

УДК 621.396.22.02:535.8:532.536

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВА СТЕКЛА ПРИ ВЫТЯГИВАНИИ ВОЛОКНА ИЗ ФИЛЬЕРЫ

**М.Ф. Чурбанов, Г.Е. Снопатин, Р.М. Шапошников,  
В.В. Шабаров**

*Нижний Новгород*

В статье приведены результаты численного исследования стабильности диаметра волокна, вытягиваемого из фильеры. В расчетных исследованиях используется программный комплекс ANSYS CFX. Определены собственные частоты и декременты колебаний расхода струи расплава, формирующейся ниже фильеры. Исследовано влияние внешних температурных возмущений на отклонение диаметра волокна от своего номинального значения. Установлено, что охлаждение струи расплава стабилизирует течение струи и диаметр вытягиваемого волокна.

### 1. Введение. Постановка задачи

Качество световодов в значительной степени зависит от стабильности диаметра волокна, получаемого вытяжкой из расплава различных стекол. Технология изготовления одинарного волокна состоит в следующем.

Фильера с выходным каналом круговой цилиндрической формы (рис. 1), заполненная синтезированной стеклосодержащей твердой субстанцией, вертикально устанавливается в температурную камеру  $I$ . Точность выдерживания температуры в камере  $\pm 3$  °С.

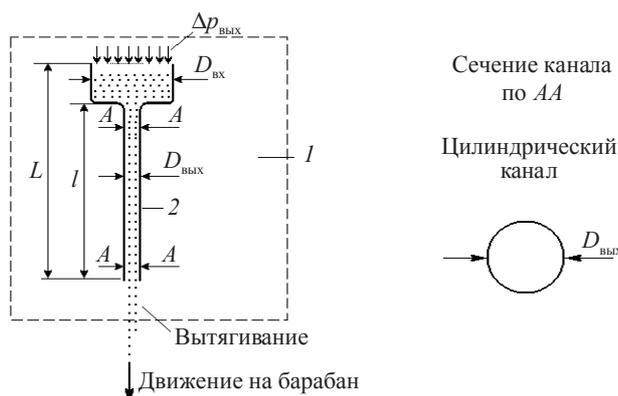


Рис. 1

После превращения твердой субстанции в расплав на вход фильеры подается избыточное давление  $\Delta p_{\text{вых}}$ , величина которого поддерживается стабилизирующим

устройством. Расплав под действием избыточного давления вытекает из выходного канала фильеры 2 в пространство, вытягивается, обжимается щипцами и направляется на вращающийся барабан. Точность выдерживания угловой скорости вращения барабана в эксплуатационном диапазоне составляет 0,1%. Сразу за выходом из канала образуется так называемая “луковица”, а на визуальном расстоянии порядка 0,01–0,02 м от выхода из канала фильеры формируется вертикальная струя, диаметр которой зависит от скорости вытяжки, то есть скорости вращения барабана. Температура в струе с удалением от фильеры падает, расплав затвердевает, и из струи постепенно образуется волокно.

Изготовленное по этой технологии волокно имеет, вообще говоря, переменный по длине диаметр. Экспериментальные замеры свидетельствуют о флуктуациях диаметра волокна по его длине до 1%. Такие отклонения текущего значения диаметра от его среднего значения ведут к искажению оптических свойств изготавливаемых на базе полученных волокон световодов и, следовательно, к снижению их стоимости на рынках высоких технологий.

Флуктуации диаметра волокна могут быть связаны с пульсациями давления на входе в фильеру (стабилизатор давления пропускает высокочастотные колебания), пульсациями температуры в камере (в том числе в локальных зонах), что ведет к изменению вязкостных характеристик расплава. Пульсации давления и (или) температуры изменяют массовый расход расплава на выходе из цилиндрического канала фильеры. Однако флуктуации диаметра волокна вполне возможны и при постоянном расходе расплава на выходе из цилиндрического канала. Флуктуации диаметра могут быть следствием механических процессов в системе “луковица”–струя–волокно”, возникающих, например, из-за вызванных движением воздуха колебаний волокна.

Отметим, что установление влияния веса каждого из перечисленных факторов в флуктуациях диаметра волокна, и особенно выявления доминирующих факторов, позволит выработать требования к точности соответствующих характеристик оборудования, используемого в технологическом процессе вытяжки волокна.

Важным и начальным этапом исследований по повышению стабильности диаметра волокна является определение характеристик устойчивости течения расплава при различных скоростях вытяжки. Знание собственных частот системы “расплав в фильере–“луковица”–струя–волокно” позволит выбрать приоритетные внешние факторы и исследовать их расчетно-экспериментальным путем. Задача заключается в следующем:

- в построении математической модели вытягивания одинарного волокна из цилиндрического канала фильеры;
- в определении собственных характеристик устойчивости системы течения расплава при вытягивании волокна из фильеры в рамках ньютоновского характера течения расплава;
- в исследовании влияния пульсаций температуры в камере на отклонение диаметра волокна от своего номинального значения.

## **2. Математическая модель вытягивания волокна из цилиндрического канала фильеры**

В [1] показано, что при медленном течении расплава контейнер фильеры практически без искажений передает давление на входе в фильеру в ее канал. Поэтому течение расплава в контейнере фильеры не рассматривается.

Расчетная область представляет собой собственно область внутри цилин-

дрического канала фильеры  $OBCD$  (рис. 2,  $AB$  – ось симметрии), а также части пространства в объеме кругового цилиндра, непосредственно примыкающего к выходу из канала фильеры.

Уравнения осесимметричного ламинарного течения расплава и воздуха имеют вид:

$$\rho_i \left( \frac{\partial V_{ri}}{\partial t} + V_{ri} \frac{\partial V_{ri}}{\partial r} + V_{yi} \frac{\partial V_{ri}}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p_i}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial r} \left( 2\mu_i \frac{\partial V_{ri}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_i \left( \frac{\partial V_{yi}}{\partial r} + \frac{\partial V_{ri}}{\partial y} \right) \right) + \frac{2\mu_i}{r} \left( \frac{\partial V_{yi}}{\partial r} - \frac{V_{ri}}{r} \right), \quad (1)$$

$$\rho_i \left( \frac{\partial V_{yi}}{\partial t} + V_{ri} \frac{\partial V_{yi}}{\partial r} + V_{yi} \frac{\partial V_{yi}}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p_i}{\partial y} - \rho_i g + \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_i \left( \frac{\partial V_{yi}}{\partial r} + \frac{\partial V_{ri}}{\partial y} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2\mu_i \frac{\partial V_{yi}}{\partial r} \right) + \frac{\mu_i}{r} \left( \frac{\partial V_{yi}}{\partial r} + \frac{\partial V_{ri}}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial V_{ri}}{\partial r} + \frac{V_{ri}}{r} + \frac{\partial V_{yi}}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

В уравнениях количества движения (1), (2) и неразрывности (3) индекс  $i=1$  соответствует расплаву,  $i=2$  – воздуху;  $V_{ri}$ ,  $V_{yi}$  – компоненты соответственно осевой и радиальной скорости;  $\rho_i$  – плотность;  $p_i$  – давление;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $\mu_i$  – вязкость.

При ньютоновском характере течения расплава его вязкость не зависит от скоростей деформаций расплава и является только функцией его абсолютной температуры  $T$ ; при вязкопластическом течении, имеющем место, например, для расплавов теллуридных стекол, вязкость при фиксированной температуре есть функция интенсивности  $H$  скоростей тензора деформаций:

$$\mu_1 = AH^{n-1}, \quad (4)$$

$$H = \sqrt{\frac{1}{6} \left[ \left( \frac{\partial V_{ri}}{\partial r} - \frac{V_{ri}}{r} \right)^2 + \left( \frac{V_{ri}}{r} - \frac{\partial V_{yi}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_{yi}}{\partial y} - \frac{\partial V_{ri}}{\partial r} \right)^2 \right] + \frac{1}{4} \left( \frac{\partial V_{yi}}{\partial r} + \frac{\partial V_{ri}}{\partial y} \right)^2}, \quad (5)$$

где  $A$  и  $n < 1$  почти постоянны в широких интервалах напряжений и скоростей деформаций, но зависят от температуры;  $\mu_1$  – кажущийся коэффициент вязкости, убывающий с ростом скорости деформации.

Уравнения (1)–(3) должны решаться совместно с уравнением энергии. Однако на настоящем этапе исследований такая постановка задачи вряд ли рациональна в связи с отсутствием экспериментальной информации по профилю температур в каком-либо сечении, проведенном перпендикулярно оси симметрии за “луковицей”. Формирование граничного условия для температуры будет допускать произвол; усложнение задачи, связанное с дополнением (1)–(3) уравнением энергии, представляется в этих обстоятельствах не рациональным. Поэтому учет загустевания

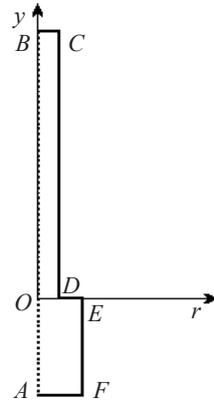


Рис. 2

струи в данной работе проводится параметрически: с удалением от температурной камеры вязкость изменяется по экспоненциальному закону, характерному для капельных (liquid) жидкостей [2]:

$$\mu_1 = \mu_{10} \exp(A(T/T_0 - 1)), \quad (6)$$

где  $\mu_{10}$ ,  $T_0$  – соответственно номинальные вязкость и температура,  $A = \text{const}$ . Предполагается, что температура с удалением от камеры в вертикальном направлении падает по линейному закону

$$T = T_0 + B\Delta y, \quad (7)$$

где  $B$  – варьируемая постоянная.

В начальный момент времени в расчетной области находится воздух; далее на вход  $BC$  под известным давлением подается расплав, который проходит канал  $OBCD$ , вытекает далее в атмосферу (в пространство  $AOEF$ ), после чего начинается процедура вытяжки. Граничными условиями задачи являются условия прилипания на твердых стенках  $CD$ ,  $DE$ ,  $EF$ :  $V_y = V_r = 0$ ; заданное давление на входной  $BC$  и нулевое избыточное давление на выходной  $AF$  границах, а также условия на не известной до решения задачи поверхности раздела расплава и воздуха.

На не известной до решения задачи поверхности раздела сред ставятся кинематическое граничное условие (условие непрерывности скоростей при переходе через границу раздела) и динамическое граничное условие, состоящее в равенстве напряжений, действующих на элементарную площадку границы раздела сред. В численной реализации определение мгновенного положения границ раздела сред осуществляется методом объемного слежения (методом VOF), согласно которому интегрирование уравнений движения сред осуществляется с учетом перемещений частиц пассивных маркеров [3]. Пассивные маркеры движутся со скоростью жидкости и указывают вид жидкости, находящейся в рассматриваемый момент времени в каждом конечном объеме расчетной области.

По достижении струей расплава выходной границы  $AF$ , граничные условия на  $DE$  и  $AF$  модифицируются. На части границы  $DE$ , примыкающей к  $E$ , ставится условие

$$p = 0, \quad i = 2, \quad (8)$$

допускающее вход-выход воздуха через эту границу. Другая часть  $DE$ , примыкающая к  $D$ , остается твердой стенкой и моделирует толщину стекла оболочки канала фильеры. Необходимость изменения граничного условия на  $DE$  связана с корректностью удовлетворения уравнению неразрывности для воздуха в процессе вытяжки.

На выходной границе  $AF$  задается значение осевой скорости (другие компоненты скорости нулевые), обеспечивающее требуемый радиус волокна. Промежуточные результаты расчета контролируются, поскольку резкое изменение осевой скорости на  $AF$  приводит к разрыву сплошности струи, соответствующее, очевидно, обрыву волокна и математически – к потере устойчивости счета.

### 3. Определение характеристик устойчивости расплава при вытягивании волокна

Расчетные исследования проводились для вытяжки волокна из фильеры с радиусом цилиндрического канала  $BC = 0,00225$  м. Размеры области  $AOEF$  принимались следующими:  $AO = 0,1$  м,  $EF = 0,00375$  м. Радиус скругления стенки канала при-

нимался равным 0,0005 м. Считалось, что температурная камера заканчивается ниже  $OE$  на 0,02 м. Выбор величины  $AO$  осуществлен с учетом экспериментальных наблюдений, согласно которым визуально диаметр струи после выхода из температурной камеры не меняется, то есть “луковица” полностью формируется в камере.

В функции вязкости от температуры (4) номинальные значения приняты следующими:  $\mu_{10} = 13000 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $T_0 = 700 \text{ К}$ ,  $A = -52 \text{ град}^{-1}$ . Величина температуры на выходной границе расчетной области варьировалась.

Расчеты проводились на различных сетках. Оптимальным с точки зрения точности и времени счета является сетка с равномерным разбиением в направлении  $r$  и сгущением к  $OE$ , то есть к выходу из канала фильеры. Максимальное число конечных объемов при исследовании точности численного решения задачи достигало 110 000. Ниже представлен ряд результатов решения рассматриваемой задачи на сетке, состоящей примерно из 65000 конечных объемов.

На рис. 3 приведена типичная геометрия струи расплава после окончания математической процедуры вытяжки. Давление на входе в цилиндрический канал задано равным  $\Delta p_{\text{вх}} = 253000 \text{ Па}$ , температура в камере – 700 К, температура на выходной границе  $AF$  – 550 К, скорость вытяжки – 0,012 м/с (для этой скорости радиус волокна равен 0,000102 м). Сразу за выходом из канала формируется “луковица”, ниже которой образуется струя тяжелой жидкости с радиусом, равным радиусу вытягиваемого волокна.

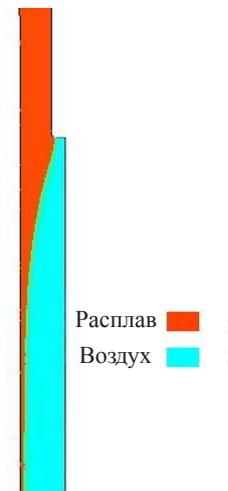


Рис. 3

Распределение давлений и вертикальной скорости вдоль оси струи и канала показано соответственно на рис. 4, 5. Характерно, что отрицательное избыточное давление в месте формирования волокна практически не передается в район выхода расплава из канала фильеры. На выходе из канала избыточное давление близко к 0, то есть при указанном радиусе волокна геометрические и динамические характеристики струи не оказывают заметного влияния на объемный секундный расход расплава.

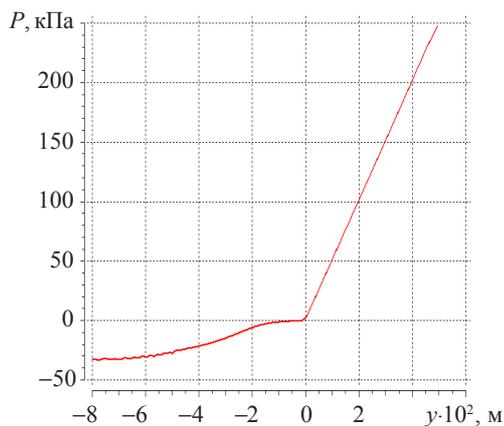


Рис. 4

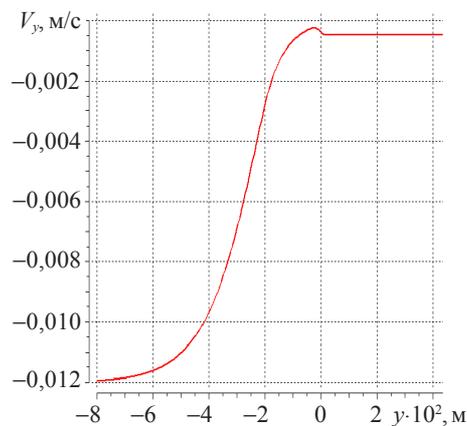


Рис. 5

Этот расчетный результат полностью согласуется с результатами опытов: при изменении угловой скорости вращения барабана, то есть изменении давления в месте формирования волокна, меняется только радиус волокна; изменения же расхода расплава экспериментально не обнаруживается.

Определение характеристик устойчивости течения расплава при вытягивании волокна из фильеры проводилось обработкой временных зависимостей массового секундного расхода расплава на выходной границе  $AF$ , полученных при фиксированной скорости вытяжки на заключительном ее этапе. Характерная зависимость массового расхода на выходной границе от времени показана на рис. 6.

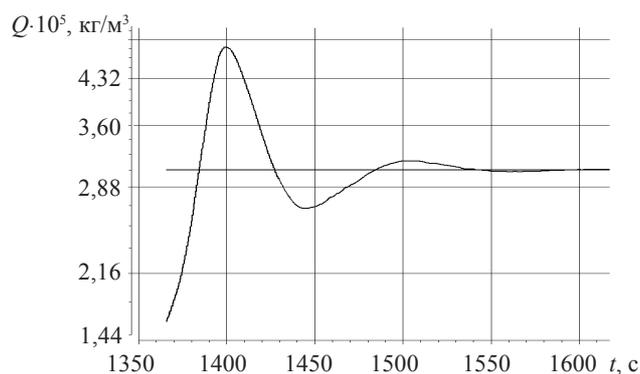


Рис. 6

В табл. 1 представлены декременты  $D$  и периоды колебаний  $\tau$  массового расхода в струе для различных значений температур и скоростей вытяжки, полученные обработкой результатов математического моделирования.

Таблица 1

$T_{\text{вых}}, \text{K}$	$V_{\text{выт}}, \text{м/с}$	$\tau, \text{с}$	$D = Q_{i+1}/Q_i$
550	0,003	115	0,2...0,25
	0,006	100...105	0,2...0,25
	0,012	90	0,25
	0,024	80...85	0,3...0,35
	0,048	80	0,55...0,6
	0,060	75	0,55...0,65
650	0,003	160	0,4
	0,006	140...145	0,45
	0,012	125...130	0,5
	0,024	115	0,7
	0,048	100...105	0,7
	0,060	100	0,75...0,8
700	0,003	290...300	0,8
	0,006	270...280	0,9...0,95
	0,012	240...260	0,95...1,05
	0,024	230...250	0,95...1,05
	0,048	210...240	0,90...1,20
	0,060	200...260	0,80...1,20

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. При фиксированной скорости вытяжки и используемом в расчетах законе изменения температуры вдоль оси струи периоды собственных колебаний существенно зависят от величины температуры на выходе струи из расчетной области. С уменьшением температуры периоды падают.

2. При заданной температуре струи на выходе из расчетной области периоды собственных колебаний расплава падают с увеличением скорости вытяжки. Зависимость периодов собственных колебаний от скорости вытяжки носит нелинейный характер.

3. Декременты собственных колебаний системы зависят от температуры струи на выходной границе расчетной области. С уменьшением температуры характеристики устойчивости течения расплава при вытяжке повышаются. При одинаковой температуре во всех точках расчетной области и скоростях вытяжки  $V_{\text{выт}} > 0,006$  м/с получить установившееся течение расплава не удается.

4. С уменьшением скорости вытяжки при заданной температуре на выходной границе декременты колебаний падают. При скоростях вытяжки  $V_{\text{выт}} > 0,012$  м/с, реализуемых в технологических процессах вытягивания волокон, течение расплава обладает низкими характеристиками устойчивости.

5. Устойчивость течения расплава при вытяжке может быть повышена принудительным охлаждением струи за “луковицей”.

#### **4. Численное исследование влияния пульсаций температуры в камере на мгновенные значения диаметра вытягиваемого волокна**

Технология численного исследования влияния колебаний температуры в камере на стабильность диаметра волокна состояла в следующем. После завершения процесса вытяжки (математически – после получения стационарного решения задачи), динамическая вязкость расплава  $\mu_{10}$  в температурной камере задавалась в виде:

$$\mu_{10} = \mu_{1c} + \mu_A \sin \omega t, \quad (9)$$

где  $\mu_{1c}$  – вязкость расплава, находящегося в температурной камере, соответствующая стационарному течению расплава;  $\mu_A$ ,  $\omega$  – амплитуда и частота пульсаций вязкости в температурной камере. Закон изменения вязкости после выхода расплава из камеры принимался в виде (6), (7). Таким образом, изучение влияния пульсаций температуры на величину диаметра вытягиваемого волокна проводилось в предположении однородного поля температур в камере в каждый момент времени.

Граничные условия полностью совпадали с граничными условиями, описанными для этапа вытяжки в п. 3. Характеристики расплава при стационарном режиме течения принимались равными номинальным (см. п. 3). Тогда колебаниям температуры в камере с амплитудой  $T_A = 1$  К соответствуют колебания вязкости с амплитудой  $\mu_A = 1000$  Па·с.

На рис. 7 сопоставлены зависимости массового расхода расплава на входной 1 и выходной 2 границах расчетной области от времени при колебаниях температуры в камере с одной частотой  $\omega = 0,419$  с<sup>-1</sup>, но разными амплитудами  $T_A$ . Скорость вытяжки постоянна  $V_{\text{выт}} = 0,012$  м/с, температура на выходной границе расчетной области для стационарного режима течения 650 К.

При указанной частоте колебаний, находящейся, по-видимому, в районе верхней границы частотного диапазона температурных колебаний, увеличение амплитудных

возмущений температуры с  $T_A = 0,5$  К до  $T_A = 1,5$  К ведет к значительному увеличению колебаний массового расхода  $Q$  через входную границу  $BC$  (зависимость 1 на рис. 7). При  $T_A = 0,5$  К относительные амплитудные колебания расхода составляют 3,7%; при амплитуде колебаний  $T_A = 1,5$  К относительные амплитуды колебаний расхода составляют уже 11,4%. В то же время амплитудные изменения расхода на выходной границе  $AF$  (зависимость 2 на рис. 7) много меньше. В величинах относительных флуктуаций диаметра вытягиваемого волокна эти изменения составляют при  $T_A = 0,5$  К всего 0,23% и при  $T_A = 1,5$  К – 0,57%. Очевидно, что важное стабилизирующее влияние на величину диаметра вытягиваемого волокна оказывает “луковица”, пульсационное изменение объема которой во многом компенсирует изменение расхода на входе в цилиндрический канал.

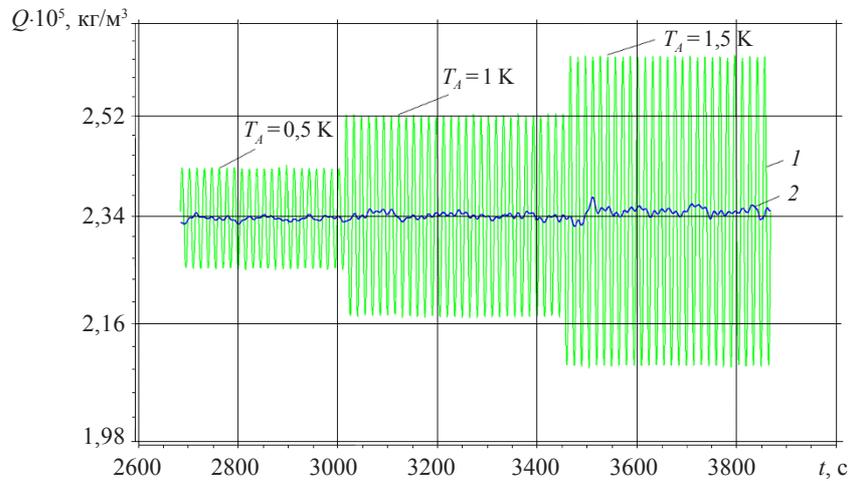


Рис. 7

Флуктуации диаметра вытягиваемого волокна  $\Delta d$  растут с уменьшением частот внешних температурных возмущений. В табл. 2 представлены результаты расчетов среднего диаметра волокна  $d_{\text{сред}}$  и относительных отклонений диаметра от среднего значения при амплитуде  $T_A = 1$  К и различных частотах возмущений для скорости вытяжки  $V_{\text{выт}} = 0,012$  м/с и двух температурных режимов  $T_{\text{выт}}$  стационарной струи на выходе расчетной области.

Таблица 2

$\omega$ , с <sup>-1</sup> ( $\tau = 2\pi/\omega$ , с)	$T_{\text{выт}}$ , К	$d_{\text{сред}}$ , м	$\Delta d/d_{\text{сред}} \cdot 100\%$
0,419 (15)	650	0,000321	0,19
	550	0,000322	0,19
0,209 (30)	650	0,000322	1,00
	550	0,000322	0,57
0,105 (60)	650	0,000321	1,84
	550	0,000322	0,98

Охлаждение струи за “луковицей” снижает флуктуации диаметра волокна. Это снижение становится более заметным с уменьшением частот внешних возмущений. На рис. 8 сопоставлены результаты расчетов в виде временных зависимостей массового расхода  $Q$  на входной 1 и выходной 2 границах расчетной области для раз-

личных температур стационарного режима на выходе струи (*a* – при  $T=650$  К, *б* – при  $T=550$  К). Расчетная частота  $\omega=0,105$  с<sup>-1</sup> находится, вероятно, в районе нижней границы частотного диапазона температурных возмущений.

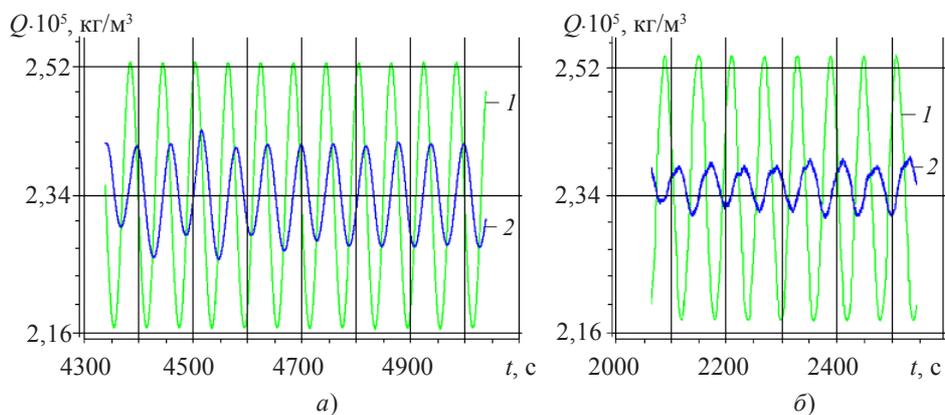


Рис. 8

## 5. Выводы

1. Прямым моделированием с использованием пакета ANSYS CFX определены собственные частоты и декременты колебаний расхода струи расплава, формирующейся ниже фильеры. Исследовано влияние внешних температурных возмущений на отклонение диаметра волокна от своего номинального значения.

2. Исследовано влияние температуры струи на характеристики устойчивости течения расплава и флуктуации диаметра волокна при колебаниях температуры в камере. С принудительным охлаждением струи расплава течение струи и диаметр вытягиваемого волокна оказываются более стабильными по отношению к внешним возмущениям.

3. Полученные результаты свидетельствуют о важной роли распределения температур в струе. В связи с этим дальнейшие расчетные исследования стабильности диаметра волокна следует проводить с включением в математическую модель уравнения энергии и предварительным проведением экспериментов для формирования тепловых граничных условий.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 05-08-137а).

### Литература

1. Чурбанов, М.Ф. Математическое моделирование движения сплошной среды при вытягивании световода через фильеру / М.Ф. Чурбанов [и др.] // Вестник ННГУ. Серия Механика / Н.Новгород: Изд-во ННГУ. – 2004. – Вып. 1(6). – С. 104–115.
2. Гиршфледер, Д. Молекулярная теория газов и жидкостей / Д. Гиршфледер, Р. Кертис, Р. Берд. – М.: ИЛ, 1961.
3. Welch, J.E. The MAC method / J.E. Welch [et al]. – Los Alamos Scientific Lab. Rept. № LA-3425. – Los Alamos, 1966.
5. Harlow, F.H. Numerical study of large amplitude free surface motion / F.H. Harlow, J.E. Welch // Phys. Fluids. – 1966. – 9. – P. 842–?.
5. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1971.
6. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1, 2 / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991.

[16.06.2006]

**NUMERICALLY INVESTIGATING THE FLOW STABILITY OF MELTED GLASS  
DRAWN OUT OF A SPINNERET**

**M.F. Churbanov, G.E. Snopatin, R.M. Shaposhnikov, V.V. Shabarov**

The results of numerically investigating the stability of the diameter of a fiber drawn out of a spinneret are presented. The ANSYS CFX software complex is used in the calculations. The natural frequencies and decrements of the melt flow filament discharge under the level of the spinneret are determined. The effect of external thermal perturbations on the variation of the fiber diameter around its nominal value is analysed. Cooling the melt flow filament is shown to stabilize the flow filament and the diameter of the fiber drawn.