестных. Чтобы замкнуть систему, добавим к ней следующие четыре уравнения:

$$\dot{V} = \dot{V}_{\delta_1} + \dot{V}_{\delta_2} \quad (9)$$

(уравнение расхода),

$$\dot{V}_{\delta_1}/\delta_1 (1 - \tilde{\delta}_1^*) = \dot{V}_{\delta_2}/\delta_2 (1 - \tilde{\delta}_2^*) \quad (10)$$

(равенство скорости  $u_0$  на границах пограничных слоев),

$$p_2 - p_1 \approx (\rho u_0^2 / R_{кр}) (2B - \delta_1^* - \delta_2^* - \delta_1^{**} - \delta_2^{**}) \quad (11)$$

(перепад давлений между стенками за счет центробежных сил инерции),

$$\delta_1 + \delta_2 = 2B \quad (12)$$

(сумму толщин пограничных слоев).

Система уравнений (7)–(12) позволяет определить изменение давлений и касательных напряжений на стенках вдоль канала, причем  $Re_{ц}$  по уравнению (1) на выпуклой стенке больше, а на вогнутой — меньше нуля (соответственно для вдува и отсоса). На рис. 1 представлены результаты гидродинамического расчета на ЭЦВМ<sup>1</sup> криволинейного канала, состоящего из последовательно соединенных криволинейного диффузора по ширине, спирального канала постоянного сечения и криволинейного диффузора по высоте.

Расчет проводился для следующих параметров: высота канала  $h=20$  мм, ширина диффузора на входе  $2B_0=1$  мм, угол раскрытия диффузора по ширине  $2\theta=1^\circ$ , ширина спирального канала  $2B=4$  мм, угол раскрытия диффузора по высоте —  $1,5^\circ$ , число  $Re \approx 850$ , расход  $\dot{V}=0,25$  л/с, рабочая среда — воздух при нормальных условиях, радиус кривизны  $R_{кр}$  на входе — 55 мм и на выходе — 15 мм.

Начальный участок диффузорной части определяли из работы [6]:

$$L_{н} = (B_0 / \text{tg } \theta_0) (e^{0,18 \cdot \theta_0 \cdot Re} - 1). \quad (13)$$

Как видно из рис. 1, касательные напряжения на выпуклой стенке стабилизированного участка входного диффузора быстро падают до нуля на длине 20 см. Поэтому для предотвращения отрыва пограничного слоя при  $x > 18$  см переходим на спиральный канал постоянного сечения. Тогда профиль скорости стабилизируется, касательные напряжения на стенках остаются постоянными, а давление монотонно падает вниз по течению.

Рассмотренная методика расчета была использована при проектировании испарительной камеры (рис. 2) в виде описанного выше криволинейного канала. Из сопоставления параметров предложенной камеры с серийной камерой испарителя «Анестезист-1», выполненной в виде лабиринтного канала [4], следует, что обе камеры имеют одинаковые

массообменные характеристики при расходе газа  $\dot{V}=0,1$  л/с, но первая камера имеет меньшее гидрав-

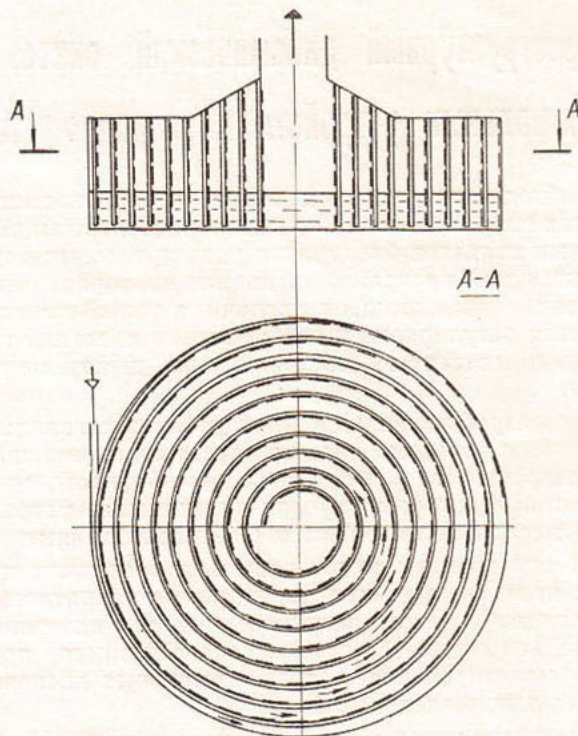


Рис. 2. Испарительная камера в виде криволинейного канала

лическое сопротивление, что позволяет в 2,5 раза увеличить верхний предел расхода газа через испаритель.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гиневский А. С. [и др.]. Аэродинамические характеристики плоских безотрывных диффузоров. «Промышленная аэродинамика», М., «Машиностроение», 1973, вып. 30, с. 5.
2. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Тепло-массообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М., «Энергия», 1972.
3. Леонтьев А. И., Берлин А. З. Испаритель. Авт. свид. № 631159, кл. А61М 17/00. Бюл. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», 1978, № 41, с. 17.
4. Перельмутр А. С., Берлин А. З. Некоторые вопросы теории испарителя жидких наркотических веществ. «Новости медицинского приборостроения», М., ВНИИМП, 1970, вып. 2, с. 3.
5. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Пер. с нем. Г. А. Вольперта под ред. Л. Цейтлина. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
6. Тарг С. М. Основные задачи теории ламинарных течений. М.-Л., ГИТТЛ, 1951.
7. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Пер. с нем. Г. А. Вольперта под ред. Л. Г. Лойцянского. М., «Наука», 1974.
8. Dean W. R. The streamline motion of a fluid in a curved pipe. «Phil. Mag.», 1927, vol. 4, p. 208; 1928, vol. 5, p. 673.

#### Summary

Laminar air stream ( $Re \sim 10^3$ ) in a flat curvilinear channel has been studied. Approximate solution of the equations for boundary layer was obtained on the basis of integral relationship of the pulses taking into consideration the centrifugal secondary flows.

Geometry of the curvilinear channel comprising a diffuser and a spiral channel with constant cross section was computed. This curvilinear channel is an effective vaporizing chamber for an anaesthetic apparatus.

<sup>1</sup> Совместно с сотрудниками института В. И. Колодиным и Ю. И. Стребковым.